

· 专题一:石油矿业安全领域学科发展(矿业与安全工程) ·

我国矿业学科“十四五”发展战略研究

谢和平¹ 苗鸿雁² 周宏伟^{3*}

1. 深圳大学 深地科学与绿色能源研究院,深圳 518060
2. 国家自然科学基金委员会 工程与材料科学部,北京 100085
3. 中国矿业大学(北京) 能源与矿业学院,北京 100083

[摘要] 在广泛调研和系统分析基础上,根据矿业学科发展的自身特点和未来五年我国经济社会发展的需求,提出了“十四五”期间矿业学科发展目标,梳理出14项应加强的优势方向、17项需培育的发展方向、10项应促进的前沿方向和5项可鼓励的交叉研究方向,并凝练出5项“十四五”优先发展领域和5项“中长期”(2035)优先发展领域。最后,从政策层面和学科层面提出了促进矿业学科发展的若干举措和建议。

[关键词] 矿业学科;发展战略;“十四五”;深地、深海、深空资源开发

矿业工程学科是用以指导矿物资源安全、高效、环境友好地开采以及矿物资源有效加工和利用的工程技术科学^[1]。由于大自然矿藏及矿业生产地质条件的多样性、复杂性,矿业学科已发展成为学科综合度和交叉关联度很高的一门工程技术科学^[2]。矿业学科涵盖了煤炭资源、金属与非金属矿产资源、地热资源、海洋矿产资源以及人类尝试涉足的其它星球资源的开采,包含了煤炭资源、金属与非金属矿产的采掘、洗选、加工,涉及到资源开采的环境、安全和矿产资源的储存、运输等众多科学与工程领域^[3]。

当今,全球科技变革深入推进,新学科和新领域不断涌现,学科界限不断被打破,不同学科相互渗透、相互融合现象已成必然趋势^[4-7],致使矿业工程学科不断突破传统学科的局限,进入一个全新的发展阶段。在我国“十四五”发展阶段初期,积极探讨矿业工程学科的发展方向和发展重点,确定符合我国国情的矿业工程学科的“十四五”发展战略,对促进我国矿业工程学科更快、更好地发展具有重要意义。



谢和平 深圳大学特聘教授、中国工程院院士,主要从事力学与能源工程方面的研究,在国际上开创了岩石力学分形研究新领域;在我国最早建立了裂隙岩体宏观损伤力学模型,开拓了裂隙岩体损伤力学研究;首次提出了深部原位岩石力学构想,构建了深部岩体力学与开采理论研究框架。研究成果已出版10余本中英文专著、发表500余篇论文,荣获国家自然科学基金二等奖等国家级奖励4项。



周宏伟 中国矿业大学(北京)教授,长期从事能源与矿业开发中的岩石力学研究,负责完成了国家973课题、国家十三五重点研发计划课题、国家自然科学基金项目、科技部国际合作项目等10余项。曾获国家自然科学基金二等奖、教育部自然科学奖、北京市教学成果奖等奖励,发表论文200余篇。

1 矿业学科的发展特点和趋势

当前,人类所消耗的自然资源中,矿产资源占80%以上,地球上每人每年要耗费3吨矿产资源。其中能源占矿产资源生产、消费的绝大多数。当前,全球矿产资源总产量为227亿吨,能源、金属和非金属产量分别占68%、7%和25%,体现出人类对于能

收稿日期:2021-05-19;修回日期:2021-06-26

* 通信作者,Email: zhw@cumtb.edu.cn

本文受到国家自然科学基金项目(51942402)的资助。

源的高度依赖^[8]。

矿业在经济发展中同样占重要位置,据最新报告显示^[8],当前全球矿业总产值为 5.9 万亿美元,相当于全球 GDP 的 6.9%,其中能源矿产占 76%,金属矿产占 12%,重要非金属矿产占 12%(图 1)。从产业看,全球共有 60 多个重要矿业国家:11 个国家矿业产值与本国 GDP 之比大于 50%,17 个国家矿业产值与本国 GDP 之比介于 20%~50%,21 个国家在 10%~20%。可以看到,矿业对国家经济发展的重要作用 and 地位。

从能源消费结构上看,中国、印度、东盟等亚洲新兴经济体、美欧日韩等发达经济体和其他国家分别消费了全球 35%、36% 和 29% 的能源,全球能源消费总体呈现“三分天下”的格局(图 2)。同时,气候变化促使全球能源消费结构加速调整,我国“双碳”目标约束下,煤炭占比将持续下降,清洁能源占比将持续增加。

矿业学科的发展不仅受自然科学规律的约束,而且依赖资源赋存条件、经济发展水平、社会发展需求的综合影响^[9]。随着人类生存水平的提高和社会进步的需求不断变化,矿业学科和所支撑的工程实践持续地开发出大规模、多种类的矿产资源,这是与自然科学不断揭示自然规律截然不同的学科特点,后者的任务是“探索、揭示、发现”,由此也决定了矿业工程学科一系列的属性和发展规律。矿业工

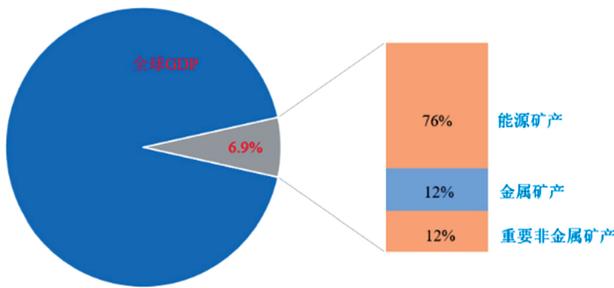


图 1 全球矿业总产值占比

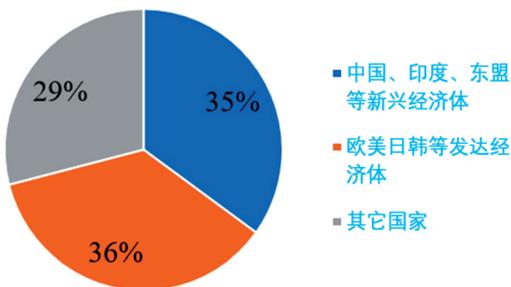


图 2 全球能源消费格局

程在设计、建设、生产、保障系统功能的同时,越来越受到来自资源开采环境的“极限”挑战,各种极端性、复杂性、非线性、不确定性等特性和因素广泛存在于矿业工程系统及其运行过程中(图 3)。矿业学科的不断发展和人类对丰富物质文明、挑战自然的无限追求,导致矿业工程系统的服役环境越来越恶劣,工程系统的行为规律也愈加复杂多变;另外,人类对不可再生资源的消耗和对环境生态的破坏使得可持续发展成为 21 世纪全球共同面临的重要课题。

(1) “极端性”成为矿业学科未来发展所面临的严峻挑战

资源和能源是支撑人类社会的最重要的物质基础之一,随着浅部资源开采的枯竭,向深地、深海寻找更多资源已成为必然趋势,深部陆地和深水海洋矿产资源的开发成为解决人类资源和能源的有效途径^[10-14],高地压、高地温、高水压、强海风、大海浪等极端开采环境是矿业学科发展必须面对的严峻挑战。在极端环境和自然灾害作用下,矿业工程系统的原位岩体力学行为、地应力环境与动力灾害演变机制、多相并存多场耦合作用下渗流规律、强采动应力场—能量场演化特征、风浪流对采矿船的动力激励、集矿机在海底的行走特性、深海采矿系统的动力学行为等成为矿业学科的核心科学问题。此外,月球、火星等太空资源的勘探开发也列入国家计划。深地、深海、深空等极端环境下资源的勘探开发及转化利用给传统的矿业学科提出了严峻的挑战。

(2) “复杂性”成为矿业学科未来发展所需解决的重要难题

深部岩体材料非线性、大形变的几何非线性、各种非线性的耦合效应等复杂的非线性行为与机制给矿业学科带来了挑战^[15]。20 世纪微分几何的发展使系统非线性动力学取得突破,系统的混沌、分岔、

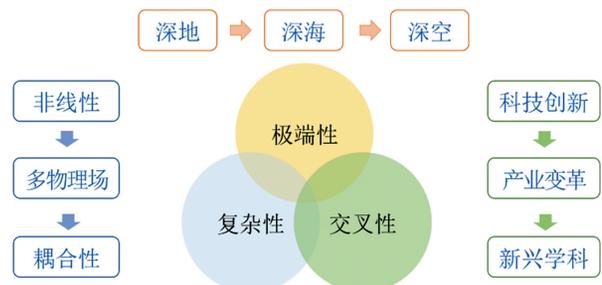


图 3 矿业学科发展规律与发展趋势

分形等非线性行为与机制获得了数学上的解释和描述,并在简单系统的工程实践中初步实现了对非线性行为的控制或利用。然而,复杂工程系统的非线性行为与机制仍然无法很好地被解释和把握。深部资源开发过程中涉及的岩体非线性行为是矿业学科需要面对和解决的重要课题。同时,随着深部资源复杂开采环境的深入,不同物理场之间的耦合效应也越来越强烈,深部陆地资源开发存在的热—力耦合场、液—固耦合场、气—固耦合场,深水海洋资源开采存在的气—液—固耦合场、海底多相资源耦合共生现象,以及不同物理—化学—生物耦合场、资源型矿体与外部介质界面的耦合作用等使得矿业学科的研究内容变得极为复杂。

(3)“交叉性”成为矿业学科未来碳中和零碳、负碳技术发展的必然趋势

当前,新一轮科技革命蓬勃兴起,各种先进理论、先进技术大量涌现,信息化、智能化产业正在迅速崛起,通过信息技术与工业相融合以提升国家工业水平的产业战略已经成为全球共识。德国、美国、日本等世界工业大国相继提出了“工业 4.0”“工业互联网”“第四次工业革命”等概念并开始付诸实施^[16, 17]。当前形势下的工业变革以物联网和智能制造、智能控制为主导,正在深刻影响今后的全球工业产业布局。信息化、智能化、绿色化迅速向各学科领域渗透,带动产生各种新的活动领域和合作形式。矿业学科既要按照生产、矿井的地质和经济特性来完善和发展传统的矿业工程科技,又要吸收和融汇现代科学技术的最新成就使矿业工程科技不断提高和更新^[18, 19]。以信息化、智能化、绿色化为创新驱动的学科融合发展将极大提升矿业学科的科学内涵,促使矿业学科进入快速发展阶段。

2 “十四五”发展目标及优先领域

根据国内外矿业工程学科发展趋势和需要解决的科学问题,应加强矿业工程学科基础理论研究,形成支撑现代矿业工程技术进步的基础理论体系,加强相关理论、学科、技术等交叉,实现自动化、智能化开采,统一矿区环境保护与治理,减少或消除开采引起的环境破坏,使矿产资源开发与矿区环境协调发展。形成一批国际知名的矿业工程科学学者、专家、

学术带头人,广泛推进国际性学术交流,使我国真正成为世界上的矿业大国和强国,成为矿业工程学科理论研究、技术开发和学术交流的中心,引领世界矿业工程学科发展。

(1) 加强关键共性基础理论研究

通过关键共性理论、方法和原理的研究,培育对矿业工程学科发展具有推动作用的重大科研成果。加强矿业学科基础理论研究,形成支撑智能采矿技术体系的矿山压力基础理论;根据资源禀赋特征、开采方法,建立相应的、完善的岩石力学及采动岩石力学基础理论。在深部岩体原位力学理论、近零生态损害保护性开采理论、面向智能化无人开采的理论、深地矿产与地热资源共采基础理论、关停矿井综合利用理论与方法等领域取得重大理论突破。

(2) 调整完善矿业工程学科体系

根据我国经济社会发展对矿业人才的需要,调整完善矿业工程学科体系,广泛吸收基础科学与相关学科的知识与技术,促进智能化、信息化相关学科交叉与融合,调整完善本科、硕士和博士培养方案,建立与时俱进的学科知识体系、知识结构,满足社会经济发展的需求,服务于我国新时代经济社会的全面发展。

(3) 建设一流研究平台和科研基地

充分发挥国家重点实验室、高校和研究院所在基础研究方面的优势,加强科研平台建设,建设一流的科研基地,加强社会合作交流和开放共享,提高资源利用效率,促进基础理论原始创新研究。充分发挥国家工程研究中心、国家重点实验室在产业技术创新战略联盟中的关键作用,促进产学研合作,提高我国产业的自主创新能力和国际竞争力。

根据未来五年我国经济社会发展需求,在广泛调研和系统分析相关学科国内外发展趋势的基础上,梳理出 14 项应加强的优势方向、17 项需培育的发展方向、10 项应促进的前沿方向和 5 项可鼓励的交叉研究方向,如图 4~图 7 所示。

根据未来 5~15 年我国经济社会发展需求层次和科技发展水平,从上述发展方向中,凝炼出 5 项“十四五”(2025)优先发展领域和 5 项“中长期”(2035)优先发展领域,如图 8、图 9 所示。

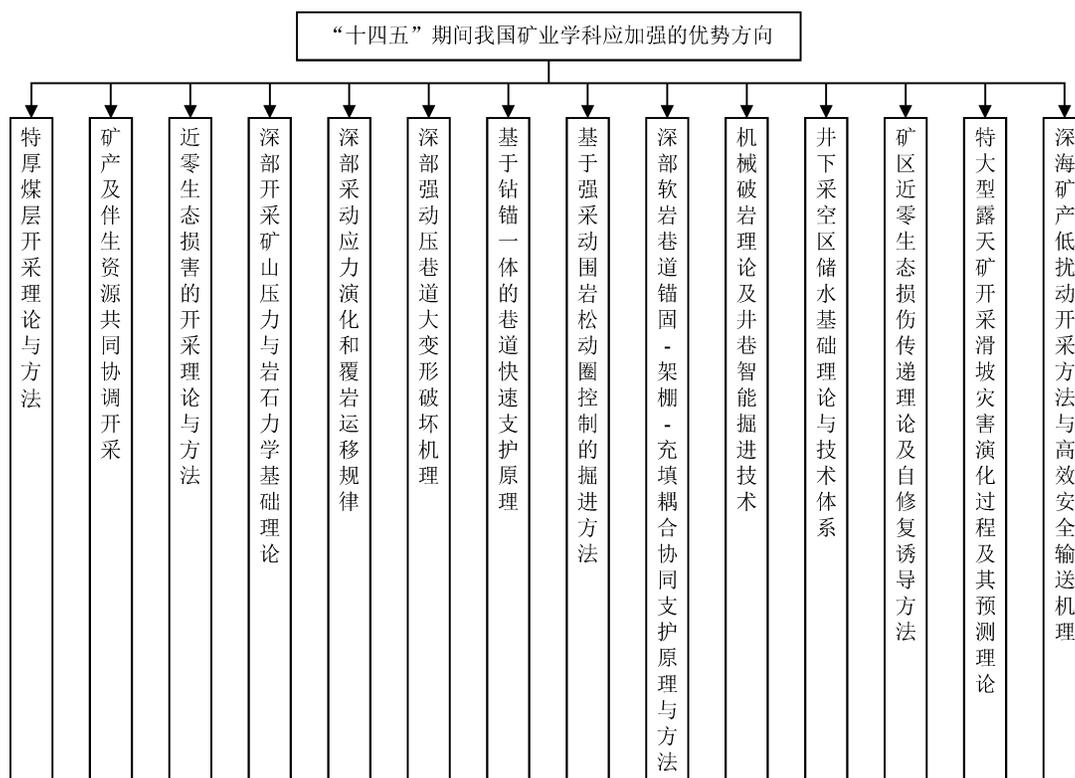


图 4 “十四五”期间我国矿业学科应加强的优势方向

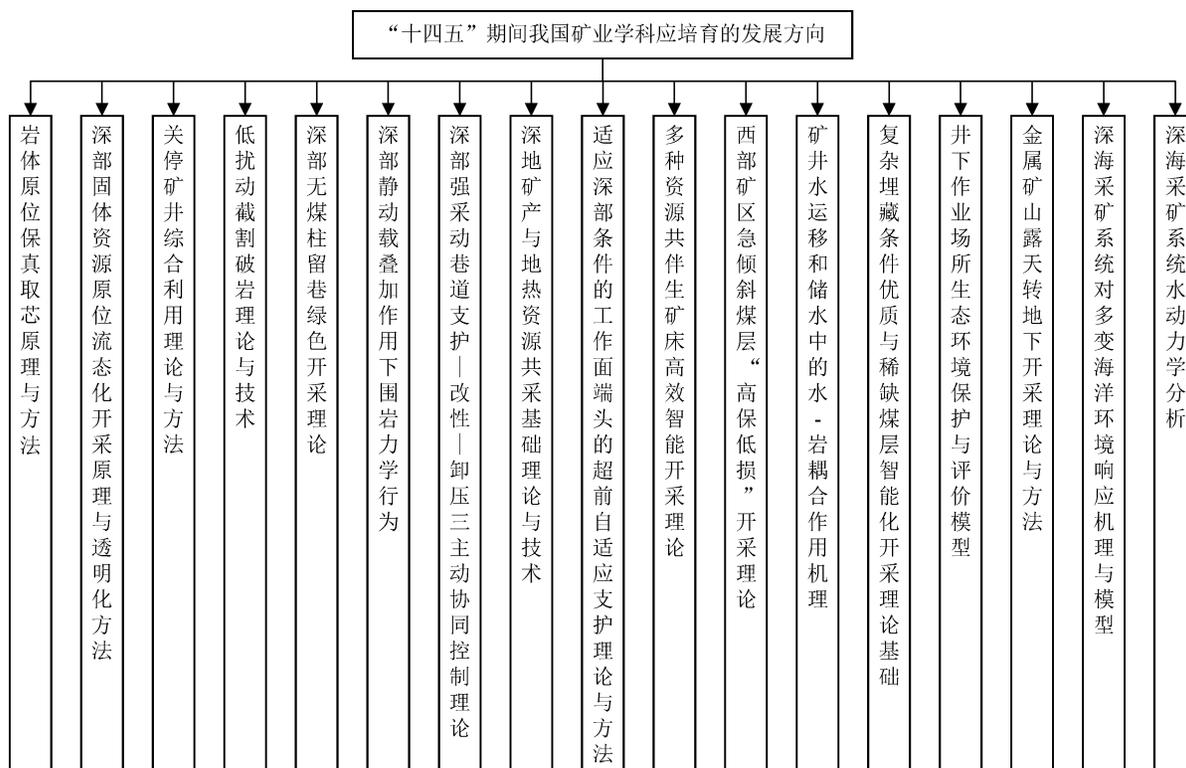


图 5 “十四五”期间我国矿业学科应加强的优势方向

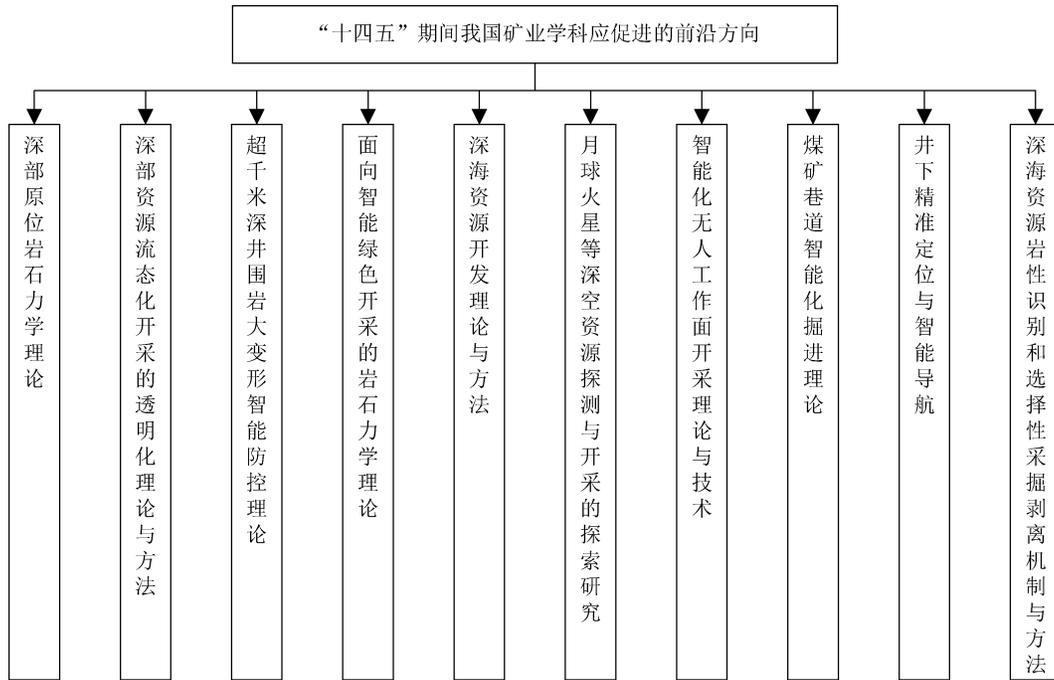


图6 “十四五”期间我国矿业学科应促进的前沿方向

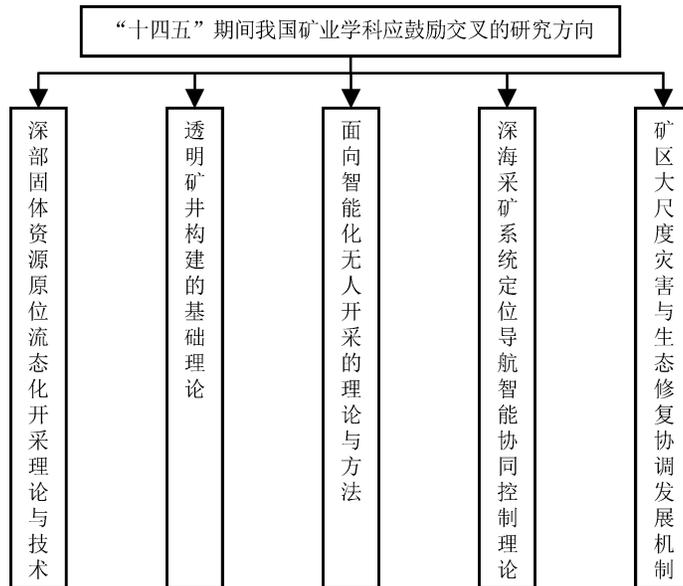


图7 “十四五”期间我国矿业学科可鼓励交叉的研究方向

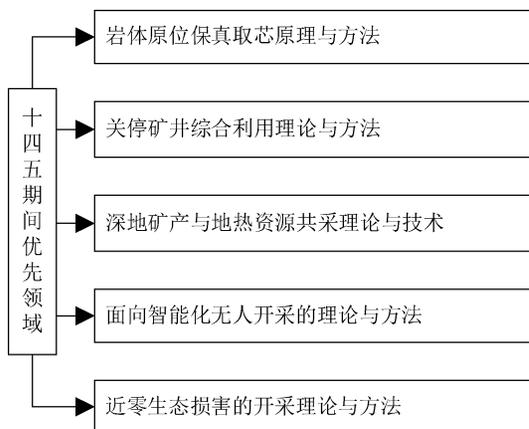


图8 “十四五”优先发展领域

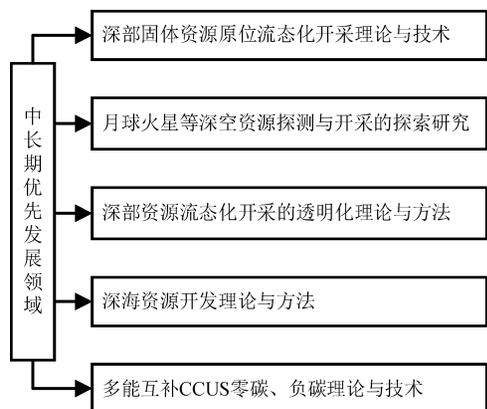


图9 “中长期”优先发展领域

3 矿业学科交叉发展与国际合作前沿

3.1 深部资源采选充(冶)一体化及原位转化

深部矿产资源开采难度加大、生产成本增加,传统资源开发方法难以适用,要使我国成为地球深部探测领域世界范围内的“领跑者”,特别是在深地煤炭资源绿色安全开发领域成为国际上的“领跑者”,就必须颠覆现有的矿产资源开发理论与技术,通过研究新的深部资源开发方式,提升我国深部资源获取能力。深部矿产资源采选充(冶)一体化及原位转化是一种颠覆性的深部资源开发模式,将传统的地下采矿、地面分选、地面冶金三个相对独立的生产链紧密衔接为地下采选充(冶)一体化生产系统,仅提取有用矿物及电热气,将分离出的废弃物就地充填,实现固体废弃物无害化处理,推进矿区生态文明建设,实现绿色矿业、智能矿山、循环经济和可持续发展。同时,在此过程中出现的新理论与技术难题也是人类走向地球深部必须面对和优先探索的基础性科学问题。

研究深部煤矿和金属矿无人化智能化开采、分选、充填、冶金等过程的一体化,建立固体资源原位流态化开采理论与方法,形成传统的地面分选、冶炼等过程全部在井下原位实现的模式,提出仅提取有用矿物及电热气、废弃物不出地面留在井下用于充填的方法。该交叉领域的核心科学问题包括:(1)深部开采岩体结构参数的透明化表征方法;(2)固体资源流态化开采的原位采动岩体力学理论;(3)固体资源流态化开采扰动下的多物理场耦合理论与近场围岩温度场—渗流场—应力场—裂隙场—化学场耦合作用机制;(4)深部资源多组份、多相介质原位多元转化的冶金动力学原理与方法;(5)深部资源的原位智能化分选与有用矿物提取方法。该交叉领域的主要研究方向包括:(1)地质构造探测及地质保障技术;(2)基于复杂地形空间导航定位的深部矿产资源智能化开采;(3)深部原位采选充(冶)体一体化技术与装备研制前沿探索。

通过建立基于流态化开采的深部资源原位采选充(冶)一体化理论与技术体系,实现对深地固态资源采、选、充、冶的原位、实时和一体化开发,提高深地矿产资源的开发效率、运输效率和利用转换效率,转变传统的矿产资源的开发模式和运输模式,实现

“地上无矿、井下无人”的绿色环保开采终极目标,开辟新型采矿工业模式,引领矿产资源开采技术革命,实现固态矿产资源开采深度上的突破及深地矿产资源清洁高效和生态友好开发利用,为我国可采资源总量翻一番提供技术支撑。

3.2 深地/深海/深空矿产资源开发

地球上无法再生的矿产资源正在被过度消耗,部分矿产资源陆地开采供应的难度越来越大、甚至到了难以为继的程度。深海采矿成为新一轮全球矿产资源开发竞争的焦点,美国、日本、德国等国家在20世纪70年代末就开展了深达5500m的锰结核联合开采试验^[20, 21]。太空采矿也正在成为矿产资源勘探开发的前沿阵地^[22-25],进入21世纪以来,美国、俄罗斯、欧盟纷纷启动了太空采矿计划,从而带动了相关学科的发展。

从矿业学科自身发展需求看,随着矿产资源的开采深度逐渐增加以及由陆地向深海延伸,开采难度和安全风险大幅增加,极地资源的勘探开发也给传统的矿业学科提出了严峻的挑战。从经济社会发展趋势看,物联网、云计算、大数据、人工智能、移动互联网、机器人化装备的飞速发展,给传统矿业学科带来了颠覆性变革。在这一背景下,深地、深海、深空矿产资源开发必将成为未来矿业学科的重要发展领域。

该领域的核心科学问题和主要研究方向有:

(1)深地、深海、深空保真取芯与原位岩石力学理论(深部岩石原位保真取芯、深部原位保真测试技术、深部原位岩石力学理论);(2)深海采矿系统的动力学理论(水面母船设计的水动力理论、系统中管道的动力学特性);(3)低重力与极端温度下太空采矿理论(太空矿产资源精准探测、太空原位保真取芯与智能探矿、太空资源地下开采与地下空间利用)。

当前我国深地、深海、深空资源开发还处于起步阶段,面临诸多发展瓶颈问题^[26]。有必要加强国际交流合作,发展深地、深海、深空能源资源勘探与评估方法,建立深地、深海、深空资源开发基础理论,研发深地、深海、深空资源开发技术与装备,尤其是深地、深海、深空资源智能化、无人化开发技术与装备。利用智能遥感、自主导航、人工智能和通信技术对深地、深海、深空矿产资源进行开发,力争促使我国走到深地、深海、深空矿产资源勘探与开发的世界前列。

4 结论与建议

4.1 主要结论

根据矿业学科发展特点和国内外矿业学科发展趋势,可以得出以下几点结论:

(1) 人类对丰富物质文明、挑战自然的无限追求,导致矿业学科越来越受到来自资源开采环境的极限挑战,“极端性”“复杂性”和“交叉性”将成为矿业学科未来发展所面临的严峻挑战。

(2) 学科交叉研究在促进科学技术和经济社会发展中的地位与作用日益重要,智能化、信息化、绿色化迅速向矿业领域渗透,矿业学科与其它学科的交叉融合成为必然发展趋势。跨学部和跨部门合作成为促进矿业学科交叉合作的一项重要机制。

(3) 深部矿产资源采选充(冶)一体化及原位转化是学科交叉融合的一个具体方向,是提升我国深部资源获取能力的一种颠覆性开发模式。

(4) 深地/深海/深空矿产资源开发是促进我国由矿业大国向矿业强国转变的重要前沿方向。

4.2 建议

根据矿业学科研究发展趋势和促进学科发展的举措,本文提出以下几条建议:

(1) 设立学科优先发展领域专项基金

在整合现有科研力量、技术资源、研究平台基础上,设立学科优先发展领域专项资金,实施高等院校和科研机构共同参与的联合攻关。吸引海内外优秀人才参与,对重要科学基础问题、具有引领世界先进水平的关键核心理论与方法研发等进行重点支持。

(2) 设立人才培养专项基金

设立矿业学科人才培养专项基金,吸引高端创新人才投入到学科的研究工作中,进一步梳理完善学科基础理论体系,优化合并或新建相关的学科方向,将传统和新兴学科进行交叉融合,推动矿业学科的持续创新发展,通过高水平、高质量的科学研究推动人才培养、学科发展,让科研成为一种高水平人才培养模式。

(3) 创造宽松自由的科研环境

将国家自然科学基金发展战略的源头创新类研究项目系列、科技人才类的人才培养系列、创新环境类的科研环境建设等方面进行有机融合;同时在人

才的培养使用、科研管理、薪酬待遇等方面具有灵活、实用的政策,参考国外基金项目管理的先进经验,以科学家为中心,实行科学家对研究项目的“负责制”,使真正的科学家在宽松自由的科研环境中能够一心一意地从事科学研究。

参 考 文 献

- [1] 何满潮,朱国龙.“十三五”矿业工程发展战略研究.煤炭工程,2016,48(1):1—6.
- [2] 国家自然科学基金委员会工程与材料科学部.冶金与矿业学科发展战略研究报告:2016~2020.北京:科学出版社,2017.
- [3] 国家自然科学基金委员会.国家自然科学基金项目指南.北京:科学出版社,2020.
- [4] Mcmurtry A. The complexities of interdisciplinarity: integrating two different perspectives on interdisciplinary research and education. International Journal of Complexity and Education, 2011, 8(2): 19—35.
- [5] 原帅,黄宗英,贺飞.交叉与融合下学科建设的思考——以北京大学为例.中国高校科技,2019(12):4—7.
- [6] 董樊丽,张兵,聂文洁.高校学科交叉融合创新体系构建研究.科学管理研究,2019,37(6):18—23.
- [7] 新华社.国务院印发《“十三五”国家科技创新规划》.[2016-08-08].http://www.gov.cn/xinwen/2016-08/08/content_5098259.htm.
- [8] 自然资源部中国地质调查局国际矿业研究中心.全球矿业发展报告.北京:自然资源部中国地质调查局中国矿业报社,2019.
- [9] 国家自然科学基金委员会政策局.筑科技强国之基:国家自然科学基金“十三五”发展战略研究报告.北京:科学出版社,2017.
- [10] 谢和平,高峰,鞠杨,等.深地科学领域的若干颠覆性技术构想和研究方向.工程科学与技术,2017,49(1):1—8.
- [11] 宋健,唐春安,亢方超.深部矿产与地热资源协同开采模式.金属矿山,2020(5):124—131.
- [12] IUCN. Deep seabed mining: a rising environmental challenge. Switzerland: International Union for Conservation of Nature, 2018.
- [13] 张农,冯晓巍,庞华东,等.深海采矿的环境影响与技术展望.矿业工程研究,2019,34(2):22—28.

- [14] 阳宁, 陈光国. 深海矿产资源开采技术的现状综述. 矿山机械, 2010, 38(10): 4—9.
- [15] 谢和平, 高峰, 鞠杨. 深部岩体力学研究探索. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(11): 2161—2178.
- [16] 克劳斯·施瓦布. 第四次工业革命转型的力量. 北京: 中信出版集团, 2016.
- [17] Alfons B, Emst AH. 工业 4.0: 开启未来工业的新模式、新策略和新思维 实践版. 刘欣, 译. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- [18] 葛世荣, 王忠宾, 王世博. 互联网+采煤机智能化关键技术研究. 煤炭科学技术, 2016, 44(7): 1—9.
- [19] 王国法, 王虹, 任怀伟, 等. 智慧煤矿 2025 情景目标和发展路径. 煤炭学报, 2018, 43(2): 295—305.
- [20] Mero JL. The mineral resources of the sea. Amsterdam: Elsevier Oceanography Series, 1965.
- [21] Wijk JMV. Vertical hydraulic transport for deep sea mining: A study into flow assurance. Netherlands: Delft University of Technology (Doctoral dissertation), 2016.
- [22] 张克非, 李怀展, 汪云甲, 等. 太空采矿发展现状、机遇和挑战. 中国矿业大学学报, 2020, 49(6): 1025—1034.
- [23] Sanchez JP, McInnes CR. Assessment on the feasibility of future shepherding of asteroid resources. Acta Astronautica, 2012, 73: 49—66.
- [24] Zaleski A. Luxembourg leads the trillion-dollar race to become the Silicon Valley of asteroid mining. (2018-04-16)/ [2021-06-09]. <https://www.cnbc.com/2018/04/16/luxembourg-vies-to-become-the-silicon-valley-of-asteroid-mining.html>.
- [25] 周国庆, 李瑞林, 严康, 等. 月球采矿中月壤/岩力学问题的理论与试验方法. 煤炭学报, 2019, 44(1): 183—191.
- [26] 赵业新. 论海上丝绸之路背景下中国与太平洋岛国深海采矿合作. 太平洋学报, 2019, 27(10): 31—46.

Development Strategy of Mining Discipline in China during the 14th Five-Year Plan Period

Xie Heping¹ Miao Hongyan² Zhou Hongwei^{3*}

1. Institute of Deep Earth Science and Green Energy, Shenzhen University, Shenzhen 518060

2. Engineering and Materials Science Division, National Natural Science Foundation of China, Beijing 100085

3. School of Energy and Mining Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083

Abstract According to the characteristics of the development of mining discipline and the needs of China's economic and social development in the next five years, the development goals of mining discipline are suggested on the basis of an extensive investigation and systematic analysis. There are fourteen advantageous directions that should be strengthened, seventeen development directions that should be cultivated, ten frontier directions that should be promoted, and five research directions that should be encouraged interdisciplinary research. It also summarizes five priority development areas in 14th Five-Year Plan and four priority development areas in “Medium and Long Term Plan” (2035). Finally, some measures and suggestions to promote the development of mining discipline are put forward considering the policy level and discipline level.

Keywords mining discipline; development strategy; the 14th Five-Year Plan; resource development of deep earth, deep sea and deep space

(责任编辑 刘敏)

* Corresponding Author, Email: zhw@cumtb.edu.cn