

# 全球第四次工业革命前景下的应用矿物学进展 (2011—2020)

董发勤, 谭道永, 王进明, 徐龙华, 李旭娟, 丁文金, 胡志波, 黄腾

西南科技大学, 固体废物处理与资源化教育部重点实验室, 四川 绵阳 621010

**摘要:** 本文从冶金-工艺矿物学和矿物原料加工、新型工业矿物和岩石(宝石)、特种功能矿物材料、仿生矿物材料、生物矿物学、文化遗产和文物保护、矿物基固废处理与资源化利用、矿山及周边土壤污染修复 8 个领域综述了近十年应用矿物学研究进展, 总结归纳了这些领域的相关重大进展, 并提出了应用矿物学在第四次工业革命浪潮下的 7 个重要发展方向。

**关键词:** 应用矿物学; 工业矿物和岩石; 非金属矿; 矿物资源; 纳米矿物; 矿山污染修复

中图分类号: P579 文章编号: 1007-2802(2021)02-0290-15 doi:10.19658/j.issn.1007-2802.2020.39.093

## Recent Advances of Applied Mineralogy under the Global Tide of Fourth Industrial Revolution (2011–2020)

DONG Fa-qin, TAN Dao-yong, WANG Jin-ming, XU Long-hua, LI Xu-juan, DING Wen-jin,  
HU Zhi-bo, HUANG Teng

Key Laboratory of Solid Waste Treatment and Resource Recycle, Ministry of Education, Southwest University of Science and  
Technology, Mianyang Sichuan 621010, China

**Abstract:** In this paper, we have comprehensively reviewed the research progresses of applied mineralogy in the last decade, mainly in aspects of metallurgical-technological mineralogy and processing of mineral raw materials, new industrial minerals and rocks (gems), specific functional mineral materials, biomimetic mineral materials, biomimetic mineralogy, cultural heritage and cultural relics preservation, treatment and resource utilization of mineral based solid waste, and remediation of polluted soils in the mine and adjacent areas. Especially, we have summarized some relevant important processes in the abovementioned fields of applied mineralogy. Seven important development directions of applied mineralogy under the global tide of Fourth Industrial Revolution has been prospected.

**Key words:** applied mineralogy; industrial minerals and rocks; non-metallic minerals; mineral resources; nano-minerals; remediation of pollution in the mine

## 0 引言

人类社会的发展史也是人类认识和利用矿物的历史。随着社会生产力和科技的进步, 人类对矿物的认识和应用逐步深入和精细, 人类社会也由石器时代、铜器时代、铁器时代、“新石器时代”等逐步发展并不断向前推进(董发勤, 2015)。人类社会对矿物资源的开发利用主要体现在三个方面: 一是提

取矿物中的有价元素(如金属矿产矿物); 二是利用矿物中的能量(如能源矿产矿物); 三是直接利用矿物本身的物化性能(如非金属矿产矿物)。这直接衍生了应用矿物学学科。

应用矿物学是矿物科学与工程的一个分支, 它是以研究矿物本身的整体应用为目的, 以矿物的化学成分和晶体结构为根本, 研究矿物的物化性质及其与成分结构的关系和内在机理; 探索矿物性能应

用和优化的方法和工艺,以便矿物在更广领域得到更充分的开发和应用。矿物应用涉及建材、冶金、化工、交通、机械、轻工等传统产业领域以及电子信息、生物医药、新能源、新材料、航空航天航海、宇宙深地深海探测等高新技术产业。矿物资源高效利用是当前地球科学与材料科学、环境科学等学科交叉的研究热点,是实现生态文明建设和社会可持续发展的重要前提,是构建人类命运共同体的重要资源构成部分,是全球共同关注的焦点。

国际矿物学协会(International Mineralogical Association, IMA)于1979年设立应用矿物学委员会(Commission for Applied Mineralogy),并于1981年举办了第一届国际应用矿物学大会(International Congress for Applied Mineralogy, ICAM),现在每两年召开一次,迄今共举办了14次,已成为应用矿物学领域全球最大规模的专业学术会议。会议旨在为从事应用矿物学的相关研究人员提供成果展示平台,加强应用矿物学领域的国际学术交流与合作,促进应用矿物学的发展。国内从事应用矿物学相关研究的科研院所和研究团队亦如雨后春笋般发展壮大,并取得了丰硕的成果、培养了大量的人才。非金属矿物资源高效利用专业委员会于2019年经中国矿物岩石地球化学学会批准成立,主要致力于非金属矿物的“政-产-学-研-用”全面发展。可以说,应用矿物学在国内外已经蓬勃发展起来了!

本文就近十年来国际ICAM大会持续活跃的8个领域进行总结,包括冶金-工艺矿物学和矿物原料加工、新型工业矿物和岩石(宝石)、特种功能矿物材料、仿生矿物材料、生物矿物学、文化遗产和文物保护、矿物基固废处理与资源化利用、矿山及周边土壤污染修复,并就未来应用矿物学发展方向进行了展望。

## 1 冶金-工艺矿物学和矿物原料加工

### 1.1 冶金矿物学

近十年来,冶金矿物学在矿物的工艺性质、测试方法及提高冶金产品质量等方面取得了显著进展。通过原料的矿物学工艺特性及冶金性能关系研究,设计优化原料矿物对应合理的冶金预处理、冶金过程和渣相构成,相关研究集中在复杂含铜矿物、含铁矿物、稀土矿物、含钒矿物和冶金渣矿物相方面。

在湿法冶金方面,Barton等(2018)研究了内华达州某Cu-Au(Zn)矿的冶金矿物学特性,比较了6种浸出剂对原矿中铜的浸出效果。结果表明,砷钙

铜矿和含铜的铁氧化物未能在各种浸出剂中完全溶解,是铜回收率低的主要原因。国内张一敏团队在对石煤提钒的研究中发现,钒主要以三价类质同象形式赋存于白云母类矿物中,方解石、黄铁矿、磷灰石和赤铁矿等耗酸脉石矿物是石煤提钒工艺中的主要有害杂质;原矿中的含钒云母多呈层片状或条状与石英紧密连生或嵌布于石英脉中,导致钒浸出率不高,增加硫酸(浸出剂)浓度,能有效提高钒的浸出率并降低溶液中钒的损失(蒋谋锋等,2015)。此外,该团队开发的重-浮联合预抛尾工艺,将最终精矿 $V_2O_5$ 品位提高至1.01%, $V_2O_5$ 回收率达87.60%,较好地实现了提高酸浸给矿 $V_2O_5$ 品位、降低酸浸作业矿量及耗酸矿物含量的目标(刘鑫等,2017)。邱廷省团队研究了某离子型稀土矿浸出前后工艺矿物学,结果表明浸出后的Al、REE、Fe、O元素含量下降,K、Si含量相对上升,Al减少的主要原因是高岭石、褐铁矿部分的溶解,金云母在浸出后全部消失。Fe减少的主要原因是浸出后稀土矿中的水合铁离子进入到溶液中(刘庆生等,2019)。

在火法冶金方面,Tanii等(2014)研究了炼铁原料铁砂的矿物学特性对炼铁产品的影响,发现其根源在于铁砂原矿中铁氧化物所含 $TiO_2$ 固溶体和赤铁矿含量是不同的,最终影响铁砂还原初始温度和还原过程中形成的矿物种类。牛乐乐等(2019)研究了铁矿粉矿物组成对烧结矿冶金性能的影响,通过微观矿物定量分析、微观矿相结构研究,发现赤铁矿、石英的出现能促使软化起始温度升高,赤铁矿有利于烧结矿的还原,针铁矿更易使产物中生成针状铁酸钙,高岭石分解产生的 $SiO_2$ 形成硅酸盐相。向小平等(2020)对柳钢烧结机台车截面烧结矿的矿物学以及上、下层烧结矿的化学成分和显微结构的研究表明,各层烧结矿中的FeO质量分数和碱度波动很大;上层烧结矿多以赤铁矿连晶为主,铁酸钙相较少;中层烧结矿铁酸钙最多,多呈理想的针状形态;下层烧结矿中的铁酸钙生成量比中部略少。冯聪等(2016)研究了钒钛磁铁矿冶炼工艺中低、中、高含钛炉渣的物相变化情况,发现渣系热稳定性和化学稳定性先变好后变差,渣中黄长石相骤减,辉石、钙钛矿相数量增多。黄毅等(2014)对典型钢渣研究表明,转炉钢渣的主要物相是硅酸钙相、铁酸钙相、RO相和f-CaO相;电炉氧化渣出现了明显的橄榄石相;精炼渣主要成分为CaO、 $Al_2O_3$ 、MgO和 $SiO_2$ ,研究成果为钢渣的分类综合利用起到了指导作用。孙永升等(2015)研究了温度对鲕状

赤铁矿石深度还原特性的影响,在 1 312 ℃ 条件下,反应产生的 FeO 会与脉石矿物继续反应,生成铁橄榄石和尖晶石;通过控制还原温度可以调控物相转变和微观结构的破坏;还原温度越高,还原产物的物相组成越简单。

在生物冶金方面的研究主要集中在微生物品种优化、矿物中供能物质的作用与微生物组合效应方面。Nie 等(2019)通过同步辐射 X 射线衍射和硫 K 边 X 射线吸收近边结构光谱等技术研究了 *Acidianus manzaensis* 菌对不同晶体结构黄铜矿的浸出作用,查明了不同晶体结构黄铜矿浸出后相态的转变规律。Liu 等(2015)研究了黄铜矿在中性嗜热硫杆菌生物浸出过程中铜、铁、硫相态的 X 射线近边结构吸收光谱,对浸出后矿物表面组份进行了原位定量矿物学分析,结果查明了黄铜矿生物浸出的溶解机理。Ma 等(2017)开展了铁硫氧化微生物共培养体系中微生物配比对黄铜矿浸出效果的研究,结果显示硫化物比例高的体系中拥有更好的浸出效果,这表明构建高效的共培养体系需要功能微生物特定比例的组合,也说明硫代谢在生物冶金微生物代谢功能网络中的重要性。

## 1.2 工艺矿物学

工艺矿物学的研究已进入微观层面,并朝着定量化和自动化方向发展。工艺矿物学参数自动测定系统(QEMSCAN)、自动矿物分析仪(MLA)、矿物表征自动定量分析系统(AMICS)和矿物模块化自动处理系统(MAPS Mineralogy)是目前工艺矿物学研究的最新手段。

QEMSCAN 测试系统的出现,是工艺矿物学领域所取得的新成就。该系统实现了解离度测定自动化,并大幅提升了解离度测定的准确性和可重现性。Nazari 等(2017)利用该系统和溶解诊断过程对难溶金进行了研究,结果发现金的难溶是因为银金矿、碲化金与其它硫化矿微细粒嵌布,金主要赋存于硫化矿物包裹体中,通过焙烧破坏包裹体可大幅提升金的浸出率。Guanira 等(2020)利用 QEMSCAN 对铜(金、银)矽卡岩型矿床尾矿进行分析,快速得到脉石矿物、粒度分布和矿物组合等信息,对该尾矿污染环境的潜在可能性进行了评价。

杨帆等(2020)利用 MLA 对煤灰的矿物学特性进行了分析,测试了含铀煤灰性质以及颗粒粒度,分析了铀矿物的解离程度及连生关系。Al-Khribash(2020)利用 MLA 对阿曼北部山区低品位红土镍矿进行了分析,得到了矿床的粒度、矿物组成、矿物间关系度等,提出了降低冶金操作成本、提高金属回

收率的方法。

AMICS 主要用于测定脉状矿物的矿物组成、粒度和嵌布特征,能够实现常规岩矿鉴定手段难以完成的矿物定量识别和鉴定。温利刚等(2018)采用 AMICS 测量了云南武定稀土矿物的种类和含量。方明山和王明燕(2018)运用 AMICS 分析了铜矿中的伴生金银的赋存状态,查明了该矿石中金银矿物的种类、金银矿物的嵌布特征和嵌布粒度,以及影响回收的最主要因素。

此外,激光消溶微探针感应耦合等离子体质谱可以进行痕量检测,能够更加准确和深入地研究元素的赋存状态,也是工艺矿物学研究向微观层面迈进的推动力。二次离子质谱分析技术使矿物表面特性及其变化研究更方便可靠。这两种技术在稀贵金属的赋存状态研究方面发挥了重要作用,已成为工艺矿物学研究的重要手段。

## 1.3 矿物原料加工

应用矿物学在矿物原料加工方面具有突出的支撑作用,它有利于查明矿物原料加工过程中存在问题的微观症结,为矿物原料加工指标的提高开辟了有针对性的工艺路线。这在矿物超细加工、超纯净化、矿物表面改性及矿物分选等方面都有集中体现。

在矿物超细加工方面,Wang 等(2020)采用两步法制备高纯度、超细 WC-Co 复合粉体,制备过程中采用 X 射线衍射、场发射扫描电子显微镜、红外碳硫仪等矿物学研究方法,研究了所制备粉体的物相组成、形貌和碳含量,并严格测量了颗粒大小,给超细 WC-Co 复合粉体制备提供了有力指导。Li 等(2017)研究了煤在气流磨中的超细粉碎,利用偏光显微镜和扫描电镜研究了原料的物相和形态特征,原生菱铁矿颗粒尺寸较大(70~100 μm),而黏土矿物颗粒非常细,呈较细的浸染状分布(约 2 μm)。要实现矿物和煤的完全解离,需要更细的粒度,从而制定了合理气流速度和相对压力参数。

高纯矿物原料加工有很大的挑战性。高纯石英具有非常重要的用途,但石英中微量杂质的剔除仍是一个难题。吴道等(2017)对青海某石英原料的分析发现,微细粒白云母是该矿中的主要杂质矿物,片径多在数十微米,紧密镶嵌在石英晶粒之间。微区成分分析表明,Al 和 K 杂质元素主要赋存于白云母中。制备高纯石英的关键是石英和白云母的解离并分离。因此通过十二胺反浮选白云母,浮选精矿进行加温酸浸,可较好地除去各种杂质,石英纯度可达 99.99%。

邵秋月等(2019)对硅灰石的表面改性及新型矿物基聚合物的合成进行研究,用扫描电镜对改性前后的硅灰石的表面形貌进行对比,发现改性前硅灰石表面光滑、改性后表面有新的附着物出现。不同改性条件下,硅灰石经过浓度较高的改性剂处理,其表面的包覆层更加完整,改性效果更好。

Cabri等(2017)对比了两种不同成矿类型铂族含镍矿体的矿物学及加工潜力差异,发现第一种矿体矿物嵌布粒度粗易于磨矿和浮选加工,而第二种只能进行湿法冶金才能回收有价金属,从而采用不同的加工方法,将该低品位矿物高效回收。Wei等(2019)研究了黄铜矿不同解理面的反应活性差异,揭示了黄铜矿新鲜解理面与 $O_2$ 和 $H_2O$ 的原位非均相反应机理和矿浆中常见“难免离子”对黄铜矿浮选的影响机理。

## 2 新型工业矿物和岩石(宝石)

工业矿物和岩石是除金属矿产与燃料矿产以外,化学组成或物理性能可为工业利用而具有经济价值的所有非金属矿物和岩石(陈正国等,2019),其研究应用范围近年来也在逐渐拓展。如水镁石和纤维水镁石既可作为提取镁的重要原料之一,又可作为阻燃增强材料,适用于防火涂层、造纸工业、环保等领域(秦雅静和朱德山,2014)。叶蜡石不仅是制备超硬材料的必备腔体材料,也是优异的烧蚀材料,在国防、航空航天等领域具有广泛应用(杜培鑫和袁鹏,2019)。电气石作为一种含硼的环状结构硅酸盐矿物,其功能复合材料及新产品的开发也在不断深入(文圆等,2019)。王菲等(2019)开发的稀土强化电气石矿物复合功能材料,阐明了电气石矿物显微结构与内部活性位点的形成机制,拥有稀土强化电气石矿物的优选和先进加工等关键技术,形成了高性能电气石远红外辐射和自发极化的性能评价方法。玄武岩纤维作为一种新兴纤维材料,其粘结性、耐热性及抗腐蚀性等物理性能较为优越,以玄武岩纤维为添加材料可制备多种复合材料,广泛用于消防、环保、航空航天、工程塑料、建筑等不同领域(秦丽辉,2014)。何军拥和田承宇(2013)的研究表明,玄武岩纤维具有较好的水工特性,能有效提升混凝土耐酸耐碱性能、抗渗性以及抗冻性,其兼具防水特性,使其在堤坝、码头及跨海大桥等领域具有广阔的应用前景。此外,地聚合物作为硅酸盐材料,还兼具有机高聚物、玻璃和水泥等材料的特点,显示出极大的发展前景(杜保聪等,2018)。王健等(2015)针对传统注浆材料抗侵蚀性

差、后期体积倒缩等问题,设计了地聚合物双液注浆材料,其凝结时间从几十秒到几十分钟可控,工程加固止水性能较传统注浆材料优势明显。

宝玉石与能源矿产、金属矿产、非金属矿产和水气矿产并列为五大类矿产。人类对宝玉石的认识历史悠久,认知度最高的是钻石、红宝石、蓝宝石和祖母绿四大珍贵宝石,地质学家和宝石学家也在不断地发掘“新成员”,如近年来对沙弗莱石(Tsavorite)、变色水铝石(Zultanite)、加斯佩石(Gaspette)、萨索斯岛大理石(Thasos marble)等新宝石的认知和普及,非常规性宝石材料的价值也将不断体现(郭鸿旭,2017)。人工宝石目前常用的加工方法主要包括焰熔法、助溶剂法、水热法和化学沉淀法等(张志祥等,2013)。陈庆汉(2012)改进了壳熔法蓝宝石晶体生长工艺,采用壳熔定向结晶法,第一次得到了厘米级蓝宝石单晶。邢睿睿等(2019)采用溶胶-凝胶法制备合成翡翠,其宝石学特征、红外光谱及紫外-可见光谱与天然翡翠基本一致,延长晶化时间有利于晶粒生长、结构致密,获得优质的合成翡翠。

张妮和林春明(2016)考察了X射线衍射技术应用单晶、多晶宝石的定名及宝石矿物的晶体结构特征,探讨了宝石矿物多型的种类。申柯娅(2011)对合成祖母绿与天然祖母绿的成分及其红外吸收光谱进行了研究,两者红外吸收光谱具有明显差异:助熔剂法合成祖母绿中没有水的吸收,而天然祖母绿中含有一定水分子吸收峰。李晓静(2016)对硅酸盐类宝石矿物、有机宝石、有机物充填宝石和合成宝石的近红外光谱进行了研究。离子注入改性是提高宝石表面性能的一种可靠方法。张海亮等(2020)通过选择不同能量和剂量的镁/钪离子注入蓝宝石,其纳米硬度、纳米划痕和红外性能等均呈现出可调节的特性。

## 3 特种功能矿物材料

特种功能矿物材料是指在传统矿物材料基础上,根据特定矿物原料的物理化学性质和工艺特性,经精、深加工处理或人工合成,形成具有特殊性能和多用途的功能材料。在此仅介绍超强矿物(复合材料)、超绝热/储热矿物(复合材料)和超导矿物材料近十年来的进展。

### 3.1 超强矿物(复合)材料

超强矿物(复合)材料包括具有超硬、超弹性等优点的高端矿物(复合)材料。如以传统超硬材料金刚石为填充料,立方氮化硼为基体,添加适量的

黏结剂,可合成新型金刚石复合材料 PCBN-dia,其兼具较高的硬度和耐磨性(刘宝昌等,2018)。Gao 等(2018)将两层石墨烯相叠形成双层石墨烯,其厚度仅为 A4 纸的百万分之一,杨氏模量大于 400 GPa,硬度甚至高于金刚石。超弹性材料具备较强的记忆及可逆形变性能,常压下制备的超弹性石墨烯/羧甲基纤维素复合气凝胶(SGA/CMC),在 80% 应变下循环压缩 500 次后,仍能恢复到原来高度的 95% 左右(Xu et al., 2020)。将石墨烯进行三维交联,可实现基于单个石墨烯片层的本征弹性和片层之间的共价连接,在 4 K 超低温条件下具有与室温相同的力学性能及几乎完全可逆的超弹性行为(高达 90% 的应变)(Zhao et al., 2019)。

### 3.2 超绝热储热矿物(复合)材料

导热系数低于静止空气(25 mW/mK)的材料称为超绝热材料,因其具有低密度、隔热性好的特点而在军工、建筑等行业具备巨大应用潜力。以硅质矿物为原料采用 Kistler 法、焚烧法及一步法制得的纳米 SiO<sub>2</sub> 气溶胶是制备超绝热材料的主导原料;纳米 SiO<sub>2</sub> 气溶胶本身具有较低的导热率(0.9 mW/mK),经 400 °C、2 h 热处理后大孔体积分数由 63.05% 显著降低至 24.82%,导热率则降低至 0.8 mW/mK,而热处理温度超过 800 °C 则直接破坏孔结构,即适当的高温处理可改善其隔热性能和室温下二氧化硅气凝胶的可用性(Lei et al., 2017);采用一体冷冻干燥工艺将纳米二氧化硅与聚酰亚胺(PI)交联制备 PI/SiO<sub>2</sub> 纳米复合气溶胶,密度及导热率分别低至 0.07 mg/cm<sup>3</sup> 和 21.8 mW/mK,在 300 °C 下仍具有较好的绝热性能(35 mW/mK)(Fan et al., 2019)。将具有较好导热性的多孔矿物(埃洛石、硅藻土、蒙脱石等)和储能相变材料进行复合可制备矿物基储热材料,其具备导热均匀、成本低等优点,可用于太阳能光热领域(谢宝珊等,2019)。如将石蜡装载至埃洛石纳米管(HNT)中可制成硬脂酸/HNT 复合储热材料,50 次储热循环后其储热性能保持不变(Zhang et al., 2012);还可通过对 HNT 进行表面超疏水改性,提升其负载相变材料的性能(杜培鑫等,2019)。Li 等(2011)用熔融吸附法制备二元脂肪酸/硅藻土复合相变材料,癸酸-月桂酸/硅藻土的潜热能可达 66.81 J/g,相变温度可达 16.74 °C。利用十二烷基硫酸钠表面活性剂扩宽蒙脱石层间距,再将正十六烷插层改性后的蒙脱石制备复合储热材料,其具备持久的储热性能,潜热值高达 126 J/g(Sarier et al., 2011)。

### 3.3 超导矿物材料

超导材料由于具有零电阻、完全抗磁性(迈斯纳效应)等特性,而在强电、强磁、储能和超导电子器件等领域的应用前景广阔。近年来层状过渡金属硫族化合物插层超导体(插层剂为碱金属/碱土金属离子或有机物)、插层石墨超导体、铜氧化物高温超导体(Ba-La-Cu-O 体系、Bi-Sr-Ca-Cu-O 体系、Hg-Ba-Ca-Cu-O 体系等,最高超导温度达 164 K)等陆续被发现(阮彬彬,2018;白桦,2019;邵志斌,2019),超导材料研究主要集中于铁基超导体和铋硫基超导体。铁基超导体中不导电的 LaO 层为空间层,导电的 FeAs 层为超导层,对 La 位和 Fe 位进行掺杂,可提升铁基超导体的超导温度;薛其坤等利用分子束外延技术在 SrTiO<sub>3</sub> 衬底上制备单层 FeSe 薄膜,通过 FeSe/SrTiO<sub>3</sub> 异质界面增强电声耦合作用,界面电荷转移以及界面应力效应共同作用下,实现了 100 K 以上的超导电性(Ge et al., 2015),这是继铜氧化物高温超导体之后的第二个常压高温超导体。Mizuguchi 等(2012)首次发现二维层状铋硫基超导体(Bi<sub>4</sub>O<sub>4</sub>S<sub>3</sub> 和 LaO<sub>0.5</sub>F<sub>0.5</sub>BiS<sub>2</sub>, 2012),BiS<sub>2</sub> 层为其超导层。与铁基超导体类似,对铋硫基超导体的空间层掺杂、替换和改造可提升铋硫基超导体的性能。除铁基超导体和铋硫基超导体之外,曹原等开发了非传统石墨烯超导材料。他们将两层石墨烯以 1.1° 的“魔角”层叠形成“超晶格(superlattice)”材料,该材料中两层石墨烯非导电,属于莫特绝缘体(Cao et al., 2018a);当添加少量的电子到石墨烯超晶格中,电子摆脱了起初的绝缘状态,并以零电阻的状态流动,成为超导材料(Cao et al., 2018b)。此材料在特定条件可实现超导与绝缘状态相互转换,有望成为室温超导体,为量子设备提供诸多可能性。

## 4 仿生矿物材料

仿生矿物材料具有精密的结构,可实现其机械性能(如韧性、减震性、比强度)、催化性能、光性能、热性能的可控设计。近十年来,仿生矿物材料的模拟合成取得了令人鼓舞的成就,除作为结构工程材料外,在催化、导热、人工肌肉、激光、探测等方面的应用也越来越广。

### 4.1 仿生矿物结构工程材料

生物体在自然界的漫长进化中,演化出了具有优异力学性能的生物矿物材料。如巨骨舌鱼的鳞片具有优异的外力抵抗性;雀尾螳螂的肢部锤头具有高抗冲击性;牙齿具有超高的硬度和耐磨损性

能;骨骼拥有极高的抗断裂损伤能力;贝壳珍珠层是强度高、韧性好和模量高的组合体,具有优异的综合性能等。这种在温和条件下由受限的材料组分实现的多级有序结构和性能强化,模拟制备出自然界的复杂精密结构,以获得力学性能优异的结构材料,拓展矿物材料在工程领域的应用。例如,以石墨和石墨烯为原料制备的1D纤维,其强度高达140 MPa,在加入高分子改善界面性能后,纤维的强度可提升至442 MPa(Jalili et al., 2013),甚至652 MPa,是天然贝壳的5倍(Hu et al., 2013);通过离子交联和扭曲设计,可将该类纤维的断裂伸长提升至400%,是纯石墨烯材料的100倍(Cruz-Silva et al., 2014)。增强、增韧后的石墨烯纤维可用于电缆、绳索和织物等领域(Xu et al., 2013; Zhang et al., 2016)。具有仿生贝壳结构的黏土/聚合物二维复合膜也具有重要的应用价值。将蒙脱石、石墨烯、二硫化钼、二硫化钨等二维层状矿物与高分子,如PVA、PLA和PDA等,制备成具有仿生贝壳结构的薄膜,此类薄膜保有良好的机械性能,兼有导电性、气体阻隔性、耐火性、耐疲劳等特性,可广泛用于建筑、工业包装、功能涂料、柔性电子装置等领域(Liang et al., 2016; Knöller et al., 2017; Wan et al., 2017)。3D砖墙仿生结构可显著提高砖墙的机械性能。调节仿生结构中的矿物含量,可得到韧性、强度和刚性性能优异的材料,如 $\text{Al}_2\text{O}_3$ -氰酸酯(CE)复合材料的弯曲强度是铝板强度的50倍(Livanov et al., 2015; Zhao et al., 2016)。Le Ferrand等(2015)将复合有超磁性氧化铁颗粒的 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 颗粒铝喷涂在铝片上,制备出贝壳仿生结构的 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 片状复合材料,其弯曲强度和韧性分别为650 MPa和 $14 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ;Livanov等(2015)将涂层中 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 的含量提高至90%,断裂强度增加至320 MPa;Bouville等(2014)将 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 的含量提高至98%,弯曲极值可达460 MPa,是纯 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 的5倍。仿生3D矿物复合材料具有优异的力学性能且质量轻,在工业中被用于替代合金、塑料、陶瓷等工程材料。如, $\text{Al}_2\text{O}_3$ -CE密度仅为 $1.8 \text{ g/cm}^3$ ,强度达到钢材的1/4,用于替代钢材(Zhao et al., 2016)。

## 4.2 仿生矿物功能材料

利用矿物结构和化学组成的差异,可制备出各种功能不同的仿生功能材料,广泛应用于催化、导热、绝缘、感光、探测、医药等领域。

4.2.1 仿贝壳多功能材料 张博雅等以聚乙烯醇和蒙脱石为原料,仿生构筑了贝壳结构,层叠势垒

提高了绝缘体表面的电子耗散,可作为高压直流气体绝缘系统的电荷耗散涂层使用(Zhang et al., 2019a)。顾军渭等以聚多巴胺和立方氮化硼纳米片制备的具有仿贝壳结构的导热复合纸,可用于柔性电子领域(Ma et al., 2020)。柏浩等制备的仿贝壳3D网络结构的氮化硼/环氧复合物具有各向异性高导热,可用于电子行业(Han et al., 2019)。Zhang等(2019b)制备了具有仿贝壳的石墨烯/海藻酸钠薄膜制动器,该薄膜器可被水蒸气驱动,可用于微型机器人、人工肌肉和快速探测等领域。Hill等(2017)以金纳米粒子、硅酸镁锂黏土、氧化石墨烯为原料制备了具有仿贝壳结构的复合膜,可用于催化、传感、抗菌等领域。Morits等(2017)制备的贝壳仿生结构的霞石/聚合物复合材料,具有高的强度和韧性。Das等(2017)以纤维素钠、蒙脱石制备了具有仿贝壳结构的涂层,该涂层可用于织物的防火。郭林等以黏土为原料制备的仿生贝壳膜,可用于防水、防腐工程中(Wu et al., 2014)。Le等(2020)以 $\text{TiO}_2$ 、石墨烯、几丁质和液晶材料制成的仿生贝壳复合薄膜在能量储存与转换、气体探测等领域具有重要应用。

4.2.2 半球形人工视网膜结构多功能材料 将钙钛矿制成具有高密度纳米线阵列,可组成半球形人工视网膜来模拟人类视网膜上的光感受器。将这种视网膜应用到电化学眼睛中,能够执行获取图像模式的基本功能(Gu et al., 2020)。Lv等(2019)仿生合成了以 $\text{NiMoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 纳米线排列组成的手性螺旋光子晶体,可用于偏光器、圆偏振发光、激光等领域。

4.2.3 人体纳米羟基磷灰石多功能材料 Yang等(2012)以纳米羟基磷灰石、胶原蛋白和磷脂酰丝氨酸为原料仿生制备的多孔复合支架,可用于骨组织替代工程中;羟基磷灰石(nHA)和石墨烯(GO)增强的聚乳酸(PLA)杂化纳米复合材料(PLGA/nHA)具有很好的生物相容性,石墨烯及其衍生物可促进新骨细胞在成骨分化其表面的细胞上粘附和生长,促进线粒体的生长(Liu et al., 2016),添加GO的PLGA/nHA支架可增强小鼠成骨细胞的增殖(Liang et al., 2018)。Zhou等(2014)开发了以磷酸钙(CaP)为核、免疫原为壳的纳米粒,用于实时生产牛痘疫苗,从而免于冷冻储存运输。Nam等(2017)开发了贻贝激发的CaP聚合物纳米载体,用于细胞内传递阿霉素。以磷酸钙为核,内部封装光敏剂,外部包覆聚乙二醇的杂化纳米载体可减少光化学物质在血液中的损失,可用于光能治疗(Nomo-

to et al., 2016)。

## 5 生物矿物学

目前,自然界的生物能合成约 60 余种矿物,含钙矿物(磷酸钙和碳酸钙)约占整个生物矿物的 50%。其中碳酸钙主要构成无脊椎动物的体内外骨骼,磷酸钙几乎完全由脊椎动物所采用;其次为非晶质氧化硅;含量较少的有铁锰氧化物、硫化物、硫酸盐、钙镁有机酸盐等。这些生物矿物除了具有保护和支撑两大基本功能外,还有很多其它特殊功能,如方解石可作为三叶虫的感光器官,作为哺乳动物内耳耳则的重力感受器;文石在头足类动物的贝壳里作为浮力装置,在软体动物中作为外骨骼;磷酸钙(包括羟磷灰石、磷酸八钙和无定型)主要作为脊椎动物的牙齿和内骨骼;一水、二水草酸钙可作为植物、真菌的钙库,二氧化硅存在于硅藻的细胞壁、植物的叶子;磁铁矿在鲑鱼、鲑鱼头部里具有磁导航的作用,并存在于趋磁性细菌的细胞内;水铁矿既存在于海狸、老鼠和鱼的牙齿表面,也存在于石鳖牙齿的前驱相。

关于生物体内的矿化机理,主要开展了以下 4 方面的研究:

(1)生物合成矿物。生物体内碳酸钙、磷酸钙的形成就是方解石/文石/羟基磷灰石生物矿化的结果。对于生物矿化,基质蛋白一般含有谷氨酸残基或天冬氨酸残基,这些残基可与钙离子结合,是钙离子生物矿化中重要的氨基酸。Jun 等(2015)模拟体内环境进行了钙离子生物矿化过程的体外再现,揭示了钙离子在生物体内的矿化机理。毛喆等(2016)利用两种不同的硫酸盐还原菌成功合成出具有不同比表面积、铁硫原子比、表面活性组分 FeS 相对含量的硫化亚铁矿物,并研究了其对六溴环十二烷的还原脱溴作用,结果表明两种不同类型硫酸盐还原菌合成的 FeS 矿物对六溴环十二烷均具有还原脱溴能力,并且它们的还原脱溴的能力和机制相似。

(2)生物分子调控矿物生长。赵康(2013)考察了一系列不同分级结构的生物分子(氨基酸、多肽、蛋白质)添加剂对无机矿物生长的影响,结果发现不同添加剂对方解石(104)面螺旋生长丘形貌及速率都有不同程度的影响。于洋(2017)采用纳米压痕试验对大连湾牡蛎壳中的珍珠母层的微观力学性能进行了研究,并与矿物方解石的微观力学性能进行对比,解析出生物硬组织优异性能的成因与机理。闫华晓等(2019)对 *Bacillus cereus* MRR2 (Gen-

Bank KY810857)作用下不同钙离子浓度诱导方解石生物矿化的研究,制备出有机和无机成因方解石,结果表明生物成因方解石的结晶度和活化能均明显高于有机成因方解石。谭远(2016)以华贵栉孔扇贝和施氏獭蛤的表壳层为对象,进行了生物成因纤维状文石集合体的研究,并以其为基底进行了仿生合成试验。Huang 和 Zhang(2012)利用新鲜竹蛭和豆蛭韧带的蛋白质在不添加任何添加剂的情况下,仿生合成了与韧带中极为相似的文石纤维,其纯度几乎达到 100%。刘晓晔(2019)以河南石井剖面寒武系苗岭统为例系统探讨了由光合作用微生物组成的生物膜的钙化作用过程,研究了光合作用生物膜作用下方解石颗粒的形成过程,丰富了颗粒的成因类型。

(3)生物诱导结晶与溶解。Zhang 等(2017a)进行了生物矿化合成碳酸钙的研究,并将其用于混凝土的自修复,取得了较好的实验效果。Liu 等(2014)通过明胶改性石墨烯模拟蛋白的作用仿生矿化羟基磷灰石。作为具有生物相容性和生物活性的材料,透明质酸也被用作模板合成碳酸羟基磷灰石;透明质酸在羟基磷灰石结晶早期可以稳定无定型磷酸钙,在晚期可以影响羟基磷灰石晶体生长中的钙空位和羟基磷灰石的形貌(Li et al., 2012)。

(4)生物模板自组装矿化。Sharma 等(2020)系统综述了人体硬组织内的生物矿化过程,特别强调了骨和牙齿矿化的机制和原理;描述了蛋白质和无机离子在矿化过程中的作用。潘海华和唐睿康(2020)以生物矿化典型无机矿物磷酸钙和碳酸钙体系为例,从生物矿物-溶液界面结构、生物分子与矿物晶面的分子识别、矿物结晶调控三个层面综述了生物矿化的化学调控原理,并从信息传递和转化的化学工程范式出发,分析了生物矿化中分子工程和结晶调控策略。Zhao 等(2014)采用血红蛋白为软模板,制备出三维纳米片组装成的羟基磷灰石微球。

## 6 文化遗产和文物保护

天然的矿物材料在文化遗产、文物及其保护领域发挥着重要作用,多数文物和文化遗产均直接或间接以天然矿物为原料进行制备、保护或维修。近十年来,有关文物成分鉴定及检测、文物加固、文物表面清洁、文物抗风化及耐腐蚀、自然岩溶景观修复保护等领域受到国内外矿物学家的重视。

### 6.1 文物成分鉴定及检测

以天然矿物为原料,经粉碎研磨漂洗等工艺制

备的矿物颜料在秦始皇兵马俑、古希腊、古罗马雕塑中大量使用。常晶晶等(2010)以拉曼光谱作为材料的“指纹”光谱对敦煌莫高窟壁画残片中的红色颜料进行了分析和鉴别,通过对朱砂天然矿物和朱砂颜料的拉曼光谱信号的比较分析,初步发现矿物颜料中有石墨。付倩丽(2016)采用显微拉曼光谱分析对秦俑彩绘颜料样品进行了半定量分析,得出彩绘矿物颜料样品的组成配比。袁鸿等(2013)采用扫描电镜和X射线衍射分析了荆门灌子冢车马土样土样的元素成分和黏粒矿物组成,发现车马土样以富集铝铁相硅酸盐矿物为主,且含有部分含钾镁相碳酸钙成分。陈庚龄和康明大(2013)对临洮哥舒翰碑的岩层矿物分析结果表明,石碑材质为砂岩,主要矿物组成为石英、长石、绿泥石、黑云母和含钙质为主的胶结物。李欣桐等(2019)对河南浙川地处考古遗址中的绿松石制品的矿物学特征进行了分析。

## 6.2 文物加固

王捷等(2017)以偏高岭土、硅粉及石灰石粉为主要原料制备无机矿物聚合物,并应用于龙山石窟岩体裂隙加固,无机矿物聚合物注浆材料可提供足够的强度,且可根据表层岩体的劣化情况进行表面强度调节。李晓溪(2012)研制了纳米级 $\text{SiO}_2$ -丙烯酸酯有机/无机复合材料,并对秦俑彩绘保护材料进行改性,提高其热稳定性、耐光老化性、渗透性,并用于酥粉陶胎的加固保护。赵林毅(2012)通过对应用于岩土质文物保护加固的两种传统材料——礞石和阿嘎土进行改性研究,并应用于内蒙古元上都遗址、南京报恩寺地宫遗址及高句丽壁画墓的保护加固,显著改善了遗址土的物理力学性能,提高了耐环境侵蚀能力。

## 6.3 文物表面清洁

齐扬等(2015)采用激光清洗技术对云冈石窟砂岩西43窟墨迹和烟熏黑垢进行清洗,获得了石灰污染物的干式和湿式清洗阈值均为32.5 mJ。铜质文物修复中常采用机械除锈、化学镀铜、电刷镀铜和金、铜着色等表面处理工艺可形成致密保护膜,结合牢固且表面孔隙较小(牛飞,2018)。李琼芳等(2018)研究了采用生物矿化法修复寒冷地区石质文物表面,利用黄龙高寒钙华沉积区分离到2株具高产碳酸酐酶活性的嗜冷型细菌菌株,在大理石试件表面进行诱导矿化沉积,实验结果表明大理石试件表面生成了致密的方解石型碳酸钙矿化层。

## 6.4 文物抗风化及耐腐蚀

严绍军等(2016)对重庆合川钓鱼城古战场遗

址的水质分析结果表明,风化样品中石英及方解石含量较岩芯样多,长石含量不同程度降低及石膏等可溶盐对岩石的片状风化有一定作用。冯楠(2011)研究了潮湿环境下砖石类文物的风化机理,提出了保护方法。杨志法等(2013)基于风化剥落深度研究了衢州古城岩石砌块的抗风化性能,得出不同岩石抗风化能力为:黄绿色火山角砾岩>赭色细砂岩>赭色凝灰岩>灰绿色凝灰岩。Zhang等(2019c)研究了石质文化遗产在热带气候条件下的生化反应和生物腐蚀机制,发现生物膜是生物退化机制的一个重要影响因素。

## 6.5 自然岩溶景观修复保育

以钙华为主体的岩溶景观是大自然的瑰宝。近年来,以九寨沟、黄龙沟为代表的钙华景观出现了开裂、垮塌等退化、受损现象(Zhao et al., 2018)。董发勤团队以 $\text{Ca-C-H}_2\text{O}$ 物质循环理论为基础,利用空-地无损探测,深入揭示了钙华天然海绵地质体构筑单元特征和生物-钙华共演化规律,以“同质同相”的学术思路,以废弃钙华为原料开发成套钙华修复保育技术并应用于震损核心遗产点抢救性恢复中,首次解决了钙华自然遗产震损及退化的科学修复保育难题,国际上首次成功应用于世界自然遗产地震损、退化钙华景观修复工程,综合效果优良,实现了遵循天然钙华演化规律快速复原钙华自然景观、保持钙华遗产的完整性、原真性目的,为世界自然遗产地钙华景观生态保护提供了新的科学认知和世界级的范例。

## 7 矿物基固废处理与资源化利用

近十年来,固废处理与资源化研究主要趋向于从固体废弃物的物化特征出发,结合化学、物理化学、化学工程与技术、计算机科学与技术、环境科学、材料科学与工程、数学等学科的相关理论和方法,借助飞行时间二次离子质谱仪、原子力显微镜、CT扫描、激光剥蚀原位质谱仪、显微激光拉曼光谱仪、原位X射线衍射仪等现代分析测试手段,对固体废弃物的表面结构与特性、有害杂质的赋存形式及全组分在不同环境条件下的迁移机制与控制方法、结构重整、反应热力学与反应动力学等进行研究,以期建立固体废弃物中有害物质的分离、固体废弃物安全堆存和工程利用的科学体系,为有效减少固体废弃物对生态环境的影响和规模化利用奠定基础。

大宗矿物基固体废物主要包括矿山尾矿以及粉煤灰、冶炼渣、工业副产石膏和赤泥等工业废渣,

其再利用技术进展主要包括两个方面:有价值组分提取及新型材料制备(董发勤等,2014)。比如,赵钰等(2019)利用微生物技术提取有色金属尾矿中的低品位铜、铅、锌等有价值组分。宋鹏程等(2016)以蛇纹石尾矿为原料采用蒸氨-碳化闭路工艺,制备出纳米  $\text{SiO}_2$  和  $\text{MgO}$ 。孟跃辉等(2010)将铅锌矿尾矿、金尾矿、铁尾矿、铜尾矿等用于制备加气混凝土、透水砖、人工鱼礁等新型建筑材料。刘来宝等(2020)围绕铬铁渣的安全转化和再生利用研究设计并制备出具有“核-壳结构”的堇青石/贝利特复相轻集料,提高轻集料混凝土力学强度约 50% (Zhang et al., 2017b),并利用铬铁渣中的镁橄榄石和尖晶石等高温耐火矿相,研究制备了铬铁渣耐火浇注料(张韶华等,2014)。

对于具有放射性的核废物,主要开展了核辐射防护材料以及核素固化处理等研究。矿物基核辐射防护或处理材料的研究主要集中在寻找高稳定性的基材和易合成的方法上。例如,杨玉山等(2013)以重晶石为主要原料开发了一种适于湿热环境的防氡涂层。易发成等以膨润土为放射性废物地质处置库缓冲材料研究了其对核素的长期阻滞效应(王哲等,2020)。核素固化包括水泥固化、玻璃固化、塑料固化、沥青固化、陶瓷固化、岩石固化及晶格固化等。放射性核素晶格固化的概念是由董发勤、周时光首先在西南科技大学和中物院设立的国家联合基金课题中提出来的(受 1978 年 Ringwood 人造岩石方法的启发),是基于天然放射性核素是源于天然矿物晶格的位置,在高放核素处理处置时回放到稳定的矿物晶格中去从而达到长期稳定且与环境安全协调的目标,西南科技大学的核环境科学与技术研究团队开发了钙钛锆石、锆石、榍石、烧绿石等系列核素晶格固化体材料。

近三年国家科技部组织重点专项全面开展固废的分类、评价、标准、安全转化、资源化增值利用研发和工程示范:研究重污染固废源头减量与生态链接技术,如石墨、多金属页岩、硼矿、中低品位磷矿资源清洁利用与重污染固废源头近零排放,典型重金属铜、锌、钒钛、铝、黄金冶炼危废全过程控制技术,难熔金属废料高效回收与清洁提取、高端铜铝废材深度净化与循环再造,复杂铅基多金属固废协同冶炼、镍钴/钨/铈冶金固废清洁提取与无害化,废弃环保催化剂金属回收、含放射性固废清洁解控与安全处置等。固废产生量大、污染重的钢铁冶炼难处理渣尘泥、精细化工园区磷硫氯、制药、造纸、制革行业典型工业污泥,城市污泥快速减量与

资源化耦合利用、固废焚烧残余物稳定化无害化等。

大宗铝硅酸盐无机固体废物相重构与安全转化、清洁增值利用、智能化回收与分类,如量大面广的废弃混凝土砂粉再生利用;矿业、冶金、化工、陶瓷典型行业大宗低阶固废规模化高值矿物材料化;大宗工业固废协同制备低成本胶凝材料、大掺量制备装配式预制构件等。研究集中于多产业固废的资源环境属性和生态环境影响效应,开发不同种类固废有价金属及非金属、有机资源的高效富集、定向分离与清洁提取技术;开发基于“无废城市”理念的城市多源固废综合管理系统、资源回收与废旧资源协同再利用技术,污染风险控制技术;建设城市固废资源循环经济产业园,开发多源城市固废的协同利用、协同处置技术,重点开发城市固废中金属、塑料的回收技术,水泥窑、冶金窑、厌氧处置等协同处置与资源综合利用技术;开发城市群、经济发展区域、“一带一路”重点产业群、特色产业区域固废资源回收及综合利用技术,污染综合控制技术(董发勤等,2014)。

## 8 矿山及周边土壤污染修复

矿山在开发的同时也造成了严重的环境污染,给矿山及周边地区居民的食品安全、生态安全及社会和谐带来了严重隐患。因此,如何治理矿山及周边土壤污染是当前国际资源与环境研究领域的热点问题。利用矿物的环境属性特别是大量的非金属矿物及其尾矿,经超细、改性、掺杂、复合及仿生合成等方式开发的环境矿物材料为环境污染治理和修复的提供了材料和方法。

### 8.1 矿山废水污染治理

矿石开采、选矿、运输、处置过程中均会产生含重金属、选矿药剂和 P-N 等酸性矿山废水。近年来,利用环境矿物材料治理矿山废水污染取得了显著成效。陈晓蕾(2018)研究发现,阳离子表面活性剂(DTAB、TTAB、CTAB)改性膨润土可在 150 min 内快速吸附选矿废水中的丁铵黑药,而且 CTAB 改性的膨润土重复利用四次对丁铵黑药的去除率仍能达到 65%。王丹等(2017)发现,  $\text{FeCl}_3$  改性膨胀石墨对苯甲羟肟酸和黄药的吸附量分别为 16.31 和 18.87 mg/g。Liu 等(2017)和 Zhou 等(2017)构筑了灰岩与生物成因马基诺矿的复合材料,不仅可有效处理去除废水中的 As,而且能够中和酸性矿山废水。彭同江团队以沸石和蒙脱石为滞固材料有效固定了某铀矿山铀尾矿中有害元素的迁移(史鸿晋,2016;胡小强,2016;李真强,2016;刘波,2017)。

此外,以矿物吸附材料作为反应介质的渗透反应墙(PRB)原位处理矿业活动导致的地下水污染也是当前的研究热点。由于零价铁在PRB中存在易氧化和堵塞,人们相继研究了天然或改性黄铁矿、沸石和磷灰石等矿物材料对土壤地下水的修复,取得了良好效果(刘昊等,2020)。

## 8.2 土壤污染修复与治理

环境矿物材料具备较强的污染固化和环境净化能力,为解决众多土壤污染问题提供了新途径,尤其是海泡石、凹凸棒石、蒙脱石、高岭石和沸石等硅酸盐矿物具有复杂的多孔道结构,能吸附重金属离子,降低重金属在土壤环境中的迁移转化能力及毒性,且天然无害、价格低廉、分布广泛,具有很大的应用潜力(Xu et al., 2017; Otunola and Ololade, 2020)。以天然黏土矿物为基础开发新型土壤修复材料是近年来土壤修复技术的研究重点之一。比如,蒙脱石和碳酸盐矿化菌的协同体系对土壤中 $\text{Sr}^{2+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$ 具有良好的联合滞留效应,有望为实际突发性重金属、核素污染的快速原位治理提供储备材料(许凤琴,2016)。凹凸棒石负载零价铁后对土壤中铅、镉和铬的吸附量显著提升,增加了蔬菜生长速度(Xu et al., 2019)。蒙脱石负载纳米马基诺矿后对六价铬的固定效果较好(李小飞,2019)。羟基磷灰石/凹凸棒土复合材料的比表面积远大于单独的羟基磷灰石和凹凸棒土,对重金属污染土壤钝化性能较好(徐丽莎,2019)。在大量土壤修复工程应用中,黏土基修复材料常与生物炭、石灰等修复剂复配使用,且对土壤污染修复效果好于单一修复剂(胡艳美等,2020)。

除了矿山及周边土壤环境污染外,表土荒漠化、沙漠化也是当前全球面临的一个长期问题。矿物材料在土壤荒漠化治理中起着重要的固沙保水作用。冉飞天(2016)以坡缕石黏土、聚乙烯醇和部分中和的丙烯酸为原料制备得高吸水复合材料,能够显著提高固沙试样的抗压强度,从而保护沙生植物的生长中使其根系免受风沙的侵蚀,同时为其生长提供一定的营养,有保温、保水作用,对沙漠地区植被的恢复起到促进作用。王爱娣(2013)以自然界广泛分布、储量丰富的天然红土和黄土为研究对象,与环境友好型高分子(CMC、PVA)和生物高分子(植物秸秆)进行复配制备天然黏土基固沙材料兼具工程固沙、化学固沙和生物固沙的复合效果,具有良好的应用前景。姜雄和铁生年(2014)采用溶液共混法制备了膨润土/聚丙烯酰胺复合吸水保水材料,发现膨润土与聚丙烯酰胺用量质量比为

8:2时,复合材料吸水率、吸盐率和保水率分别为12.28、5.9 g/g和42.54%,适合作为固沙材料的保水添加剂,且聚丙烯酰胺用量较少。

## 9 展望

近十年,应用矿物学在矿物学和相关学科的先进理论方法技术带动下,在传统应用领域取得了丰硕的成果,在新兴领域得到大力拓展。但是,我国作为全球第二大经济体在资源供给消耗反全球化的形势下,应用矿物学如何在能源革命与面临资源危机转化为资源革命如通过资源代替、可循环、最优化方式,解决生态与环境危机中的难题;此外,以石墨烯、清洁能源、量子信息技术、人工智能、5G技术、大数据云计算、生物技术等为技术突破口的第四次工业革命(绿色工业革命)已经悄然来临,国家也早在2015年部署了全面推进实施“中国制造2025”强国战略,应用矿物学在生态环境修复、矿产资源(包括再生资源)高效绿色循环利用、清洁能源生产、先进材料、碳中和、未来技术等领域发挥重要作用。

(1)重视非金属矿物资源及其功能开发利用,重点在新型资源、新型材料、生态环境保护与修复治理等领域并扩大其空间,应将磷矿、钾盐、萤石、石墨、石英、叶蜡石、黏土、硅藻土、重晶石、硼矿、锂矿、锆英石等矿产列为我国战略性非金属矿产,并加大其新性能新功能的开发和应用,拓展新型工业矿物品种和应用领域,建立矿物资源、矿物材料产品性能和质量提升与可持续发展兼容的工业矿物发展体系。

(2)大力拓展矿物自动测量与分析技术,并配合新型遥感如矿物高光谱立体分析方法,用大数据方法挖掘综合矿物学参数的特性与规律性,建立基于云计算的三维数据表征技术模型,预测选冶矿加综合工艺指标,重点瞄准贫、细、杂、难的矿物资源品种,对低品位及结构复杂的矿物如硫化矿物、氧化矿物、非金属矿物、煤炭、石墨等综合运用新方法技术,形成新的应用矿物学动态数据链。

(3)加大在特定环境条件(或未知环境)下矿物与环境介质的相互作用机制与效应研究,如强辐射、强激光、强微波、强电磁、强中子、超高(低)温、超高压等独特环境下矿物的相互作用与表征(谱学响应);特别是在常温下通过生物分子获得一些特殊结构和形貌的矿物及材料,探讨蛋白质等生物大分子利用其结构的复杂性控制生物分子在生物矿化中的作用;探讨矿物形成超材料的方法与途径,

如负折射率超材料、负的电容率和磁导率超材料、微米透镜材料等。

(4)非金属矿是环境友好的生态环境材料,应大力开发低品位、尾矿和采剥形成非金属矿潜在资源与新用途。研究固废与生态环境材料、低碳绿色工艺、功能、艺术美学之间的联系,服务于无废城市,朝世间无废之理想目标迈进。固体废弃物的成分复杂、毒害组分含量高、物理化学性质差异较大,特别是其资源价值较低,材料化处理成本较高,排放量巨大,要明确部分固体废弃物的资源属性,发掘难利用固废的资源途径,特别是针对尾矿、钢渣、工业副产石膏、赤泥、粉煤灰、建筑垃圾等最难处理的几种大宗固废。大宗固废的材料化资源属性评价方法与应用技术、固废的环境危害的评价方法体系、质量标准体系,在复杂组分及结构下,固废中金属、非金属资源的全组分利用、高附加值利用的应用矿物学基础研究及其资源经济性评价的市场、技术、环境、安全等方面的政策研究需要加强,开发无机-有机固废基于物质-能量-环境自平衡耦合定向转化和系统优化新方法和危险废物毒害组分快速识别与检测新技术。

(5)氢能时代加速大型工业化应用对应用矿物学带来新的挑战 and 机遇。氢气冶金、氢气炼钢炼铁、氢气烧结水泥、氢气交通等等新工艺带来冶金过程、热反应过程、燃烧过程等矿物相变研究热潮,带动一批相关新材料的研发,如稀土储氢材料、高效发光稀土功能,人工晶状体、碳碳复合材料、碳陶复合材料、金属基复合材料,生物医用材料,高性能钕铁硼,超固体,时间晶体,木材海绵,冷沸材料,微格金属、量子技术,光子晶体,4D 打印材料,自修复材料,平皱纹材料,永湿材料、坚如岩石的涂层材料,可编程水泥,纳米点钙钛矿、遮光玻璃涂层,空调功能墙体材料,仿生塑料等。

(6)在 5G 通讯和新一代智能互联,传感感应器件制造上应用矿物学具备广阔的应用空间。我国用于与 5G 相关的新材料的进口率高达 86%,化工新材料产业国内保障能力只有 50%;高端高温合金主要依赖进口,矿物高端原料及其精细加工如半导体材料、显示材料、新能源材料、高性能纤维、高性能膜材料、大硅片、抛光材料、偏光片、OLED 发光材料、高纯溅射靶材、化学机械抛光(CMP)材料、碳化硅单晶等。

(7)利用非金属矿多样性与功能或矿区矿物材料开发就地取材的场地土壤污染治理材料与技术,如铀矿区放射性核素污染控制及治理、煤化工、油

田重金属污染场地防治及安全利用集成技术、煤炭产业集聚区场地污染治理、有色金属选冶渣场影响区污染修复、冶炼场地土壤-地下水协同修复、废旧电器拆解场地污染区修复技术等。

总之,我们这里不能穷尽应用矿物学在未来十年的所有发展内容,但可以预期应用矿物学和科学家在第四次产业技术革命的前景下面临的挑战和迫切任务,期待广大同行共同创造和努力。

**致谢:** 本文撰写过程中,就相关问题与张岭、黄阳、王振等同事和陈禹衡、夏雪等研究生进行了有益探讨,特此致谢。

### 参考文献 (References):

- Al-Khirbush S A. 2020. Mineralogical characterization of low-grade nickel laterites from the North Oman Mountains: Using mineral liberation analyses-scanning electron microscopy-based automated quantitative mineralogy. *Ore Geology Reviews*, 120: 103429
- Barton I, Ahn J, Lee J. 2018. Mineralogical and metallurgical study of supergene ores of the Mike Cu-Au(-Zn) deposit, Carlin trend, Nevada. *Hydrometallurgy*, 176: 176-191
- Bouville F, Maire E, Meille S, van de Moortèle B, Stevenson A J, Deville S. 2014. Strong, tough and stiff bioinspired ceramics from brittle constituents. *Nature Materials*, 13(5): 508-514
- Cabri L J, Wilhelmij H R, Eksteen J J. 2017. Contrasting mineralogical and processing potential of two mineralization types in the platinum group element and Ni-bearing Kapalagulu Intrusion, western Tanzania. *Ore Geology Reviews*, 90: 772-789
- Cao Y, Fatemi V, Demir A, Fang S A, Tomarken L S, Luo Y J, Sanchez-Yamagishi D J, Watanabe K, Taniguchi T, Kaxiras E, Ashoori C R, Jarillo-Herrero P. 2018a. Correlated insulator behaviour at half-filling in magic-angle graphene superlattices. *Nature*, 556(7699): 80-84
- Cao Y, Fatemi V, Fang S A, Watanabe K, Taniguchi T, Kaxiras E, Jarillo-Herrero P. 2018b. Unconventional superconductivity in magic-angle graphene superlattices. *Nature*, 556(7699): 43-50
- Cruz-Silva R, Morelos-Gomez A, Kim H I, Jang H K, Tristan F, Vega-Diaz S, Rajukumar L P, Elias A L, Perea-Lopez N, Suhr J, Endo M, Terrones M. 2014. Super-stretchable graphene oxide macroscopic fibers with outstanding knotability fabricated by dry film scrolling. *ACS Nano*, 8(6): 5959-5967
- Fan W, Zhang X, Zhang Y, Zhang Y F, Liu T X. 2019. Lightweight, strong, and super-thermal insulating polyimide composite aerogels under high temperature. *Composites Science and Technology*, 173: 47-52
- Gao Y, Cao T F, Cellini F, Berger C, de Heer W A, Tosatti E, Riedo E, Bongiorno A. 2018. Ultrahard carbon film from epitaxial two-layer graphene. *Nature Nanotechnology*, 13(2): 133-138
- Ge J F, Liu Z L, Liu C H, Gao C L, Qian D, Xue Q K, Liu Y, Jia J F. 2015. Superconductivity above 100 K in single-layer FeSe films on

- doped SrTiO<sub>3</sub>. *Nature Materials*, 14(3): 285–289
- Gu L L, Poddar S, Lin Y, Long Z H, Zhang D Q, Zhang Q P, Shu L, Qiu X, Kam M, Javey A, Fan Z Y. 2020. A biomimetic eye with a hemispherical perovskite nanowire array retina. *Nature*, 581(7808): 278–282
- Guanira K, Valente T M, Rfios C A, Castellanos O M, Salazar L, Lattanzi D, Jaime P. 2020. Methodological approach for mineralogical characterization of tailings from a Cu (Au, Ag) skarn type deposit using QEMSCAN (Quantitative Evaluation of Minerals by Scanning Electron Microscopy). *Journal of Geochemical Exploration*, 209: 106439
- Han J K, Du G L, Gao W W, Bai H. 2019. An anisotropically high thermal conductive boron nitride/epoxy composite based on nacre-mimetic 3D network. *Advanced Functional Materials*, 29(13): 1900412
- Hill E H, Hanske C, Johnson A, Yate L, Jelitto H, Schneider G A, Liz-Marzan L M. 2017. Metal nanoparticle growth within clay-polymer nacre-inspired materials for improved catalysis and plasmonic detection in complex biofluids. *Langmuir*, 33(35): 8774–8783
- Hu X Z, Xu Z, Liu Z, Gao C. 2013. Liquid crystal self-templating approach to ultrastrong and tough biomimic composites. *Scientific Reports*, 3: 2374
- Huang Z Q, Zhang G S. 2012. Biomimetic synthesis of aragonite nanorod aggregates with unusual morphologies using a novel template of natural fibrous proteins at ambient condition. *Crystal Growth & Design*, 12(4): 1816–1822
- Jalili R, Aboutalebi S H, Esrafilzadeh D, Shepherd R L, Chen J, Amin-orroaya-Yamini, S, Konstantinov K, Minett A I, Razal J M, Wallace G G. 2013. Scalable one-step wet-spinning of graphene fibers and yarns from liquid crystalline dispersions of graphene oxide: Towards multifunctional textiles. *Advanced Functional Materials*, 23(43): 5345–5354
- Jun J M V, Altoe M V P, Aloni S, Zuckermann R N. 2015. Peptoid nanosheets as soluble, two-dimensional templates for calcium carbonate mineralization. *Chemical Communications*, 51(50): 10218–10221
- Knöller A, Lampa C P, von Cube F, Zeng T H, Bell D C, Dresselhaus M S, Burghard Z, Bill J. 2017. Strengthening of ceramic-based artificial nacre via synergistic interactions of 1D vanadium pentoxide and 2d graphene oxide building blocks. *Scientific Reports*, 7: 40999
- Le Ferrand H, Bouville F, Niebel T P, Studart A R. 2015. Magnetically assisted slip casting of bioinspired heterogeneous composites. *Nature Materials*, 14(11): 1172–1179
- Le P T A, Vu T P, Le H T, van Phan D, Nguyen C X, Luong T D, Dang N T T, Nguyen T D. 2020. Nacre-mimicking Titania/Graphene/chitin assemblies in macroscopic layered membranes and their performance. *Journal of Electronic Materials*, 49(6): 3791–3803
- Lei Y F, Chen X H, Song H H, Hu Z J, Cao B. 2017. The influence of thermal treatment on the microstructure and thermal insulation performance of silica aerogels. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 470: 178–183
- Li M, Wu Z S, Kao H T. 2011. Study on preparation and thermal properties of binary fatty acid/diatomite shape-stabilized phase change materials. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 95(8): 2412–2416
- Li Q H, Li M, Zhu P Z, Wei S C. 2012. *In vitro* synthesis of bioactive hydroxyapatite using sodium hyaluronate as a template. *Journal of Materials Chemistry*, 22(38): 20257–20265
- Li Z, Fu Y H, Zhou A N, Zhu C Y, Yang C, Zhang Q. 2017. Air impact pulverization-precise classification process to support ultraclean coal production. *Powder Technology*, 318: 231–241
- Liang B L, Zhao H W, Zhang Q, Fan Y Z, Yue Y H, Yin P G, Guo L. 2016. Ca<sup>2+</sup> enhanced nacre-inspired montmorillonite-alginate film with superior mechanical, transparent, fire retardancy, and shape memory properties. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 8(42): 28816–28823
- Liang C Y, Luo Y C, Yang G D, Xia D, Liu L, Zhang X M, Wang H S. 2018. Graphene oxide hybridized nHAC/PLGA scaffolds facilitate the proliferation of MC3T3-E1 cells. *Nanoscale Research Letters*, 13: 15
- Liu C, Wong H M, Yeung K W K, Tjong S C. 2016. Novel electrospun polylactic acid nanocomposite fiber mats with hybrid graphene oxide and nanohydroxyapatite reinforcements having enhanced biocompatibility. *Polymers*, 8(8): 287
- Liu H C, Nie Z Y, Xia J L, Zhu H R, Yang Y, Zhao C H, Zheng L, Zhao Y D. 2015. Investigation of copper, iron and sulfur speciation during bioleaching of chalcopyrite by moderate thermophile *Sulfobacillus thermosulfidooxidans*. *International Journal of Mineral Processing*, 137: 1–8
- Liu H Y, Cheng J, Chen F J, Bai D C, Shao C W, Wang J, Xi P X, Zeng Z Z. 2014. Gelatin functionalized graphene oxide for mineralization of hydroxyapatite: biomimetic and in vitro evaluation. *Nanoscale*, 6(10): 5315–5322
- Liu J, Zhou L, Dong F Q, Hudson-Edwards K A. 2017. Enhancing As (V) adsorption and passivation using biologically formed nano-sized FeS coatings on limestone: Implications for acid mine drainage treatment and neutralization. *Chemosphere*, 168: 529–538
- Livanov K, Jelitto H, Bar-On B, Schulte K, Schneider G A, Wagner D H. 2015. Tough alumina/polymer layered composites with high ceramic content. *Journal of the American Ceramic Society*, 98(4): 1285–1291
- Lv J W, Ding D F, Yang X K, Hou K, Miao X, Wang D W, Kou B C, Huang L, Tang Z Y. 2019. Biomimetic chiral photonic crystals. *Angewandte Chemie International Edition*, 58(23): 7783–7787
- Ma L Y, Wang X J, Feng X, Liang Y L, Xiao Y H, Hao X D, Yin H Q, Liu H W, Liu X D. 2017. Co-culture microorganisms with different initial proportions reveal the mechanism of chalcopyrite bioleaching coupling with microbial community succession. *Biore-source Technology*, 223: 121–130
- Ma T B, Zhao Y S, Ruan K P, Liu X R, Zhang J L, Guo Y Q, Yang X T, Kong J, Gu J W. 2020. Highly thermal conductivities, excellent mechanical robustness and flexibility, and outstanding thermal stabilities of aramid nanofiber composite papers with nacre-mimetic layered structures. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 12(1): 1677–1686

- Mizuguchi Y, Fujihisa H, Gotoh Y, Suzuki K, Usui H, Kuroki K, Demura S, Takano Y, Izawa H, Miura O. 2012. BiS<sub>2</sub>-based layered superconductor Bi<sub>4</sub>O<sub>4</sub>S<sub>3</sub>. *Physical Review B*, 86(22): 220510
- Morits M, Verho T, Sorvari J, Liljeström V, Kostianen M A, Gröschel A H, Ikkala O. 2017. Toughness and fracture properties in nacre-mimetic clay/polymer nanocomposites. *Advanced Functional Materials*, 27(10): 1605378
- Nam H Y, Min K H, Kim D E, Choi J R, Lee H J, Lee S C. 2017. Mussel-inspired poly(1-dopa)-templated mineralization for calcium phosphate-assembled intracellular nanocarriers. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 157: 215–222
- Nazari A M, Ghahreman A, Bell S. 2017. A comparative study of gold refractoriness by the application of QEMSCAN and diagnostic leach process. *International Journal of Mineral Processing*, 169: 35–46
- Nie Z Y, Zhang W W, Liu H C, Zhu H R, Zhao C H, Zhang D R, Zhu W, Ma C Y, Xia J L. 2019. Bioleaching of chalcopyrite with different crystal phases by *Acidianus manzaensis*. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 29(3): 617–624
- Nomoto T, Fukushima S, Kumagai M, Miyazaki K, Inoue A, Mi P, Maeda Y, Toh K, Matsumoto Y, Morimoto Y, Kishimura A, Nishiyama N, Kataoka K. 2016. Calcium phosphate-based organic-inorganic hybrid nanocarriers with pH-responsive on/off switch for photodynamic therapy. *Biomaterials Science*, 4(5): 826–838
- Otunola B O, Ololade O O. 2020. A review on the application of clay minerals as heavy metal adsorbents for remediation purposes. *Environmental Technology & Innovation*, 18: 100692
- Sarier N, Onder E, Ozay S, Ozkiliç Y. 2011. Preparation of phase change material—montmorillonite composites suitable for thermal energy storage. *Thermochimica Acta*, 524(1–2): 39–46
- Sharma V, Srinivasan A, Nikolajeff F, Kumar S. 2020. Biomineralization process in hard tissues: The interaction complexity within protein and inorganic counterparts. *Acta Biomaterialia*, doi: 10.1016/j.actbio.2020.04.049
- Tani H, Inazumi T, Terashima K. 2014. Mineralogical study of iron sand with different metallurgical characteristic to smelting with use of Japanese classic iron-making furnace “Tatara”. *ISIJ International*, 54(5): 1044–1050
- Wan S J, Zhang Q, Zhou X H, Li D C, Ji B H, Jiang L, Cheng Q F. 2017. Fatigue resistant bioinspired composite from synergistic two-dimensional nanocomponents. *ACS Nano*, 11(7): 7074–7083
- Wang K F, Chou K C, Zhang G H. 2020. Preparation of high-purity and ultrafine WC-Co composite powder by a simple two-step process. *Advanced Powder Technology*, 31(5): 1940–1945
- Wei Z L, Li Y B, Gao H M, Zhu Y G, Qian G J, Yao J. 2019. New insights into the surface relaxation and oxidation of chalcopyrite exposed to O<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O: A first-principles DFT study. *Applied Surface Science*, 492: 89–98
- Wu Q, Guo D, Zhang Y W, Zhao H W, Chen D Z, Nai J W, Liang J F, Li X W, Sun N, Guo L. 2014. Facile and universal superhydrophobic modification to fabricate waterborne, multifunctional nacre-mimetic films with excellent stability. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 6(23): 20597–20602
- Xu C B, Qi J, Yang W J, Chen Y, Yang C, He Y L, Wang J, Lin A J. 2019. Immobilization of heavy metals in vegetable-growing soils using nano zero-valent iron modified attapulgite clay. *Science of the Total Environment*, 686: 476–483
- Xu W L, Chen S, Zhu Y N, Xiang X X, Bo Y Q, Lin Z M, Wu H, Liu H E. 2020. Preparation of hyperelastic graphene/carboxymethyl cellulose composite aerogels by ambient pressure drying and its adsorption applications. *Journal of Materials Science*, 55(24): 10543–10557
- Xu Y, Liang X F, Xu Y M, Qin X, Huang Q Q, Wang L, Sun Y B. 2017. Remediation of heavy metal-polluted agricultural soils using clay minerals: A review. *Pedosphere*, 27(2): 193–204
- Xu Z, Sun H Y, Zhao X L, Gao C. 2013. Ultrastrong fibers assembled from giant graphene oxide sheets. *Advanced Materials*, 25(2): 188–193
- Yang C R, Wang Y J, Chen X F. 2012. Preparation and evaluation of biomimetic nano-hydroxyapatite-based composite scaffolds for bone-tissue engineering. *Chinese Science Bulletin*, 57(21): 2787–2792
- Zhang B Y, Wang Q, Zhang Y X, Gao W Q, Hou Y C, Zhang G X. 2019a. A self-assembled, nacre-mimetic, nano-laminar structure as a superior charge dissipation coating on insulators for HVDC gas-insulated systems. *Nanoscale*, 11(39): 8046–18051
- Zhang G X, Gong C J, Gu J G, Katayama Y, Someya T, Gu J D. 2019c. Biochemical reactions and mechanisms involved in the biodeterioration of stone world cultural heritage under the tropical climate conditions. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 143: 104723
- Zhang J G, Liu Y Z, Feng T, Zhou M J, Zhou L, Zhou A J, Zhu L. 2017a. Immobilizing bacteria in expanded perlite for the crack self-healing in concrete. *Construction and Building Materials*, 148: 610–617
- Zhang J S, Zhang X, Wan Y Z, Mei D D, Zhang B. 2012. Preparation and thermal energy properties of paraffin/halloysite nanotube composite as form-stable phase change material. *Solar Energy*, 86(5): 1142–1148
- Zhang L, Zhang Y Q, Li F B, Yan S, Wang Z S, Fan L X, Zhang G Z, Li H J. 2019b. Water-evaporation-powered fast actuators with multimodal motion based on robust nacre-mimetic composite film. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 11(13): 12890–12897
- Zhang L H, Zhang Y S, Liu C B, Liu L B, Tang K J. 2017b. Study on microstructure and bond strength of interfacial transition zone between cement paste and high-performance lightweight aggregates prepared from ferrochromium slag. *Construction and Building Materials*, 142: 31–41
- Zhang Y Y, Li Y C, Ming P, Zhang Q, Liu T X, Jiang L, Cheng Q F. 2016. Ultrastrong bioinspired graphene-based fibers via synergistic toughening. *Advanced Materials*, 28(14): 2834–2839
- Zhao B, Wang Y S, Luo Y H, Li J, Zhang X, Shen T. 2018. Landslides and dam damage resulting from the Jiuzhaigou earthquake (8 August 2017), Sichuan, China. *Royal Society Open Science*, 5(3): 171418
- Zhao H W, Yue Y H, Guo L, Wu J T, Zhang Y W, Li X D, Mao S C, Han X D. 2016. Cloning nacre’s 3D interlocking skeleton in engineering composites to achieve exceptional mechanical properties.

- Advanced Materials, 28(25): 5099–5105
- Zhao K, Zhang T F, Chang H C, Yang Y, Xiao P S, Zhang H T, Li C X, Tiwary C S, Ajayan P M, Chen Y S. 2019. Super-elasticity of three-dimensionally cross-linked graphene materials all the way to deep cryogenic temperatures. *Science Advances*, 5(4): eaav2589
- Zhao X Y, Zhu Y J, Zhao J, Lu B Q, Chen F, Qi C, Wu J. 2014. Hydroxyapatite nanosheet-assembled microspheres: Hemoglobin-templated synthesis and adsorption for heavy metal ions. *Journal of Colloid and Interface Science*, 416: 11–18
- Zhou L, Dong F Q, Liu J, Hudson-Edwards K A. 2017. Coupling effect of  $Fe^{3+}_{(aq)}$  and biological, nano-sized FeS-coated limestone on the removal of redox-sensitive contaminants (As, Sb and Cr): Implications for *in situ* passive treatment of acid mine drainage. *Applied Geochemistry*, 80: 102–111
- Zhou W B, Moguche A O, Chiu D, Murali-Krishna K, Baneyx F. 2014. Just-in-time vaccines: Biomimetic calcium phosphate core-immunogen shell nanoparticles induce long-lasting CD8<sup>+</sup> T cell responses in mice. *Nanomedicine*, 10(3): 571–578
- 白桦. 2019. 层状过渡金属硫族化合物的超导电性研究. 博士学位论文. 杭州: 浙江大学
- 常晶晶, 张文元, 徐抒平, 宣旭阳, 苏伯民, 徐蔚青. 2010. 古代壁画中矿物颜料的拉曼光谱研究. 见: 第十六届全国分子光谱学学术会议论文集. 郑州: 中国光学学会, 中国化学会, 277–278
- 陈庚龄, 康明大. 2012. 临洮哥舒翰纪功碑岩层矿物分析. *丝绸之路*, (2): 114–116
- 陈庆汉. 2012. 壳熔法生长蓝宝石单晶的进展. *宝石和宝石学杂志*, 14(3): 17–21
- 陈晓蕾. 2018. 有机改性膨润土对选矿废水中丁铵黑药的吸附性能研究. 硕士学位论文. 济南: 山东大学
- 陈正国, 于海军, 李朝灿, 陈军元, 熊军. 2019. 我国非金属矿产分类探讨. *中国非金属矿工业导刊*, (2): 1–5
- 董发勤, 徐龙华, 彭同江, 代群威, 谌书. 2014. 工业固体废物资源循环利用矿物学. *地学前缘*, 21(5): 302–312
- 董发勤. 2015. 应用矿物学. 北京: 高等教育出版社
- 杜保聪, 张鸣, 杨鼎宜, 陈霓超, 周勋建, 蔡雨, 李书龙. 2018. 地聚合物材料研究与应用现状. *四川建材*, 44(12): 38–41
- 杜培鑫, 袁鹏, 庄官政. 2019. 纳米管埃洛石的应用矿物学研究进展. *矿产保护与利用*, 39(6): 77–86
- 杜培鑫, 袁鹏. 2019. 叶蜡石在超硬材料等关键矿物材料领域的研究和应用. *矿产保护与利用*, 39(6): 87–92
- 方明山, 王明燕. 2018. AMICS在铜矿伴生金银综合回收中的应用. *矿冶*, 27(3): 104–108
- 冯聪, 储满生, 唐珏, 汤雅婷, 柳政根. 2016. 不同类型含铁高炉渣主要冶金性能及物相. *中南大学学报(自然科学版)*, 47(8): 2556–2562
- 冯楠. 2011. 潮湿环境下砖石类文物风化机理与保护方法研究. 博士学位论文. 长春: 吉林大学
- 付倩丽. 2016. 古代矿物颜料拉曼光谱定量分析方法模拟实验研究. 硕士学位论文. 西安: 西北大学
- 郭鸿旭. 2017. 宝石“新贵”: 沙弗莱石 变色水铝石 加斯佩石. *上海工艺美术*, (4): 62–63
- 何军拥, 田承宇. 2013. 玄武岩纤维水工高性能混凝土的耐久性研究. *混凝土与水泥制品*, (5): 46–48
- 胡小强. 2016. 沸石矿物对铀尾矿的固化及阻滞机理研究. 硕士学位论文. 绵阳: 西南科技大学
- 胡艳美, 王旭军, 党秀丽. 2020. 改良剂对农田土壤重金属镉修复的研究进展. *江苏农业科学*, 48(6): 17–23
- 黄毅, 徐国平, 程慧高, 蒋卓辉, 杨宇. 2014. 典型钢渣的化学成分、显微形貌及物相分析. *硅酸盐通报*, 33(8): 1902–1907
- 蒋谋锋, 张一敏, 包申旭, 杨晓. 2015. 石英对某云母型石煤酸浸提钒的影响. *有色金属(冶炼部分)*, (8): 34–38
- 姜雄, 铁生年. 2014. 膨润土/聚丙烯酰胺复合吸水保水材料的制备及性能研究. *硅酸盐通报*, 33(4): 731–735
- 李琼芳, 何鑫, 陈超, 杨清清, 吕治州. 2018. 两株嗜冷碳酸钙矿化菌对大理石表面修复效果研究. *人工晶体学报*, 47(1): 172–178
- 李小飞. 2019. 天然矿物材料改性及其修复铬污染土壤效果研究. 硕士学位论文. 北京: 北京化工大学
- 李晓静. 2016. 常见宝石的近红外光谱研究. 硕士学位论文. 昆明: 昆明理工大学
- 李晓溪. 2012. 脆弱陶质文物加固材料的筛选及改性研究. 硕士学位论文. 西安: 西北大学
- 李欣桐, 先怡衡, 樊静怡, 张璐繁, 郭靖雯, 高占远, 温睿. 2019. 应用扫描电镜-X射线衍射-电子探针技术研究河南浙川绿松石矿物学特征. *岩矿测试*, 38(4): 373–381
- 李真强. 2016. 沸石矿物对铀尾矿堆积体的固化处理与固化体稳定性研究. 硕士学位论文. 绵阳: 西南科技大学
- 刘宝昌, 曹鑫, 孟庆南, 朱品文, 戴文昊, 韩哲, 赵新哲, 李思奇. 2018. PCBN基体孕镶金刚石复合材料的制备与性能研究. *金刚石与磨料磨具工程*, 38(5): 21–27
- 刘波. 2017. 某铀矿山尾矿中有害金属元素的迁移、阻滞及机理研究. 博士学位论文. 绵阳: 西南科技大学
- 刘昊, 廖立兵, 吕国诚, 王丽娟, 梅乐夫, 郭庆丰. 2020. 矿物介质材料在渗透反应格栅技术中的应用研究进展. *矿物学报*, 40(3): 274–280
- 刘来宝, 张礼华, 唐凯靖. 2020. 高碳铬铁冶金渣资源化综合利用技术. 北京: 中国建材工业出版社
- 刘庆生, 李江霖, 常晴, 邱廷省. 2019. 离子型稀土矿浸出前后工艺矿物学研究. *稀有金属*, 43(1): 92–101
- 刘晓晔. 2019. 光合作用生物膜形成的方解石鲕粒: 以河南石井剖面寒武系苗岭统为例. 硕士学位论文. 北京: 中国地质大学(北京)
- 刘鑫, 张一敏, 刘涛, 孙坤, 汪博, 许承宝. 2017. 湖北某云母型含钒石煤重-浮联合预抛尾试验. *金属矿山*, (5): 93–98
- 毛喆, 李丹, 钟音, 朱锡芬, 鲜海洋, 彭平安. 2016. 硫化亚铁矿物的生物合成及其对六溴环十二烷的还原脱溴研究. *地球化学*, 45(6): 601–613
- 孟跃辉, 倪文, 张玉燕. 2010. 我国尾矿综合利用发展现状及前景. *中国矿山工程*, 39(5): 4–9
- 牛飞. 2018. 几种表面处理技术在金属文物修复中的应用. *电镀与涂饰*, 37(16): 728–731
- 牛乐乐, 刘征建, 张建良, 张宗旺, 王耀祖, 杜诚波. 2019. 铁矿粉矿物组成对烧结矿冶金性能的影响. *钢铁*, 54(9): 27–32, 38
- 潘海华, 唐睿康. 2020. 生物矿化及仿生矿化中的信息传递和转化. *化工学报*, 71(1): 68–80
- 齐扬, 周伟强, 陈静, 叶亚云, 周萍, 侯静敏, 吴鹏. 2015. 激光清

- 凌云冈石窟文物表面污染物的试验研究. 安全与环境工程, 22(2): 32-38
- 秦丽辉. 2014. 玄武岩纤维布加固损伤混凝土梁力学性能研究. 博士学位论文. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学
- 秦雅静, 朱德山. 2014. 我国水镁石矿资源利用现状及展望. 中国非金属矿工业导刊, (6): 1-3
- 冉飞天. 2016. 黏土基高分子复合材料的制备及其保水固沙性能研究. 硕士学位论文. 兰州: 西北师范大学
- 阮彬彬. 2018. 新型卤化物、插层结构及合金超导体探索. 博士学位论文. 北京: 中国科学院大学(中国科学院物理研究所)
- 邵秋月, 葛文, 沈建军. 2019. 硅灰石的表面改性及新型矿物基聚合物的合成. 非金属矿, 42(5): 16-18
- 邵志斌. 2019. 常规超导体及 IV-VI 族薄膜的分子束外延生长及扫描隧道显微镜研究. 博士学位论文. 武汉: 华中科技大学
- 申柯娅. 2011. 天然祖母绿与合成祖母绿的成分及红外吸收光谱研究. 岩矿测试, 30(2): 233-237
- 史鸿晋. 2016. 某铀矿山铀尾矿属性与核素铀的迁移规律及工程阻滞研究. 研究硕士学位论文. 绵阳: 西南科技大学
- 宋鹏程, 彭同江, 孙红娟, 贾蕾, 张馨文, 邱国华, 朱琳. 2016. 纤维蛇纹石石棉尾矿综合利用新进展. 中国非金属矿工业导刊, (2): 14-17
- 孙永升, 韩跃新, 高鹏, 王琴. 2015. 温度对鲕状赤铁矿深度还原特性的影响. 中国矿业大学学报, 44(1): 132-137
- 谭远. 2016. 生物成因纤维状文石集合体的结构表征及其仿生制备. 硕士学位论文. 南宁: 广西大学
- 王爱娣. 2013. 黏土基复合固沙材料性能研究. 硕士学位论文. 兰州: 西北师范大学
- 王丹. 2017. 膨胀石墨的制备及其对捕收剂吸附研究. 硕士学位论文. 昆明: 昆明理工大学
- 王菲, 于湖生, 宫怀瑞. 2019. 抗菌防螨远红外黏胶纤维的制备及性能研究. 针织工业, (10): 7-9
- 王健, 张乐文, 冯啸, 赵少龙, 王洪波. 2015. 碱激发地聚合物双液注浆材料试验与应用研究. 岩石力学与工程学报, 34(S2): 4418-4425
- 王捷, 王逢睿, 申喜旺, 何真. 2017. 无机矿物聚合物应用于龙山石窟岩体裂隙加固的试验研究. 新型建筑材料, 44(5): 58-62
- 王哲, 易发成, 刘艳, 刘延. 2020. 以膨润土为基材的集成缓冲材料对轴的长期阻滞效应研究. 矿物岩石地球化学通报, 39(2): 200-208, 169
- 温利刚, 曾普胜, 詹秀春, 范晨子, 孙冬阳, 王广, 袁继海. 2018. 矿物表征自动定量分析系统(AMICS)技术在稀土稀有矿物鉴定中的应用. 岩矿测试, 37(2): 121-129
- 文圆, 黄惠宁, 张国涛, 黄辛辰, 杨景琪, 戴永刚. 2019. 电气石材料性能与应用研究进展. 陶瓷, (2): 17-24
- 吴道, 孙红娟, 彭同江, 段佳琪, 杨红梅, 吴懂萱, 喇继德. 2017. 优质石英岩作为高纯石英原料的提纯试验研究. 非金属矿, 40(1): 68-70, 74
- 向小平, 刘武杨, 李东升, 甘牧原, 马承胜, 石楚刚. 2020. 柳钢烧结矿的化学成分及显微结构分析. 烧结球团, 45(2): 21-25, 30
- 谢宝珊, 李传常, 张波, 赵新波, 陈荐, 陈中胜. 2019. 硅酸盐矿物储热特征及其复合相变材料. 硅酸盐学报, 47(1): 143-152
- 邢睿睿, 陈美华, 邹昱. 2019. 晶化时间对高压高温合成翡翠品质的影响. 宝石和宝石学杂志, 21(1): 31-39
- 许凤琴. 2016. 蒙脱石-碳酸盐矿化菌对  $\text{Sr}^{2+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$  的联合滞固研究. 硕士学位论文. 绵阳: 西南科技大学
- 徐丽莎. 2019. 羟基磷灰石/凹凸棒土复合材料制备及其对重金属污染土壤钝化性能研究. 硕士学位论文. 成都: 成都理工大学
- 闫华晓, 韩作振, 赵辉, 庄定祥. 2019. 对生物成因和非生物成因方解石的新见解. 见: 中国矿物岩石地球化学学会第 17 届学术年会论文摘要集. 杭州: 中国矿物岩石地球化学学会, 1091
- 严绍军, 何凯, 孙鹏, 窦彦, 陈嘉琦. 2016. 重庆合川钓鱼城古战场遗址砂岩风化试验研究. 长江科学院院报, 33(8): 100-104, 119
- 杨帆, 李峰, 胡南, 张辉, 丁德馨. 2020. 含铀煤灰工艺矿物学研究. 矿物学报, doi: 10.16461/j.cnki.1000-4734.2020.40.141
- 杨玉山, 董发勤, 邓跃全, 曲瑞雪. 2013. 一种适于湿热环境的防氡涂层. 原子能科学技术, 47(12): 2384-2388
- 杨志法, 张中俭, 周剑, 李丽慧. 2013. 基于风化剥落深度的衢州古城墙小西门岩石砌块和灰浆勾缝条长期抗风化能力研究. 工程地质学报, 21(1): 97-102
- 于洋. 2017. 生物方解石微观光学性能的纳米压痕试验研究. 硕士学位论文. 长春: 吉林大学
- 袁鸿, 龙永芳, 赵西晨, 刘雄. 2013. 荆门獾子冢搬迁车马土体分析研究. 敦煌研究, (1): 82-85
- 张海亮, 张明福, 韩杰才, 侯永昭, 杨雯. 2020. 镁/钛离子注入对蓝宝石微结构和机械性能的影响. 人工晶体学报, 49(2): 195-204
- 张妮, 林春明. 2016. X 射线衍射技术应用于宝石鉴定-合成及晶体结构研究进展. 岩矿测试, 35(3): 217-228
- 张韶华, 刘来宝, 谭克锋, 张登科, 唐凯靖. 2014. 掺铬铁渣的铝镁系浇注料的制备与性能研究. 耐火材料, 48(6): 436-438, 442
- 张志祥, 斯琴高娃, 翁根花, 李伟, 哈斯. 2013. 浅谈人工宝石. 西部资源, (5): 179-181
- 赵康. 2013. 生物分子对方解石体外仿生矿化的研究. 博士学位论文. 青岛: 中国石油大学(华东)
- 赵林毅. 2012. 应用于岩土质文物保护加固的两种传统材料的改性研究. 博士学位论文. 兰州: 兰州大学
- 赵钰, 董颖博, 林海. 2019. 有色金属矿尾矿微生物浸出技术研究进展. 金属矿山, 48(11): 197-203

(本文责任编辑:龚超颖;英文审校:张兴春)