DOI 10.15302/J-SSCAE-2021.06.006

深部矿产和地热资源共采战略研究

蔡美峰[1,2]，多吉[3]，陈湘生[4]，毛景文[5]，唐春安[6]，刘志强[7]，纪洪广[1,2]，任奋华[1,2]，郭奇峰[1,2]，李鹏[1,2]

（1. 北京科技大学土木与资源工程学院，北京 100083；2. 北京科技大学金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室，北京 100083；3. 西藏自治区地质矿产勘察开发局，拉萨 850032；4. 深圳大学土木与交通工程学院，广东深圳 518061；5. 中国地质科学院矿产资源研究所，北京 100037；6. 大连理工大学土木工程学院，辽宁大连 116023；7. 北京中煤矿山工程有限公司，北京 100013）

摘要：深部矿产和地热资源共采是实现深部采矿可持续发展的重要举措，也为深部高温岩层地热开采提供了全新技术手段。本文分析了深部矿产和地热资源共采的重要价值，梳理了国内外地热资源的开发利用现状，总结了我国在深部矿产和地热资源共采方面的基础研究进展；在剖析深部矿产和地热资源共采面临的技术与管理挑战的基础上，论证形成了实施综合开发利用亟需的技术体系构成，涉及深部矿产资源与深部地热开发利用调查及前景研判、高温坚硬岩层地下巷道与硐室掘进及建造、深部矿产资源开采系统和地热开发系统“共建 – 共存 – 共用”的关键理论与技术体系、深部高温岩层地热能交换和输送理论与技术。研究提出了地质勘查、科技创新、扶持政策、顶层规划与科研示范基地等方面的发展建议，以期为我国矿业和地热产业可持续、高质量发展提供参考。

关键词：深部矿产；地热资源；矿 – 热共采；高温岩层；地热能交换和输送

中图分类号：TD853；P314.2　　**文献标识码**：A

Development Strategy for Co-mining of the Deep Mineral and Geothermal Resources

Cai Meifeng[1,2], Duo Ji[3], Chen Xiangsheng[4], Mao Jingwen[5], Tang Chun’an[6], Liu Zhiqiang[7], Ji Hongguang[1,2], Ren Fenhua[1,2], Guo Qifeng[1,2], Li Peng[1,2]

(1. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Ministry of Education for Efficient Mining and Safety of Metal Mines, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 3. Tibet Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Lhasa 850032, China; 4. College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518061, Guangdong, China; 5. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 6. School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, Liaoning, China; 7. Beijing China Coal Mine Engineering Co. Ltd., Beijing 100013, China)

收稿日期：2021-10-11；**修回日期**：2021-11-23

通讯作者：蔡美峰，北京科技大学土木与资源工程学院教授，中国工程院院士，研究方向为岩石力学和采矿工程；E-mail: caimeifeng@ustb.edu.cn

资助项目：中国工程院咨询项目“深部矿产和地热资源共采战略研究”(2019-XZ-16)

本刊网址：www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

Abstract: Co-mining of the deep mineral and geothermal resources is crucial for the sustainable development of deep mining and provides a brand-new technical means for geothermal mining in deep high-temperature strata. In this article, we analyze the important values of the co-mining, introduce the current status of development and utilization of geothermal resources worldwide, and summarize the basic research progress of the co-mining in China. Subsequently, we analyze the technical and management challenges faced by the co-mining and establish a technical system that is urgently required for comprehensive development and utilization, which involves (1) the investigation and prospect judgment of the joint development and utilization of deep mineral and geothermal resources, (2) the excavation and construction of underground tunnels and chambers in high-temperature and hard rock strata, (3) the key theory and technical system of co-construction, coexistence, and sharing of a deep mineral resource exploitation system and a geothermal development system, and (4) the theories and technologies of geothermal energy exchange and transportation in the deep high-temperature strata. Furthermore, development suggestions are proposed in terms of geological exploration, scientific and technological innovation, supporting policies, top-level planning, and scientific research demonstration bases; these aim to provide a reference for the sustainable and high-quality development of the mining and geothermal industries in China.

Keywords: deep mineral resources; geothermal resources; co-mining; high-temperature strata; geothermal energy exchange and transportation

一、前言

经过多年的大规模持续开采，我国浅部矿产资源逐年减少、趋于枯竭，矿产资源特别是金属矿产资源的开采逐步向深部全面推进 [1]；已有一批金属矿山的开采深度达到或超过 1 km，正在或计划兴建的大中型金属矿山几乎全部为地下深井矿山。未来十年，我国 1/3 以上的金属矿山开采深度将达到或超过 1 km，部分可达 2~3 km [2,3]。由此可见，深部开采是保障我国金属矿产资源可持续开发与供给的最主要途径 [4~6]。

金属矿深部开采会遇到一系列关键难题，最突出的是高温环境条件伴生的一系列问题使得深部采矿难以为继 [3,7]。为了维持正常生产必须进行降温处理，常用的降温技术有非人工制冷、人工制冷两大类。矿井通风是主要的非人工制冷降温技术，但井深超过 1 km 后常规通风无法满足降温要求，必须辅以人工制冷降温。人工制冷降温分为水冷却、冰冷却两种类型。水冷却系统实际上是地面空调系统在井下矿山降温中的应用，早在 20 世纪 60 年代南非便开始使用大型矿井集中空调；但随着矿井深度的增加，水冷却系统不可避免存在过高的静水压力和难以解决的冷凝热排放问题。冰冷却降温系统利用冰的融化潜热进行降温，获得相同冷量所需冰量的含水量远低于水冷系统 [8]，在 20 世纪 80 年代初期南非等国家开始进行冰冷却降温系统的研究与应用；在井深超过 2~3 km 后，人工制冷降温成本会很高，一般矿山无法承受。也要注意到，现有的降温技术都是被动式降温；必须发展和应用主动式降温技术，才能解决被动式降温造成的采矿高成本问题。

对于发展主动式深井降温技术，最具发展前途的是深部地热开发技术 [9]。事实上，深井高温环境主要由高温岩层“热辐射”引起，是作为天然清洁能源的地热产生的效应。若在深部矿产开采过程中采用热交换技术，对地热资源进行开发利用，即为深井采矿、深部地热的联合开发。开采深部地热资源不仅可以变“热害”为“热利”，为地下采矿空间环境降温创造条件，还能够大幅度降低专门为采矿降温采取一系列被动式措施的成本，有望为深井降温开辟一条具有颠覆性、技术经济性的新途径。已有研究提出了基于开挖技术的增强型地热系统概念模型（EGS-E），从系统原理、工程构想、技术优势等方面对 EGS-E 进行了具体阐述 [10~12]。

本文在全面调查我国深部高温岩层地热赋存情况、矿产与地热资源共同赋存区域类型及特征的基础上，分析国内外深部地热的开发利用现状，总结我国在相关领域的重要研究进展，提出技术经济可行的深部矿产与地热资源共采双赢战略；分析深部矿产和地热资源共同开发利用面临的关键问题和技术瓶颈，明晰深部矿产和地热资源共采的重点研究任务，针对性提出推进深部矿产与地热资源共采战略实施的发展建议。相关研究成果可为我国资源和能源的中长期可持续发展提供前瞻性路径与战略性启发。

二、深部矿产和地热资源共采的重大意义

（一）深部“矿 – 热共采”是自然资源综合开发利用的重要趋势

延续千年的大规模自然资源开发与利用，打破了地球生态系统平衡，导致气候变化、极端气候事件频发，给人类生存和发展带来了严峻挑战。全球气候控制已是世界各国高度关心并参与行动的重大课题。我国碳达峰、碳中和目标的提出，体现了推动构建人类命运共同体的责任担当，也是实现可持续、高质量发展的内在要求。尽管为了按时实现碳达峰、碳中和目标，以煤炭为主体的化石能源使用将逐步有序地减少或消退，但经济社会发展对能源的需求仍在持续。地热能作为绿色、低碳、无污染的可再生能源，储存量极大，是取代传统化石能源、保障不断增长的能源需求的有力选项。深部矿产资源和地热资源将是推动我国能源转型、全球能源与资源供给格局深刻变革的重要因素，有利于国民经济朝着高效、环保、清洁、低碳方向发展，成为人类对美丽生态环境和美好生活目标需求的重要基础保障。

从深部采矿可持续发展的中观角度看，采用现有技术开采 2 km 及更深部位的矿产资源时，因降温成本过高而在经济上不可行。深部矿产与地热资源共采，不但能够显著降低传统的被动式降温成本，而且可以提升矿产、地热资源的综合开采效益；为解决传统采矿模式进行深部采矿“成本太高、效益太低”的经济性问题，保持深部矿产的可持续、大规模开发提供了新模式、新路径。

（二）“矿 – 热共采”为深部高温岩层地热开采提供全新技术手段

绝大部分地热能赋存在 3~10 km 深处的高热坚硬岩层中，随着人类对地热开发利用需求的不断增加，各国对这部分地热能开发利用的重视与依赖程度也在迅速增加。石油钻孔等传统方式开采深部地热资源时存在难度大、能力小等问题，而增强型地热系统（EGS）技术在建造人造热储方面面临诸多难点：①要在地表下 3~10 km 的深部建造地热开发系统，需要采用特种技术与装备（适应高热坚硬岩层、高地应力条件）来开掘特殊岩石工程、结构、通道并保持其稳定，这前所未有、难度极大；②由于深部高地应力的作用，水压致裂制造的裂隙经常会闭合，导致裂隙间不连通或形成短路，无法建成并保持足够体积的热储；③多次高压激发已存在的裂隙，可能导致生产井、注入井的直接连通并形成流体短路效应 [13]，造成换热效果完全丧失；④利用 EGS 技术开发地热时，注水井、生产井的水循环过程往往消耗大量的水，可能导致与地下水相关的环境问题。迄今为止，在采用 EGS 技术开发深部地热方面并未形成有效的解决方案，因而相关工作仍处于研究和试验阶段，距离大规模工业化开发仍有相当距离 [9]。

将采矿技术用于地热开采可有效解决上述 EGS 应用的难题。当前，硬岩矿山的开采深度已超过 4 km，深部开挖技术十分成熟。利用采矿技术，从地面向深部高温岩层开挖竖井，在竖井下部开掘多水平分布的水平巷道，再加上通过爆破方式在矿体中形成的破裂网络，可大幅度提高热储建造能力、增加热交换面积及地热能获取与输出的量级，为大规模地热开发创造有利条件；开挖的竖井和巷道可供采矿作业、地热开采共用，在降低地热开发成本的同时，最大限度地减少环境污染。因此，深部矿产和地热资源共采技术的运用，极大可能为未来深部高温岩层地热开采提供全新的技术手段。

三、深部矿产和地热资源开发利用现状及我国“矿 – 热共采”的科技基础

（一）国外深部高温岩层地热资源开发利用

对于深部高温岩层地热开采，国外在 50 多年前就开始研究 EGS 技术，即采用石油勘探钻孔的方法向深部高热地层打钻孔，应用水力压裂等井下作业措施在钻孔底部的干热岩体中造成具有高渗透性的裂缝体系，由此“人造”出一个地热储层（热储）；然后在地面上从注入井（一口或数口）中将冷水注入热储，经裂缝换热后再从生产井（另外数口）中抽出至地面，利用产生的地热蒸汽进行发电等热能应用。

20 世纪 70—90 年代是 EGS 地热开发研究的兴起阶段，美国、英国、日本、法国先后开展了 6 个现场试验项目。1973 年，美国最早在墨西哥州芬顿山开始第一次 EGS 现场试验，随后在加利福尼亚州盖塞斯进行试验。1991—2000 年为干热岩研究低

潮期，没有 EGS 新增项目实施。2001 年以来，有关干热岩的研究再度升温，美国、德国、澳大利亚、韩国启动了多个 EGS 研究与现场试验项目。截至 2019 年，欧洲、北美洲、澳洲、亚洲、中美洲的 14 个国家合计实施了约 41 个深部高热岩层地热资源勘察开发项目，其中 25 个属于传统型地热系统，16 个属于 EGS [14]。法国、德国、英国等联合开发的法国苏尔茨干热岩项目，其运行时间超过 30 年，但装机容量不大（1.5 MW）且处于间歇运行状态。

（二）我国地热资源开发利用

根据赋存埋深和温度，我国地热资源主要划分为浅层地温型、水热型、干热岩型。浅层地温型（深度＜200 m、温度＜90 ℃）地热资源遍布全国，浅部地热能量约为 9.5×10^{9} tce，可利用资源量为 7×10^{8} t/a。水热型（中、深层中温，深度为 200~3000 m、温度为 90~150 ℃））地热资源主要集中在大型沉积盆地区，能量约为 1.25×10^{12} tce，已经或正在开发利用的主要是 200 m 以浅的水热型地热资源。干热岩型（深度为 3~10 km、温度为 150~650 ℃）地热资源的开发潜力是浅层地热资源的 100~1000 倍，我国深部高温岩层中的地热能资源量约为 8.6×10^{14} tce [4]。干热岩型地热资源被视为未来最佳的替代能源类型之一，世界各国都致力于对其实现高效开发利用。

在我国，开发利用地热温泉资源已有上千年的历史，但规模化地实施地热勘查开发利用主要在近几十年。20 世纪 50 年代，规模化利用温泉起步，随后以温泉洗浴、康养、供暖、发电为代表的地热能资源开发利用多样化格局逐渐形成，2000 年后，在国家扶持和市场需求的驱动下步入发展快车道 [15]。水热型地热能的直接利用以年均 10% 的速度持续增长，连续多年居世界首位；在相关发电装机容量方面，截至 2017 年年底为 27.28 MW，2018 年增至 44.98 MW，2019 年增至 49.1 MW [15,16]。对于浅层地热能，截至 2017 年年底地源热泵装机容量为 2×10^{4} MW，供暖建筑面积为 5×10^{8} m^2 [16]。

也要注意到，尽管我国的中浅层地热资源开发利用得到快速发展，但在全国一次能源消费中的占比很低（约 0.5%），因此需要在深部高温岩层地热开采方向继续加强。目前，我国深部高热岩层地热能开发研究处于起步阶段，从 21 世纪初才开始相关勘查研究；2017 年，在青海共和盆地 3705 m 深度钻取到了高温干热岩体（温度为 236 ℃），但没有进行 EGS 地热能开发现场试验。整体来看，我国深部高温岩层地热能的开发仍处于现场试验阶段，从勘探到开发较多沿用了石油工程开发中的经验；在地质筛选模型、高温钻完井工艺方向面临许多亟待攻克的技术瓶颈，尚未形成完善的 EGS 开发评价体系 [17]。

（三）我国深部矿产和地热资源共采研究进展

1. 资源战略及勘探摸底

通过调查研究，总结得出了我国处于全球成矿相关的大地构造有利位置的结论。我国位于欧亚板块、印度板块、太平洋板块交汇地带，由于三大板块与中国大陆板块的俯冲和碰撞，形成了一系列大型、超大型矿床。我国成矿条件优越，矿种齐全，具有明显的分带、分群以及有规律的分布。

提出了我国深部地热资源勘探摸底的 4 种地质类型：高放射性产热型（东南沿海地区）、沉积盆地型（关中、咸阳、贵德、共和、东北等白垩系形成的盆地下部）、近代火山型（腾冲、长白山、五大连池等）、板内活动构造带型（青藏高原）。

在勘查研究我国大型 – 超大型金属矿床与地热资源分布后，认定胶东、长江中下游、秦岭东部、滇西北地区是地热与矿产资源的共同赋存区，共采潜力巨大。考虑到地形、开发成本、实际需求等因素，宜率先在胶东地区试行能源与资源共采，三山岛、新城、金青顶、玲珑金矿等作为可试采区。

2. 高温地下工程技术体系

研究了高温条件下的岩石特性、围岩变形机理与控制技术、工作面降温技术、地层改性材料与技术、掘进装备的适用性与发展方向、地热 – 矿产资源共采的井巷建造模式，提出了地下矿产与地热资源共采的开发途径。研究了高温岩石特性及其可钻性，提出了机械破岩钻进井巷可行性和高温地层隔热、岩体改性工艺及材料。

形成了涵盖“基础理论 – 关键技术 – 掘进装备 – 工程材料 – 建造工艺”的地下高温坚硬岩层井巷与硐室掘进与建造的技术体系。提出了机械破岩的井巷施工装备体系、无人化“机器人”建造模式，发展了深井高温地层井巷围岩支护工艺、结构与材料以及深井工程“围岩支护 – 地层改性 – 应力调控 – 断面优化”稳定控制技术，构建了“竖井 +

斜井”提升、竖井“U”形结构流体提升、斜坡螺旋分级提升 3 种工程开拓与提升模式以及 U/L/Q 型 +360° 钻孔式的“井 – 巷 – 孔”联合布置地热开采模式。

3.“矿 – 热共采”基础理论与技术

提出了适用于矿产和地热资源共采的崩落法、充填法、原位溶浸开采 3 种“共建 – 共存 – 共用”的开采设施、工程布置及开发顺序；开展了温度和化学场变化对花岗岩力学特性影响的实验研究，总结了矿产和地热共采过程中热提取诱发的热损伤和化学损伤力学特性。

调查了金属矿、煤矿、盐矿等开发对地热资源的开发利用现状，通过案例分析梳理了现阶段矿产与地热共采实践中采用的方法、技术。针对共采靶区环境识别问题，分析了矿产及地热一体化勘探技术和高温环境矿产开发与传统应力、渗流、化学等多场耦合的影响机制。

4. 深部地热能交换和输送研究

提出了深部矿产与地热资源共采的高 – 中 – 低多温度层级热能提取系统；研发了适用于不同温度层级的冷热工质热能交换、提取、输送系统和中温区“矿 – 热共采”工艺流程；提出了使用隔热层和施工优化参数来延长有效通风距离、防治井下热害、降低热储能量损耗的措施。

提出了适用于矿产与地热资源共采的高温高压热能输送理论与技术。建立了高温、高压裂隙流与管道流的热能输送机理及配套技术体系，分析了不同输送技术的输送能力和效率，提出了通过增强技术在热储中生成随机裂隙是提升热能提取效率的有效方法。通过模拟试验获得了在裂隙换热区内采用裂隙换热方式优于管道流换热方式效果的重要结论。

四、深部矿产和地热资源共采面临的挑战、发展框架及重点任务

（一）我国深部矿产和地热资源共采面临的挑战

1. 金属矿产资源与地热资源共同赋存区域勘查程度低

我国金属矿产资源与地热资源共同赋存区域勘查评价工作刚刚起步，对“家底”掌握不清。有关金属矿床与地热资源的分布、类型、储量以及两类资源之间的关联性的调查研究还不充分，矿产资源与地热共采的远景区、有利区、目标区、开采区都有待进一步精细化圈定。对于深部高温地热资源勘查，目前尚未形成可靠的资源评价技术与方法体系，亟需拓展高新技术应用并重新优化勘查技术。这些方面成为制约矿产资源与地热共采的瓶颈环节。

2. 深部矿产和地热资源共同开发利用基础研究薄弱

深部矿产与地热共采由我国首次提出，在国际上没有先例，相关研究与实施是跨领域、多学科的系统工程，因而相关基础研究极为薄弱，众多方向仍是空白，需要跨学科、系统性、持续性地开展创新研究。基础研究问题主要有：在矿产区精准勘探并预测地热的赋存位置、赋集程度、分布特点；利用现有的或开发创新的地热开发理论和技术进行采矿空间的地热开采；在深地高温坚硬岩层中安全有效地开掘竖井、巷道、硐室；在深地高地应力岩层中建造矿产资源开采系统和地热开发系统（如热储）以实现两者“共建 – 共存 – 共用”；筛选热交换系统和技术，将赋存在深部高温岩层中的地热能资源置换出来并安全经济地输送到地表及其他适合利用的地方；针对各类地热源确认交换系统和技术的适应性。此外，我国深部高温岩层地热钻井技术与世界先进水平存有差距，高温岩层地热勘查开发、地热资源梯级综合利用、地热回灌与防腐防垢等技术研究未能取得突破性进展，不能满足现实需求。

3. 行业规划、政策措施有待完善

国家现行的一些财政、价格鼓励政策在加快地热资源开发和清洁利用方面发挥了积极引导作用，但未有针对矿产与地热资源共采开发利用这一新兴方向进行配套完善，专门的行业规划、技术标准、管理办法等有待制定。因政策滞后而导致相关财税法律规定可操作性差、实际执行不到位，必要的激励措施不充分，有针对性的支持政策待加强 [18]。值得指出的是，现阶段我国油气等化石能源对外依存度居高不下，着眼中长期来加强替代能源开发利用并充实技术储备较为迫切；地热能利用需要追赶先进国家步伐，而高端复合型人才不足、专有创新开发平台缺失的现状，直接制约了地热产业的高质量发展。

（二）我国深部矿产和地热资源共采发展框架

调查我国深部地热勘探和开发利用现状，分析深部矿产资源与深部地热共存区域的分布及特征，可为国家相关部门政策制定、相关领域工程科技研发提供基础支撑。在对现有的深部矿产资源开采技术和深部地热开发利用技术进行系统梳理，多学科的系统性深入研究，构建兼备实用性和经济性的深部矿产资源与地热资源共采系统工程框架（见图 1），涵盖地热与矿产资源勘查、掘进与建造、矿产与地热开发技术和地热利用等关键技术。

为支撑上述系统工程框架的落地实施，需要着重推动三个方面工作：①继续追踪国际外深部矿产资源、深部地热开发利用技术进展，评估主要技术路线，提出我国的领域未来技术发展路线图；②立足国内深部矿产资源与深部地热资源共采利用的现状及存在问题，剖析制约我国深部矿产资源与深部地热资源共采利用的技术、体制、机制瓶颈，总结形成适合我国深部矿产资源与深部地热资源共采利用发展方向的宏观规划；③调研国内外深部矿产资源与深部地热共采利用的相关政策法规，论证提出推动资源开发企业实施深部矿产资源与深部地热资源共采利用的政策建议，涵盖工程科技应用激励、产业政策、环保法规、财税政策等。

（三）我国深部矿产和地热资源共采未来重点研究方向

1. 深部地热资源赋存及开发利用调查和深部矿产资源与深部地热共同开发利用前景分析

广泛收集资料信息，掌握国际上深部地热资源方面勘查、开发、理论研究的新成果和新进展。进一步调查研究我国深部地热资源的分布、开发、技术发展态势以及核心问题。在全面跟踪国际进展、掌握我国赋存及开发情况的基础上，开展国内外深部地热资源的比较研究，为我国深部地热资源勘查开发战略研究提供坚实基础。

深入开展我国深部地热与矿产资源分布的勘查研究，率先调研金属矿产资源与地热共同赋存区域的地质特征。例如，在云南会泽地区、河南秦岭地区、胶东半岛地区，部分矿山地下 500 m 深度的岩层温度就超过了 40 ℃，采矿工程需要常年通过人工制冷系统进行降温，是潜在的“矿 – 热共采”研究对象。

进一步研判矿产资源与地热共同开采的技术效能，探讨利用采矿工程中的竖井、斜井、平巷等开采系统同步进行地热能源开采的有效方式，兼顾深部矿井作业温度控制和地热清洁能源开发。细化提出我国矿产资源富集省份可实现“矿 – 热共采”的目标区，为进一步的技术研发明确主攻方向。

2. 高温坚硬岩层地下巷道与硐室掘进和建造技术

开展深部高温坚硬岩石岩的温度场 – 应力场 – 渗流场分布规律及耦合异常特征研究。分析深部高温岩土材料在长期高温及温变条件下岩体结构、热力学特征和变异性，研究相关物理场的探测技术。探析深部高温坚硬岩石地层温度场 – 应力场 – 渗流场的耦合机理及反演分析方法，预测地热开采和储存的安全耐久性。分析不同热物性（相变温度、潜热值、热容量）的相变储能材料与深部地热温度的高效匹配关系，阐明热交换机制。

开展深部高温坚硬岩石地层中井巷（硐室）工

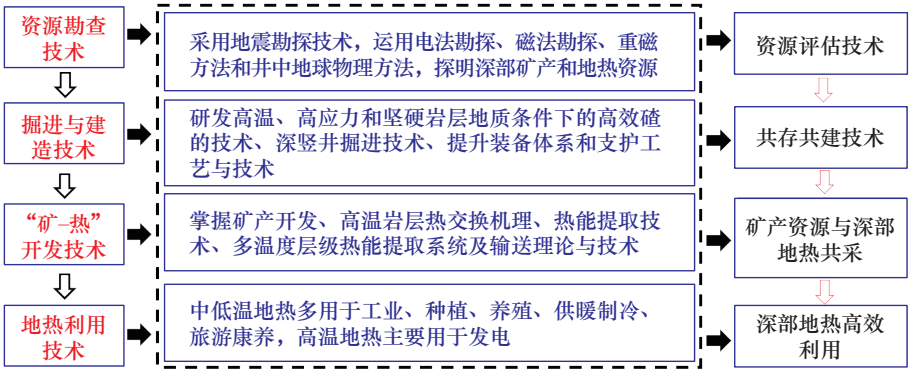

图 1　深部矿产资源与地热资源共采系统工程框架

程的整体规划、工程设计、工艺适宜性研究。探索深部高温坚硬岩石地层中井巷（硐室）的规划 / 设计 / 工艺，建立科学表征方法、指标体系、决策风险分析模式。发展深部高温坚硬岩石地层中耐高温、耐高压的井壁结构设计方法及分级悬浮下沉工艺，深部不稳定地层的改性技术及工艺。

开展深部高温坚硬岩石中井巷（硐室）掘进工艺及装备体系研究。探索深部掘进高温坚硬岩石的机械机理、破岩方式、降温及排渣工艺，论证钻井法、竖井掘进机、巷道掘进机等机械破岩装备体系，掘 / 支一体化的建设技术与工艺装备体系。分析高温高压条件对钻井液介质、钻头刀齿磨损的影响，给出适应高温工况的固体润滑滚刀及配套新材料的技术要求。攻关长期高温高压条件下深部高温坚硬围岩支护理论、支护工艺、支护材料的系列技术。

3. 深部矿产资源开采系统和地热开发系统“共建 – 共存 – 共用”关键理论与技术

精准探测矿区深部矿产和地热资源的赋存特点、赋存状况、赋存量、准确位置，尤其是矿产与地热资源共存的详细分布状况，探明矿区深部的工程地质、水文地质条件、岩体物理力学性能，为“矿 – 热共采”系统的优化设计以及安全、高效、精准开采提供保障。

根据矿产与地热资源共存的空间分布状况，结合深部地热能交换和输送技术进展，力求创造性提出矿产资源开采结构与地热开发结构共建、共用的方式方法，统筹实现采矿系统为地热开发提供必需的主体通道，地热开采为采矿作业降温提供有效的节能手段。

精准探测矿区深部岩层、岩体结构的工程地质及高地应力环境条件。“矿 – 热共采”系统建造及共采作业期间的高地应力等因素，可导致共采系统及其围岩体的强烈变形破坏及相应的地压活动，阐明相关过程机理，对破坏风险开展识别、预测与控制研究。制定发展机制和策略，兼顾开采系统与共采作业安全、采矿与地热开发协调作业。

研发适应深部高温地层环境条件的矿产与地热资源共采工艺、遥控智能化作业方式及技术装备，提升深部矿产与地热共采系统的智能化水平。

4. 深部高温岩层地热能交换和输送理论与技术

开展高温高压岩体物理力学特性及多物理场耦合理论研究。以岩体损伤演化为主线，研究高温高压环境下岩石的力学特性、热传导特性以及岩石的渗流、损伤、破裂机理与裂纹扩展规律，开展多物理场耦合的数值分析。

开展高温高压岩体热交换机理与热能提取技术研究。理论方法与实验手段相结合，以裂隙传热为主导，研究致裂区内工质 – 岩体换热机理，不同裂缝网络、不同换热工质下的热能提取效率，进一步开展高温岩体传热通道的分析与优化。分析地下热湖区内的冷 – 热工质热交换机理以及不同工质、不同管道布置方式的对流换热效率。

开展高温高压热能输送理论及技术研究。理论推导和数值模拟相结合，研究高温高压下裂隙流和管道流的热能输送机理及其配套技术；以封闭循环系统（U 型管）高温高压、多相流复杂工况下的热能输送机理为主要对象，采用数值模拟方法分析换热和输送过程，据此优化系统的热能输送效率。

开展多温度层级的热能提取系统研发。针对适应不同岩体温度的热能提取系统，尤其是“矿 – 热共采”区域的降温系统开展技术研发，为“先采热后采矿”技术方案提供依据。应用多介质热交换计算程序，分析各温度层级系统的热能提取效率与综合产能，为高温岩层地热发电系统的容量及服务年限设计提供判断依据。

五、对策建议

（一）加强地质勘查，为“矿 – 热共采”战略提供信息保障

深部矿产与地热资源共采没有可借鉴的先例，应用推进应从扎实的基础工作做起，而地质勘查是最基础的起步工作。建议开展全国性的深部矿产与地热资源调查评价，查明资源分布及类型，评价资源储量与开采潜力，形成完善的调查评价与科学开发利用技术支撑体系，筑牢“矿 – 热共采”战略实施基础。对于深部高温岩层地热资源，选择未来最具有开发利用前景、当前勘查程度不高的典型高温地热系统地开展地热资源勘查。对于高放射性产热型、沉积盆地型、近代火山型、板内活动构造带型 4 种“高温热矿”，评价其资源储量、可开采资源量、开采潜力。对于深部矿山，既要充分勘查矿产资源

赋存情况，还要查清相关区域地热赋存情况，确定二者实施共采的技术和经济可行性。推动建立行业共享的公开数据库或平台，为矿产和地热共同开发利用研究工作提供全面的数据信息，最大化发挥地质勘查数据效用。

（二）推进科技创新，为“矿－热共采”战略提供技术保障

建议设立国家科技重大专项，积极布局相关重点项目。实施深部矿产与地热共采重大科技攻关计划，涵盖深部矿产与地热能资源勘查与共同开发利用的基础研究、深部高温高应力坚硬岩层复杂工程化综合开发建造的关键技术与装备研究、深部高温岩层地热能交换、提取、输送的技术与设备研究；加强地热能专用设备和特种技术研发，尤其是高温岩层钻井、人工压裂、梯级综合利用、尾水回灌、防腐防垢、井下回热等技术。应对矿产资源开发的智能化趋势，加强与大数据、新型移动通信、物联网、高性能计算等技术的深度融合，提升深部资源能源开发的智能化水平。聚合多学科、多领域专业人才，就矿产与地热资源共采面临的一系列难点和瓶颈问题，集中力量予以突破，推动共采关键技术、前沿引领技术、现代工程技术的协同创新发展。

（三）制定法规与扶持政策，为“矿－热共采”战略提供综合保障

建议尽快制定深部矿产与地热资源开发利用的技术标准，适时出台相关管理办法，规范和保障勘探、开发、利用等活动。加强对深部矿产与地热资源共采开发利用的引导与鼓励，明确激励机制、产业政策、环保法规、财税政策。完善财政与信贷政策，鼓励商业银行投资地热产业。发挥市场调节机制，以减税、免税等的作用，合理加大对矿产和地热资源共同开发利用单位以及相关设备、材料制造企业的支持力度。出台切实可行的共同开发利用税收优惠办法，落实地热供暖及发电的相关可再生能源补贴政策。

（四）纳入国家资源能源顶层规划，建立科研示范基地

矿产与地热资源共同勘查与开发利用是推动我国能源转型，落实碳达峰、碳中和目标，可持续提供清洁能源与绿色矿产品的新途径。建议将深部矿产资源与地热资源共采纳入国家资源能源发展战略布局中统筹考虑，做好深部矿产资源与地热资源共采发展战略的顶层设计；确立中长期内煤炭等化石能源清洁化开发利用与地热等绿色低碳清洁新能源的并行发展路线，科学实现矿产资源对国民经济的可持续供给、地热能等新能源更高比例替代化石能源。

建议将遴选出的胶东地区“焦家式”“玲珑式”金矿床的三山岛、新城、金青顶、玲珑 4 个金矿作为可试采区，尽快组织论证和实施。建立典型矿产与地热资源共采的科研示范基地，以示范应用带动“矿－热共采”开发利用，加速形成“产学研用”一体化的发展格局。注重和发挥深部矿产与地热资源开发的品牌效应，更好引领矿业、地热产业的高质量发展。

致谢

感谢项目组全体同志的工作与贡献以及相关参研单位给予的大力支持。

参考文献

[1] Cai M F, Brown E T. Challenges in the mining and utilization of deep mineral resources [J]. Engineering, 2017, 3(4): 432–433.

[2] 王琼杰. 如何实现深部开采技术的“弯道超车”？——访中国工程院院士、北京科技大学教授蔡美峰 [N]. 中国矿业报, 2017-02-04(03).
Wang Q J. How to realize “Corner overtaking” of deep mining technology? — Interview with Cai Meifeng, academician from the Chinese Academy of Engineering and professor from the University of Science and Technology Beijing [N]. China Mining News, 2017-02-04(03).

[3] 蔡美峰, 薛鼎龙, 任奋华. 金属矿深部开采现状与发展战略 [J]. 工程科学学报, 2019, 41(4): 417–426.
Cai M F, Xue D L, Ren F H. Current status and development strategy of metal mines [J]. Chinese Journal of Engineering, 2019, 41(4): 417–426.

[4] 马春红. 中国工程院院士蔡美峰: 热交换技术将深刻改变深部采矿 [N]. 中国黄金报, 2018-11-13(02).
Ma C H. Cai Meifeng, academician of Chinese Academy of Engineering: Heat exchange technology will profoundly change deep mining [N]. China Gold News, 2018-11-13(02).

[5] Cai M F, Li P, Tan W H, et al. Key engineering technologies to achieve green, intelligent, and sustainable development of deep metal mines in China [EB/OL]. (2021-08-16)[2021-10-09]. https://doi.org/10.1016/j.eng.2021.07.010.

[6] 滕玲. 院士蔡美峰解析未来矿业三大主题 [J]. 地球, 2018 (12): 40–43.
Teng L. Academician Cai Meifeng analyzes three major themes of future mining industry [J]. Earth, 2018 (12): 40–43.

[7] 蔡美峰, 谭文辉, 吴星辉, 等. 金属矿山深部智能开采现状及其发展策略 [EB/OL]. (2021-09-13)[2021-10-09]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1238.TG.20210913.1149.001.html.
Cai M F, Tan W H, Wu X H, et al. Current situation and development strategy of deep intelligent mining in metal mines [EB/OL]. (2021-09-13)[2021-10-09]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1238.TG.20210913.1149.001.html.

[8] 石乃敏, 潘爱民, 沈雁醒. 某金属矿山深部开采人工制冷降温技术方案分析 [J]. 中国矿业, 2016, 25(7): 161–165.
Shi N M, Pan A M, Shen Y X. Analysis of the technical scheme of artificial cooling in a deep mining metal mine [J]. China Mining Magazine, 2016, 25(7): 161–165.

[9] 程强, 李颖, 贺宇慧. 蔡美峰: 深部矿产和地热共采可实现双赢 [N]. 中国石化报, 2018-12-10(01).
Cheng Q, Li Y, He Y H. Cai Meifeng: Co-mining of deep minerals and geothermal can achieve win-win results [N]. China Petrochemical News, 2018-12-10(01).

[10] 唐春安, 赵坚, 王思敬. 基于开挖技术的增强型地热系统EGS-E概念模型 [C]. 北京: 中国岩石力学与工程学会, 2018.
Tang, C A, Zhao J, Wang S J. Enhanced geothermal system based on excavation: EGS-E conceptual model [C]. Beijing: Chinese Society for Rock Mechanics and Engineering, 2018.

[11] Zhao J, Tang C A, Wang S J. Excavation based enhanced geothermal system (EGS-E): Introduction to a new concept [J]. Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources, 2020, 6(1): 1–7.

[12] 亢方超, 唐春安. 基于开挖的增强型地热系统概述 [J]. 地学前缘, 2020, 27(1): 185–193.
Kang F C, Tang C A. Overview of enhanced geothermal system (EGS) based on excavation in China [J]. Earth Science Frontiers, 2020, 27(1): 185–193.

[13] 许天福, 袁益龙, 姜振蛟, 等. 干热岩资源和增强型地热工程: 国际经验和我国展望 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2016, 46(4): 1139–1152.
Xu T F, Yuan Y L, Jiang Z J, et al. Hot dry rock and enhanced geothermal engineering: International experience and China prospect [J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2016, 46(4): 1139–1152.

[14] 毛翔, 国殿斌, 罗璐, 等. 世界干热岩地热资源开发进展与地质背景分析 [J]. 地质论评, 2019, 65(6): 1462–1472.
Mao X, Guo D B, Luo L, et al. The global development process of hot dry rock (enhanced geothermal system) and its geological background [J]. Geological Review, 2019, 65(6): 1462–1472.

[15] 黄嘉超, 李天舒, 谷雪曦. 国际地热利用发展形势对中国的启发 [J]. 石化技术, 2020, 27(9): 252–253.
Huang J C, Li T S, Gu X X. Enlightenment of international geothermal utilization development situation to China [J]. Petrochemical Industry Technology, 2020, 27(9): 252–253.

[16] 本刊讯.《中国地热能发展报告(2018)》白皮书发布 [J]. 地质装备, 2019, 20(2): 3–6.
This Newsletter. The white paper *China geothermal energy development report (2018)* was released [J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2019, 20(2): 3–6.

[17] 王转转, 欧成华, 王红印, 等. 国内地热资源类型特征及其开发利用进展 [J]. 水利水电技术, 2019, 50(6): 187–195.
Wang Z Z, Ou C H, Wang H Y, et al. The characteristics and development of geothermal resources in China [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(6): 187–195.

[18] 陆晓如. 地热发电, 温度还不够——专访中国工程院院士多吉 [J]. 中国石油石化, 2019, 18: 17–19.
Lu X R. Geothermal power generation, the temperature is not enough — An exclusive interview with Duo Ji, academician of the Chinese Academy of Engineering [J]. China Petrochem, 2019, 18: 17–19.