

我国矿物材料研究进展(2000-2010)

廖立兵¹, 汪 灵², 董发勤³, 彭同江³, 白志民¹

1. 中国地质大学(北京) 材料科学与工程学院, 北京 100083; 2. 成都理工大学 材料与化学化工学院, 成都 610059; 3. 西南科技大学 矿物材料与应用研究所, 四川 绵阳 621010

摘要:本文介绍了我国关于矿物材料定义、分类及矿物材料学内涵的讨论及其发展现状,系统综述了近十年我国功能矿物材料(包括环境、光功能、电功能、声功能、生物医用等矿物材料)、结构矿物材料(包括矿物聚合材料、矿物摩擦材料、矿物复合材料)和纳米矿物材料的研究进展。资料表明:近十年来环境矿物材料依然是我国矿物材料研究最活跃的领域,其中固体废弃物利用研究得到明显加强,电、光、声学功能矿物材料研究相对不足。结构矿物材料方面,矿物聚合材料研究的兴起引人注目。纳米矿物材料则仍以聚合物/层状结构硅酸盐纳米复合材料研究为主。我国矿物材料研究存在的主要问题是研究方向分散、创新性不强、成果推广应用薄弱。笔者指出,今后我国矿物材料研究应更紧密地结合国家经济社会发展的需要和我国矿物资源的特点,大胆创新研究方法和思路,在进一步加强基础研究的同时,更加重视成果的应用与推广。

关键词:矿物材料;功能材料;结构材料;纳米材料;研究进展

中图分类号:P578 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-2802(2012)04-0323-17

Advances of Mineral Materials Studies in China during 2000-2010

LIAO Li-bing¹, WANG Ling², DONG Fa-qin³, PENG Tong-jiang³, BAI Zhi-min¹

1. School of Materials Science and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083 China;
2. College of Materials, Chemistry and Chemical Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059 China; 3. Institute of Mineral Materials and Application, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010 China

Abstract: This paper introduces definitions of mineral materials and mineral material science, and classifications of mineral materials, reviews progresses in the study fields of functional mineral materials (including environmental mineral material, optical mineral material, electrical mineral material, acoustic mineral material, mineral biomaterial and mineral medicine), structural mineral materials (including geopolymer, mineral friction material, mineral composite) and mineral nano-materials in China in the past decade. The paper concludes that in the fields of functional mineral material, environmental mineral materials, especially the recycling of industrial solid wastes, have kept as the activist research subjects in the last 10 years, and that the geopolymers related researches have attracted more and more attention in structural mineral material researches, and that the preparation and the characterization of polymer/layered silicate mineral nano-composites are still the focuses of the research of nano-mineral material. Based on the collected literature studies, the authors point out that the main problems of current mineral material researches include spreading of research orientations, lacking of new ideas and commercialization of research finds. It is suggested that Chinese mineral material researchers should pay more attention to fundamental researches, create more new ideas and technologies, which are appropriate to the characters of Chinese mineral resources, to meet the demands of the social and economic developments of China.

Key words: advance; mineral material; functional material; structural material; nano-material

收稿日期:2011-12-05 收到,2012-02-21 改回

第一作者简介:廖立兵(1963-),男,博士,教授,专业方向:矿物岩石材料. E-mail: lbliao@cugb.edu.cn.

1 矿物材料定义、分类及矿物材料学

20世纪80年代初,我国开始出现“岩石矿物材料”、“矿物岩石材料”、“矿物材料”、“矿物功能材料”、“纳米矿物材料”、“生物矿物材料”、“特种矿物材料”等术语^[1~17],并逐步形成了“矿物材料学”这一新兴边缘学科。然而自“岩石矿物材料”、“矿物岩石材料”、“矿物材料”等术语出现和使用以来,不同学者给出了不同的定义,并在争论中得到发展。

1.1 “矿物材料”的定义及内涵

自20世纪80年代初提出“矿物材料”的概念至今,已提出过十余种“矿物材料”或“岩石矿物材料”定义^[2~4,6,7,10~17]。目前关于“矿物材料”定义和内涵已达成的共识如下:

- (1)“岩石矿物材料”、“矿物岩石材料”、“矿物材料”等术语均统一为“矿物材料”;
- (2)“矿物材料”是指可以直接利用其物理、化学性质的矿物岩石或经一定加工改造后制备的材料;
- (3)“矿物材料”以矿物为主要组分或主要原料;
- (4)“矿物材料”有广义、狭义之分。

存在的分歧包括:

(1)对“一定加工改造”的理解和定义不同。“一定加工改造”的定义主要包括“选矿、加工处理以及人工合成或晶体生长”^[17]、“适当加工处理”^[4]、“简单加工处理”^[6]、“可控加工改造或复合”^[7]、“非提出性加工”^[4]、“不以提炼金属和化工原料为目的制备与合成”^[16]等。这是目前关于“矿物材料”定义的最大分歧,也是对一些材料归属不清的最大原因;

(2)对矿物原料和矿物材料的界定和归属认识不一致。多数学者认为矿物材料应包括可以直接利用其物理、化学性质的矿物、岩石,少数认为矿物材料是经过物理、化学方法制备的矿物岩石^[10];

(3)多数学者同意“矿物材料”以矿物为主要组分,但对“矿物”的定义不一致。比如有学者认为“矿物”应为天然形成,不包括人工合成者^[4,12];

(4)“矿物材料”与“无机非金属材料”关系不清。一些学者认为“矿物材料”就是“无机非金属材料”^[13,14],而一些学者认为“矿物材料”主要是无机非金属材料,但与金属材料、复合材料等有交叉。

2006年,汪灵^[3]提出一种新的矿物材料定义(包括广义和狭义矿物材料):矿物材料是以矿物为主要或重要成分的材料,强调矿物在矿物材料中的中心地位,广义矿物材料与狭义矿物材料采用同一个定义,但都是以矿物为本质特征。该定义中的矿物包括天然矿物、人工矿物以及在组成、结构、性能

和使用效能与矿物存在直接继承关系的衍生物(如柱撑粘土、煨烧高岭土等)。

2010年,廖立兵^[18]提出矿物材料定义:狭义矿物材料是指可直接利用其物理、化学性能的天然矿物岩石或以天然矿物岩石为主要原料加工、制备而成,而且组成、结构、性能和使用效能与天然矿物岩石原料存在直接继承关系的材料。广义矿物材料是指以矿物岩石为主要原料加工、制备的材料。

1.2 矿物材料的分类

矿物材料是一种特殊类型的材料,它既有其他材料的共性,又有自己的特性,这给矿物材料的分类带来困难。已提出的分类方案如下^[4,12~16]:①按材料状态分类。分为单晶、多晶、非晶、复合、分散材料;②按用途和行业分类。分为玻璃、陶瓷、耐火材料等;③按材料工艺分类。分为机械加工材料、化学处理材料、热处理材料、水热处理材料、熔融处理材料、胶结处理材料、烧结处理材料等,或分为熔浆型、烧结型和胶凝型材料。以上分类方案一个共同的问题是都未考虑到与其他材料类型的关系,与通用的材料分类方法不能衔接。廖立兵^[18]认为,作为一种特殊类型的材料,矿物材料可以在通用的材料分类方法基础上,考虑矿物材料的成分、结构、性能特点和实际应用情况进行综合分类。

1.3 矿物材料学的定义及内涵

材料科学是研究材料的组织结构、性质、生产工艺、使用效能及其相互关系的科学^[19,20]。材料研究的“四要素”:组织结构、性质、合成/制备和使用效能,或“五要素”:组织结构、性质、合成/制备、使用效能和理论及工艺设计,已被材料界广泛接受。汪灵^[2]认为,矿物材料学兼具材料科学与矿物科学属性,矿物原料的性质和特点为矿物材料研究与应用的基本前提或重要基础,并据此提出了矿物材料学的定义和内涵:矿物材料学是研究矿物材料的组成与结构、加工与制备、性能和使用效能以及矿物原料性质与特点等五要素及其相互关系和规律的一门学科。这五要素是具有内部互相联系和作用的有机整体,研究这五要素并了解它们之间的相互关系和规律构成了矿物材料学的内涵。廖立兵^[18]认为,对矿物材料的研究应强调“六要素”,即矿物原料、组织结构、性质、合成/制备、使用效能和理论及工艺设计,而且要体现“矿物原料”的中心地位,即“矿物原料”对其他五要素有重要影响,“理论及工艺设计”要素同时与其他五要素有关系。

2 矿物功能材料研究进展

2.1 环境矿物材料

环境矿物材料是指与生态环境具有良好协调性或直接具有防治污染和修复环境功能的一类矿物材料。在环境治理中,环境矿物材料主要应用于水污染治理、大气污染治理、固体废物利用、土壤污染修复、放射性污染治理等。近年来,随着人们对环境保护的重视和对绿色环境的渴望,环境矿物材料的研究取得了较大进展。

(1)水污染治理材料:高岭土、蒙脱石和伊利石等粘土矿物具有比表面积大、孔隙率高、极性高等特性,是去水中 Hg^{2+} 、 Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Cr^{3+} 、 As^{3+} 、 Ni^{2+} 等重金属的理想低成本吸附剂。詹旭等^[21]用高岭土去除含锰废水中的锰离子,去除率超过 90%。杨友强等^[22]以蒙脱石为主要原料,制备出一种自来水处理用的新型复合絮凝剂。祝凌燕等^[23]研究了沸石、方解石、钾长石、钙基和钠基膨润土对水体中 Pb^{2+} 的吸附固定效果。

(2)大气污染治理材料:沸石、凹凸棒石、海泡石、砭石、蒙脱石、多孔 SiO_2 、活性 MgO 、活性 Al_2O_3 、白云石、硅藻土等具有吸附性、过滤性、絮凝性、离子交换性及中和性等性能,对其改性、改型或复合处理,可用于处理工业与生活中排放的废气。邢泳^[24]进行了海泡石净化油烟及活化废酸的研究。任建莉等^[25]用天然沸石、膨润土和蛭石及其化学改性物作为吸附剂在小型固定床试验台上开展了脱除气态汞的研究。

(3)固体废物利用:固体废物主要是指工业生产和城市居民日常生活排放的废弃物,包括各类炉渣、煤矸石、粉煤灰、赤泥、尾矿以及生活垃圾等。很多学者^[26~29]分别利用上述废弃物制备出土壤固化剂、复合型防渗层和新型陶粒产品等。

(4)土壤污染治理材料:一些层状、架状结构矿物和铁、锰、铝氧化物及氢氧化物具有孔道特性和化学吸附性,尤其是 Fe、Mn 变价元素,其氧化物及氢氧化物往往表现出一定的氧化-还原性,因此成为土壤环境中吸附重金属污染物的有效物质。杨秀红等^[30]研究了凹凸棒石对铜污染土壤的修复效果。刘秀珍等^[31]、律琳琳等^[32]、廖立兵等^[33]分别用膨润土、沸石、硅藻土、海泡石等对镉污染土壤进行了修复研究。谢正苗等^[34]研究了膨润土对受 Pb 和 Zn 复合污染的绍兴某矿区土壤的修复效果。林云青等^[35]在铜、锌、镉污染红壤中加入凹凸棒石和钠基蒙脱石,结果表明添加凹凸棒石和钠基蒙脱石能显著增加黑麦草两茬的地上部分生物量(鲜重)。

(5)放射性核废物处理材料:核试验污染环境的放射性核素主要为⁸⁹Sr、⁹⁰Sr、¹³⁷Cs、¹³¹I、¹⁴C、²³⁹Pu。

以沸石、凹凸棒石等矿物为吸附介质,能够很好地防止核素在处置场中的迁移。王金明等^[36]研究了不同环境条件下(浓度、温度、pH)凹凸棒石对模拟核素 Cs^+ 的吸附性能及其平衡吸附时间。易发成等^[37]用热活化高岭土、新疆沸石、改性凹凸棒粘土为基质材料制成的富铝碱矿渣粘土矿物胶凝材料吸附放射性核素体 Sr^{2+} 、 Cs^+ 。

燃煤固硫材料也属环境材料,近年有实验证实^[38],将蛭石的吸附性和膨胀性与碳酸钙等配合使用,可提高燃煤固硫效果。

20 世纪八、九十年代电气石环境矿物材料受到广泛重视,而近几年电气石的性能机理研究得到加强,例如有学者计算了电气石的化学键^[39],研究电气石的电磁屏蔽性、磁学性能^[40,41],以及电气石的固有电偶极矩、热释电性^[42,43]和表面性能^[44],为电气石的进一步开发利用奠定了良好基础。

2.2 光功能矿物材料

光功能材料是指在外场如力、声、热、电、磁和光等作用下,其光学性质发生改变的材料。近年来光功能矿物材料的研究在光致变色、光催化、偏振和发光材料等方面取得重要进展。

(1)光致变色矿物材料:光致变色是某些化合物在一定波长和强度的光作用下分子结构发生变化,使其对光的吸收峰值即颜色发生相应改变,且改变一般是可逆的。光致变色在光信息存储与显示、光过滤与防护、生物识别与改性等材料和光电子器件等领域有广阔的应用前景。廖尚宜等^[45]发现紫色方钠石是很好的光致变色材料,其变色效应是色心所引起,对寻找天然光致变色矿物材料有指导意义。

(2)光催化功能矿物材料:光催化技术是反应体系在催化剂的辅助下能将吸收的光能直接转化为化学能或生物化学能,使原先难以实现的反应在某种光源条件下顺利进行。光催化功能矿物材料能够应用于降解废水中有机污染物、去除有害无机气体、杀菌和净化空气等领域。以 TiO_2 改性为重点的新型光催化材料,具有催化效率高、低能隙等突出优点,有着广阔的应用前景。鲁安怀^[46]对天然含钒金红石光催化性能进行了研究。温淑瑶等^[47]和马敏立^[48]分别证明阳光和紫外线下 TiO_2 /膨润土对十二烷基苯磺酸钠(SDBS)有明显降解效果。

(3)偏振功能矿物材料:石英、水晶、冰洲石等矿物具有偏振性能。吴闻迪等^[49]利用石英晶体和偏振棱镜的组合,设计了一种用于内腔拉曼黄光激光器 590 nm 谱线提取的石英晶体旋光滤波器。严晖等^[50]利用石英晶体透光特性,采用监控法镀制高精

度光学薄膜。戚巽骏等^[51]利用水晶制作了二维水晶光学低通滤波器。贾朋等^[52]为了降低生产成本,采用力求减少使用冰洲石的改进工艺,制备了一种新型的90°分束偏光棱镜。吴福全^[53]制备了冰洲石-玻璃组合e光超高透偏光棱镜。

(4)发光功能矿物材料:发光材料是能够将吸收的能量转化为辐射的功能材料。矿物发光材料具有生产成本低、工艺简单等优点,有很好的应用前景。杜鹏等^[54]制备了萤石基矿物发光材料。李殿超等^[55]以方解石为原料制备出矿物发光材料CaS:Mn²⁺。

2.3 电学功能矿物材料

电学功能矿物材料主要包括导电、绝缘和热电功能矿物材料三类。

(1)导电功能矿物材料:利用石墨优良的导电性和高温性能,张金章等^[56]合成了石墨-氧化锡-活性炭复合锂离子电池负极材料。洪泉等^[57]考察了纯化处理前后天然微晶石墨组成、结构及电化学性能的变化,探讨纯化处理后的天然微晶石墨用作锂离子电池负极材料的可行性。另外,一些非金属矿物经表面处理也有较好的导电性能,例如杨丽梅^[58]用化学镀的方法制备了导电云母粉。

(2)绝缘功能矿物材料:白云母类矿物具有优良的电绝缘强度、耐电晕、耐热和力学性能,被广泛用作电子、电工绝缘材料。张小伟等^[59]研究了粒度组成对云母纸抗张强度和击穿强度的影响,获得了较好的粒级配比参数。Wang等^[60]和罗柯等^[61]发现微晶白云母具有优良的绝缘性能,对提高绝缘灌注胶的电阻率和抗压强度有明显作用,为研制新型微晶白云母绝缘灌注胶提供了科学依据。

(3)热电功能矿物材料:电气石是发现最早的具有热释电效应的晶体,能产生负离子和远红外辐射,在环保和体保健等方面具有重要的应用价值。董颖^[62]通过测试不同成分、不同粒径电气石粉体的Zeta电位,发现电气石族矿物电位高低顺序为:锂电气石>镁电气石>铁电气石,且电气石粒径越小,Zeta电位越大。张丹等^[42]和Zhao等^[43]研究了铁-镁电气石结构中Fe价态变化对其热释电性能的影响,认为热处理提高铁-镁电气石热释电系数的原因主要是Fe²⁺的氧化,其次是Fe³⁺占位的变化。

2.4 生物、医用矿物材料

生物医用矿物材料包括生物医学矿物材料和矿物药。前者是指用于和生物系统接合,以诊断、治疗或替换生物机体中的组织、器官或增进其功能的矿物材料,又称生物矿物材料;研究以骨替代材料为重

点,主要涉及具有良好生物活性、生物相容性、可降解性、抗磨损性和抗压性的磷灰石和硅灰石,例如用磷灰石和硅灰石制备了聚乳酸/硅灰石复合材料、磷灰石-硅灰石/磷酸三钙复合材料、磷灰石-硅灰石生物活性玻璃陶瓷等新型生物医学复合材料,这些材料具有较好的力学性能、生物活性、生物相容性和降解性,是良好的骨替代材料^[63~65]。后者是以天然矿物为原料或原料之一制备的各种药材。虽然生物医学矿物材料研究有所进展,但矿物药研究进展相对更大,不仅药用矿物种类增加、应用范围扩大,而且矿物药的制备引入了纳米新技术。例如,纳米雌黄用于抑制白血病K562细胞生长^[66,67];沸石制备复合止血剂,止血效果好,放热显著降低,无热损伤,有较强的抗菌活性,血凝块强度大^[68];滑石粉用于治疗胸腔积液,能够刺激组织、产生纤维化和肉芽肿,引起胸膜广泛粘连^[69];纳米雄黄用于抗肿瘤治疗,可抑制人宫颈癌细胞HeLa生长、繁殖和诱导凋亡^[70];坡缕石用于制备磁性靶向药物载体材料^[71]。

2.5 声学功能矿物材料

一些非金属矿物,如温石棉、纤维海泡石、凹凸棒石等具有纤维和多孔结构,膨胀蛭石、膨胀珍珠岩、硅藻土等具有多孔结构和质轻等特性,具有良好的吸声功能,以及隔热、难燃、耐腐蚀、防蛀和耐候性好等特点,常用来制备高性能吸声材料。近十年来,我国声学功能矿物材料的研究与应用主要集中于吸音降噪方面。

(1)高性能水泥基吸声材料:仲新华等^[72]、余海燕等^[73]分别研究了水泥基膨胀珍珠岩吸声材料的制备、结构与性能。

(2)水镁石纤维增强的水泥基吸声材料:刘庆丰等^[74]利用分散性良好的水镁石纤维做增强剂,以硫铝酸盐水泥和膨胀珍珠岩为主要原料,辅以引气剂、减水剂等添加剂,制备了具有致密、均匀、细微的相互贯通孔结构的多孔吸声材料。

(3)无机颗粒吸声材料:金雪莉等^[75]以陶粒、膨胀珍珠岩为骨料制备了适用于隧道环境的无机颗粒吸声材料。张继香等^[76]利用煤矸石为主要原料,加入发泡剂和其他外加剂,采用凝胶注模成型工艺制备了高频吸声性能优越的多孔吸声材料。

2.6 其他功能矿物材料

其他功能矿物材料研究方向分散,包括矿物多孔材料、矿物催化材料、矿物涂料、矿物保水材料、矿物颜料、矿物涂布材料等。笔者认为,矿物功能材料研究还应包括宝石加工和改善,因这个方面已发展成一个专门领域,在此不作介绍。

3 矿物结构材料研究进展

3.1 矿物聚合材料

近十年来,有关矿物聚合材料的研究较为活跃,热点集中在矿物原料类型与性质以及制备工艺对材料结构与性能的影响,以及聚合反应机理。

对于矿物原料,主要集中在硅酸盐固体废弃物上,包括粉煤灰、高炉矿渣、脱硫灰渣、非水溶性钾矿提钾残渣、金属尾矿等,尤以针对粉煤灰和高炉矿渣的研究最多。研究发现,粉煤灰和高炉矿渣富含玻璃相,化学活性较高,作为矿物聚合材料原料具有显著优势。以粉煤灰或高炉矿渣为主要原料制备的矿物聚合材料,通常具有较高的抗压强度和良好的耐酸碱性^[77],并且对 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 、 Ni^{2+} 和 Cr^{3+} 有很好的固化效果^[78]。研究认为,粉煤灰较高的 CaO 含量和超细颗粒的存在对制品强度的提高具有积极意义;粉煤灰中玻璃体与絮凝状基体相的紧密结合是制品具有较高强度的结构基础;高炉渣中的玻璃相在强碱的作用下发生溶解,首先形成 Si 、 Al 低聚体,最终形成结晶体,从而赋予聚合材料较高的强度和对重金属强的固化能力。

有关制备工艺对材料结构与性能的影响,在以下三个方面取得了明显进展:①激发剂类型和浓度。研究表明,以单一碱为激发剂时,矿物聚合材料的强度关系为: $\text{KOH} > \text{Ca}(\text{OH})_2 > \text{NaOH}$;当激发剂为组合碱时, $\text{KOH}/\text{Ca}(\text{OH})_2 = \text{NaOH}/\text{Ca}(\text{OH})_2 = 2:3$ 时,制品的抗折强度最高^[79]。与 Na^+ 相比, K^+ 具有更强的进入基体相平衡电荷环境的倾向,且使溶解的聚合物硅酸盐具有较高的离子化速率和溶解速率,因而具有提高制品强度的显著作用^[80]。 Ca^{2+} 的加入可以显著缩短材料的固化时间; CaO 的含量愈高,所形成的聚合物强度亦愈大^[81]。②碱和水玻璃的配合类型。研究发现, $\text{NaOH}/$ 钠水玻璃或 $\text{KOH}/$ 钾水玻璃先混合,然后与固相混合,形成的材料强度最大^[82];以 $\text{KOH}/$ 钾水玻璃制备的聚合物基体相的抗压强度最大,由 $\text{NaOH}/$ 钠水玻璃制成的基体相的强度较低,但对 Pb 的固封最为有效;而以 $\text{NaOH}/$ 钾水玻璃制成的基体相的强度最低^[81]。③ pH 值。实验发现,初始碱金属硅酸盐前驱物的 pH 值是控制矿物聚合材料抗压强度的最主要因素^[81]。配合料的粘度随碱溶液 pH 的值增大而减小;碱溶液的 pH 值愈高,生成的聚合物强度愈大。说明在高 pH 值条件下,液相组分以较小的低聚物链和单体硅酸盐为主,容易与可溶的 Al 反应而生成聚合粘结相;此外,随 pH 值增高,铝硅酸盐初始反应物

中可溶的 Al 、 Ca 含量显著增大^[80,81]。④固化温度和时间。实验发现,温度越高,聚合物强度越高;材料强度随固化时间的延长而发展,其规律符合抛物线关系。铝硅酸盐聚合反应一般在室温至约 60°C 下即可进行,24 h 脱膜^[83]。

在聚合机理研究方面,研究了 $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ 或 $\text{Al}-\text{O}-\text{Si}$ 的键合特点以及 Si 和 Al 配位特征^[84],认为具有火山灰活性的原料在碱性条件下,首先发生溶解,其中 $\text{Si}-\text{O}$ 、 $\text{Al}-\text{O}$ 键发生断裂,断裂之后的 Si 、 Al 组分在碱金属离子 Na^+ 和 OH^- 的作用下,形成 $-\text{Si}-\text{O}-\text{Na}$ 、 $-\text{Si}-\text{O}-\text{Ca}-\text{OH}$ 、 $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ 、 $\text{Al}(\text{OH})_5^{2-}$ 、 $\text{Al}(\text{OH})_6^{3-}$ 等组分或低聚合体,随着原料溶解的进行和溶液中硅铝组分及浓度的变化,这些组分或低聚合体之间发生聚合作用,脱水形成非晶质物相;矿物聚合材料基体相中的 Si 以 $\text{Q}^4(2\text{Al})$ 为主要存在方式, Al 以四次配位为主。

矿物聚合材料的工程化应用也迈出了可喜的步伐。国内某公司建设了 30 万~50 万 t/a 矿物聚合材料生产线,产品用于重载道路(10~50 t 车通过频率为 3.5 辆/min)、工业建筑(厂房、设备基础)和储水池顶盖(5000 m^2)等结构工程,其强度、抗断裂、抗磨、耐久性等性能均符合设计要求^[85]。

矿物聚合材料作为一种化学激发类胶凝材料,能在常温、常压下把骨料粘结在一起而凝结固化成整体,具有优异的抗化学腐蚀性能,同时可以大量消耗硅酸盐固体废弃物,具有良好的发展前景。但是,这类材料目前仍存在凝结速率过快、硬化体积收缩大等不足,需要重点攻克;对其耐久性和耐候性的评价也不够充分,需要长期研究。

3.2 矿物摩擦材料

矿物摩擦材料可分为增摩(摩阻)材料和减摩材料两类。增摩矿物材料包括石棉、海泡石、水镁石、重晶石、硅灰石、萤石、赤铁矿、磁铁矿、钛铁矿、铬铁矿、长石、锆石、石英、刚玉、金红石、蛭石、沸石、高岭石、硅藻土、白云石、方解石、冰晶石等,它们莫氏硬度通常在 3~9,大多作为复合摩擦材料的增强材料或填料,具有提高摩擦制品强度、密度和摩擦系数的作用。近十年来,由于石棉及其制品的使用受到严格限制,对其作为摩阻增强材料的应用研究几近停止。与之相反,对坡缕石、海泡石、蛭石、高岭石、硅灰石等矿物作为摩阻增强材料的研究较为活跃^[86,92],重点研究了这些矿物的有机插层或表面改性工艺以及它们与其他原料的优化配比及复合工艺,但成果的产业化水平还较低,且未形成有约束力的技术规范。

石墨、滑石和辉钼矿(MoS_2)等具有较低的硬度(莫氏硬度一般在1~2)和剪切强度,具有降低摩擦系数和摩擦副磨损量的显著作用,作为减摩材料已得到广泛应用,近年来新的研究进展不突出。但是,在石墨和 MoS_2 纳米化以及摩擦性能评价等方面取得了新进展:采用湿法化学研磨成功制备了具有良好分散性能和较低摩擦系数的纳米石墨^[93,94];以聚乙烯吡咯烷酮(PVP)、二烷基二硫代磷酸吡啶盐(PyDDP)为修饰剂,通过液相分散法制备了具有良好减摩抗磨性能的 MoS_2 纳米微粒^[95]。

自20世纪90年代后期俄罗斯专家偶然发现蛇纹石对金属摩擦副具有减摩-修复功能并研发出金属减摩-修复产品以来,以蛇纹石为代表的层状结构硅酸盐矿物作为减摩-修复材料的应用基础研究及工程化应用近十年来取得了引人注目的成就,主要体现在四个方面:①系统评价了蛇纹石对金属摩擦副的减摩-修复性能,证实蛇纹石可以明显降低摩擦副的摩擦系数和磨损量,并对摩擦副具有一定的修复作用^[96,106]。②研究了蛇纹石对金属摩擦副减摩-修复的机理,认为蛇纹石的层状结构和表面活性,在摩擦过程中作为形成耐磨保护层/修复层的基体组分,与磨屑和润滑介质中的组分以及碳共同作用,形成了结构复杂的、具有结构硬化、间隙强化和置换硬化相结合的高硬度耐磨保护层;蛇纹石作为催化剂,具有清洁摩擦表面,使磨损表面动态保持“活化状态”的作用^[96,98,107~111]。③在铁路内燃机车、汽车发动机、矿山机械等工业设备上广泛开展了工程化应用试验,证实蛇纹石减摩-修复材料具有提高发动机功率、降低尾气有害物质排放、延长设备使用寿命等显著作用^[96,105]。某项在铁路内燃机车柴油机上历时5年、连续走行 1.15×10^6 km的专项试验表明:发动机燃油降低2.2%,汽缸套寿命延长3倍以上^[112];④以提高蛇纹石粉体在润滑介质中的分散及悬浮稳定性为目的,系统开展了蛇纹石表面改性工艺研究。结果表明:Span60与硼酸酯以1:1配合使用或采用油酸、钛酸脂偶联剂等对蛇纹石粉体进行表面改性修饰,可以改善其在有机润滑介质中的分散及悬浮稳定性以及使用效能^[113,114]。以提高层状矿物对金属摩擦副的减摩-修复功能效应在润滑介质中的悬浮稳定性为目标,发展层状矿物纳米粉体合成、制备以及改性技术,深化减摩-修复机理研究,是该领域重要的研究方向。

3.3 矿物复合材料

在矿物增强聚合物复合材料方面,以提高矿物填料与聚合物基体强度和分散性为目标,重点研究

了蒙脱石、高岭石、金云母、白云母、蛭石等层状结构硅酸盐矿物插层与表面改性^[115~123],硅灰石、透闪石等纤维状矿物的表面改性^[124,125]工艺,在插层-改性剂类型选择、插层-改性工艺优化、改性产物表面性质评价以及改性填料对复合材料性能影响等方面取得了重要进展(见本文4.2部分)。

4 纳米矿物材料

自然界已发现有多种不同结构的纳米尺度的天然矿物——纳米矿物,包括纳米通道结构型、纳米层状单元体叠置结构型和纳米相复合结构型矿物等。纳米矿物经加工处理可制备纳米矿物材料,包括功能性纳米矿物材料和纳米复合材料。纳米矿物的独特结构和性能使其在纳米材料制备、纳米组装、纳米反应器、催化、复合材料、电子器件等领域有重要的应用前景。

4.1 纳米通道结构型矿物材料

包括单管(通道)结构型和集束通道结构型。单管结构型如纤蛇纹石和埃洛石,前者管外径30~50 nm,内径6~14 nm,外形呈纳米丝状;后者管外径50~500 nm,内径 ± 7.2 nm。集束通道结构型如坡缕石、海泡石和沸石。海泡石通道横截面积为 $0.37 \times 1.06 \text{ nm}^2$,坡缕石通道横截面积为 $0.37 \times 0.64 \text{ nm}^2$,沸石通道直径为0.2~1 nm。

彭同江、马国华等^[126~129]利用水热法人工合成了纤蛇纹石结构纳米管,并对其生长机理和掺杂后的结构进行了研究,利用超声化学法在纳米管中进行了半导体量子线组装。类延达、黄志方等^[130~134]以埃洛石为填料提高橡胶的力学性能;乔梅英等^[135]利用埃洛石为载体制备了纳米氧化镍-埃洛石复合材料,其在气体传感器、锂离子电池负极材料以及高效催化剂方面有潜在应用前景。张大斌等^[136]用共混法制备了坡缕石/PBT、坡缕石/酚醛树脂复合材料。彭书传等^[137]利用坡缕石粉末负载 TiO_2 为催化剂对染料废水进行光催化氧化,与纯 TiO_2 粉末相比具有更高的光催化活性等。

4.2 纳米层状单元体叠置结构型矿物材料

包括单层结构型(如石墨)和复式层结构型(如辉钼矿、高岭石、蒙脱石、蛭石等)。

石墨结构层是矿物中最薄的二维纳米单元,且具有良好的化学反应活性和剥离分散性。石墨烯可以看成是由单层至数层石墨结构层构成的二维原子晶体,可直接通过剥离石墨层状晶体获得。由氧化石墨经分散或插层剥离后获得的呈单层至数层分散的特别称为氧化石墨烯,采用不同的还原剂,将其还

原也可获得石墨烯。石墨烯及其衍生物表现出的诱人物理性质和纳米电子学中潜在的应用价值,为低维物理研究领域及材料科学领域提供了良好的研究机遇。杨勇辉等^[138]利用氧化法制备了石墨烯,实现了对石墨的剥离;吕岩等^[139]利用电弧法制备了具有发达、开放的介孔结构和优异电性能的石墨烯材料;马文石等^[140]采用液相氧化法制备了氧化石墨,并通过水合肼还原氧化石墨制备了石墨烯;杜庆来等^[141]利用热剥离法制备了具有很好电容性的石墨烯;李素芳等^[142]研究了石墨烯对红外光的吸收和散射性能。吴小琴等^[143]利用溶胶固定化工艺合成了石墨烯负载 Pt 纳米颗粒的 Pt/石墨烯催化剂,一定条件下,不但对 CO 氧化有较好的催化发光性能,还对乙醚、无水甲醇和甲苯有不同程度的催化氧化发光活性。张晓艳等^[144]成功制备并研究了 TiO₂/石墨烯纳米复合材料,对比纯的 TiO₂ 纳米材料,其光解水产氢活性明显提高等。

纳米 MoS₂ 具有良好的光学、电学、润滑、催化等性能。目前纳米级别的辉钼矿有层状纳米 MoS₂ 薄膜和富勒烯结构 MoS₂ 纳米管。纳米 MoS₂ 因其优良的物理、化学性质,受到广泛重视。周丽春等^[145]采用超音速气流粉碎机对 MoS₂ 粉体进行粉碎,制备了纳米 MoS₂。宋旭春等^[146]采用沉淀法合成了具有无机类富勒烯结构的纳米 MoS₂。陈云霞等^[147]利用浸涂-热解法在玻璃基底表面制备了纳米 MoS₂ 薄膜,初步探讨了薄膜的摩擦磨损机制。胡献国等^[148]对超细润滑级 MoS₂ 颗粒形态的控制进行了初步研究。沃恒洲等^[149]对普通 MoS₂ 和纳米 MoS₂ 对比研究得出纳米 MoS₂ 添加剂的极压、抗磨和减摩性能优于普通 MoS₂ 添加剂。田言等^[150]研制了表面修饰的纳米 MoS₂,且讨论了其极压性能。

刘钦甫等^[151]研究发现,与白炭黑/橡胶复合材料相比,纳米高岭土/橡胶复合材料弹性、拉伸性能和热稳定性较好,撕裂强度和定伸应力稍差。孙红娟等^[152~156]利用钠化改性-有机插层等方法对蒙脱石进行了剥分,制备了有机-蒙脱石复合纳米材料和柱撑蒙脱石。漆宗能等^[157]对蒙脱石钠化改性、有机改性,利用插层聚合法、聚合物插层法等不同方法制备出聚酰胺/蒙脱石、热塑性聚酯/蒙脱石、聚丙烯/蒙脱石、PS/蒙脱石等不同的聚合物/蒙脱石纳米复合材料,讨论了纳米复合材料的结构、性能及其应用。肖诚斌等^[158]采用聚合物熔融插层法制备了氯丁橡胶/蒙脱石纳米复合材料,提高了橡胶的力学性能。王磊等^[159]采用溶液插层法制备了聚乳酸/

蒙脱石纳米复合材料,改善了复合物的热稳定性能。陆昶等^[160]采用原位插层法制备了 SMA/蒙脱石纳米复合材料增容 PA6/ABS 共混体系,蒙脱石起到了增溶剂的作用,提高了体系的力学性能。张泽朋等^[161]以聚乙烯醇为碳源,在水体系中通过溶液插层法,直接与未进行有机改性的蒙脱石进行插层反应,制备了聚乙烯醇/蒙脱石插层复合材料,再经碳化和纳米化处理制得炭/蒙脱石纳米复合材料。

孙金梅等^[162~163]基于含蛭石晶层层状硅酸盐矿物层电荷在有机化及纳米化处理中的重要意义,对其层电荷大小、表征方法及其有机化、纳米化等进行了研究。张泽朋等^[164]用溶液插层法和在乳液体系中采用原位插层聚合法制备了氯丁橡胶/蛭石纳米复合材料。刘文霞等^[165]利用熔融插层法制备聚苯乙烯/蛭石纳米复合材料,提高了材料的力学性能和阻燃性能。何珺^[166]首次利用原位聚合法制备了剥离型聚乳酸/蛭石纳米复合材料,层状纳米蛭石聚乳酸的结晶度降低,球晶粒径大大降低,其纳米复合材料的力学性能大大提高。张坤等^[167]采用微波辅助原位聚合法制备了聚乳酸/蛭石(PLA/VMT)纳米复合材料,在反应时间很短的情况下,蛭石即可以纳米尺寸分布在 PLA 中。

4.3 纳米相复合型矿物材料

包括矿物类质同像高温固溶体在低温条件下溶离形成的显微条纹结构、矿物受力作用后形成的聚片双晶及具有纳米孔结构的矿物等。

长石在低温下可分离成两个相,分离后的钾长石与钠长石呈薄层交互排列,层厚度的大小是变化的,这种共生称为条纹长石,其中隐形条纹长石的晶片厚度小于 80 nm,是天然的纳米相复合型矿物材料。钠长石薄层本身也交替排列,形成钠长石双晶,双晶片的厚度仅有 10~15 nm。贵蛋白石(opal)由无定型 SiO₂ 小球规整排列形成,具有几百纳米空隙的结构,是一类光子晶体。而合成光子晶体是人工制作的周期性介质材料,具有能够控制光传输的独特性质。由于光子晶体的优越特性,光子晶体被认为是未来的“半导体”,其对光通讯、微波通讯、光电子集成以及国防科技等领域将产生重大影响。张辉等^[168]、李明海等^[169]在乙醇介质中制备了 SiO₂ 光子晶体;段涛等^[170]研究了热处理温度对蛋白石晶体(SiO₂ 颗粒堆积)的影响;许多学者^[171~174]利用 SiO₂ 和聚苯乙烯微球做模版制备了各种蛋白石结构光子晶体等。

5 结 语

综上所述,近十年我国功能矿物材料、结构矿物

材料、纳米矿物材料研究取得了一系列成果。功能矿物材料方面,环境矿物材料依然是最活跃的领域,固体废弃物利用研究得到明显加强,但对电、光、声学等功能矿物材料研究重视不够,成果相对较少。在结构矿物材料方面,矿物聚合材料研究的兴起引人注目,成果丰硕。纳米矿物材料种类繁多,但仍以聚合物/层状结构硅酸盐纳米复合材料研究为主。

但是,应该看到我国矿物材料研究仍存在一些问题:①研究方向分散,与国民经济发展结合不够紧密,缺乏大成果,不能解决国家的重大战略需求;②创新性不强。无论是研究思路还是研究方法,跟踪国外研究多,自主创新少;③成果推广应用薄弱。绝大多数研究成果仅限于实验室规模和水平,很少有成果转向中试和生产。

鉴于我国矿物材料的发展现状,笔者认为,今后我国矿物材料研究的发展方向是:①加强基础研究。非金属矿物的开发与应用不同于金属矿产。金属矿产主要是以应用它的某一元素为主,而非金属矿产主要是应用它的物化性质与工艺特性。非金属矿物开发应用的基础是对非金属矿物的成分、结构及各种物化性能的研究。只有对非金属矿物的物化性质进行系统研究,才能发现和了解非金属矿物可利用的性能,只有对非金属矿物的可应用性能的机理进行研究,才能对非金属矿物加以充分利用,提高非金属矿物的开发应用水平。近年的研究情况表明,矿物性能机理研究仍未得到明显加强,因此建议加强非金属矿物的应用基础研究,在深入了解矿物成分-结构-性能-加工工艺关系,建立非金属矿物数据库的基础上,开展和加强矿物材料设计研究;②应更紧密地结合国家经济社会发展的需要和我国矿物资源的特点,加快我国矿物功能材料特别是与节能减排、新能源、低碳社会、循环经济等社会和经济重大发展问题紧密相关的矿物功能材料研究步伐,进一步提高我国矿物材料的研究水平;③大胆创新研究方法和思路,产出更多有自主知识产权的成果;④在进一步加强基础研究的同时,更加重视成果的应用与推广。

参考文献 (References):

- [1] 汪小红,张群. 仿生矿物材料的研究现状[J]. 科技信息, 2008, (21): 372-421.
Wang Xiaohong, Zhang Qun. Research in biomimetic mineral materials[J]. Science and Technology Information, 2008, (21): 372-421. (in Chinese with English abstract)
- [2] 汪灵. 矿物材料学的内涵与特征[J]. 矿物岩石, 2008, 28(3): 1-8.
Wang Ling. Connotation and features of mineral material sciences[J]. J. Mineral. Petrol., 2008, 28(3): 1-8. (in Chinese with English abstract)
- [3] 汪灵. 矿物材料的概念与本质[J]. 矿物岩石, 2006, (2): 1-9.
Wang Ling. Concept and essence of mineral materials[J]. J. Mineral. Petrol., 2006, 26(2): 1-9. (in Chinese with English abstract)
- [4] 彭同江. 我国矿物材料的研究现状与发展趋势[J]. 中国矿业, 2005, 14(1): 17-20.
Peng Tongjiang. Present situation and development of mineral materials in China[J]. China Mining Magazine, 2005, 14(1): 17-20. (in Chinese with English abstract)
- [5] 张立娟,孙家寿. 环境矿物材料的研究现状与展望[J]. 化学与生物工程, 2003, (3): 10-12.
Zhang Lijuan, Sun Jiashou. Present situation and forecasts of research in environment mineral materials[J]. Chem. Bio. Eng., 2003, (3): 10-12. (in Chinese with English abstract)
- [6] 邱冠周,袁明亮,杨华明. 矿物材料加工学[M]. 长沙:中南大学出版社, 2003.
Qiu Guanzhou, Yuan Mingliang, Yang Huaming. Mineral materials processing[M]. ChangSha: Central South University Press, 2003. (in Chinese)
- [7] 万朴. 矿物材料与非金属矿工业市场[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2002, (1): 3-9.
Wan Pu. Mineral materials and market of non-metallic industry[J]. China Non-metallic Mining Industry Herald, 2002, (1): 3-9. (in Chinese)
- [8] 周明芳. 纳米矿物材料的开发现状及存在的主要问题[J]. 矿产与地质, 2002, 16(2): 103-104.
Zhou Mingfang. Status and main problems of the development of nano-mineral materials[J]. Mineral Res. Geol., 2002, 16(2): 103-104. (in Chinese with English abstract)
- [9] 张刚生. 生物矿物材料及仿生材料工程[J]. 矿产与地质, 2002, 16(2): 98-102.
Zhang Gangsheng. Biomineral materials and biomimetic material engineering[J]. Mineral Res. Geol., 2002, 16(2): 98-102. (in Chinese with English abstract)
- [10] 郑水林. 非金属矿物材料的加工与应用[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2002, (4): 3-7.
Zheng Shuilin. Processing and application of non-metallic mineral materials[J]. China Non-metal. Mining Indu. Herald, 2002, (4): 3-7. (in Chinese with English abstract)
- [11] 李艺. 特种矿物材料的应用与发展[J]. 矿产综合利用, 2001, (3): 30-34.
Li Yi. The application and development of special mineral material[J]. Multip. Utiliz. Mineral Res., 2001, (3): 30-34. (in Chinese with English abstract)
- [12] 吴季怀. 矿物材料刍议[J]. 矿物学报, 2001, (3): 278-283.
Wu Jihuai. A preliminary discussion of mineral materials[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2001, (3): 278-283. (in Chinese with English abstract)
- [13] 赵万智,宋存义,陈德平. 矿物材料学的几个基本问题[J]. 矿物岩石地球化学通报, 1999, 18(4): 264-266.
Zhao Wanzhi, Song Cunyi, Chen Deping. Important views on mineral material science[J]. Bull. Mineral. Petrol. Geo-

- chem., 1999, 18(4): 264–266. (in Chinese with English abstract)
- [14] 倪文, 李建平, 方兴, 陈娜娜. 矿物材料学导论[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
Ni Wen, Li Jianping, Fang Xing, Chen Nana. Introduction to mineral materials[M]. Beijing: Science Press, 1998. (in Chinese)
- [15] 邱克辉. 材料科学概论[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 1996.
Qiu Kehui. Introduction to materials science[M]. Chendu: Univ. Elec. Sci. Tech. Press, 1996. (in Chinese)
- [16] 汪灵, 张振禹, 叶大年. 矿物材料及矿物材料学[J]. 中国非金属矿业导刊, 1995, (2): 7–10, 48.
Wang Ling, Zhang Zhenyu, Ye Dalian. Mineral materials and mineral material science[J]. China Non-Metal. Mining Ind. Herald, 1995, (2): 7–10, 48. (in Chinese with English abstract)
- [17] 陈丰. 若干非金属矿产资源及矿物材料的开发与应用[A]. 中国科学院地球化学研究所. 中国科学院地球化学研究所集刊[C]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 1990: 5–11.
Chen Feng. Development and application of several non-metallic mineral resources and mineral materials[A]. Institute of Geochemistry Chinese Academy of Sciences. Bulletin of Institute of Geochemistry Chinese Academy of Sciences[C]. Guiyang: Institute of Geochemistry Chinese Academy of Sciences, 1990: 5–11. (in Chinese)
- [18] 廖立兵. 矿物材料的定义与分类[J]. 硅酸盐通报, 2010, 29(5): 1067–1071.
Liao Libing. Definition and classification of mineral materials [J]. Bull. Chin. Ceram. Soc., 2010, 29(5): 1067–1071. (in Chinese with English abstract)
- [19] 师昌绪. 跨世纪材料科学技术的若干热点问题[J]. 自然科学进展, 1999, 9(1): 1–13.
Shi Changxu. Cross century hot issues of materials science and technology[J]. Progress in Natural Science, 1999, 9(1): 1–13. (in Chinese with English abstract)
- [20] 国家自然科学基金委员会. 自然科学学科发展战略调研报告无机非金属材料科学[R]. 北京: 科学出版社, 1997: 22–27.
National Natural Science Foundation of China. Strategy research report on development of natural sciences inorganic non-metallic materials science[R]. Beijing: Science Press, 1997: 22–27. (in Chinese)
- [21] 詹旭, 罗泽娇, 马腾. 高岭土吸附剂去除含锰废水中锰离子的实验研究[J]. 地质科技情报, 2005, 24(1): 95–98.
Zhan Xu, Luo Zejiao, Ma Teng. Experimental study on removal of Mn ion from Mn wastewater by kaoline adsorbent [J]. Geol. Sci. Tech. Inf., 2005, 24(1): 95–98. (in Chinese with English abstract)
- [22] 杨友强, 方勇. 一种新型改性蒙脱石复合絮凝剂的制备及其应用研究[J]. 非金属矿, 2009, 32(5): 24–26.
Yang Youqiang, Fang Yong. Study on preparation and application of a novel modified montmorillonite composite flocculant[J]. Non-Metallic Mines, 2009, 32(5): 24–26. (in Chinese with English abstract)
- [23] 祝凌燕, 林加华, 张子种. 5种天然矿物修复铅污染沉积物的实验研究[J]. 环境科学技术, 2010, 33(4): 1–5.
Zhu Lingyan, Lin Jiahua, Zhang Zizhong. Experimental study on in situ remediation of Pb-contaminated sediments by active capping with five natural minerals[J]. Environ. Sci. Tech., 2010, 33(4): 1–5. (in Chinese with English abstract)
- [24] 邢泳. 海泡石净化油烟及其活化废酸综合利用的研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2003.
Xing Yong. Utilization of sepiolite for fume purification and activation of waste acid[D]. Changsha: Hunan Univ., 2003. (in Chinese with English abstract)
- [25] 任建莉, 周劲松, 骆仲泱, 胡长兴, 钟英杰. 新型吸附剂脱除烟气中气态汞的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(2): 49–51.
Ren Jianli, Zhou Jinsong, Luo Zhongyang Hu Changxing, Zhong Yingjie. The Application of novel sorbents for mercury vapor removal from simulated flue gases[J]. Proc. CSEE, 2007, 27(2): 49–51. (in Chinese with English abstract)
- [26] 周乃武. 利用工业固体废物制备高强度土壤固化剂的实验研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2006.
Zhou Naiwu. Preparation of high-strength soil stabilizer from solid wastes: An experimental study [D]. Beijing: China Univ. Geosci., 2006. (in Chinese with English abstract)
- [27] 王铁军. 固体废物填埋场防渗层改良研究[D]. 长春: 吉林大学, 2008.
Wang Tiejun. Research on the modification of landfill liner [D]. Changchun: Jinlin Univ., 2008. (in Chinese with English abstract)
- [28] 尹国勋, 邢明飞, 余功耀. 利用赤泥等工业固体废物制备陶粒[J]. 河南理工大学学报, 2008, 27(4): 491–496.
Yin Guoxun, Xing Mingfei, Yu Gongyao. The study on manufacture of haydite by using industrial solid wastes[J]. J. Henan Polytechn. Univ., 2008, 27(4): 491–496. (in Chinese with English abstract)
- [29] 陈磊, 廖立兵. 膨润土、沸石和赤泥用作垃圾填埋场底部防渗衬里的机理探讨[J]. 硅酸盐通报, 2009, (6): 1139–1142.
Chen Lei, Liao Libing. Antipermeation and attenuation mechanism of bentonite, zeolite and red mud Liner for Garbage Landfill [J]. Bull. Chin. Ceram. Soc., 2009, (6): 1139–1142. (in Chinese with English abstract)
- [30] 杨秀红, 胡振琪, 高爱林, 危向峰. 凹凸棒石修复铜污染土壤[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2006, 25(4): 629–631.
Yang Xiuhong, Hu Zhenqi, Gao Ailin, Wei Xiangfeng. Remediation of attapulgite on copper contaminated soil[J]. J. Liaoning Tech. Univ., 2006, 25(4): 629–631. (in Chinese with English abstract)
- [31] 刘秀珍, 赵兴杰, 马志宏. 膨润土和沸石在镉污染土壤治理中的应用[J]. 水土保持学报, 2007, 21(6): 83–85.
Liu Xiuzhen, Zhao Xingjie, Ma Zhihong. Application of bentonite and zeolite in dealing soil contaminated by Cd[J]. J. Soil Water Conservation, 2007, 21(6): 83–85. (in Chinese with English abstract)
- [32] 律琳琳, 金美玉, 李博文, 谢建治. 4种矿物材料改良Cd污染土壤的研究[J]. 河北农业大学学报, 2009, 32(1): 1–5.
Lv Linlin, Jin Meiyu, Li Bowen, Xie Jianzhi. Study on remediation of the soil contaminated with cadmium by applying four minerals[J]. J. Agri. Univ. Hebei, 2009, 32(1): 1–5. (in Chinese with English abstract)

- [33] 廖立兵, 姜浩, 梁树平, 龙梅, 王军玲, 杜高翔, 何茂乾. 湖南株洲地区 Cd、Pb 污染土壤的修复实验[J]. 矿物学报, 2012, 32(1): 151-155.
Liao Libing, Jiang Hao, Liang Shuping, Long Mei, Wang Junling, Du Gaoxiang, He Maoqian. Remediation of Cd, Pb Contaminated Soil in Zhuzhou region, Hunan Province by Using Minerals[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2012, 32(1): 151-155. (in Chinese with English abstract)
- [34] 谢正苗, 俞天明, 姜军涛. 膨润土修复矿区污染土壤的初探[J]. 科技通报, 2009, 25(1): 109-113.
Xie Zhengmiao, Yu Tianming, Jiang Juntao. A preliminary study on remediation of a mining tailings contaminated soil using natural bentonite[J]. Bull. Sci. Tech., 2009, 25(1): 109-113. (in Chinese with English abstract)
- [35] 林云青, 章钢娅, 许敏, 刘总堂, 龚华. 添加凹凸棒土和钠基蒙脱石对铜锌镉污染红壤的改良效应研究[J]. 土壤, 2009, 41(6): 892-896.
Lin Yunqing, Zhang Gangya, Xu Min, Liu Zongtang, Gong Hua. Studies on modified effects of attapulgite and Na-montmorillonite on Cu-Zn-Cd contaminated red soil[J]. Soils, 2009, 41(6): 892-896. (in Chinese with English abstract)
- [36] 王金明, 易发成. 3种矿物材料对 Cs⁺ 的吸附性能研究[J]. 铀矿冶, 2008, 27(4): 196-210.
Wang Jinming, Yi Facheng. Adsorption performance of Cs⁺ in three mineral materials[J]. Uran. Mining Metal., 2008, 27(4): 196-210. (in Chinese with English abstract)
- [37] 易发成, 李玉香, 石正坤, 康厚军. 矿物材料对核素 Sr、Cs 的吸附及其固化材料的性能研究[J]. 西南科技大学学报, 2006, 21(4): 1-6.
Yi Facheng, Li Yuxiang, Shi Zhengkun, Kang Houjun. Study on the adsorptive capabilities of mineral materials and properties of solidifying materials for radionuclide Sr, Cs[J]. J. SWUST, 2006, 21(4): 1-6. (in Chinese with English abstract)
- [38] 耿曼, 石林, 徐稳定. 蛭石作为燃煤固硫添加剂的实验研究[J]. 非金属矿, 2006, 29(4): 28-30.
Geng Man, Shi Lin, Xu Wending. Experimental research on using vermiculite as coal-burning sulfur-fixed additive[J]. Non-Metallic Mines, 2006, 29(4): 28-30. (in Chinese with English abstract)
- [39] 韩跃新, 任飞, 印万忠, 王子祥, 袁致涛. 电气石晶体结构中的化学键的计算[J]. 有色矿冶, 2005, 21(1): 12-14.
Han Yuexin, Ren Fei, Yin Wanzhong, Wang Zixiang, Yuan Zhitao. Calculation on the chemical bond of tourmaline crystal structure[J]. Non-ferrous Mining and Metallurgy, 2005, 21(1): 12-14. (in Chinese with English abstract)
- [40] 李雯雯, 张晓晖, 吴瑞华, 孟琳. 不同种属电气石的压电效应及磁学性质的研究[J]. 硅酸盐通报, 2007, 26(6): 1116-1121.
Li Wenwen, Zhang Xiaohui, Wu Ruihua, Meng Lin. Piezoelectricity and magnetic properties of diverse tourmalines[J]. Bull. Chin. Ceram. Soc., 2007, 26(6): 1116-1121. (in Chinese with English abstract)
- [41] 卢琪, 张晓晖, 吴瑞华, 白峰. 电气石粉体电磁屏蔽性能研究[J]. 非金属矿, 2006, 29(1): 5-7.
Lu Qi, Zhang Xiaohui, Wu Ruihua, Bai Feng. Study on property of electromagnetic shielding of Tourmaline powder [J]. Non-Metallic Mines, 2006, 29(1): 5-7. (in Chinese with English abstract)
- [42] 张丹, 赵长春, 廖立兵. 热处理对铁-镁电气石热释电特性的影响[J]. 矿物学报, 2008, 28(4): 386-388.
Zhang Dan, Zhao Changchun, Liao Libing. The influence of heat treatment on the pyroelectric properties of Fe-Mg tourmaline[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2008, 28(4): 386-388. (in Chinese with English abstract)
- [43] Zhao C C, Zhang D, Liao L B, Sun X N. Influence of the content, valence and distribution of Fe in Fe-Mg tourmalines on their intrinsic dipolemoments[J]. J. Chin. Ceram. Soc., 2008, 36(6): 854-857.
- [44] 梁金生, 孟军平, 朱东彬, 丁燕, 刘志国. 热处理对电气石矿物粉体表面自由能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2008, 26(2): 257-260.
Liang Jinsheng, Meng Junping, Zhu Dongbin, Ding Yan, Liu Zhiguo. Effect of heat treatment on the surface free energy of mineral tourmaline powders[J]. J. Chin. Ceram. Soc., 2008, 26(2): 257-260. (in Chinese with English abstract)
- [45] 廖尚宜, 彭明生, 蒙宇飞. 紫方钠石一种光致变色的天然矿物材料[J]. 矿物岩石, 2005, 25(3): 75-78.
Liao Shangyi, Peng Mingsheng, Meng Yufei. Sodalite-A natural tenebrescence mineral material[J]. J. Mineral. Petrol., 2005, 25(3): 75-78. (in Chinese with English abstract)
- [46] 鲁安怀. 无机界矿物天然自净化功能之矿物光催化作用[J]. 岩石矿物学杂志, 2003, 22(4): 323-329.
Lu Anhuai. Mineralogical photocatalysis in natural self-purification of inorganic minerals[J]. Acta Petrol. Mineral., 2003, 22(4): 323-329. (in Chinese with English abstract)
- [47] 温淑瑶, 陈素云, 马占青, 高晓飞, 王晓岚. 阳光下二氧化钛-膨润土对 SDBS 的降解[J]. 矿物岩石, 2010, (1): 106-110.
Wen Shuyao, Chen Suyun, Ma Zhanqing, Gao Xiaofei, Wang Xiaolan. Solar photocatalytic degradation of sodium dodecyl benzene sulfonate TiO₂-bentonite[J]. J. Mineral. Petrol., 2010, 30(1): 106-110. (in Chinese with English abstract)
- [48] 马敏立. 紫外光照射下 TiO₂-膨润土对模拟废水中 SDBS 的降解[D]. 北京: 北京师范大学, 2005.
Ma Minli. Degradation of SDBS in simulated wastewater by TiO₂-bentonite under UV light[D]. Beijing: Beijing Normal University, 2005. (in Chinese with English abstract)
- [49] 吴闻迪, 吴福全, 苏富芳, 张姗, 张行愚. 对腔拉曼激光激光器谱线提取的石英晶体旋光滤波器[J]. 中国激光, 2009, 36(4): 833-835.
Wu Wendi, Wu Fuquan, Su Fufang, Zhang Shan, Zhang Xingyu. Quartz optical filter based on rotatory dispersion effect used for intracavity yellow raman laser[J]. Chin. J. Lasers, 2009, 36(4): 833-835. (in Chinese with English abstract)
- [50] 严晖, 胡焕林, 孙嵩泉, 李万福. 石英晶体监控法镀制高精度光学薄膜[J]. 真空, 2003, (5): 16-18.
Yan Hui, Hu Huanlin, Sun Songquan, Li Wanfu. Preparation of high precise optical coating by quartz crystal deposition monitor[J]. Vacuum, 2003, (5): 16-18. (in Chinese with English abstract)
- [51] 戚巽骏, 林斌, 曹向群, 陈钰清. 二维水晶光学低通滤波器

- 的研制[J]. 光电子·激光, 2007, 18(2): 150—153.
- Qi Xunjun, Lin Bin, Cao Xiangqun, Chen Yuqing. Preparation of new crystal 2-D optical low pass filter[J]. J. Optoelec. Laser, 2007, 18(2): 150—153. (in Chinese with English abstract)
- [52] 贾朋, 李国华, 彭捍东, 赵廷生, 姚海涛. 一种新型的 90°分束偏光棱镜[J]. 激光技术, 2008, 32(5): 539—541.
- Jia Peng, Li Guohua, Peng Handong, Zhao Tingsheng, Yao Haitao. A new type of 90° beam splitting polarized prism[J]. Laser Tech., 2008, 32(5): 539—541. (in Chinese with English abstract)
- [53] 吴福全, 任树锋, 唐恒敬, 赵培. 冰洲石-玻璃组合 e 光超高透偏光棱镜[J]. 应用光学, 2006, 27(2): 116—119.
- Wu Fuquan, Ren Shufeng, Tang Hengjing, Zhao Pei. Combination of iceland crystal and glass for e beam super-high transmittance polarizing prism[J]. J. Applied Optics, 2006, 27(2): 116—119. (in Chinese with English abstract)
- [54] 杜鹏, 夏志国, 庞雪, 廖立兵. 萤石 CaF₂ 基矿物发光材料的制备与发光性能研究[J]. 矿物学报, 2010(增刊), 136—137.
- Du Peng, Xia Zhiguo, Pang Xue, Liao Libing. Preparation and luminescent properties of fluorite CaF₂ based light emitting mineral materials[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2010, 136—137. (in Chinese)
- [55] 李殿超, 吴长锋, 于立新, 曹林. 矿物发光材料 CaS: Mn²⁺ 的合成及其荧光性质[J]. 矿物学报, 2001, (2): 209—212.
- Li Dianchao, Wu Changfeng, Yu Lixin, Cao Lin. Synthesis and fluorescent properties of mineral material CaS: Mn²⁺ phosphor[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2001, (2): 209—212. (in Chinese with English abstract)
- [56] 张金章, 陈旭辉. 石墨/氧化锡/活性炭锂离子电池负极材料的合成及性能[J]. 化学研究, 2010, 21(3): 27—30.
- Zhang Jinzhang, Chen Xuhui. Synthesis and performance of graphite/SnO₂/active carbon anode material for Li-ion battery[J]. Chem. Res., 2010, 21(3): 27—30. (in Chinese with English abstract)
- [57] 洪泉, 何月德, 刘洪波, 石磊, 夏笑虹. 纯化处理对天然微晶石墨电化学性能影响的研究[J]. 非金属矿, 2010, 33(3): 45—48.
- Hong Quan, He Yue, Liu Hongbo, Shi Lei, Xia Xiaohong. Investigations on electrochemical performances of purified natural microcrystalline graphite [J]. Non-Metallic Mines, 2010, 33(3): 45—48. (in Chinese with English abstract)
- [58] 杨丽梅. 导电云母的性能评价[J]. 涂料工业, 2001, (9): 39—42.
- Yang Limei. Evaluation of performance of conductive mica [J]. Paint and Coatings Industry, 2001, (9): 39—42. (in Chinese with English abstract)
- [59] 张小伟, 程亮, 张翼, 钱玉鹏, 朱瀛波. 粒度组成对云母纸强度性能的影响[J]. 非金属矿, 2010, 33(3): 55—58.
- Zhang Xiaowei, Cheng Liang, Zhang Yi, Qian Yupeng, Zhu Yingbo. Influence of particle size to strength properties of mica paper[J]. Non-Metallic Mines, 2010, 33(3): 55—58. (in Chinese with English abstract)
- [60] Wang L, Luo K, Li Z Q, Guan S Y, Ge W, Zhang J Y. Design and application of a small electrode experimental installation for resistivity measurement of mineral and solid insulating material[J]. Sci. China Tech. Sci., 2011, 54: 691—697.
- [61] 罗柯, 汪灵, 雷燕, 李自强. 微晶白云母对绝缘灌注胶绝缘性能和强度的影响初步研究[J]. 矿物学报, 2010, 30(增刊): 118—119.
- Luo Ke, Wang Ling, Lei Yuan, Li Ziqiang. Preliminary study on the influence of microcrystalline muscovite on the insulating properties and strength on the insulating pouring sealant[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2010, 30(Supl.): 118—119. (in Chinese)
- [62] 董颖. 电气石红外辐射特性与 Zeta 电位研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2005.
- Dong Ying. The study of infrared radiation character and zeta potential of tourmaline[D]. Beijing: China Univ. Geosci., 2005. (in Chinese with English abstract)
- [63] 徐梁, 熊成东. 聚乳酸/硅灰石生物医用复合材料的降解性能研究[J]. 重庆工学院学报, 2009, 23(3): 69—75.
- Xu Liang, Xiong Chengdong. Degradability of poly (DL-lactide)/wollastonite composite as biomaterial[J]. J. Chongqing Inst. Tech, 2009, 23(3): 69—75. (in Chinese with English abstract)
- [64] 肖斌, 周大利, 杨为中, 欧俊, 唐艳娟, 陈槐卿. 磷灰石-硅灰石/-磷酸三钙复合多孔支架材料的制备与表征[J]. 无机材料学报, 2006, 21(2): 427—432.
- Xiao Bin, Zhou Dali, Yang WeiZhong, Ou Jun, Tang Yanjuan, Chen Huaiqing. Preparation and characterization of porous apatite-wollastonite/ β -tricalcium phosphate composite scaffolds[J]. J. Inorganic Materials, 2006, 21(2): 427—432. (in Chinese with English abstract)
- [65] 冯丹哥, 周大利, 龙沁, 曹滨, 张翔, 杨为中. 磷灰石-硅灰石生物活性玻璃陶瓷对谷氨酸的吸附[J]. 中国组织工程研究与临床康复, 2009, 13(12): 2253—2256.
- Feng Dange, Zhou Dali, Long Qin, Cao Bin, Zhang Xiang, Yang Weizhong. Adsorption properties of apatite-wollastonite bioactive glass-ceramic to glutamic acid[J]. J. Clin. Rehab. Tissue Eng. Res., 2009, 13(12): 2253—2256. (in Chinese with English abstract)
- [66] 林海, 张东升, 李华, 叶军, 张立新. 雌黄纳米粒对白血病 K562 细胞体外治疗作用及其机制[J]. 纳米技术与精密工程, 2008, 6(1): 14—19.
- Lin Hai, Zhang Dongsheng, Li Hua, Ye Jun, Zhang Lixin. Anticancer effect of orpiment nanoparticles on K562 cells in vitro and its mechanism[J]. Nanotech. Prec. Eng., 2008, 6(1): 14—19. (in Chinese with English abstract)
- [67] 林海, 张东升. 纳米雌黄对 K562 细胞端粒酶活性的影响[J]. 实用临床医药, 2007, 11(6): 5—7.
- Lin Hai, Zhang Dongsheng. Effect of Orpiment Nanoparticles on telomerase activity in K562 cell line[J]. J. Clin. Med. Prac., 2007, 11(6): 5—7. (in Chinese with English abstract)
- [68] 陈绍综, 蒋立, 李靖, 吕小星, 李跃军, 李学拥, 李金清, 李望舟. 复合沸石止血剂放热和抗菌活性实验研究[J]. 西北国防医学杂志, 2009, 30(1): 11—13.
- Chen Shaozong, Jiang Li, Li Jing, Lv Xiaoxing, Li Yuejun, Li Xueyong, Li Jinqing, Li Wangzhou. Experimental study of exothermal and antibacterial activity of a compound zeolite

- hemostatic agent[J]. *Med. J. National Defending Forces in N W China*, 2009, 30(1): 11-13. (in Chinese with English abstract)
- [69] 李仁喜, 蒋波. 经胸腔镜喷洒滑石粉及干扰素治疗恶性胸腔积液的疗效观察[J]. *湘南医学院学报*, 2008, 10(1): 23-24.
- Li Renxi, Jiang Bo. Efficacy of thoracoscopic spray of talc and interferon for treatment of malignant pleural effusion[J]. *Hunan Medical University*, 2008, 10(1): 23-24. (in Chinese with English abstract)
- [70] 刘荣, 濮德敏, 程艳香, 尹伶, 李天. 纳米雄黄混悬液对入宫颈癌细胞 RCAS1 表达的影响[J]. *中国医院药学杂志*, 2008, 28(6): 459-462.
- Liu Rong, Pu Demin, Cheng Yanxiang, Yin Ling, Li Tian. Change of RCAS1 expression human cervical carcinoma cells treated with realgar nanometer suspension [J]. *Chin J. Hosp. Pharm.*, 2008, 28(6): 459-462. (in Chinese with English abstract)
- [71] 沈上越, 汤庆国, 杨眉, 李珍. 磁性坡缕石复合材料的制备及性能[J]. *硅酸盐学报*, 2006, 34(7): 875-878.
- Shen Shangyue, Tang Qingguo, Yang Mei, Li Zhen. Preparation and properties of magnetic palygorskite composite materials[J]. *J. Chin. Ceram. Soc.*, 2006, 34(7): 875-878. (in Chinese with English abstract)
- [72] 仲新华, 谢永江. 高性能水泥基吸声材料[J]. *中国铁道科学*, 2006, (3): 3-46.
- Zhong Xinhua, Xie Yongjiang. Cementitious materials with high performance of absorbing noise[J]. *China Railway Science*, 2006, (3): 3-46. (in Chinese with English abstract)
- [73] 余海燕, 王武祥, 姚燕. 水泥基吸声材料的研究[J]. *混凝土与水泥制品*, 2006, (1): 6-49.
- Yu Haiyan, Wang Wuxiang, Yao Yan. Study of cement based absorption material[J]. *China Concrete and Cement Prod.*, 2006, (1): 6-49. (in Chinese with English abstract)
- [74] 刘庆丰, 程正江. 水镁石纤维增强的水泥基吸声材料的研制[J]. *噪音与振动控制*, 2008, (2): 20-122.
- Liu Qingfeng, Cheng Zhengjiang. Sound-absorbition material of brucite fibre enhanced cement-matrix[J]. *Noise and Vibr. Control*, 2008, (2): 20-122. (in Chinese with English abstract)
- [75] 金雪莉, 骆翔宇. 提高隧道无机颗粒吸声材料耐久性的措施[J]. *新型建筑材料*, 2009, (9): 1-84.
- Jin Xueli, Luo Xiangyu. Measures to promote the durability of inorganic tunnel sound-absorbing material[J]. *New Building Materials*, 2009, (9): 1-84. (in Chinese with English abstract)
- [76] 张继香, 刘炜, 董英鸽. 利用煤矸石研制多孔陶瓷吸声材料[J]. *中国陶瓷*, 2010, (6): 0-52.
- Zhang Jixiang, Liu Wei, Dong Yingge. Developed by using coal gangue porous ceramics sound-absorbing material[J]. *China Ceramics*, 2010, (6): 0-52. (in Chinese with English abstract)
- [77] 苏玉柱, 杨静, 马鸿文, 聂铁苗, 李如臣. 利用粉煤灰制备高强矿物聚合材料的实验研究[J]. *现代地质*, 2006, 20(2): 355-360.
- Su Yuzhu, Yang Jing, Ma Hongwen, Nie Yimiao, Li Ruchen. Preparation of high-strength mineral polymer based on flyash: An experimental study[J]. *Geoscience*, 2006, 20(2): 355-360. (in Chinese with English abstract)
- [78] 徐建中, 周云龙, 唐然肖. 地聚合物水泥固化重金属的研究[J]. *建筑材料学报*, 2006, 9(3): 341-346.
- Xu Jianzhong, Zhou Yunlong, Tang Ranxiao. Study on the solidification of heavy metals by fly ash based geopolymers [J]. *J. Building Materials*, 2006, 9(3): 341-346. (in Chinese with English abstract)
- [79] 张汉卿. 碱及稀土对矿物聚合材料性能影响研究[D]. 江西: 江西理工大学, 2009.
- Zhang Hanqing. The influence of alkali and rare earth on the performance of geopolymer[D]. Jiangxi: Jiangxi University of Technology, 2009. (in Chinese with English abstract)
- [80] Phair J W, Van D J, Smith D. Mechanism of polysialation in the incorporation of zirconia into fly ash-based geopolymers [J]. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2000, 39: 2925-2934.
- [81] Phair J W, Van D J. Effect of silicate activator pH on the leaching and material characteristics of waste-based inorganic polymers[J]. *Minerals Engineering*, 2001, 14: 289-304.
- [82] Xu Hua, Van D J. Effect of alkali metals on the preferential geopolymerization of stilbite/kaolinite mixtures [J]. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2001, 40: 3749-3756.
- [83] 马鸿文, 凌发科, 杨静, 王刚. 利用钾长石尾矿制备矿物聚合材料的实验研究[J]. *地球科学*, 2002, 27(5): 1-9.
- Ma Hongwen, Ling Fake, Yang Jing, Wang Gang. Preparation of mineral polymer from potassium feldspar wastes: An experimental study[J]. *Earth Science*, 2002, 27(5): 1-9. (in Chinese with English abstract)
- [84] 聂铁苗. $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O(K}_2\text{O)-H}_2\text{O}$ 体系矿物聚合材料制备及反应机理研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2006.
- Nie Yimiao. Mineral polymer in the system of $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O(K}_2\text{O)-H}_2\text{O}$: Preparation and reaction mechanism[D]. Beijing: China Univ. Geosci., 2006. (in Chinese with English abstract)
- [85] 倪文, 殷玉婷, 孙恒虎. 仿地成岩的新一代胶凝材料-凝石自然科学、材料科学与循环经济的新焦点[J]. *新材料产业*, 2005, (5): 37-43.
- Ni Wen, Yin Yuting, Sun Henghu. Agglomerated rock - new generation of cement material and new focus of natural science, material science and recycling economy[J]. *Adv. Material Ind.* 2005, (5): 37-43. (in Chinese)
- [86] 陶伟. 海泡石纤维增强摩擦阻材料的研究[D]. 西安: 长安大学, 2008.
- Tao Wei. Study on the Sepiolite Fiber-reinforced Friction Materials[D]. Xi'an: Changan Univ., 2008. (in Chinese with English abstract)
- [87] 朱媛媛, 王庆良. 煤系高岭土/尼龙 1010 复合材料的摩擦学特性[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2006, 38(s): 173-175.
- Zhu Yuanyuan, Wang Qingliang. Tribological properties of polyamide 1010 composite filled with coal kaolin[J]. *J. Harbin Inst. Tech.*, 2006, 38(s): 173-175. (in Chinese with English abstract)
- [88] 吴静晰, 欧雪梅, 赵宇龙, 葛世荣. 硅灰石表面改性及其对复合材料摩擦磨损性能的影响[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2006, 38(s): 239-241.
- Wu Jingxi, Ou Xuemei, Zhao Yulong, Ge Shirong. Effect of

- surface modification of wollastonite on abrasion and friction properties for composites[J]. *J. Harbin Inst. Tech.*, 2006, 38(s): 239-241. (in Chinese with English abstract)
- [89] 郑忠恒. 坡缕石矿物的提纯、纳米制备及其 PF 复合后的摩擦学性能研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2008.
Zheng Zhonghen. Purification and preparation of nano-palyorskite and the tribological study of its PF composite[D]. Guiyang: Guizhou University, 2008. (in Chinese with English abstract)
- [90] 雅重庆. 酚醛树脂/蛭石纳米复合材料及其在刹车片中的应用研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2008.
Ya Chongqing. Studies on phenolic resin/vermiculite nanocomposite and its application in frictional material[D]. Wuhan: Wuhan Univ. Tech., 2008. (in Chinese with English abstract)
- [91] 曹献坤, 梁磊, 姚安佑. 玻纤蛭石混杂增强摩擦制动材料的研制[J]. *材料开发与应用*, 2000, 15(2): 17-19.
Cao Xiankun, Liang Lei, Yao Anyou. Frictional brake material reinforced with glass fiber and vermiculite hybrid[J]. *Development and Application of Materials*, 2000, 15(2): 17-19. (in Chinese with English abstract)
- [92] 韩兴言. 纳米坡缕石/酚醛树脂共混制备方法及其摩擦材料性能研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2009.
Han Xingyan. Preparation of nano-palyorskite/phenolic resin blends and its properties as friction materials[D]. Guiyang: Guizhou University, 2009. (in Chinese with English abstract)
- [93] 侯越峰, 干路平, 黄海栋, 涂江平, 李春忠. 含片状纳米石墨粒子润滑油的制备及其摩擦学行为[J]. *华东理工大学学报*, 2005, 31(6): 743-746.
Hou Yuefeng, Gan Luping, Huang Haidong, Tu Jiangping, Li Chunzhong. Tribological properties of lubricating oil with sheet graphite nanoparticles[J]. *J. East China Univ. Sci. Tech.*, 2005, 31(6): 743-746. (in Chinese with English abstract)
- [94] 黄海栋. 片状纳米石墨和无机类富勒烯二硫化钼作为润滑油添加剂的摩擦学性能[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
Huang Haidong. Tribological properties of flake graphite and inorganic fullerene nanoparticles of molybdenum disulfide as lubricant additive [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006. (in Chinese with English abstract)
- [95] 朱红, 王淮英, 王芳辉. MoS_2 的表面修饰与摩擦学性能研究[J]. *润滑与密封*, 2006, (5): 91-92.
Zhu Hong, Wang Huaiying, Wang Fanghui. The Surface modification and tribological properties of MoS_2 [J]. *Lubr. Eng.*, 2006, (5): 91-92. (in Chinese with English abstract)
- [96] 陈文刚. 硅酸盐粉体作为添加剂对金属摩擦副磨损特性影响的研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2006.
Chen Wengang. Investigation on the characteristics of wear resistance using silicate particles as additive on the metal friction pairs[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2006. (in Chinese with English abstract)
- [97] 杨其明, 白志民. 超细蛇纹石粉体的材料特性、摩擦学介入行为及其工业应用[J]. *润滑与密封*, 2010, 35(9): 98-102.
Yang Qiming, Bai Zhimin. The material characteristic and tribological intervention behaviors of hyper-fine serpentine powder and its industrial application[J]. *Lubr. Eng.*, 2010, 35(9): 98-102. (in Chinese with English abstract)
- [98] 张博, 徐滨士, 许一, 王晓丽. 微纳多层状硅酸盐矿物润滑材料的摩擦学性能研究[J]. *中国表面工程*, 2009, 22(1): 29-32.
Zhang Bo, Xu Binshi, Xu Yi, Wang Xiaoli. Research on the tribological performance of micro-and nano-phylllosilicate mineral Lubricating Material[J]. *China Surf. Eng.*, 2009, 22(1): 29-32. (in Chinese with English abstract)
- [99] 张博, 徐滨士, 许一, 王晓丽, 张保森. 羟基硅酸镁对球墨铸铁摩擦副耐磨性能的影响及自修复作用[J]. *硅酸盐学报*, 2009, 37(4): 492-495.
Zhang Bo, Xu Binshi, Xu Yi, Wang Xiaoli, Zhang Baosen. Effect of magnesium silicate hydroxide on the friction behaviour of ductile cast iron pair and the self-repairing performance[J]. *J. Chin. Ceram. Soci.*, 2009, 37(4): 492-495. (in Chinese with English abstract)
- [100] 许一, 于鹤龙, 赵阳, 史佩京, 徐滨士. 层状硅酸盐自修复材料的摩擦学性能研究[J]. *中国表面工程*, 2009, 22(3): 58-61.
Xu Yi, Yu Helong, Zhao Yang, Shi Peijing, Xu Binshi. Study on tribological properties of stratified silicate self-repair materials[J]. *China Surf. Eng.*, 2009, 22(3): 58-61. (in Chinese with English abstract)
- [101] 郭延宝, 徐滨士, 马世宁, 许一. 羟基硅酸盐润滑油添加剂对 45# 钢/球墨铸铁摩擦副摩擦磨损性能的影响[J]. 2004, 26(6): 512-516.
Guo Yanbao, Xu Binshi, Ma Shining, Xu Yi. Effect of hydroxyl silicate particulates as an additive on the friction and wear behavior of 45 steel/ductile cast iron pair[J]. 2004, 26(6): 512-516. (in Chinese with English abstract)
- [102] 史佩京, 于鹤龙, 赵阳, 许一, 徐滨士, 白志民. 原位摩擦化学处理对 45 钢力学性能及摩擦学特性的影响[J]. *材料热处理学报*, 2007, 28(2): 113-117.
Shi Peijing, Yu Helong, Zhao Yang, Xu Yi, Xu Binshi, Bai Zhimin. Effects of in-situ tribochemical treatment on mechanical property and tribological behavior of 45 steel[J]. *Trans. Mat. Heat Treat.*, 2007, 28(2): 113-117. (in Chinese with English abstract)
- [103] 田斌, 王成彪, 岳文. 羟基硅酸铝润滑油添加剂对钢/铸铁摩擦副磨损性能的影响[J]. *润滑与密封*, 2006, (9): 135-140.
Tian Bin, Wang Chengbiao, Yue Wen. Effect of a cermet additive in lubricating oil on the wear performance of steel/cast iron friction pair[J]. *Lubr. Eng.*, 2006, (9): 135-140. (in Chinese with English abstract)
- [104] 杨鹤, 金元生, 山下一彦. $\text{Mg}_6[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_8$ 修复剂应用于滑动轴承的模拟试验研究[J]. *润滑与密封*, 2006, (7): 144-146.
Yang He, Jin Yuansheng, Shanxia Yihong. Experimental study of applying $\text{Mg}_6[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_8$ reconditioner to simulative journal bearing[J]. *Lubr. Eng.*, 2006, (7): 144-146. (in Chinese with English abstract)
- [105] 于鹤龙, 许一, 徐滨士. 超细矿物微粉改善 2 号坦克润滑脂摩擦学性能研究[J]. *装甲兵工程学院学报*, 2009, 23(2): 80-83.
Yu Helong, Xu Yi, Xu Binshi. Research on tribological

- properties of No. 2 tank grease improved by ultra-fine mineral micro-powder[J]. *J. Acad. Armored Force Eng.*, 2009, 23(2): 80-83. (in Chinese with English abstract)
- [106] 陈文刚. 矿石粉体作为自修复添加剂的摩擦学作用机理研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2008.
Chen Wengang. Investigation of tribological characteristics using ore powder as lubricant additive on metal friction pairs [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2008. (in Chinese with English abstract)
- [107] 张保森, 徐滨士, 许一, 吴毅雄, 张博. 蛇纹石微粉对球墨铸铁摩擦副的减摩抗磨作用机理[J]. *硅酸盐学报*, 2009, 37(12): 2037-2042.
Zhang Baosen, Xu Binshi, Xu Yi, Wu Yixiong, Zhang Bo. Friction reduction and anti-wear mechanism of serpentine micro powders for spheroidal graphite iron tribopair[J]. *J. Chin. Ceram. Soc.*, 2009, 37(12): 2037-2042. (in Chinese with English abstract)
- [108] 齐效文, 杨育林, 范兵利. 羟基硅酸镁粉体添加剂含量对金属表面自修复膜生成的影响及机制[J]. *润滑与密封*, 2007, (6): 46-49.
Qi Xiaowen, Yang Yusen, Fan Bingli. Influence and mechanism of the formation of self-repair coatings with magnesium Silicate hydroxide powder[J]. *Lubr. Eng.*, 2007, (6): 46-49. (in Chinese with English abstract)
- [109] 李生华, 伦增琨, 杨鹤, 金元生. 摩擦化学膜的成因与结构: 矿物质化学和有机质化学观点[J]. *润滑与密封*, 2005, (4): 148-157.
Li ShengHua, Lun Zengmin, Yang He, Jin Yuansheng. Views of mineralogical and organics chemistry on origin and structure of tribochemical films[J]. *Lubr. Eng.*, 2005, (4): 148-157. (in Chinese with English abstract)
- [110] 高玉周, 张会臣, 王亮, 陈文刚, 刘莎, 严立. 自修复材料在钢球磨损表面成膜的机理分析[J]. *大连海事大学学报*, 2005, 31(3): 62-65.
Gao Yuzhou, Zhang Huichen, Wang Liang, Chen Wengang, Liu Sha, Yan Li. Mechanical analysis of formation of auto-restoration coating on the worn surface of the GCr15 balls[J]. *Journal of Dalian Maritime University*, 2005, 31(3): 62-65. (in Chinese with English abstract)
- [111] 高玉周, 张会臣, 许晓磊, 王亮, 陈文刚. 硅酸盐粉体作为润滑油添加剂在金属磨损表面成膜的机制[J]. *润滑与密封*, 2006, (10): 39-42.
Gao Yuzhou, Zhang Huichen, Xu Xiaolei, Wang Liang, Chen Wengang. Formation mechanism of self-repair coatings on the worn metal surface using silicate particles as lubricant oil additive[J]. *Lubr. Eng.*, 2006, (10): 39-42. (in Chinese with English abstract)
- [112] 周培玉. 金属磨损自修复材料在铁路内燃机车柴油机上的应用试验[J]. *铁道机车车辆*, 2003, 23(5): 13-15.
Zhou Peiyu. Experiment on self-repairing metal material applied to diesel engine of locomotive[J]. *Railway Locomotive and CAR*, 2003, 23(5): 13-15. (in Chinese with English abstract)
- [113] 李桂金, 白志民, 黄卫俊, 鞠颖. 蛇纹石粉体表面改性研究[J]. *硅酸盐通报*, 2008, 27(6): 1091-1096.
Li Guijin, Bai Zhimin, Huang Weijun, Ju Ying. Research of serpentine powder surface modification[J]. *Bull. Chin. Ceram. Soc.*, 2008, 27(6): 1091-1096. (in Chinese with English abstract)
- [114] 高飞, 许一, 徐滨士, 张保森. 纳米羟基硅酸镁的原位表面修饰和二次表面修饰[J]. *中国表面工程*, 2010, 23(2): 82-85.
Gao Fei, Xu Yi, Xu Binshi. In-situ and secondary surface chemical modification of nano-scale hydroxyl magnesium silicate[J]. *China Surf. Eng.*, 2010, 23(2): 82-85. (in Chinese with English abstract)
- [115] 王毅. 蒙脱土表面改性及聚苯乙烯/蒙脱土纳米复合材料的制备和表征[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2003.
Wang Yi. Montmorillonite modification and polystyrene/montmorillonite nanocomposites synthesis and characterization [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2003. (in Chinese with English abstract)
- [116] 江曙. 环氧树脂/金云母纳米复合材料制备及表征[D]. 北京: 中国地质大学, 2006.
Jiang Shu. Preparation and characterization of epoxy resin/phlogopite nanocomposites[D]. Beijing: China Univ. Geosci., 2006. (in Chinese with English abstract)
- [117] 林浩. 高岭土补强丁苯橡胶的实验研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009.
Lin Hao. Experimental study of kaolin reinforcement SBR [D]. Wuhan: Wuhan Univ. Tech., 2009. (in Chinese with English abstract)
- [118] 冯威. 硬质聚氨酯泡沫塑料/层状硅酸盐复合材料的制备与性能研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2008.
Feng Wei. Preparation and properties of rigid polyurethane foam/layered silicate composites [D]. Wuhan: Wuhan Univ. Tech., 2008. (in Chinese with English abstract)
- [119] 王莹. 蒙脱石/环氧树脂(E-44、E-12)纳米复合材料制备及表征[D]. 北京: 中国地质大学, 2003.
Wang Ying. Preparation and major properties of montmorillonite/epoxy nanocomposites [D]. Beijing: China Univ. Geosci., 2003. (in Chinese with English abstract)
- [120] 许涛. 偏高岭石-聚合物复合材料的制备、表征及机理研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2003.
Xu Tao. Preparation, Characterization and mechanism of metakaolinite-polymer composites [D]. Wuhan: China Univ. Geosci., 2003. (in Chinese with English abstract)
- [121] 牛艳萍. 硅酸盐矿物/聚合物复合材料的制备及其界面机理的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2005.
Niu Yanping. Study on the preparation and interface mechanism of silicate mineral/polymer[D]. Wuhan: Wuhan Univ. Tech., 2005. (in Chinese with English abstract)
- [122] 唐华伟. PA6/PE/高岭土复合材料的制备及其界面特征的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007.
Tang Huawei. Study on the preparation and interface features of PA6/PE/kaolin[D]. Wuhan: Wuhan Univ. Tech., 2007. (in Chinese with English abstract)
- [123] 李宏鹏. 蛭石填充复合及成核剂改性尼龙 66 的制备与表征[D]. 郑州: 郑州大学, 2007.
Li Hongpeng. Preparation and characterization of PA66/vermiculite composites and PA66/nucleating agents composite[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2007. (in Chinese with English abstract)
- [124] 刘晓丽. 透闪石/尼龙 1010 复合材料性能研究[D]. 长春:

- 吉林大学, 2007.
Liu Xiaoli. Study on properties of tremolite/Nylon1010 composites[D]. Changchun: Jilin University, 2007. (in Chinese with English abstract)
- [125] 李珍, 姚书振, 沈上越, 陈红余. 纤维状硅灰石/聚丙烯复合材料界面性能研究[D]. 矿物岩石, 2005, (3): 67-70.
Li Zhen, Yao Shuzhen, Shen Shangyue, Chen Hongyu. Study on the interfacial properties between the fibrous wolastonite and the polypropylene composite material[D]. J. Mineral. Petrol., 2005, (3): 67-70. (in Chinese with English abstract)
- [126] 马国华, 彭同江. 水热法合成掺杂铁离子纤蛇纹石纳米管[J]. 无机化学学报, 2006, 22(9): 1663-1667.
Ma Guohua, Peng Tongjiang. Preparation of Fe-doped chrysotile nanotubes by hydrothermal method[J]. Chin. J. Inorg. Chem., 2006, 22(9): 1663-1667. (in Chinese with English abstract)
- [127] 马国华, 彭同江, 段涛. 纤蛇纹石纳米管的水热合成与表征[J]. 矿物岩石, 2007, 27(1): 401-405.
Ma Guohua, Peng Tongjiang, Duan Tao. A study of chrysotile asbestos nanotube synthesized by hydrothermal reaction[J]. J. Mineral. Petrol., 2007, 27(1): 401-405. (in Chinese with English abstract)
- [128] 马国华, 彭同江, 李明. 铁磁性 Cr^{3+} 掺杂纤蛇纹石纳米管的制备与表征[J]. 功能材料, 2009, 40(9): 1471-1476.
Ma Guohua, Peng Tongjiang, Li Ming. Preparation and characterization of ferromagnetic Cr^{3+} doped chrysotile nanotubes[J]. J. Funct. Materials, 2009, 40(9): 1471-1476. (in Chinese with English abstract)
- [129] 彭同江, 马国华, 焦永峰. 合成纤蛇纹石纳米管的 CdS 组装实验研究[J]. 功能材料, 2007, 38(3): 472-474.
Peng Tongjiang, Ma Guohua, Jiao Yongfeng. Experimental study on assembling CdS in chrysotile nano-tubes[J]. J. Funct. Materials, 2007, 38(3): 472-474. (in Chinese with English abstract)
- [130] 类延达, 陈锋, 刘晓亮, 万晶晶, 邹全亮, 杜明亮, 郭宝春, 贾德民. 硅烷偶联剂改性埃洛石纳米管的表征和增强丁苯橡胶的研究[J]. 特种橡胶制品, 2009, 30(1): 1-4.
Lei Yanda, Chen Feng, Liu Xiaoliang, Wan Jingjing, Zou Quanliang, Du Mingliang, Guo Baochun, Jia Demin. Characterizations of halloysite nanotubes modified with Si69 and the study on the reinforced styrene-butadiene rubber[J]. Special Purpose Rubber Products, 2009, 30(1): 1-4. (in Chinese with English abstract)
- [131] 杨树颜, 贾志欣, 罗远芳, 贾德民, 郭宝春. 埃洛石纳米管/甲基丙烯酸锌并用补强 SBR 的研究[J]. 橡胶工业, 2009, 56(8): 453-458.
Yang Shuyan, Jia Zhixin, Luo Yuanfang, Jia Demin, Guo Baochun. Reinforcement of SBR by HNTs/ZDMA blend[J]. China Rubber Industry, 2009, 56(8): 453-458. (in Chinese with English abstract)
- [132] 黄志方, 贾志欣, 郭宝春, 贾德民. PBT/埃洛石纳米管复合材料的结构与性能[J]. 塑料工业, 2008, (5): 29-31.
Huang Zhifang, Jia Zhixin, Guo Baochun, Jia Demin. Structure and property of PBT/halloysite nano-tube composite[J]. China Plastics Industry, 2008, 36(5): 29-31. (in Chinese with English abstract)
- [133] 曹艳霞, 袁阳照, 严欣兵, 王万杰, 王经武, 陈荣峰. 聚环氧乙烷/埃洛石纳米管复合材料的热稳定性和燃烧性质[J]. 高分子通报, 2010, 4: 74-77.
Cao Yanxia, Yuan Yangzhao, Yan Xinbing, Wang Wanjie, Wang Jingwu, Chen Rongfeng. Thermal stability and flame retardant effects of halloysite nanotubes on poly(ethylene oxide)[J]. Polymer Bulletin, 2010, 4: 74-77. (in Chinese with English abstract)
- [134] 陈卫丰, 肖敏, 王拴紧, 闻立时, 孟跃中. 全降解聚甲基乙撑碳酸酯/埃洛石纳米管复合材料的制备与性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2010, 26(2): 142-145.
Chen Weifeng, Xiao Min, Wang Shuanjin, Wen Lishi, Meng Yuezhong. Preparation and properties of poly(propylene carbonate)/halloysite nanotubes composites[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2010, 26(2): 142-145. (in Chinese with English abstract)
- [135] 乔梅英, 张冰, 刘金盾, 张浩勤, 杨方, 陈荣峰. 以埃洛石纳米管为载体合成 NiO 纳米微粒的研究[J]. 人工晶体学报, 2008, 37(3): 749-752.
Qiao Meiyong, Zhao Bing, Liu Jindun, Zhang Haoqin, Yang Fang, Chen Rongfeng. Preparation nickel oxide nanoparticles on halloysite nanotubes[J]. J. Syn. Crystals, 2008, 37(3): 749-752. (in Chinese with English abstract)
- [136] 张大斌, 周元康, 杨绿, 王满力. 共混法制备酚醛树脂纳米坡缕石复合材料及其摩擦学性能[J]. 润滑与密封, 2010, 35(2): 52-55.
Zhang Dabin, Zhou Yunkang, Yang Lv, Wang Manli. Tribological behavior of friction materials based on palygorskite nanometer/phenolic composite resin with solution mixing[J]. Lubr. Eng., 2010, 35(2): 52-55. (in Chinese with English abstract)
- [137] 彭书传, 谢晶晶, 庆承松, 陈天虎, 徐惠芳, 陈菊霞, 袁君. 负载 TiO_2 凹凸棒石光催化氧化法处理酸性品红染料废水[J]. 硅酸盐学报, 2006, 34(10): 1208-1212.
Peng Shuchuan, Xie Jingjing, Qing Chengsong, Chen Tianhu, Xu Huifang, Chen Juxia, Yuan Jun. Photocatalysis oxidation process of acid fuchsine dyestuff wastewater by titania coated palygorskite[J]. J. Chin. Ceram. Soc., 2006, 34(10): 1208-1212. (in Chinese with English abstract)
- [138] 杨勇辉, 孙红娟, 彭同江, 黄桥. 石墨烯薄膜的制备和结构表征[J]. 物理化学学报, 2011, 27(3): 736-742.
Yang Yonghui, Sun Hongjuan, Peng Tongjiang, Huang Qiao. Synthesis and structural characterization of graphene-based membranes[J]. Acta Phys. Chim. Sin., 2011, 27(3): 736-742. (in Chinese with English abstract)
- [139] 吕岩, 王志永, 张浩, 房进, 曹高萍, 施祖进, 王碧燕. 电弧法制备石墨烯的孔结构和电化学性能研究[J]. 无机材料学报, 2010, 25(7): 725-728.
Lv Yan, Wang Zhiyong, Zhang Hao, Fang Jin, Cao Gaoping, Shi Zujin, Wang Biyan. Pore structures and electrochemical properties of graphene prepared by arc discharge method[J]. J. Inorg. Materials, 2010, 25(7): 725-728. (in Chinese with English abstract)
- [140] 马文石, 周俊文, 程顺喜. 石墨烯的制备与表征[J]. 高校化学工程学报, 2010, 24(4): 719-722.
Ma Wenshi, Zhou Junwen, Cheng Shunxi. Preparation and characterization of graphene[J]. J. Chem. Eng. Chin.

- Univ., 2010, 24(4): 719-722. (in Chinese with English abstract)
- [141] 杜庆来, 张立逢, 郑明波, 曹洁明, 王少刚. 功能型单层石墨烯的热剥离法制备及其超电容性能[J]. 化学研究, 2010, 21(3): 18-22.
Du Qinglai, Zhang Lifeng, Zheng Mingbo, Wang Shaogang. Preparation of functionalized graphene sheets by thermal exfoliation approach and their electrochemical supercapacitive behavior[J]. Chemical Research, 2010, 21(3): 18-22. (in Chinese with English abstract)
- [142] 李素芳, 查文珂, 方建军, 鲁盛会, 从洪云, 陈俊芳. 石墨烯烟幕红外激光消光性能研究[J]. 红外技术, 2010, 32(6): 366-370.
Li Sufang, Zha Wenke, Fang Jianjun, Lu Shenghui, Cong Hongyun, Chen Junfang. Extinction characteristic of graphene smoke to infrared and laser wave[J]. Infrared Tech., 2010, 32(6): 366-370. (in Chinese with English abstract)
- [143] 吴小琴, 宗瑞隆, 牟豪杰, 朱永法. 石墨烯负载Pt催化剂的催化氧化发光性能[J]. 物理化学学报, 2010, 26(11): 3002-3008.
Wu Xiaoqin, Zong Ruilong, Mu Haojie, Zhu Yongfa. Cataluminescence performance on catalysts of graphene supported platinum[J]. Acta Physico-Chimica Sinica, 2010, 26(11): 3002-3008. (in Chinese with English abstract)
- [144] 张晓艳, 李浩鹏, 崔晓莉. TiO_2 /石墨烯复合材料的合成及光催化分解水产氢活性[J]. 无机化学学报, 2009, 25(11): 1903-1907.
Zhang Xiaoyan, Li Haopeng, Cui Xiaoli. Preparation and photocatalytic activity for hydrogen evolution of TiO_2 /graphene sheets composite[J]. Chin. Inorg. Chem., 2009, 25(11): 1903-1907. (in Chinese with English abstract)
- [145] 周丽春, 吴伟端, 赵煌. 纳米二硫化钼的制备与表征[J]. 电子显微学报, 2004, (6): 618-620.
Zhou Lichun, Wu Weidun, Zhao Huang. Preparation and characterization of nanoscaled molybdenum disulfide[J]. J. Chin. Electron Microsc. Soc., 2004, (06): 618-620. (in Chinese with English abstract)
- [146] 宋旭春, 徐铸德, 陈卫祥, 郑遗凡, 韩贵. 无机类富勒烯 MoS_2 纳米材料的制备与表征[J]. 化学物理学报, 2004, (5): 629-632.
Song Xuchun, Xu Zhude, Chen Weixiang, Zheng Yifei, Han Gui. Preparation and characterization of inorganic fullerene-like MoS_2 nano-material [J]. Chin. J. Chem. Phys., 2004, (5): 629-632. (in Chinese with English abstract)
- [147] 陈云霞, 冯治中, 刘维民. 纳米 MoS_2 薄膜的浸涂-热解法制备和摩擦学性能研究[J]. 摩擦学学报, 2002, (2): 85-87.
Chen Yunxia, Feng Zhizhong, Liu Weimin. Preparation and investigation of tribological properties of nano MoS_2 thin films prepared by dip coating-thermolysis[J]. Tribology, 2002, (2): 85-87. (in Chinese with English abstract)
- [148] 胡献国, 胡坤宏, 韩效钊. 超细润滑级二硫化钼颗粒形态的控制[J]. 材料导报, 2004, (8): 274-276.
Hu Xianguo, Hu Kunhong, Liu Xiaozhao. Morphology-controlled synthesis of lubricative molybdenum disulfide ultrafined particles[J]. Materials Review, 2004, (8): 274-276. (in Chinese with English abstract)
- [149] 沃恒洲, 胡坤宏, 胡献国. 纳米二硫化钼作为机械油添加剂的摩擦学特性研究[J]. 摩擦学学报, 2004, (1): 33-36.
Wo Hengzhou, Hu Kunhong, Hu Xianguo. Tribological properties of MoS_2 nanoparticles as additive in a machine oil [J]. Tribology, 2004, (1): 33-36. (in Chinese with English abstract)
- [150] 田言, 任南琪, 冯玉杰. 表面修饰纳米二硫化钼粒子的研制及极压性能[J]. 科技导报, 2007, (7): 26-31.
Tian Yan, Ren Nanqi, Feng Yujie. Preparation of modified nano-molybdenum bisulfide and their properties at extreme-pressure condition[J]. Sci. Tech. Rev., (7): 26-31. (in Chinese with English abstract)
- [151] 刘钦甫, 张玉德, 李和平, 吉雷波, 张乾. 纳米高岭土/橡胶复合材料的性能研究[J]. 橡胶工业, 2006, 53(9): 525-529.
Liu Qinpu, Zhang Yude, Li Hepin, Ji Leibo, Zhang Qian. Study on properties of nanokaolin/rubber composites[J]. China Rubber Industry, 2006, 53(9): 525-529. (in Chinese with English abstract)
- [152] 孙红娟, 刘颖, 彭同江. TiO_2 /蒙脱石纳米复合物中 TiO_2 的结构相变[J]. 无机化学学报, 2011, 27(3): 403-408.
Sun Hongjuan, Liu Ying, Peng Tongjiang. Phase transition of TiO_2 in TiO_2 /montmorillonite nanocomposites[J]. Chin. J. Inorg. Chem., 2011, 27(3): 403-408 (in Chinese with English abstract)
- [153] 孙红娟, 彭同江, 陈彦琴, 古朝建. TiO_2 /蒙脱石层间化合物的制备及层间原位反应过程研究[J]. 化学学报, 待刊.
Sun Hongjuan, Pengtongjiang, Chen Yancui, Gu Chaojian. Preparation and in situ reaction study on TiO_2 /montmorillonite intercalation compounds[J]. Acta Chimica Sinica. (in press)
- [154] 孙红娟, 彭同江, 刘颖. 蒙脱石的晶体化学式计算与分类[J]. 人工晶体学报, 2008, 37(2): 350-355.
Sun Hongjuan, Peng Tongjiang, Liuying. Calculation of crystal chemical formula of montmorillonite and classification[J]. J. Syn. Crystals, 2008, 37(2): 350-355. (in Chinese with English abstract)
- [155] 孙红娟, 刘颖, 彭同江, 岳美琼. 锂皂石的水热合成与表征[J]. 人工晶体学报, 2008, 37(4): 843-848.
Sun Hongjuan, Liuying, Peng Tongjiang, Yue Meiqiong. Hydrothermal Synthesis and Characterization of Heetorite [J]. J. Syn. Crystals, 2008, 37(4): 843-848. (in Chinese with English abstract)
- [156] 孙红娟, 彭同江, 刘颖. 含膨胀性晶层的层状硅酸盐矿物层电荷表征方法及原理[J]. 矿物学报, 2007, (1): 19-24.
Sun Hongjuan, Peng Tongjiang, Liu Ying. Measurement and mechanism of layer charge of phyllosilicate with expansive layers[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2007, (1): 19-24. (in Chinese with English abstract)
- [157] 漆宗能, 尚文宇. 聚合物/层状硅酸盐纳米复合材料理论与实践[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
Qi Zongneng, Shang Wenyu. Polymer/ Theory and practice of layered silicate nanocomposites[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002. (in Chinese)
- [158] 肖诚斌, 张泽朋, 刘建辉, 张治平. 氯丁橡胶/蒙脱石纳米复合材料的研制[J]. 材料导报, 2006: 208-210.

- Xiao Chengbin, Zhang Zepeng, Liu Jianhui, Zhang Zhiping. Preparation of neoprene/montmorillonite nanocomposite[J]. *Materials Review*, 2006; 208—210. (in Chinese with English abstract)
- [159] 王磊, 夏华. 聚乳酸/蒙脱石纳米复合材料的制备与表征[J]. *化工新型材料*, 2008, (36): 23—24.
Wang Lei, Xia Hua. Preparation and characterization of polylactide acid/montmorillonite nanocomposite [J]. *New Chemical Materials*, 2008, (36): 23—24. (in Chinese with English abstract)
- [160] 陆昶, 黄新辉, 邢艳艳, 陈权, 刘继纯, 张玉清. SMA/蒙脱石纳米复合材料增容 PA6/ABS 共混体系[J]. *高分子学报*, 2010, 4: 402—406.
Lu Chang, Huang Xinhui, Xing Yanyan, Chen Quan, Liu Jichun, Zhang Yuqing. Compatibility of PA6/ABS blends with SMA/montmorillonite nanocomposites[J]. *Acta Polymerica Sinica*, 2010, 4: 402—406. (in Chinese with English abstract)
- [161] Zhang Zepeng, Liao Libing, Xia Zhiguo. Ultrasound-assisted preparation and characterization of anionic surfactant modified montmorillonites[J]. *Applied Clay Science*, 2010, 50(4): 576—581.
- [162] 孙金梅, 彭同江, 孙红娟. 有机蛭石的制备与应用研究现状[J]. *材料导报*, 2007, 21(3): 50—53.
Sun Jinmei, Peng Tongjiang, Sun Hongjuan. Review on the preparation of organic vermiculite and its application[J]. *Materials Review*, 2007, 21(3): 50—53. (in Chinese with English abstract)
- [163] 孙金梅, 彭同江, 孙红娟. 有机蛭石的制备及其层间插层剂排布模式研究[J]. *矿物学报*, 2009, 29(2): 51—52.
Sun Jinmei, Peng Tongjiang, Sun Hongjun. Study on the modification of Xinjiang vermiculite by pillaring a series of quaternary ammonium[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2009, 29(2): 51—52. (in Chinese with English abstract)
- [164] Zhang Zepeng, Liu Jianhui, Liao Libing, Xiao Chengbin, Li Rui, Zhang Zhiping. Preparation and properties of chloroprene rubber/vermiculite nanocomposites [J]. *Key Engineering Materials*, 2007, 334—335: 833—836.
- [165] 刘文霞, 张宝述, 孙红娟, 彭同江. 熔融插层制备聚苯乙烯/蛭石纳米复合材料的结构与性能研究[J]. *化工新型材料*, 2010, 38(3): 82—84.
Liu Wenxia, Zhang Baoshu, Sun Hongjuan, Peng Tongjiang. Study on structure and properties of melt intercalated polystyrene/vermiculite nanocomposites [J]. *New Chemical Materials*, 2010, 38(3): 82—84. (in Chinese with English abstract)
- [166] 何珺. 聚乳酸/蛭石纳米复合材料的原位聚合与性能研究[J]. *化工新型材料*, 2009, 37(6): 74—76.
He Jun. Novel poly(lactic acid)/vermiculite nanocomposites by in situ intercalative polymerization [J]. *New Chemical Materials*, 2009, 37(6): 74—76. (in Chinese with English abstract)
- [167] 张坤, 徐静, 王瑞, 陈昊. 微波辅助原位聚合法制备聚乳酸/蛭石纳米复合材料[J]. *高分子材料科学与工程*, 2009, 25(11): 162—164.
Zhang Kun, Xu Jing, Wang Rui, Chen Hao. Microwave-assisted synthesis of polylactide acid/vermiculite nanocomposites via in-situ polymerization[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2009, 25(11): 162—164. (in Chinese with English abstract)
- [168] 张辉, 赵晓峰, 唐清, 李文超. 在乙醇介质中制备 SiO₂ 光子晶体及其表征[J]. *北京科技大学学报*, 2002, 24(2): 157—160.
Zhang Hui, Zhao Xiaofeng, Tang Qing, Li Wenchao. Preparation and characterization of silica photonic crystals made from ethanol[J]. *J. Univ. Sci. Tech. Beijing*, 2002, 24(2): 157—160. (in Chinese with English abstract)
- [169] 李明海, 马颀, 徐岭, 张宇, 马飞, 黄信凡, 陈坤基. 二氧化硅人工蛋白石晶体(opal)的制备及其结构性质的研究[J]. *物理学报*, 2003, 52(5): 1302—13068.
Li Minghai, Ma Si, Xu Ling, Zhang Yu, Ma Fei, Huang Xinfan, Chen Kunji. Formation and structure of artificial opal based on the colloidal silica sphere[J]. *Acta Physica Sinica*, 2003, 52(5): 1302—13068. (in Chinese with English abstract)
- [170] 段涛, 彭同江, 唐永建, 陈吉明. 热处理温度对蛋白石晶体的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2008, 20(9): 1495—1498.
Duan Tao, Peng Tongjiang, Tang Yongjiang, Chen Jiming. Effects of heat treatment temperature on morphology and properties of opal crystal[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, 20(9): 1495—1498. (in Chinese with English abstract)
- [171] 冀志宏, 韩伟健, 叶丽, 姜言彬, 李昊, 赵彤. 碳化硅反蛋白石光子晶体的制备及表征[J]. *化学学报*, 2010, 68(15): 1545—1548.
Ji Zhihong, Han Weijian, Ye Li, Jiang Yanbin, Li Hao, Zhao Tong. Preparation and characterization of SiC inverse opal photonic crystal[J]. *Acta Chimica Sinica*, 2010, 68(15): 1545—1548. (in Chinese with English abstract)
- [172] 陈友俊, 傅正平, 杨磊芳. 电沉积法制备 Cu₂O 与 ZnO 反蛋白石的复合材料[J]. *中国科学技术大学学报*, 2010, 40(1): 53—57.
Chen Youjun, Fu Zhengpin, Yang Beifang. Cu₂O and ZnO inverse opal composite materials fabricated by electrodeposition[J]. *J. Univ. Sci. Tech. China*, 2010, 40(1): 53—57. (in Chinese with English abstract)
- [173] 涂圣义, 许静, 谢凯, 李宇杰, 梁国杰, 李运鹏. 电化学沉积制备二氧化钒反蛋白石光子晶体[J]. *人工晶体学报*, 2008, 37(4): 913—917.
Tu Shengyi, Xu Jing, Xie Kai, Li Jieyu, Liang Guojie, Li Yunpeng. Fabrication of VO₂ inverse opal photonic crystal by electrodeposition[J]. *J. Syn. Crystals*, 2008, 37(4): 913—917. (in Chinese with English abstract)
- [174] 李宇杰, 谢凯, 李效东, 许静, 韩喻, 杜盼盼. 低温等离子体增强化学气相沉积法制备 Ge 反 opal 三维光子晶体及其光学性能[J]. *物理学报*, 2010, 59(3): 1839—1846.
Li Yujie, Xie Kai, Li Xiaodong, Xu Jing, Han Yu, Du Panpan. Fabrication of germanium inverse opal three-dimensional photonic crystal by low temperature plasma enhanced chemical vapour deposition techniques and optical properties [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(3): 1839—1846. (in Chinese with English abstract)