



全新工业革命与碳中和驱动的矿物科学与工程前景 ——基于矿物资源几个平衡的思考

董发勤^{1,2,3},周磊³,边亮⁴,郭铭^{1,2},陈军元⁵

1. 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;
2. 西南科技大学 环境与资源学院,四川 绵阳 621010;
3. 西南科技大学 国家原子能机构核环境安全技术创新中心,四川 绵阳 621010;
4. 西南科技大学 环境友好能源材料国家重点实验室,四川 绵阳 621010;
5. 中国建筑材料工业地质勘察中心,北京 100035

中图分类号:P579 文献标志码:A
文章编号:1001-6872(2025)01-0130-12

DOI:10.19719/j.cnki.1001-6872.2025.01.12
网络首发地址:https://link.cnki.net/urlid/51.1143.td.20250117.1314.006

引用格式:董发勤,周磊,边亮,等.全新工业革命与碳中和驱动的矿物科学与工程前景——基于矿物资源几个平衡的思考[J].矿物岩石,2025,45(1):130-141.
DONG Faqin,ZHOU Lei,BIAN Liang, *et al.* Prospects of Mineral Science and Engineering Driven by the New Industrial Revolution and Carbon Neutrality—Thoughts on several balances based on mineral resources[J]. *Mineralogy and Petrology*, 2025, 45(1):130-141.

【摘要】 进入21世纪后绿色能源发展、生态环境矛盾深化、高新技术需求高涨,新科技加速演进主导了“工业革命4.0”。工业革命的历史进程都与矿物资源演进密切相关,新技术的出现与运用引发矿产资源的利用类型和方式的变革,进而主导工业革命的方向和内容,从而带动能源、材料、信息等多方面的科技进步。矿产资源利用多次转型的规律预示着,在全新工业革命和碳中和目标的大背景下,矿产资源的保障、开发利用、新型应用所带来的生态环境问题都制约着矿物科学与工程学科的地位与价值。如何在当代的矿产资源利用中运用矿物学和应用矿物学的理论与方法技术化解一些长期存在的矛盾,包括资源开拓与节约的矛盾、资源利用与环境污染的矛盾、矿物性能与新应用的矛盾以及矿物介质排碳与固碳的矛盾,而这些矛盾都上升为当下矿物科学与工程的视角承载中国式现代化国家需求和社会发展应面向的重要任务。本文聚焦于上述四个矛盾的方面,结合矿产资源开发利用的实例,如铀矿、锂矿、水滑石、钙钛矿等,阐述现代矿物学如何高质量服务国家重大战略需求,在相关领域发展新质生产力的一些思考。

【关键词】 工业革命;碳中和;矿物资源;综合利用;新功能

0 引 言

人类文明发展史就是一部矿产资源利用史,地

学为能源结构更替提供了物质支撑,每一次新型技术革命都伴随着能源结构的转型升级^[1]。21世纪以来,为应对能源和资源危机、全球生态环境恶化、高新技革新等人类社会面临重大问题,以信

收稿日期:2024-12-26;改回日期:2025-01-10

基金项目:国家自然科学基金重点项目(批准号:4243000522);国家自然科学基金面上项目(批准号:5197041946)

第一作者简介:董发勤,男,61岁,博士,教授(博士生导师),矿物学专业,研究方向:应用矿物学。E-mail:fqdong@swust.edu.cn。

息、生物、新材料、新能源技术为代表的“第四次工业革命”^[2]显现出强有力的生命力。在新型工业革命的大趋势下,依赖矿物资源类型的重心出现了新的趋势,即传统的影响社会经济发展的技术如冶炼技术、蒸汽技术、电能技术、发动机技术等高度依赖碳资源,而现代科学技术如大数据、人工智能、新能源、激光技术等更依赖硅资源,这种趋势对矿物学和应用矿物学来说既是挑战更是机遇。

然而人类社会的高速发展引发的矿物资源过度开发利用也导致了一系列的生态环境问题,特别是化石能源的高碳排放产生了不可逆转的全球温室效应。近年来,我国都是世界上 CO₂ 排放量最大的国家之一,导致我们在国际气候变化行动方面处于被动。然而我们自身还有对碳中和目标认知的局限,因为碳中和不单是一个技术的问题,更是经济和社会平衡发展的综合性问题。我国双碳目标的难点聚焦在燃煤、电力、民用建筑、传统工业系统等减排重点领域,国家以“减污降碳协同增效”为总抓手,加快能源清洁低碳转型,逐步构建零碳能源体系^[3]。提高能效是世界上成本最低的减碳路线,但根本的还依靠碳基能源结构的大幅降低,而在此过程中矿物资源开发利用方向和方式的转变迫在眉睫。

在全新工业革命的世界变革与碳中和的国家政策驱动下,矿物科学与工程该如何发展并做出更大贡献? 本文从矿物资源的开发应用现状出发,提出新型矿物资源、矿物环境效应、矿物新应用及排碳固碳方面的矛盾及平衡方法,旨在为矿物学的前景提供新的探索方向。

1 矿物资源开拓与节约的平衡

1.1 矿物资源类型、特征与开发利用困局

截至 2023 年底,中国已发现 173 种矿产,其中包括能源矿产 13 种、金属矿产 59 种、非金属矿产 95 种和水气矿产 6 种^[4]。能源矿产如石油、天然气和煤炭是现代工业和经济发展的基石,中国的能源消耗量占全球超过 30%,石油进口量超过 70%^[5]。金属矿产是工业生产和基础设施建设的重要原材料,对国家经济安全和国防安全具有重要意义^[6]。非金属矿产在战略性新兴产业中也有重要应用,随着这些产业的发展,对非金属矿产的需求将快速增长,如石墨、萤石、高纯石英和叶蜡石等^[7]。

矿物资源不可再生,而应用需求量却没有上限。中国是世界矿业大国,固体矿产开发总规模居世界

前列。然而,中国在矿产资源类型、特征与开发利用方面面临困局,不占优势。伴生的问题还在于矿产开发过程中对生态环境的破坏和大量土地被废弃。如全国共有大、中型矿山 9 000 多座,小型矿山近 30 万座,占地面积接近 4 万平方公里,以露天矿为例,排土场和尾矿库占整个矿山用地面积的 40%~65%。在二次资源利用中,存在着来源广泛、种类繁多、品位和性质差异大,组成复杂,分选提纯难度大,技术创新不足,产品市场推广难度大,以及分类回收体系不完善、循环利用成本高、潜在环境污染等问题^[5]。

因此,矿物学在其中的作用显而易见,那就是瞄准国家“国家安全”、“生态文明建设”、“无废城市”、“城市矿产”、“绿色矿山”等重大战略需求,针对各类工业生产过程中资源利用的“科学-工程-技术”问题,开展跨学科的创新性基础理论和应用基础研究^[6]。通过提升矿物技术水平和资源回收率,解决贫难杂散深资源和二次利用难题。

1.2 战略矿产与关键矿物资源竞争

关键矿产对新能源、新材料、信息技术等新兴产业和国防军工等行业具有不可替代的重大用途。美国 2018 年美国公布关键矿物资源有 35 种,非金属矿物超过十余种。2021 年,美国 17 种完全依赖进口的矿产中,有 14 种属于关键矿物资源,而净进口依赖度超过 50% 的非燃料矿产中,由中国供应的数量最多。因此,关键战略矿产资源是国际竞争的焦点。为了保障国家资源安全、国防安全和战略新兴产业发展需求,我们需要在战略矿产与关键矿物资源竞争中主导战略新兴产业,学会抢占先机、把握机遇,把资源优势转化为经济优势:以金砖国家丰富的关键战略性资源,从石油—美元体系逐渐转化到矿产—人民币的资源经济模式,推动国际经济和战略布局,因此,矿物科学与工程需要针对我国资源贫矿多、富矿和易选矿少,矿物之间共生关系复杂,资源回收率低,难以综合利用等技术难点,开展跨学科联合攻关,如共伴生回采技术和多矿综合利用技术,二次资源拓展利用的选别尾矿资源再提取技术、采矿研石和选别尾矿充填技术、冶炼废渣解控及资源化技术以及全面循环利用的常规垃圾分类回收技术、电子材料资源分离技术、有价金属资源提取技术、材料回收及再生技术等。

1.3 矿物资源的开拓与节约

矿产资源的不可再生性和矿物资源的短缺性、分布不均匀使不断寻找新资源类型和发现新矿物成为首要任务。但在现存资源总量下,节约使用资源

也是一种非常现实的途径。为了可持续发展和保护生态环境,我们在矿物资源的开发利用中需要注重开拓与节约的平衡。开拓矿物资源方式包括增加矿种、扩充储量(如降低边界品位和开发城市矿产)、发现新用途以及提高资源利用效率。节约方式则包括源头减量、再生利用和循环利用、集约利用以及废物利用,即“5R原则”^[8]。

资源综合利用从3R(源头减量、再生利用、循环利用)到5R的飞跃是转换资源经济角色的重要方式^[9]。替代原则和方法的建立是由于传统金属和非金属矿物资源的界限和利用方式变得通用和模糊;赋存方式如晶体和非晶体、边界品位和工业品位划分变得宽泛;其产业及延伸产业的规模和地位以材料流或资源流的流动方式及位置经常互换,金属/非金属互化利用成为可能,并在性能和使用上经常替代。同理,复原方法的使用是由于岩石矿物在使用或赋存过程中部分损伤(失)导致其成分、结构或构造、性能或功能等退化直至丧失后,可以通过自然或人工过程,在适宜条件和环境下对自身的缺损进行修补和恢复,以达到矿物资源和材料再次使用或延长寿命。

在矿物资源开发利用的过程中会产生一些副产物、边角料、残余物,在环境领域称之为废物或废弃

物,而且大有泛化之势。其实,在矿物资源的利用过程中,采矿时有大量的产生的剥离物,有的是低品位矿石,并不是废石;在选矿时也产生大量的共生伴生矿物和极低品位矿石,还有在非矿产品加工时产生大量碎屑和粉末,在化工加工时产生大量的副产物如磷石膏、钛石膏,又如在冶金时产生大量的钢渣和铁渣,他们都是有一定性能、活性和用途,也是潜在的矿物资源,但我们过早的轻易的戴上了废物的帽子和标签,这是极不合理的,既是对矿物资源(包括其它资源)极大限制,也是对这类资源的利用带来更大的环境心理压力。我们可以借用核元件材料加工使用后,还有大量的核素没有被完全使用,并且有二次循环使用的潜力,称之为核乏料的理念,在原料和材料之间建立一个中间过度体并称之为乏料的概念。乏料是指原料或材料在生产、使用或者消费过程中,已达到使用寿命失去原有价值和功能后,仍含有大量可再生利用资源的新型固体弃用物料,可通过新技术开发或有效再加工成为原材料或功能材料(图1),包括工农业生产过程没有有毒有害成分的伴生产物、副产物、边角余料和各类渣料。因此,固体废物应严格限定在含有有毒有害成分的固体弃用物。这样可以大幅拓展潜在资源的范围,也为弃用物开发利用打消了污名化的心理障碍。

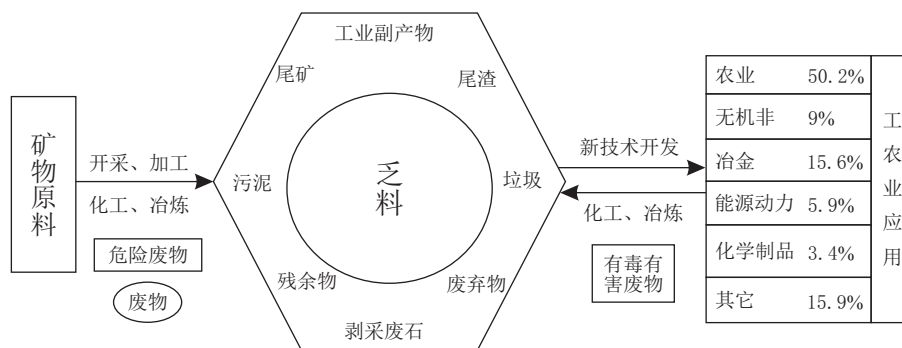


图1 矿物乏料的来源与去处

Fig. 1 Sources and place of mineral waste

1.4 资源开拓节约案例:铀矿资源

下面我们以重要的战略资源铀矿资源为例,简述铀矿资源的开拓与节约。铀矿资源核电站运行的重要原材料,也是制造尖端战术武器不可获缺的资源,是世界各国重要的战略矿产。铀资源分布特征是分散的,边界品位低至ppm级,我国年需铀金属约1万吨,90%以上铀原料依赖于从国际市场进口^[10]。核领域发展对铀资源需求巨大,除常规硬岩型铀矿和砂岩型铀矿外,需要更加重视分散铀资源的回收富集以拓展铀资源,如从海水(ppb)或海水

淡化尾水、工业含铀废水、盐湖铀资源、铀矿山废水(ppm)和各种含铀卤水提取铀^[11]。

目前的国内外海水提铀试验已有公斤级提铀产品,海水提铀的材料最早为矿物吸附材料,目前主要开发偕胺肟基功能化高分子纤维为主^[12]。纳米结构、MOF/COF@LDHs等新型功能化材料目前尚处于实验室研发阶段,未来攻克目标是既能在低浓度下提取核素又能拥有很大的吸附容量的各类材料。

我国存在许多潜在分散铀资源例如盐湖铀资源,盐湖中铀浓度远高于海水,盐湖中的铀储量可满

足目前我国10年铀金属需求量。中国含铀盐湖分布于我国青海、西藏、新疆和内蒙古等广大地区^[13]。西藏达则措盐湖中铀浓度可达到 $324\ \mu\text{g}/\text{L}$ ^[14]。盐湖中铀浓度是海水中铀浓度的几倍甚至上百倍。盐湖提铀的研究工作还处于研发阶段,需要在盐矿物溶解与结晶、选矿和表面吸附等多方面有更大的突破和进展^[15]。

2 矿物资源利用与环境污染的平衡

2.1 矿物资源绿色综合利用趋势

现如今,矿产资源利用涵盖采矿、选矿、冶金、制品、使用、废弃和回用等多个环节。存在于地球中的矿物具有多个学科的属性,主要集中在①物质属性,如声、光、电、磁、热特性;②资源属性,如作为原料和能源矿物,应用于矿产、染料、药材、肥料等领域;③环境属性,如与自然界中的光、水、气、土相互作用,涉及地形、地貌、回填、复垦等方面;④能量属性即体现在能源矿物方面,例如铀矿物和硅基、钛基光电矿物。这些属性和功能性矿物资源也具有回收再利用潜质^[16]。

2.2 矿物—废物的平衡

目前,想要实现矿物与废物的平衡,主要采用资源循环利用和协调处置的路径。矿物资源经过开采、储存、选别加工等前处理,然后生产产品和产生废物。产品在消费利用过程中会再次产生废物,这些废物经过后处理,或达到环境排放标准,或通过再利用实现废物资源化。而后者不仅减少了环境污染,还提高了资源的利用效率,推动了可持续发展^[17]。

资源循环利用加协调处置理念的实现的的关键在于技术创新和政策引导。例如,利用先进的分选技术和处理工艺,可以有效提高废物的再利用率。同时,建立完善的废物回收体系和激励机制,鼓励企业和个人参与废物回收和再利用,可以明显改变资源与废物的比例构成和扩大资源的范围和受益群体。

2.3 矿物资源化利用与环境协同案例

矿产资源的全流程低废化、低碳化的使用是促进环境友好型矿产工业持续发展的基础,在此介绍两种关键矿产,锂矿以及磷石膏的资源化利用与环境协同案例。

2.3.1 锂矿资源

近几年,锂成为一种新兴重要的能源金属,在高性能锂电池和受控热核反应中的应用使其成为解决人

类长期能源供给的重要原料。新能源汽车产业,带动了锂离子电池领域的消费显著增加,其中锂电池消费份额从2015年的35%增长至2023年的87%^[18]。

目前,世界上锂盐的生产主要依赖于液态锂资源如盐湖锂资源,通常分为碳酸盐型、硫酸盐型和氯化物型。非常规卤水资源包括地热卤水、油田卤水和盐井卤水等。固态锂资源如伟晶岩锂矿石资源,即富锂矿物如锂辉石、锂云母等。

锂云母通常含 Li_2O 为1.23%~5.90%,还伴有钽、铌、锂、铷、铯等多种稀有金属。锂云母富集的过程包括破碎、磁选、浮选和多级筛选,最终得到主要为锂云母精矿、钽铌精矿和不同等级的锂长石粉等锂矿产品^[19]。选矿尾矿中含有大量的硅酸盐矿物和石英,可进行全生命周期的深度开发利用,形成矿物资源的产品长链。

锂辉石的提锂工艺,目前最常用的是硝酸加压浸出法和硫酸焙烧浸出法^[20]。硝酸加压浸出法通过高温高压条件下的化学反应,将锂从矿石中提取出来。硫酸焙烧浸出法则是通过高温焙烧,再通过浸出工艺提取锂,将锂辉石转化为易溶于水的硫酸锂。但二者最大的不同在于,硫酸法会产生大量的石膏副产品,而硝酸法产生副产品硝酸铵是可以回用的。

2.3.2 磷石膏资源化

磷石膏是磷化工行业排放的主要固体废弃物,每年全球磷石膏的排放量超过1.5亿吨,累积量已达56亿吨。2024年工信部等发布的《推进磷资源高效高值利用实施方案》,明确提出要持续推进磷石膏在绿色建材、硫酸联产水泥等领域的应用,并加大硫酸钙晶须、高纯氧化钙及其他高附加值产品的研发和生产力度。

近年来,磷石膏在制备硫酸钙晶须和高纯氧化钙方面取得了显著进展。硫酸钙晶须是一种具有高强度、高模量、高韧性等优良性能的纤维状单晶体,广泛应用于树脂、塑料、橡胶等领域作为补强增韧剂或功能型填料^[21]。

此外,磷石膏还可以用于水泥缓凝剂、纸面石膏板、高强石膏粉等建材产品。通过对磷石膏进行预处理,如水洗、酸碱中和、煅烧等方法,可以有效去除其中的杂质,提高其利用价值。这些技术的应用不仅提高了磷石膏的资源化利用率,还有效减少了环境污染^[22]。磷石膏制酸联产水泥是大规模消化存量各类石膏副产物的根本途径,也是水泥行业可以

大量使用的现成钙资源,虽然其分布仅在几个中西部省份,但其总减碳量还是相当可观的。目前主要需要解决类石膏的单窑分解、催化分解、降低能耗以及协同处置其它含硫-钙-铁等废物装备和矿物反应产物的调控^[23]。

3 矿物性能与新应用的平衡

3.1 矿物性能与转化利用

矿物是具有固定配方的天然材料,矿物材料的矿物原料、组成与结构、加工与制备、使用性能、物化性能及工艺设计构成了矿物材料的六要素^[24],矿物性能的转化利用是矿物材料应用的关键,制约矿物从原料到材料的发展因素包括其高效转化率及环境友好性。在新时代工业革命背景下,材料应用场景不断增多,新型矿物不断被发现,从新矿种、矿物新用途到发现矿物新性能逐渐成为研究热点,而在矿物材料的开发应用中仍存在一些需要解决的矛盾。

3.2 矿物性能与极端条件应用的矛盾

矿物的性能发既有其独特性也有其局限性,主要是结构多变、化学成分多样、包裹体、类质同像和同质多像,再加上其物相的共伴生性,因此矿物的性能参数变化大使其性能不稳定或不是最佳状态,从而限制了它的应用。

但是矿物的生成条件是十分广泛的,从地心到地表,从太阳系到地球,从超高压超高温到失重和极低温,从气态到液固态,从单质到复杂化合物,从溶解到结晶和再结晶,从静高压到动高压,这就是我们要全面系统研究的方向即深空、深地、深海,而这样的环境和条件正是一些矿物从此生长出来或改造过的。人类新探索恰恰需要具有抵抗极端环境条件的材料,如耐高温高压、轻质高强、耐辐射、抗冲击、强阻燃等性能的材料,我们面临高性能材料合成与制备方法工艺匮乏的窘境,正是这些自然过程中存在的矿物有可能提供解决之道。针对矿物性能不佳和极端条件应用的矛盾,从6500种矿物的丰富性和生成环境的多样性、超越材料特性和装备功能的局限出发,应该重视这些新研究方向:

①开发新型矿物资源,如电气石、霞石、水镁石、钙钛矿、水滑石、水钠锰矿、钒云母、烧绿石等。

②研发新性能:高强纤维矿物,产氢制氢矿物,新型产电矿物,超高强矿物,耐超高温矿物,催化矿物,高活性矿物等。

③发现新效应:如矿物与下列能量波的相互作用

及伴生效应,如太赫兹、微波、超声波、高能射线(含宇宙射线)和粒子束、激光、等离子体、超高压、超高温、超强电场和磁场等极端条件或环境,矿物生物效应,这些效应在矿物固体物理的研究还很少。

④改性与复合:几百种矿物可与超过万种的种类改性剂如两性偶联剂、表面活性剂、液态塑料树脂聚合物、弹性体改性剂、无机物改性剂和纳米改性剂等产生表面作用,有的属于物理改性,大部份形成化学键或接枝在表面完成改性包覆。同样矿物可以与成千上万的金属基、树脂基、陶瓷基和增强材料进行简单和复杂的复合,从而创制出众多性能多样的复合材料或制品。

3.3 矿物超材料与超性能

超材料是指具有天然材料所不具备的超常物理性质的人工复合结构或复合材料,是具有超越材料自然属性极限的一种材料^[25]。超材料一般没有特殊的化学组成,但是具有特定的微观结构单元和特殊的功能构造,这使得超材料在某一方面具有特殊性能。现如今超材料的研究热点主要集中于光学超材料,但是超材料的概念逐渐向各个领域扩展,譬如,通过结合精确设计的微观结构进而能展现出独特的宏观力学性能的力学超结构材料^[26];通过改变一些材料微观结构,可得到热学超结构材料,其可操控热流形成一系列的超常热功能,如热隐身、热集中、热旋转等,在航空航天、能源、电子等领域具有重要的应用价值^[27]。

天然矿物存在比较普遍的超结构,如混层结构、谢氏超晶石、辉闪石条带结构、坡缕石、海泡石等。这些结构可以形成天然的矿物材料。当然通过人工合成、掺杂改性等方式,甚至与有机分子进行构造组装可以制备合成材料的“超结构”,可得到性能极好的“超性能”矿物材料。例如超硬矿物蓝丝黛尔石,它具有比钻石高58%的硬度^[28]。而基于人工合成的三维交联石墨烯超弹性材料,具有高达90%的弹性应变能力,可以达到几乎完全可逆的超弹性^[29]。通过旋转得到的扭曲三层石墨烯 moiré 超导体材料,在电子结构和超导性能方面的可调性,优于魔角扭曲双层石墨烯,具有很强的超导性能^[30];还有通过改性海泡石调节晶胞结构后得到转移效率增加数倍的纳米载体,可提高其与各种生物分子的结合率^[31]。

3.4 新型矿物材料应用案例

新型矿物材料以其特殊的性能在诸多领域有很好的应用前景,下面介绍几种矿物的新性能与新应用。

3.4.1 新型仿生矿物材料

仿生矿物材料一类由矿物构成的模仿生物的各种特点或特性而天然或人工形成的材料。Cruz-Silva R^[32]等人用 95 vol. % 片状文石 + 5 vol. % 有机质贝壳构造多级结构得到的一维矿物结构工程材料,其纤维的模量、强度和韧性可提升至 652 MPa、18 MJ/m³,是天然贝壳的 5 倍和 10 倍;兼具导电性,可用于电缆、绳索和织物等领域。又如将蒙脱石、石墨烯等二维层状矿物与高分子 PVA, PLA, PDA 等复合,可制备成具有仿生贝壳结构的薄膜,薄膜机械性能优异,兼有导电性、气体阻隔性、耐火性、耐疲劳特性等。而仿生贝壳三位网络结构可制备氮化硼/环氧复合物,它具有各向异性高导热,可用于电子行业^[33]。

3.4.2 新型修复矿物材料

一些矿物还可作为自然地质景观的修复材料,如大型钙华景观,因它是一种天然海绵地质体,在九寨沟和黄龙形成精美绝伦的世界自然遗产。我们在首次揭示了钙华天然海绵地质体的矿物-生物协同演化规律,探明了钙华-生物共沉积作用过程的基础上,采用 Ca-C-H₂O 物质循环以及空-地无损探测等理论方法,揭示了钙华单元结构如钙华矿物颗粒-生物-孔隙及钙华微颗粒间的“聚散”关系、钙华矿物建构的跨尺度孔隙结构(即从微观、可视、宏观孔隙结构(10⁻⁹ m~10 m))对于维护钙华体的结构稳定性和力学行为具有重要的作用,明确了孔隙单元是钙华景观地上和地下涵养的关键过程和钙华矿物的“双涵养”功能。当 2017 年“8.8”7.0 级地震世界钙华奇观九寨沟世界自然遗产景区受到毁灭性破坏时,本课题组在长期研究成果的基础上,提出了遵循“协同保育、保持原真”和“同质同相、自然增强”的修复保育理念,并进行大型钙华景观的震损应急抢修,完全恢复了“诺日朗瀑布”等旷世美景,使之成为钙华世界自然遗产地首次修复的国际范例。

3.4.5 新型换能材料

钙钛矿是一种可以利用太阳能产电或直接制氢进行能量转换新型换能矿物材料,目前有三种钙钛矿制氢系统:光催化剂颗粒悬浮(PC)系统、光电化学(PEC)系统、光伏驱动电化学(PV-EC)系统。而“氢农场”方法(即利用暴露在不同侧面的 BiVO₄ 晶体)已被证明是一种可行的太阳能制氢技术,基于光催化剂颗粒的水分解效率高达 1.8%。因此,钙钛矿型 PC 系统经过创新改造后,可以高效地产生氢气,有望在未来应用中实现较高的转化效率^[34]。

电气石是另一种新型换能材料。近年来,传统核废料问题凸显,人们正在探索新型核能发电方式。在 1953 年 Rappaport 最早向公众展示了通过 β 粒子轰击 p-n 结产生电子伏特效应,建立了放射性同位素电池的原型。虽然如今半导体材料已大力发展,多种新型半导体材料被纳入核电池应用,但仍存在辐照损伤和宽禁带宽度材料转换率低等问题。课题组发现电气石在伽马射线照射下有定向电子流产生,转换率已达 3.6%,且禁带宽度适中,具有成为新型核电换能材料的潜力^[35]。

还有一种新型换能矿物复合材,即可打印 Powerfoyle 太阳能电池,其成本低,污染少,可打印并能在任何光线条件下充电。Powerfoyle 的工作原理类似于植物的光合作用,以纳米二氧化钛和光敏染料为主要原料的染料敏化太阳能电池(DSSC)逐渐演变为用一种新的架构重新发明了染料敏化太阳能电池(DSC),由 100 个原子厚的光伏板固定在塑料薄膜上制成,得到了近 100% 的有效面积,其具有可打印性,23 秒可印出 100~200 个太阳能单位,导电性提高了 1 000 倍^[36]。

另外还有新型水滑石矿物材料,它具有多种优越的性能,如碱性、层间阴离子可交换性、热稳定性、记忆效应、组成结构可调控性、优良阻燃性能、红外吸收性能及优良催化性能,且比电容和传输速率高,可制作高能量密度和速率容量的超级电容器电极材料。基于 LDHs 特殊的结构可调控性,可以将发光稀土金属元素引入 LDHs 层板结构中,赋予其优异的发光性能,其特有的层状结构载体和层板电荷可调控性将光功能分子均匀分散在层间,稳定维持了光功能分子的光学性能^[37]。由于水滑石合成简单、环境友好,已成为环境功能材料、记忆材料^[38]、阻燃材料的研究热点。

超低温类矿物催化材料如氧化锰类复合矿物,克服了传统催化材料基本都需要在高温、光照等强能场中才能正常运行的不足,实现了 Ce_nMn_nO_x 在超低温和含有 SO₂、NO_x 的高湿度大气下表现出高效且持续的脱硝性能,转化率达到 91% 以上,且对水蒸气和 SO₂ 中毒的抵抗能力最强。

4 矿物介质排碳与固碳的平衡

4.1 “双碳”目标的强力推动和全面引领

随着科技、工业高速发展,CO₂ 排放引发的一系列全球性生态环境问题逐渐成为人类可持续发展

和大国博弈的核心议题。自从第七十五届联合国大会上中国政府首次提出双碳目标之后,在1+N的总体部署下,加强生态文明建设,加快调整优化产业、能源结构,倡导绿色低碳的生产生活方式全面展开,全国上下各行各业都从政策、科技、产业、应用等角度综合探讨双碳目标下,各相关产业如何实现快速高质量发展,这必将深刻变革中国经济结构和经济社会运转方式;国家也在某些领域提出了明确的指标,如在节能减排综合工作中明确规划出到2025年,全国单位国内生产总值能源消耗比2020年下降

13.5%,能源消费总量得到合理控制。因此,在工业排碳、固碳的过程中,矿物扮演着举足轻重的角色。

4.2 矿物与CO₂的关系

如图2所示,矿物在碳循环中起到了重要作用,它支撑着工业文明,同样也造成了工业污染,矿物与CO₂关系可以归结为:排碳-存碳-固碳-吸碳-转碳-负碳。现如今的CO₂捕捉与利用技术其原理一般为捕捉、转换、利用三个方向,其技术路线又可分为高效吸附剂的研发、膜分离技术的优化、光催化转换技术的突破、光催化转换技术的创新、系统集成与优化。

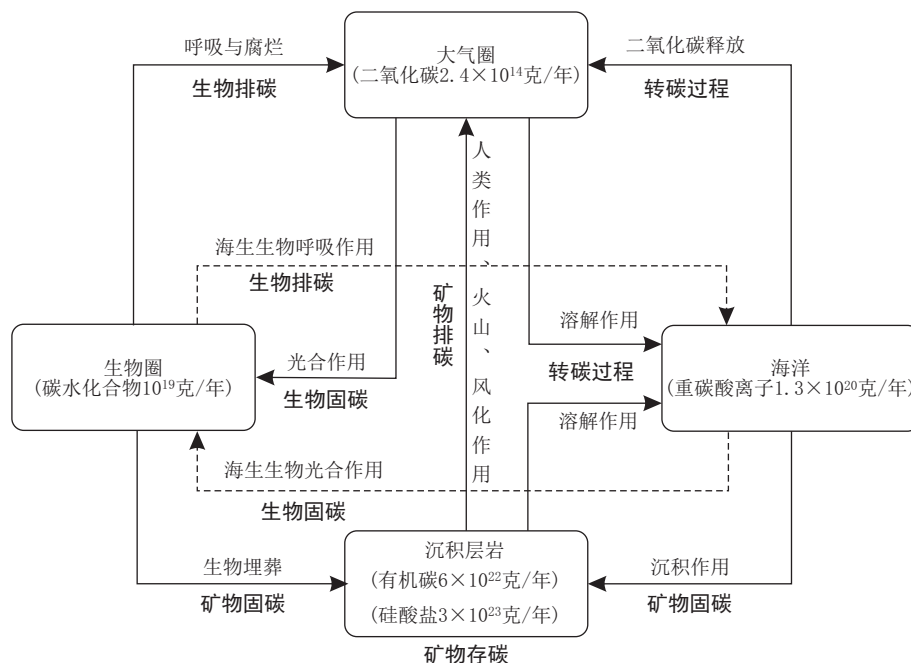


图2 矿物与碳循环

Fig. 2 Mineral and carbon cycles

4.3 工业固碳路径与环境矿物工程

再碳酸盐化是一种工业固碳路径,其主要通过以典型大宗钙、镁、钾基工业固体废弃物为原料进行晶格固化,在工艺过程中进行定向强化转化固化,在生产轻质碳酸钙、碱式碳酸镁和碳酸钾等粉体材料中实现绿色固化,最终实现固废资源化和CO₂稳定固定转化,这种CO₂矿物转化技术类似于自然界钙镁硅酸盐的风化过程。矿物永久高效封存CO₂的方法主要有原位、异位等方式,异位法中又分为直接(干法和湿法)和间接技术(酸化碳化、熔盐碳化、生物碳化、铵盐碳化、碱法碳化等组合工艺)。

矿物固碳转化技术已有诸多研究,例如王小龙等^[39]研究了一种使用可回收铵盐通过矿物碳酸化来捕获和储存CO₂的新方法,即在捕获、矿物溶解和碳酸化步骤中分别使用NH₃、NH₄HSO₄和

NH₄HCO₃来将CO₂捕获与矿物碳酸化结合起来。NH₄HSO₄和NH₃然后可以通过(NH₄)₂SO₄的热分解再生。使用NH₄HCO₃作为CO₂的来源可以避免CO₂的解吸和压缩,其铵盐碳化工艺中矿物最大碳化程度达95.9%。Amin Azdarpour^[40]等人采用尾气CO₂矿化转化磷石膏的“一步法”CO₂转化率高于70%,二水合硫酸钙的转换率超过90%。

4.4 重资源行业的碳排放与减碳策略案例

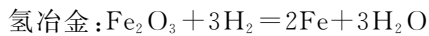
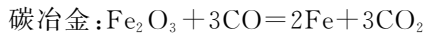
与矿物资源大量使用的两个高排碳行业就是钢铁行业与水泥行业,这里讨论它们在现阶段的排碳及减碳策略。

4.4.1 钢铁行业

在过去50年,全球钢铁产量增长了两倍多。其中,中国和印度的钢铁产量持续增长,成为全球最大的两个钢铁生产国。2023年全球排碳17亿吨(生

产 1 t 钢排放 1.8 t CO₂),我国钢铁生产以高炉-转炉长流程为主,严重依赖煤基化石能源,即高能耗、高碳排放,我国钢铁行业排碳占全国碳排放总量的 16%,绿色发展水平与生态环境要求不匹配已成为钢铁工业面临的主要矛盾^[41]。

传统钢铁冶炼的碳排放 90%以上来源于燃料燃烧,5%以上来源于净购入电力。从下列化学反应简式可以看出,氢冶金与传统的“碳基冶金”相比,可大幅降低排碳(可减少 85%以上的碳排放)。高炉富氢冶炼碳减排幅度在 10%~20%,气基直接还原工艺 CO₂ 排放量可减少 50%以上。



从节能减排、环境友好出发,钢铁工业只有逐渐从“减碳”过渡到“代碳”才能从根本上实现碳减排。但是,高炉富氢冶炼和气基直接还原工艺在实际应用中也存在相应问题,如①炉料低温还原的粉化;② H₂ 间接还原发展程度低及 H₂ 利用率低;③高炉喷吹风口温度降低及如何进行热补偿;④氢还原产物水蒸气对现有工艺设备的腐蚀^[42]。

在气基直接还原中存在的问题是^[43]:①氢还原的强吸热效应对竖炉反应器温度场的影响,温度场的波动会影响 H₂ 的还原作用,影响 H₂ 利用效率;② H₂ 生产成本低,储存困难;③气体加热炉装备、反应器的耐氢腐蚀性、耐高压性、防泄漏性;④热量补偿问题。

4.4.2 水泥行业

水泥生产是高碳排放的重要行业之一。建材工业碳排放 14.8 亿吨,其中水泥工业碳排放 12.3 亿吨,占比 83%,其中 96%碳排放来源为熟料煅烧阶段。每吨水泥排放 CO₂ 约 640 kg。石膏建材的碳排放量只有传统水泥建材的 1/5,减少碳排放约 512 kg。目前在水泥行业中的排碳固碳问题包括:①规模大,中国水泥行业产生的 CO₂ 占中国总排放量的 13%~14%,碳排压力大;②反应过程排碳,是水泥行业减排的最大难点。生产 1 t 水泥需要 1.2~1.3 t 石灰石,全国每年水泥行业消耗的石灰石重量在 20 亿吨。尚未出现能广泛替代石灰石的替代原料、生产工艺或替代性胶凝材料;③水泥生产高度依赖化石燃料,中国水泥生产的能源输入以煤炭为主,替代能源的替代比例很低,只有 2%左右来源于非化石燃料,而欧洲国家的替代率可达 40%以上;④治理成本高,水泥生产过程中排出的 CO₂ 浓度在 20%~30%,须把浓度提纯到 95%以上才能捕

捉或利用^[44]。

水泥行业的主要低碳转型路径可以总结为四大类型:原料及产品替代、能效工艺提升、能源结构调整及 CCUS 技术。能效工艺提升手段未来的减排空间不高;而 CCUS 技术和氢能燃料替代技术虽然应用空间大,减排潜力高,但短期内全面铺开的可能性不高。部分研究者找到了可应用于建材,水泥和混凝土的低碳替代品,如 Ferrock 水泥、Papercrete 和 Timbercrete 建材、Ashcrete 混凝土、粒化高炉矿渣、硅灰、可再生材料、地聚物、生物水泥。

5 展 望

在全新工业革命背景下,绿色低碳工业革命浪潮席卷全球,清洁能源、量子信息技术、人工智能、5G 技术、大数据云计算、生物技术等领域快速发展,对新型矿物开发利用提出新的挑战。笔者认为新时代矿物资源的研发应该集中在以下几个方面:

1)重视非金属矿物资源及其功能开发利用,重点放在新型资源、新型能源、生态环境保护与修复治理等领域并扩大其空间,加大磷矿、萤石、石墨等战略性非金属矿产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)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)加大特种环境条件下矿物与环境介质(生物)的相互作用机制与效应研究,独特环境下矿物的相互作用与表征(谱学响应);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)大力开发低品位、尾矿和采剥形成非金属矿产潜在资源与新用途;如就地取材的污染治理材料技术,提升选冶技术水平,降低矿石利用的边界品位下限,提高矿产资源综合利用水平,增加可用战略资源总量;大幅减少重金属的源头污染总量与风险。

5)高度关注新能源和氢能时代矿物学发展机遇: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,高性能钎铁硼,4D打印材料,自修复材料,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)加大超结构矿物及功能的研发:矿物高端原料及其精细加工如半导体材料、显示材料、新功能基元与纳米粉体、高性能纤维、高性能膜材料、大硅片、抛光材料、偏光片、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)在双碳目标和治污制约下,优先开发国家关键战略资源的稳定供应,瞄准无废城市目标,深挖城市矿产资源和智慧资源潜力,建立废旧电器、绿色新能源废旧等资源的全产业链跟踪回收制度,制定战略资源回用的技术标准。持续研发绿色高效的战略矿产资源利用技术、工艺和装备,提升资源利用效率,达到近零排放,减轻能源消耗和环境负荷;以战略关键矿产资源产业创新链形成新质生产力,壮大战略新兴产业促进绿色低碳高质量发展。

参考文献

- [1] 张映红,路保平. 世界能源趋势预测及能源技术革命特征分析[J]. *天然气工业*,2015,35(10):1-10. DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2015.10.001.
ZHANG Yinghong,LU Baoping. Prediction of global energy trend and analysis on energy technology innovation characteristics [J]. *Natural Gas Industry*,2015,35(10):1-10. DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2015.10.001.
- [2] 李克强访欧提“工业4.0”,对中国正当其时[N]. *中国青年报*,2014-10-14.
LI Keqiang's visit to Europe to promote 'Industry 4.0' is timely for China[N]. *China Youth Daily*,2014-10-14.
- [3] 张 涵.《中国能源转型:走向碳中和》在京发布[J]. *中国国情国力*,2021,(6):80.
ZHANG Han.《China's Energy Transition:Towards Carbon Neutrality》released in Beijing [J]. *China National Conditions and National Power*,2021,(06):80.
- [4] 侯增谦,陈 骏,翟明国. 战略性关键矿产研究现状与科学前沿[J]. *科学通报*,2020,65(33):3651-3652. DOI:10.1360/TB-2020-1417.
HOU Zengqian,CHEN Jun,ZHAI Mingguo. Current status and frontiers of research on critical mineral resources [J]. *Chinese Science Bulletin*,2020,65(33):3651-3652. DOI:10.1360/TB-2020-1417.
- [5] 干 勇,彭苏萍,毛景文,等. 我国关键矿产及其材料产业供应链高质量发展战略研究[J]. *中国工程科学*,2022 ,24(3):1-9. DOI:10.15302/J-SSCAE-2022.03.001.
GAN Yong,PENG Suping,MAO Jingwen, *et al.* High-quality development strategy for the supply chain of critical minerals and its material industry in China [J]. *Strategic Study of CAE*,2022 ,24(3):1-9. DOI:10.15302/J-SSCAE-2022.03.001.
- [6] 赵 超,许安民,李 鹏,等. 关于我国战略性矿产供应安全的思考[J]. *中国矿业*,2024,33(S2):1-5. DOI:10.12075/j.issn.1004-4051.20241485.
ZHAO Chao,XU Anming,LI Peng, *et al.* Thoughts on supply security of strategic mineral resources in China [J]. *China Mining Magazine*,2024,33(S2):1-5. DOI:10.12075/j.issn.1004-4051.20241485.
- [7] 吴巧生,周 娜,成金华. 战略性关键矿产资源供给安全研究综述与展望[J]. *资源科学*,2020,42(8):1439-1451. DOI:10.18402/resci.2020.08.01.
WU Qiaosheng,ZHOU Na,CHENG Jinhua. A review and prospects of the supply security of strategic key minerals[J]. *Resources Science*,2020,42(8):1439-1451. DOI:10.18402/resci.2020.08.01.
- [8] 迈出加强矿产资源节约与综合利用的“浙江脚步”[J]. *浙江国土资源*,2024,(9):25-26. DOI:10.16724/j.cnki.cn33-1290/p.2024.09.011.
Taking the “Zhejiang Step” to strengthen the conservation and comprehensive utilization of mineral resources [J]. *Zhejiang Land and Resources*,2024,(9):25-26. DOI:10.16724/j.cnki.cn33-1290/p.2024.09.011.
- [9] 董发勤,徐龙华,彭同江,等. 工业固体废物资源循环利用矿物学[J]. *地学前缘*,2014,21(5):302-312. DOI:10.13745/j.esf.2014.05.025.
DONG Faqin,XU Longhua,PENG Tongjing, *et al.* The mineralogy in the process of industrial solid wastes treatment and resource recycle [J]. *Earth Science Frontiers*,2014,21(5):302-312. DOI:10.13745/j.esf.2014.05.025.
- [10] 陈军强,曾 威,王佳营,等. 全球和我国铀资源供需形势分析[J]. *华北地质*,2021,44(2):25-34. DOI:10.19948/j.12-1471/P.2021.02.04.
CHEN Junqiang,ZENG Wei,WANG Jiaying, *et al.* Analysis of global and Chinese uranium resource supply and demand situation[J]. *North China Geology*,2021,44(2):25-34. DOI:10.19948/j.12-1471/P.2021.02.04.

- [11] 朱鹏飞,蔡煜琦,郭庆银,等. 中国铀矿资源成矿地质特征与资源潜力分析[J]. *地学前缘*,2018,25(3):148-158. DOI:10.13745/j. esf. 2018. 03. 001.
ZHU Pengfei,CAI Yuqi,GUO Qingyin, *et al.* Metallogenetic and geological characterization and resource potential assessment of uranium resources in China [J]. *Earth Science Frontiers*,2018,25(3):148-158. DOI:10.13745/j. esf. 2018. 03. 001
- [12] 梁丽莎,张涛,周晋. 海水提铀材料研究新进展[J]. *四川大学学报(自然科学版)*,2024,61(5):199-218. DOI:10.19907/j. 0490-6756. 2024. 055003.
LIANG Lisha,ZHANG Tao,ZHOU Jin. Recent advances in materials for uranium extraction from seawater [J]. *Journal of Sichuan University(Natural Science Edition)*,2024,61(5):199-218. DOI:10.19907/j. 0490-6756. 2024. 055003.
- [13] 牛玉清,陈树森. 盐湖提铀:铀资源开发新途径[J]. *中国核工业*,2016,(11):21-23.
NIU Yuqing,CHEN Shusen. Uranium extraction from salt lakes:A new approach to uranium resource development [J]. *China Nuclear Industry*,2016,(11):21-23.
- [14] 叶传永. 杂斯库勒盐湖卤水与沉积物中铀的分布及富集机理[D]. 核工业北京地质研究院,2013.
YE Chuanyong. Distribution and enrichment mechanism of uranium in brine and sediments of Gaskule salt lake [D]. Beijing Research Institute of Uranium Geology,2013.
- [15] 蔡煜琦,张金带,李子颖,等. 中国铀矿资源特征及成矿规律概要[J]. *地质学报*,2015,89(6):1051-1069.
CAI Yuqi,ZHANG Jindai,LI Ziyin, *et al.* Overview of the characteristics and metallogenic regularity of uranium resources in China[J]. *Acta Geologica Sinica*,2015,89(6):1051-1069.
- [16] 郭娟,崔荣国,周起忠,等. 2023年中国矿产资源形势回顾与展望[J]. *中国矿业*,2024,33(1):12-19. DOI:10.12075/j. issn. 1004-4051. 20240085.
GUO Juan,CUI Rongguo,ZHOU Qizhong, *et al.* Outlook and overview of mineral resources situation of China in 2023 [J]. *China Mining Magazine*,2024,33(1):12-19. DOI:10.12075/j. issn. 1004-4051. 20240085.
- [17] 国务院办公厅关于加快构建废弃物循环利用体系的意见[J]. *再生资源与循环经济*,2024,17(3):2-4.
Opinions of the general office of the state council on accelerating the establishment of a waste recycling system [J]. *Recyclable Resources and Circular Economy*,2024,17(3):2-4.
- [18] 吴裕根,司芑,许书平,等. 新能源背景下对锂矿资源开发利用的“理性思考”[J]. *资源与产业*,2024,26(3):90-96.
WU Yuyin,SI Xiang,XU Shuping, *et al.* Rational thoughts on lithium resources development and utilization under new energy background[J]. *Resources & Industries*,2024,26(3):90-96. DOI:10.13776/j. cnki. resourcesindustries. 20240509. 007
- [19] 张江峰. 锂辉石提锂技术发展现状[J]. *世界有色金属*,2020,(18):1-4.
ZHANG Jiangfeng. Current status of Lithium extraction technology from spodumene [J]. *World Nonferrous Metals*,2020,(18):1-4.
- [20] 董树豪,杨亚凯,张豪,等. 锂辉石提锂工艺现状及晶型转化研究进展[J]. *有色金属(冶炼部分)*,2024,(2):48-56.
DONG Shuhao,YANG Yakai,ZHANG Hao, *et al.* Research progress of Lithium extraction technology from spodumene and[J]. *Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy)*,2024,(02):48-56. doi:10.3969/j. issn. 1007-7545. 2024. 02. 008
- [21] 徐海涛. 一种利用工业副产石膏制备高品质硫酸钙晶须和氧化钙的方法[P]. 中国:CN110965124A,2020.04.07.
XU Haitao. A method for preparing high-quality calcium sulfate whiskers and calcium oxide using industrial by-product gypsum[P]. China:CN110965124A,2020.04.07.
- [22] 徐长忠,於金浩,李义连. 磷石膏的预处理和综合利用研究进展[J]. *安全与环境工程*,2024,31(1):260-270. DOI:10.13578/j. cnki. issn. 1671-1556. 20221555.
XU Changzhong,YU Jinhao,LI Yilian. Research progress of pretreatment and comprehensive utilization of phosphogypsum[J]. *Safety and Environmental Engineering*,2024,31(1):260-270. DOI:10.13578/j. cnki. issn. 1671-1556. 20221555.
- [23] 邓华,侯硕旻,李中军,等. 磷石膏综合利用现状及展望[J]. *无机盐工业*,2024,56(1):1-8+22. DOI:10.19964/j. issn. 1006-4990. 2023-0278.
DENG Hua,HOU Shuomin,LI Zhongjun, *et al.* Current situation and prospect of comprehensive utilization of phosphogypsum[J]. *Inorganic Chemicals Industry*,2024,56(1):1-8+22. DOI:10.19964/j. issn. 1006-4990. 2023-0278.
- [24] 汪灵. *矿物材料学*[M]. 北京:地质出版社,2023:1-362.
WANG Ling. *Mineral Material Science*[M]. Beijing:Geological Publishing House,2023:1-362. (in Chinese)
- [25] 张文毓. 超材料的研究进展与应用[J]. *装备机械*,2018,(2):67-71.
ZHANG Wenyu. Development and application of metamaterials[J]. *The Magazine on Equipment Machinery*,2018,(2):67-71.

- [26] 姚 谦,杨 钊,王 昕,等. 力学超结构设计方法研究进展[J]. *应用数学和力学*, 2024, 45(8):974-1000. DOI:10.21656/1000-0887.450106.
YAO Qian, YANG Zhao, WANG Xin, *et al.* A review of design methods for mechanical metastructures[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2024, 45(8):974-1000. DOI:10.21656/1000-0887.450106.
- [27] 张学鹭,张 森. 热学超材料研究进展[J]. *光电工程*, 2017, 44(1):49-63+121. DOI:10.3969/j.issn.1003-501X.2017.01.004.
ZHANG Xueao, ZHANG Sen. Research advances in thermal metamaterials[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, 44(1):49-63+121. DOI:10.3969/j.issn.1003-501X.2017.01.004.
- [28] MCCULLOCH D G, WONG S, SHIELL T B, *et al.* Investigation of Room Temperature Formation of the Ultra-Hard Nanocarbons Diamond and Lonsdaleite[J]. *Small*, 2020, 16(50):e2004695. DOI:10.1002/smll.202004695.
- [29] ZHAO K, ZHANG T, CHANG H, *et al.* Super-elasticity of three-dimensionally cross-linked graphene materials all the way to deep cryogenic temperatures[J]. *Science Advances*, 2019, 5(4):2589-2589. DOI:10.1126/sciadv.aav2589.
- [30] YUAN C, DANIEL R, ORIOL R, *et al.* Tunable correlated states and spin-polarized phases in twisted bilayer-bilayer graphene[J]. *Nature*, 2020, 583(7815):215-220. DOI:10.1038/s41586-020-2260-6.
- [31] CASTRO-Smirnov FA, AYACHE J, BERTRAND JR, *et al.* Cellular uptake pathways of sepiolite nanofibers and DNA transfection improvement[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7:5586. DOI:10.1038/s41598-017-05839-3.
- [32] CRUZ-Silva R, MORELOS-Gomez A, KIM HI, *et al.* Super-stretchable graphene oxide macroscopic fibers with outstanding knotability fabricated by dry film scrolling. *ACS Nano*. 2014, 8(6):5959-5967. DOI:10.1021/nn501098d
- [33] YANG Y, RUBO X, XIANGCHENG S, *et al.* Constructing two dimensional composite nanosheets with montmorillonite and graphene-like carbon: Towards high-rate-performance PVA based gel polymer electrolytes for quasi-solid-state supercapacitors[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2022, 287. DOI:10.1016/j.matchemphys.2022.126333.
- [34] LIU X X, CHEN L, YU Y, *et al.* Advancements of highly efficient perovskite based tandem solar cells[J/OL]. *Science China Materials*, 2025, 1-18. DOI:https://doi.org/10.1007/s40843-024-3076-3.
- [35] 周 琳,张 伟,周 磊,等. 铁镁电气石 Y 位阳离子主导的构效关系[J]. *硅酸盐学报*, 2024, 52(10):3192-3204. DOI:10.14062/j.issn.0454-5648.20240159.
ZHOU Lin, ZHANG Wei, ZHOU Lei, *et al.* Structure-function relationship of Fe - Mg tourmaline dominated by positive ion in y site[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2024, 52(10):3192-3204. DOI:10.14062/j.issn.0454-5648.20240159.
- [36] AHSAN M S, KICHEON Y, CHEOL H K, *et al.* Recent developments in dye-sensitized photovoltaic cells under ambient illumination[J]. *Dyes and Pigments*, 2021, 194. DOI:10.1016/j.dyepig.2021.109626.
- [37] ZHANG W, LI Y, FAN H. Layer-by-layer assembly of luminescent ultrathin films by Mg-Al-Eu LDHs nanosheets and organic ligand with high transparency[J]. *Optical Materials*, 2016, 5178-83. DOI:10.1016/j.optmat.2015.11.001.
- [38] 黄玮婷,白 圆,马 睿,等. 层状双氢氧化物在砷污染水体/土壤修复中的应用研究进展[J]. *环境监测管理与技术*, 2024, 36(3):1-6. DOI:10.19501/j.cnki.1006-2009.2024.03.008.
HUANG Weiting, BAI Yuan, MA Rui, *et al.* Progress in Application of Layered Double Hydroxides in Arsenic Contaminated Water/Soil Remediation[J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2024, 36(3):1-6. DOI:10.19501/j.cnki.1006-2009.2024.03.008.
- [39] Xiaolong W, MERCEDES M M. Integration of CO₂ capture and mineral carbonation by using recyclable ammonium salts [J]. *ChemSusChem*, 2011, 4(9):1291-300. DOI:10.1002/cssc.201000441.
- [40] AZDARPOUR A, ASADULLAH M, JUNIN R, *et al.* Extraction of calcium from red gypsum for calcium carbonate production[J]. *Fuel Processing Technology*, 2015, 130:12-19. DOI:10.1016/j.fuproc.2014.09.034.
- [41] 王新东,上官方钦,邢 奕,等. “双碳”目标下钢铁企业低碳发展的技术路径[J]. *工程科学学报*, 2023, 45(5):853-862. DOI:10.13374/j.issn2095-9389.2022.09.22.003.
WANG Xindong, SHANGGUAN Fangqin, XING Yi, *et al.* Research on the low-carbon development technology route of iron and steel enterprises under the “double carbon” target[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2023, 45(5):853-862. DOI:10.13374/j.issn2095-9389.2022.09.22.003.
- [42] 崔小杰,胡长庆. 高炉富氢冶炼发展现状与展望[J]. *中国冶金*, 2024, 34(5):1-10. DOI:10.13228/j.boyuan.issn1006-9356.20230704.
CUI Xiaojie, HU Changqing. Research trends and prospects of hydrogen-rich ironmaking in blast furnace[J]. *China Metallurgy*, 2024, 34(5):1-10. DOI:10.13228/j.boyuan.issn1006-9356.20230704.
- [43] 张 奔,赵志龙,郭 豪,等. 气基竖炉直接还原炼铁技术的发展[J]. *钢铁研究*, 2016, 44(5):59-62.

ZHANG Beng, ZHAO Zhilong, GUO Hao, *et al.* Development of direct-reduction ironmaking technology in gas-based shaft furnace[J]. **Research on iron and steel**, 2016, 44(05):59-62.

[44] 李 婷, 王郁涛, 李抒苒, 等. 加速工业深度脱碳: 中国水泥行业碳中和之路[R]. 2022-9.

LI Ting, WANG Yutao, LI Shuyi, *et al.* Accelerating deep decarbonization in industry: the path to carbon neutrality in China's cement industry[R]. 2022-9.

PROSPECTS OF MINERAL SCIENCE AND ENGINEERING DRIVEN BY THE NEW INDUSTRIAL REVOLUTION AND CARBON NEUTRALITY ——THOUGHTS ON SEVERAL BALANCES BASED ON MINERAL RESOURCES

DONG Faqin^{1,2,3}, ZHOU Lei³, BIAN Liang⁴, GUO Ming^{1,2}, CHEN Junyuan⁵

1. Key Laboratory of Waste Solid Treatment and Resource Recycle of Ministry of Education, Mianyang Sichuan 621010, China;
2. School of Environment and Resource, Southwest University of Science and Technology, Mianyang Sichuan 621010, China;
3. CAEA Innovation Center of Nuclear Environmental Safety Technology, Mianyang Sichuan 621010, China;
4. State Key Laboratory of Environment-friendly Energy Materials, Mianyang Sichuan 621010, China;
5. China Construction Materials Industry Geological Survey Center, Beijing 100035, China

Abstract: Since the turn of the 21st century, the development of green energy, the deepening conflicts in the ecological environment, and the surge in demand for high-tech solutions have driven the acceleration of new technologies, ushering in the era of “Industrial Revolution 4.0.” The historical progression of industrial revolutions has always been closely linked to the evolution of mineral resources. The emergence and application of new technologies have transformed the types and methods of utilizing mineral resources, thereby steering the direction and content of industrial revolutions, and promoting technological advancements in energy, materials, information, and other fields. The recurring transformations in the utilization of mineral resources highlight that, in the context of the new industrial revolution and carbon neutrality goals, the assurance, development, utilization, and novel applications of mineral resources—alongside associated ecological and environmental issues—determine the relevance and value of mineral science and engineering disciplines. Addressing longstanding conflicts in contemporary mineral resource utilization, such as the conflicts between resource development and conservation, resource utilization and environmental pollution, mineral properties and new applications, and carbon emissions and carbon sequestration in mineral media, has become a critical task. This paper focuses on these four aspects, discussing modern mineralogy's high-quality service to the country's major strategic needs and its role in developing new productivity in relevant fields through practical examples in mineral resource development, such as uranium, lithium, hydrotalcite, and perovskite.

Keywords: Industrial Revolution; Carbon neutrality; Mineral resources; Comprehensive utilization; New function