doi: 10. 20238/j. issn. 1671-4172. 2026. 06. 005
李玉选, 杨灵敏, 刘平, 等. 金属矿山深部TBM工程掘采协同一体化设计研究[J]. 有色金属(矿山部分), 2026, 78(6): 45-53.
Li Yuxuan, Yang Lingmin, Liu Ping, et al. Research on the integrated design of excavation and mining coordination in deep TBM engineering of metal mines[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2026, 78(6): 45-53.

金属矿山深部TBM工程掘采协同一体化设计研究

李玉选[1,2], 杨灵敏[3], 刘　平[4], 黄　丹[1,2]
(1. 矿冶科技集团有限公司, 北京 100160;
2. 国家金属矿绿色开采国际联合研究中心, 北京 102628;
3. 云南永昌铅锌股份有限公司, 云南 龙陵 678307;
4. 瓮福(集团)有限责任公司瓮福磷矿, 贵州 黔南布依族苗族自治州 550508)

摘　要: 针对金属矿山深部TBM开拓工程掘进线路、断面、与钻爆法协同作业等关键问题, 开展TBM工程掘采协同一体化设计研究。分析影响因素, 明确与传统钻爆法施工的不同, 提出金属矿山深部TBM开拓工程设计原则。以某矿山新扩建矿区深部开拓工程为例, 分析矿山矿体条件、工程地质、现有工程系统、TBM设备参数、相关规范等, 制定深部TBM开拓工程掘采协同一体化设计方案, 包含掘进线路、断面、与钻爆法协同作业: 详述掘进路线分段情况及各分段的坡度、转弯角度、转弯半径等参数, 并分析布设原因; 对比Φ5. 0 m与Φ5. 3 m两种不同断面开挖直径下的开挖量、铺底高度、建设工期、适用性等多项指标, 并分析优缺点; 与钻爆法协同, 详述工程中涉及到与钻爆法协同施工内容安排、施工协同时序及具体协同方案。研究为后续金属矿山TBM开拓工程设计或优化提供借鉴。

关键词: 金属矿山; 深部TBM开拓; 一体化设计; 掘进线路; 掘进断面; 协同作业
中图分类号: TD421; TD853　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1671-4172(2026)06-0045-09

Research on the integrated design of excavation and mining coordination in deep TBM engineering of metal mines

Li Yuxuan[1,2], Yang Lingmin[3], Liu Ping[4], Huang Dan[1,2]
(1. BGRIMM Technology Group, Beijing 100160, China;
2. National Center for International Joint Research on Green Metal Mining, Beijing 102628, China;
3. Yunnan Yongchang Lead & Zinc Co., Ltd., Longling 678307, Yunnan, China;
4. Wengfu Phosphate Mine Wengfu Group Co., Ltd., Qiannan Buyi and Miao Autonomous Prefecture 550508, Guizhou, China)

Abstract: Research on the integrated design of TBM engineering excavation and mining collaboration was carried out to address key issues such as the excavation route, cross-section, and coordinated operation with drilling and blasting methods in deep TBM development projects of metal mines. By analyzing influencing factors and identifying differences from conventional drill-and-blast techniques, the research established design principles for deep TBM development projects in metal mines. Taking a newly expanded deep-level mining area as a case study, it evaluated geological conditions, engineering geology, existing infrastructure, TBM equipment parameters, and relevant standards to develop an integrated design scheme for TBM excavation and mining. The scheme covered excavation routes, cross-sections, and coordination with drill-and-blast methods: detailed descriptions include segmented route planning, gradient, turning angles, and turning radii, along with explanations for their layout rationale. It compared multiple indicators-such as excavation volume, invert height, construction

收稿日期: 2026-08-07
基金项目: 新疆维吾尔自治区重点研发计划项目(2024B03014)
作者简介: 李玉选, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为地下矿山采矿工程, 非爆机械连续采掘技术。

duration, and applicability-for two different tunnel diameters (Φ5.0 m and Φ5.3 m), analyzing their respective advantages and disadvantages. Furthermore, it specified the layout schemes, construction sequences and collaborative strategies for the combination of TBM and drill-and-blast methods. This research provided valuable references for future design and optimization of TBM-based development projects in metal mines.

Key words: metal mines; deep TBM development projects; integrated design; excavation routes; cross-sectional design; coordination with drill-and-blast methods

我国工业化、现代化进程逐步加快，国家对矿产资源的开发需求也逐步旺盛。近年来，我国不断加大对矿产资源的开发保障能力，尤其是战略性矿产资源[1-4]。随着金属矿山开采深度的不断增加，开采面临高地应力、高岩温、高水压“三高”挑战。传统钻爆法采掘施工效率低、安全性差、人员劳动强度大、恶劣作业环境下适应差等问题日益突出。基于此，学者们提出变革传统采掘模式，应用非爆破机械连续采掘，机械减人，同时提高资源利用率，提升采掘效率和安全性[5-11]。在此背景下，全断面隧道掘进机(TBM)凭借其高效、安全、环保的优势，逐步成为矿山开拓工程，尤其是主巷道掘进的重要技术手段。

目前，我国TBM技术及市场份额世界领先，已全面替代进口设备，广泛应用于交通、水电等隧道工程[12-14]。截至2025年，全国矿用TBM工程大部分为煤矿TBM工程。金属矿山TBM应用占比不足1%[15]，多用于新建或改扩建矿山的长距离关键巷道施工，如长距离主开拓平巷或斜坡道掘进，矿山尾矿库排洪隧洞工程，矿山与选厂间矿石长距离运输工程等。

金属矿山TBM开拓工程与交通隧道、水利工程存在本质差异：一是工程线路多变化、多转弯、小转弯、回头弯、大坡度等；二是TBM工程是服务于矿山采矿生产的一个部分，改扩建矿山中，需与已有采矿、通风、运输、排水、供电等其他生产系统衔接，新建矿山中，需提前考虑其他系统工程的布设与协调[15]。因此，金属矿山深部TBM开拓工程不能简单照搬隧道工程的设计，需要从掘进线路、断面、TBM与钻爆法协同作业等方面统筹考虑，进行一体化设计研究[16]。

本文针对金属矿山深部TBM工程系统与采掘设计关键技术问题，分析设计影响因素、总结设计原则，以实际金属矿山深部TBM开拓工程为例，综合考虑矿体条件、工程地质、现有工程系统、TBM设备及掘进工艺、相关规范等，开展一体化设计研究，为金属矿山深部TBM开拓工程提供系统化设计思路与方法参考。

1 金属矿山TBM开拓工程设计影响因素

金属矿山TBM开拓工程一体化设计，是指将掘进线路、断面、TBM掘进工艺、与钻爆法协同作业等诸多环节因素作为整体进行统筹设计。分析影响金属矿山TBM工程系统设计的主要因素。

1)矿体条件。金属矿山矿体倾角、厚度、走向等赋存条件决定开拓工程的空间布局，如开拓工程需沿矿体走向布置，矿体倾角、厚度等决定脉内、脉外开拓方案等，合理的开拓工程需充分契合矿体赋存特征，实现工程量最合理、提升运输通风系统最高效等目的。

2)工程地质。工程地质条件包括岩体完整性、岩石强度、地质构造(断层、节理、褶皱)、地应力、水文地质等，是影响开拓系统与巷道布置、断面形式、支护方案的主要因素。TBM转弯不灵活，路线变更困难，相较于传统钻爆法，TBM对地质条件敏感性更强。

3)采矿方法。采矿方法从矿山阶段划分、脉内/脉外巷道布置、运输系统、配套系统、通风系统等多个方面影响着开拓工程的布置。矿山开拓工程为永久性工程，一经施工很难大规模改动。

4)现有工程系统。区别于新建矿山，生产矿山新增TBM开拓工程须依托现有工程系统开展施工，现有系统中的斜坡道、中段巷道等主开拓巷道、出渣系统、通风系统、排水系统等，从始发位置、出渣、排水、通风等辅助工程接续、贯通位置等多方面影响TBM开拓工程设计。

5)TBM参数。不同TBM设备的开挖直径、转弯半径、爬坡能力、铺底工艺等均不同，且均影响着TBM开拓工程设计。

6）设计规范与安全要求。TBM开拓开拓工程设计必须符合现行金属矿山开拓工程设计中关于斜坡道直线段、缓坡段布设、人行道宽度、安全出口布设等强制要求[17]。

7）工程经济性。金属矿山TBM工程属于“挣钱工程”，对建设成本和投资回报要求严格，掘进线路长短、断面大小影响建设工期与施工成本。

以上因素对TBM开拓工程设计产生的影响并不是单一的独立的，而是复杂的耦合的，如斜坡道坡度不仅受矿体倾角影响，还受到TBM最大爬坡能力以及规范最大坡度设置等影响；岩体质量影响TBM选型，TBM直径决定掘进断面大小，断面又需满足运输设备通行和规范安全距离要求；现有工程系统布置影响TBM线路走向和与中段联络方式，联络方式又影响TBM与钻爆法协同作业的安排。因此，有必要且必须对TBM开拓工程进行一体化设计，以增加TBM在金属矿山的适用性。

2　金属矿山深部TBM开拓工程设计原则

2.1　掘进线路设计

金属矿山TBM开拓多用于大型金属矿山掘进斜坡道、主要中段大巷工程，掘进线路是指各巷道工程的空间走向、掘进顺序、联络关系等，是整个工程的空间骨架，尤其在扩建矿山中，还要与已有系统匹配融合，设计原则见图1。

2.2　掘进断面设计原则

TBM掘进净断面由TBM开挖直径与支护参数决定，TBM掘进断面多为圆形，设计时需遵循原则，见图2。

2.3　与钻爆法协同作业原则

金属矿山深部开拓中，TBM承担长距离斜坡道与中段巷道主体工程掘进，钻爆法承担中段联络巷道、风井联络巷、人行道或躲避硐室、断面刷帮等工程，两者需协同作业，见图3。

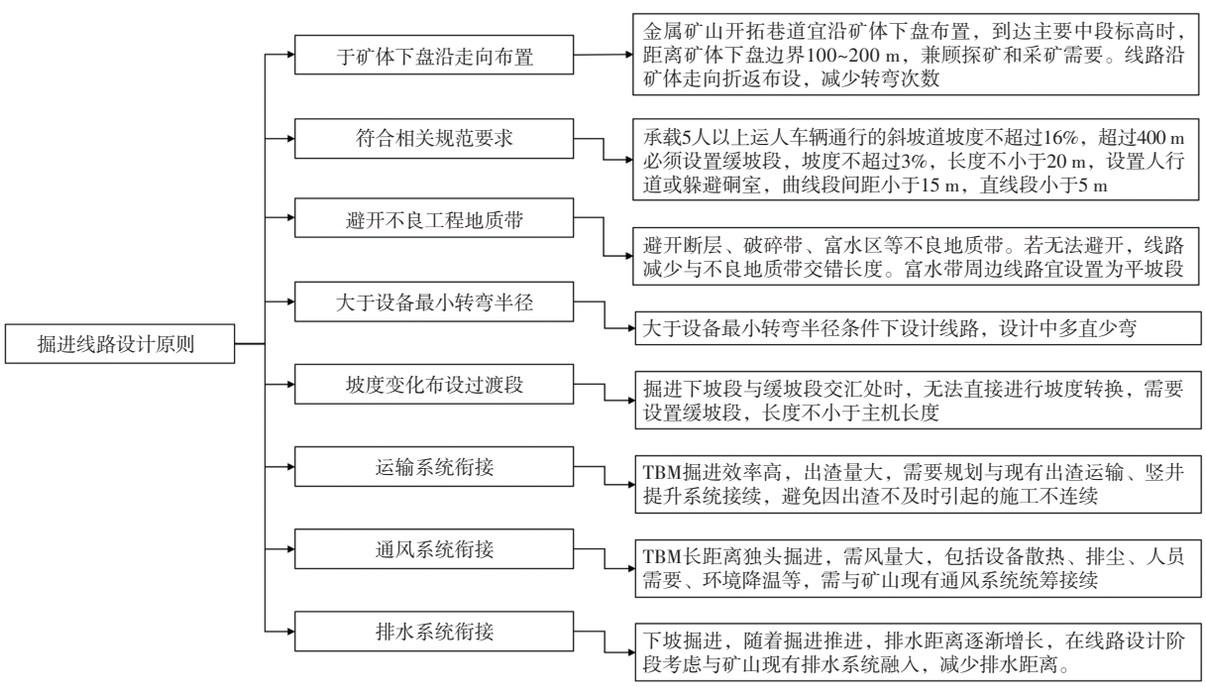


图1　金属矿山TBM掘进线路设计原则

Fig. 1　Design principles of TBM tunneling alignment for metal mines

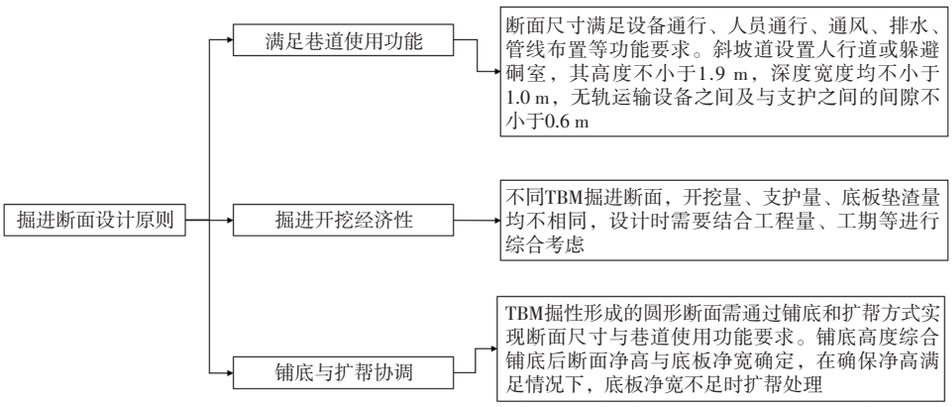


图2 金属矿山TBM掘进断面设计原则

Fig. 2 Design principles of TBM excavation cross-section for metal mines

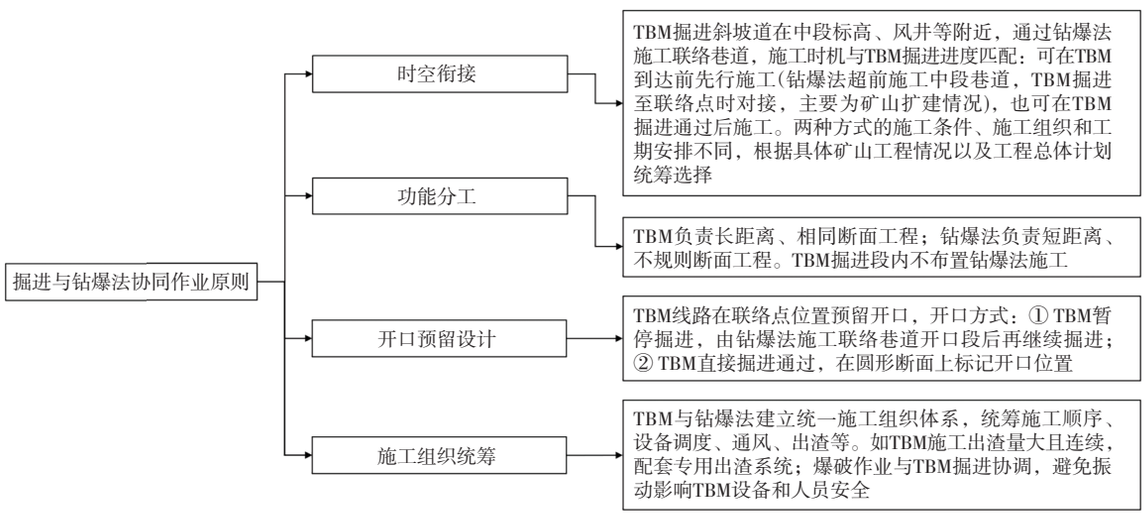


图3 金属矿山TBM掘进与钻爆法协同作业原则

Fig. 3 Design principles for coordinated operation of TBM tunneling and drilling-blasting method in metal mines

3 工程实例

3.1 矿山概况及工程条件

某金属矿山深部生产接续面临严重的采掘失衡问题，急需强有力的快速采掘技术，支撑新矿区的开发进度，矿山通过调研、考察了解矿山TBM工程技术后，计划引进TBM掘进技术进行矿山深部斜坡道工程的开拓。

3.1.1 矿体条件

矿山待开发矿区共圈定5个主要矿体(Ⅰ-1、Ⅰ-2、Ⅱ-1、Ⅱ-2、Ⅱ-3)，其中，Ⅰ-1矿体赋存标高−813～−2 026 m，控制走向最大长度2 070 m，控制倾向最大斜深1 402 m，平均倾角约42°，平均厚度7.24 m；Ⅰ-2矿体距离Ⅰ-1号矿体底板4～60 m，赋存标高−880～−2 037 m，控制走向最大长度1 700 m，平均倾角44°，平均厚度12.38 m；Ⅱ-1矿体，距Ⅰ-2号矿体底板3～45 m，次要矿体之一，赋存标高−989～−2 008 m，控制走向长度1 417 m，平均倾角约40°，平均厚度3.35 m；Ⅱ-2号矿体距Ⅱ-1号矿体底板4～60 m，次要矿体之一，赋存标高−918～−1 810 m，控制走向长度1 414 m，平均倾角约43°，平均厚度5.50 m；Ⅱ-3号矿体距Ⅱ-2号矿体底板3～75 m，次要矿体之一，赋存标高−1 080～−1 829 m，控制走向长度649 m，平均倾角约43°，平均厚度11.79 m。矿化带划分示意图见图4。

3.1.2 工程地质条件

矿区以脆性断裂构造发育为特征，存在主要控矿的断裂带构造，总体走向40°，倾向SE，倾角45°～75°，矿山原开拓工程主要布置在断裂带下盘，下盘岩体质量等级优，近断裂处*RQD*值一般大于75%，远离主断裂大于90%。

深部地应力条件突出：−1 000 m处最大水平主应力24.8 MPa、最小水平主应力21.1 MPa、垂

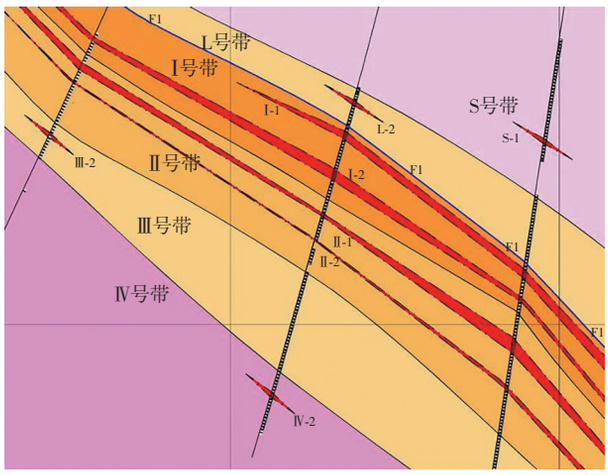


图4　某金属矿山深部新矿区矿化带划分示意图

Fig. 4　Schematic diagram of mineralized zone division in the new deep mining area of a metal mine

向应力27.3 MPa；−1 500 m处最大水平主应力37.5 MPa、最小水平主应力32.2 MPa、垂向应力40.8 MPa。应力关系为垂向应力＞最大水平主应力＞最小水平主应力，属正断型应力场。

3.1.3　现有工程系统

现有开拓运输系统经多期建设已形成较完整的生产体系。现有矿区采用竖井＋斜坡道联合开拓，辅助斜坡道净断面4.3 m×3.4 m，坡度10%，长约5 600 m，中段高度80 m(−165～−600 m)，−600～−1 240 m段采用盲混合井＋辅助斜坡道联合开拓，辅助斜坡道−600 m至−1 140 m，长度5 000 m，坡度10%。新矿区可研设计方案，采用盲主井＋副井＋辅助斜坡道开拓，中段高度为45 m，与原矿区−960 m中段向新矿区−1 230 m中段建设斜坡道。

通风系统：矿山原有通风系统为斜坡道、盲混合井进风，回风井回风的对角式通风；新矿区可研设计采用中部进风、两翼回风的两翼对角式通风系统，新矿区两个回风井中一个回风井为新老矿区回风共用。

3.1.4　TBM设备参数

TBM设备选型考虑参数：

1)开挖直径。新矿区斜坡道设计净断面4.4 m×3.6 m(宽×高)，若采用TBM施工，需选择能满足运输设备通行和规范要求的开挖直径。考虑到新矿区斜坡道主要功能为安全出口、无轨设备通行和通风通道，选用Φ5.0～Φ5.3 m开挖直径的TBM较为适宜。参考国内非煤矿山TBM工程案例，见表1。

2)最小转弯半径。有案例可查的小转弯TBM最小转弯半径可以达到30 m[18]，金属矿山中，矿用TBM受限于掘进断面、曲线段滚刀磨损加剧、长距离皮带出渣等，最小转弯半径能达到80 m。

表1　国内部分非煤矿山TBM工程案例

Table 1　Selected TBM engineering cases of non-coal mines in China

序号	矿山企业	工程	设备直径/mm
1	瑞海矿业	斜坡道	5 000
2	麻坪磷矿	斜井	5 480
3	黑龙江多宝山铜矿	斜坡道	6 740
4	金寨钼矿	斜坡道	6 330
5	西鞍山铁矿	斜坡道	7 030
6	紫金塞尔维亚铜矿	斜坡道与平巷	5 490

3.2　TBM开拓工程设计

3.2.1　TBM掘进线路设计

始发位置，设计新矿区由原矿区−900 m中段开始建设斜坡道开拓，设计斜坡道为三心拱断面4.4 m×3.6 m(宽×高)，但区域岩层破碎，不满建设地下始发大硐室群需求，设计规划TBM掘进开拓由现有−1 000 m中段大巷向新矿区始发。

TBM掘进路线：本次TBM掘进路线由−1 000 m中段①点开始，至新矿区−1 200 m㉕点终止，设计长度2 501.75 m，共计两个回头弯道。其中，①点至②点为直线段，坡度为0%，为TBM始发适应段，避免始发即下坡；②点至③点为直线段，坡度为0.3%，小坡度爬坡段，增加工程排水能力；③点至④点为转弯段，坡度为0%，转弯半径80 m，调整线路方向，避免TBM掘进穿过矿体，与上部所探测富水带垂直穿过，减少与富水带交叉距离；④点至⑤点为直线段，坡度为0%，此段穿越富水带，为避免淹机风险，布设为平坡段；⑤点至⑪点为直线段，按规范以及设备需求分别设置有正常段(坡度为15%)，缓坡段(坡度为3%)以及坡度变化处的过渡段；⑪点至⑫点为转弯段，坡度为3%，转弯半径80 m，TBM折返转弯，掘进路线靠近矿体下盘；⑫点至⑮点为直线段，设置有正常段与过渡段，使掘进路线进一步靠近矿体下盘；⑮点至⑯点为转弯段，过渡段坡度，调整掘进线路方向，使路线与矿体走向平行；⑯点至㉒点为直线段，布设有正常段、平坡段、缓坡段与过渡段，掘进路线在此阶段与新矿区已有设计工程空间交错，为避免上下工程标高相差太小，设置平坡段调整掘进线路标高；㉒点至㉓点为转弯段，TBM折返转弯，坡度3%，转弯半径140 m；㉓点至㉕点为直线段，布设有正常段与过渡段。掘进线路设计中，斜坡段最大坡度15%，斜坡段最长400 m设置缓坡段，缓坡段长

度30 m，坡度3%，斜坡段与缓坡段之间设置过渡段，过渡段长度25 m；−1 140 m中段开口位置处距离矿体下盘160 m，满足150～200 m布设原则；最小转弯半径80 m，满足设备转弯要求；线路沿矿体走向布设，线路与富水带、破碎带等地质异常带交错距离小(图5和图6)。

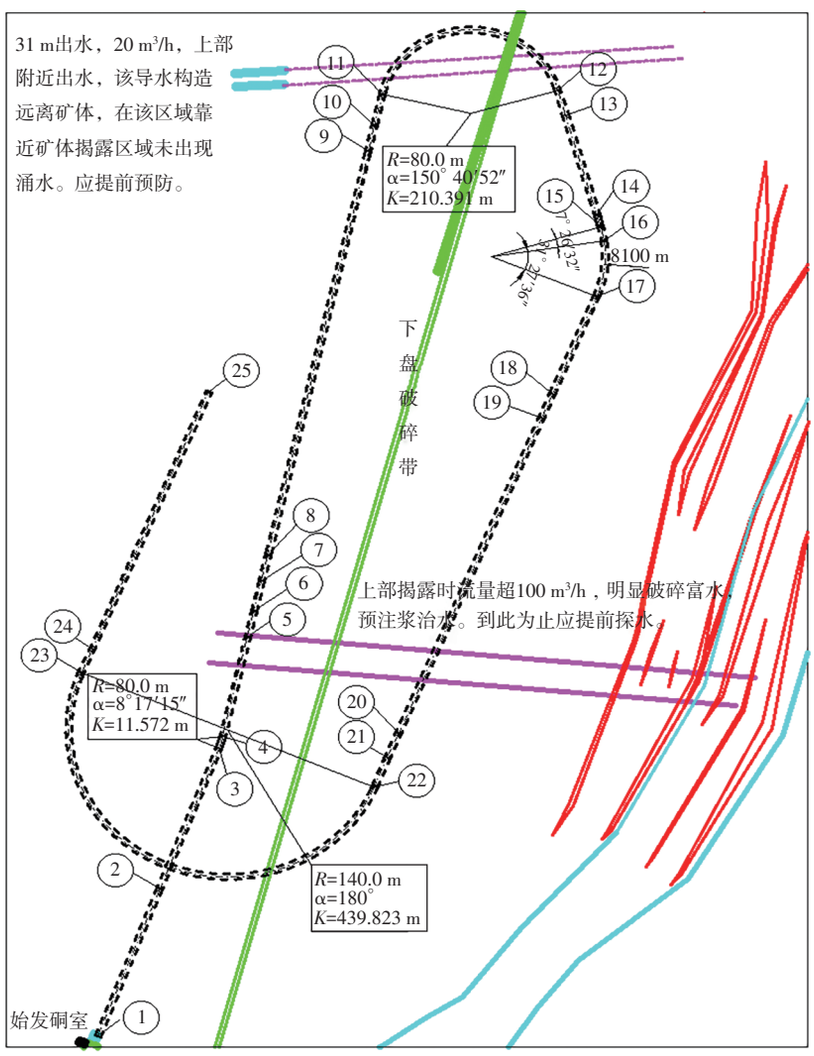


图5 TBM设计路线平面图

Fig. 5 Designed TBM alignment plan

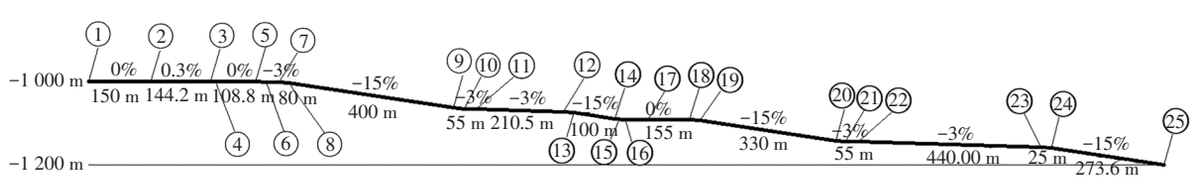


图6 TBM设计路线纵投影图

Fig. 6 Longitudinal projection of designed TBM alignment

出渣系统：目前TBM工程出渣工艺多为连续皮带出渣工艺，随着独头掘进距离加长，出渣要求愈来愈高，超出5 km后，皮带出渣效率与经济性将大打折扣，必须考虑接续问题。矿山工程不同于其他工程领域，随着斜坡道、中段大巷等工程不断向下延申，上部中段开拓工程、竖井工程同步施工。TBM工程选择与离掘进迎头最近的已完成中段或出渣系统进行出渣接续；若超5 km无已完成中段或出渣系统，则选择于离掘进迎头2 km左右位置的主要中段，形成存渣系统，系统前由TBM皮带出渣，系统后由铲

运机＋矿卡或其他方式转运岩渣。

通风系统：同出渣系统，TBM工程选择与离掘进迎头最近的已完成中段或通风系统进行通风接续，不同于出渣系统，当独头距离过远时，无法形成临时通风系统，仅能通过增加通风设备保障通风能力。另线路布设时，提前考虑与生产中段、通风系统的联通点与联通工程。

排水系统：采用多级反坡机械排水，设置多级泵站或临时水仓接力接续排水。始发后，施工废水、迎头积水等排放至始发硐室附近系统沉淀池。同出渣、通风系统，TBM工程选择与离掘进迎头最近的已完成中段或通风系统进行排水接续，另外延申深度每隔500 m，设置临时排水仓用于污水储存。

3.2.2　掘进断面设计

TBM掘进断面需综合考虑运输功能、安全规范、施工经济性和采矿工艺要求，进行一体化设计。

针对某金属矿山扩建新矿区斜坡道，比较Φ5.0 m和Φ5.3 m两种TBM断面，结果见表2、表3和图7。

由此可知，Φ5.0 m和Φ5.3 m两种断面方案对比分析，两种方案均满足规范安全规定的矿山斜坡道断面要求，Φ5.0 m方案开挖量少11.3%，喷浆量少13.3%，回填量少33.2%，经济性好；Φ5.0 m方案需要二次刷帮，相较于Φ5.3 m断面方案施工难度大、建设周期长。

分析可知，两种断面均可满足矿山适用需求，不同的地方在于，开挖工程经济性与建设周期，断面大则开挖量、喷浆量、回填量大，不经济，但不需二次扩挖断面，建设周期短，断面小则经济性好，但建设周期长，各有利弊，需结合矿山具体情况进行选择。

表2　不同TBM断面方案工程量对比

Table 2　Comparison of engineering quantities for different TBM section schemes

对比项	Φ5.0 m	Φ5.3 m	较5 m增加/%
开挖量/m³	19.82	22.05	11.3
喷浆量/m³	1.13	1.28	13.3
回填量/m³	1.99	2.65	33.2
铺底高度/m	1.0～1.1	1.25	—
是否扩帮	单侧扩帮	无扩帮	—

表3　TBM掘进断面方案对比

Table 3　Comparison of TBM excavation section schemes

对比项	Φ5.0 m方案	Φ5.3 m方案	说明
开挖直径/m	5.0	5.3	—
净断面直径/m	4.8	5.1	含喷浆厚度100 mm
开挖量/m³	19.82	22.05	Φ5.3 m增加11.3%
铺底高度/m	1.0～1.1	1.25	—
是否扩帮	单侧扩帮0.6 m	无扩帮	Φ5.3 m无需扩帮
人行道宽度/m	1.2(扩帮后)	1.2(自然满足)	规范要求≥1.2 m
设备间隙/m	≥0.6(扩帮后)	≥0.6(自然满足)	规范要求≥0.6 m
通行设备	小型无轨设备	20 t矿用卡车	—
通风功能	满足	更优	断面大风阻小
施工难度	较大	适中	Φ5.0 m锚杆钻机受限
建设周期	较长	较短	—

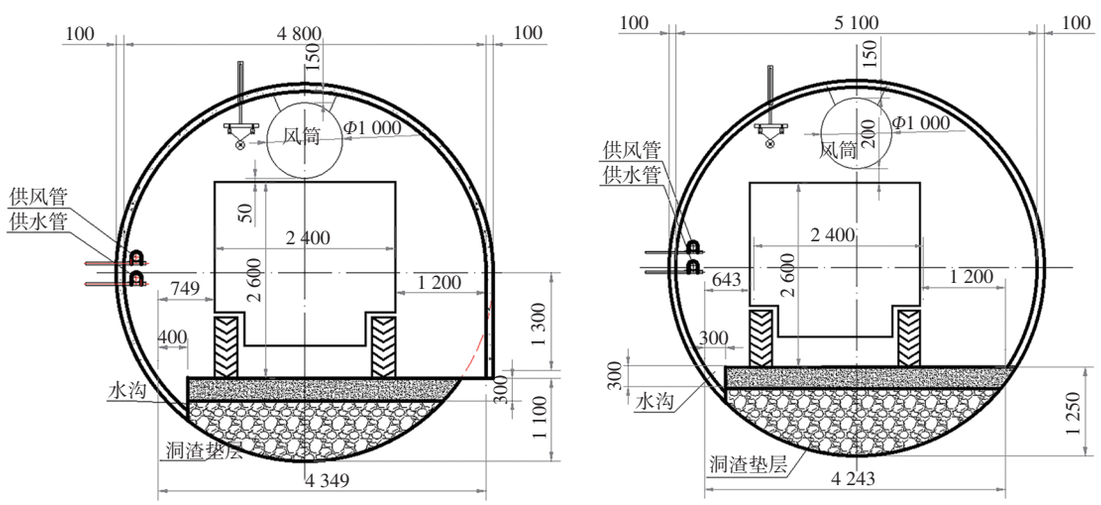


图7　TBM掘进断面方案对比图(单位：mm)

Fig. 7　Comparison drawing of TBM excavation section schemes(Unit: mm)

3.2.3　与钻爆法协同作业设计

根据矿山新扩矿区深部开拓工程特点，TBM与钻爆法协同作业的空间规划如下。

1）施工内容安排。TBM负责的工程：斜坡道主体段(原矿区－1 000 m中段大巷至新矿区

－1 200 m标高)由TBM掘进施工,包括直线段、曲线段等主体工程。钻爆法负责的工程:①TBM组装硐室;②中段联络巷道:在TBM掘进至各中段联络点后,由钻爆法施工联络巷道,连接TBM斜坡道与各中段沿脉巷道;③溜井联络道和硐室:溜井联络道、水泵房、变电所等不规则断面工程由钻爆法施工;④断面扩刷工程。

2)施工时序安排,TBM在组装硐室完成组装并开始掘进,连续掘进斜坡道主体段,各中段联络巷道由钻爆法施工;TBM先于钻爆法到达新矿区既定标高,待TBM通过后,钻爆法施工贯通措施工程,为TBM工程提供运输、通风、排水等工程接续;TBM工程运输、通风、排水等工程接续后,在TBM已施工完成的巷道中采用钻爆法进行刷帮、中段联络道、躲避硐室等工程施工。

3)与钻爆法协同施工,尽量不共用一套出渣系统,确保TBM连续稳定出渣;钻爆法作业与TBM掘进面保持一定的安全距离;对斜坡道已有设备皮带、风水管线、电控等设备采取保护措施。

4 结论

1)金属矿山TBM开拓工程一体化设计需求源于TBM工程系统性、矿体条件约束、工程经济性、规范与安全等多方面因素,影响因素包括矿体条件、工程地质、现有工程系统、TBM设备参数、设计规范、经济因素等多种因素,因素之间存在复杂耦合关系,需要一体化统筹设计。

2)分别从掘进线路设计、断面设计、与钻爆法协同作业设计三个方面分析金属矿山TBM工程一体化设计原则,提出沿矿体下盘布置、规范合规、地质避让、转弯半径适配、缓坡段与中段对应等原则,为TBM工程一体化设计提供依据。

3)以某金属矿山新扩建矿区为工程案例,分析矿区矿体条件、工程地质条件、现有工程系统、TBM设备参数等,提出矿区TBM开拓工程一体化设计方案。针对设计完成的2 501.75 m TBM工程斜坡道,详述斜坡道掘进路线中的24个分段情况以及各分段的坡度、转弯角度、转弯半径等参数,并分析布设原因;断面设计,比较Φ5.0 m和Φ5.3 m两种TBM断面下的开挖量、喷浆量、人行道宽度、通风功能、施工难度等,分析不同断面方案的优缺点;与钻爆法协同设计,详述工程中涉及到需与钻爆法协同施工内容安排、施工协同时序安排及具体协同方案。

参 考 文 献

[1] 李夕兵,黄麟淇,周健,等. 硬岩矿山开采技术回顾与展望[J]. 中国有色金属学报,2019,29(9):1828-1847.
Li Xibing, Huang Linqi, Zhou Jian, et al. Review and prospect of mining technology in hard rock mines[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(9): 1828-1847.

[2] 蔡美峰. 深部开采围岩稳定性与岩层控制关键理论和技术[J]. 采矿与岩层控制工程学报,2020,2(3):1-9.
Cai Meifeng. Key theories and technonogies for surrounding rock stability and ground control in deep mining[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2020, 2(3): 1-9.

[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 Meifeng, Xue Dinglong, Ren Fenhua. Current status and development strategy of metal mines[J]. Chinese Journal of Engineering, 2019, 41(4): 417-426.

[4] 杨小聪,蒋合国. 新质生产力引领深部金属矿山安全高效开采:以毛坪铅锌矿深部开采实践为例[J]. 中国矿业,2024,33(5):9-21.
Yang Xiaocong, Jiang Heguo. New quality productive forces leads the safe and efficient mining of deep metal mines: taking deep mining practice of Maoping Lead-Zinc Mine as an example[J]. China Mining Magazine, 2024, 33(5): 9-21.

[5] 黄丹,杨小聪,陈何. TBM在地下金属矿山应用中的发展现状与趋势[J]. 有色金属工程,2019,9(11):108-121.
Huang Dan, Yang Xiaocong, Chen He. Development status and trend of tunnel boring machine in underground metal mine application[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2019, 9(11): 108-121.

[6] 李玉选,郭红斌,黄丹,等. 金属矿山TBM地下始发硐室群设计及关键施工技术研究[J]. 有色金属(矿山部分),2024,76(6):152-160.
Li Yuxuan, Guo Hongbin, Huang Dan, et al. Study on design and key construction technology of underground starting chamber group of TBM in metal mine[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2024, 76(6): 152-160.

[7] 李勇,陈虎忠,朱航宇,等. 金属矿山TBM掘进技术的应用与推广[J]. 有色金属(矿山部分),2024,76(6):113-118.
Li Yong, Chen Huzhong, Zhu Hangyu, et al. Application and popularization of TBM tunneling technology in metal mines[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2024, 76(6): 113-118.

[8] 王少锋,孙立成,周子龙,等. 非爆破岩理论和技术发展与展望[J]. 中国有色金属学报,2022,32(12):3883-3912.
Wang Shaofeng, Sun Licheng, Zhou Zilong, et al. Development and prospect of non-blasting rock breakage theory and technology[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(12): 3883-3912.

[9] 刘泉声,潘玉丛,余宏淦,等. 深部金属矿山巷道TBM掘进技术应用现状及研究进展[J]. 有色金属(矿山部分),2024,76(6):25-41.

Liu Quansheng, Pan Yucong, Yu Honggan, et al. Application status and research progress of TBM tunnelling technology in deep metal mine roadways[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2024, 76(6): 25-41.

[10] 黄建鑫. TBM在某金属矿山长距离井巷掘进中的应用[J]. 现代矿业, 2023, 39(7): 205-209.
Huang Jianxin. Application of TBM in long-distance tunneling in a metal mine[J]. Modern Mining, 2023, 39(7): 205-209.

[11] 刘福春, 郭钦鹏, 熊有为. 金属矿山深部硬岩矿床非爆连续采矿技术及应用[J]. 有色金属(矿山部分), 2024, 76(6): 64-69, 83.
Liu Fuchun, Guo Qinpeng, Xiong Youwei. Non-explosive continuous mining technology and application for deep hard rock deposits in metal mines[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2024, 76(6): 64-69, 83.

[12] 翟强, 顾伟红. 硬岩隧道掘进机滚刀破岩性能评价研究[J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31(5): 225-234.
Zhai Qiang, Gu Weihong. Evaluation of rock breaking performance of TBM cutter[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2020, 31(5): 225-234.

[13] 乔世范, 王超, 刘红中, 等. 硬质岩层中TBM滚刀破岩效率预测模型研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2021, 54(12): 1094-1102.
Qiao Shifan, Wang Chao, Liu Hongzhong, et al. Study on prediction model of rock breaking efficiency of TBM hob in hard rock[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2021, 54(12): 1094-1102.

[14] 巩江峰, 王伟, 周俊超. 截止2021年底中国铁路盾构及TBM隧道统计与分析[J]. 铁道标准设计, 2022, 66(3): 1-5.
Gong Jiangfeng, Wang Wei, Zhou Junchao. Statistics and analysis of shield and TBM tunnels in China by the end of 2021[J]. Railway Standard Design, 2022, 66(3): 1-5.

[15] 程志, 陈虎忠, 刘文学, 等. TBM在我国矿山巷道掘进中的应用现状与展望[J]. 建井技术, 2025, 46(2): 1-6.
Cheng Zhi, Chen Huzhong, Liu Wenxue, et al. Application status and future prospects of TBM in mine roadway excavation in China[J]. Mine Construction Technology, 2025, 46(2): 1-6.

[16] 杨小聪, 黄丹, 岳小磊, 等. 非煤矿山机械连续采矿技术研究进展与发展趋势[J]. 有色金属(矿山部分), 2024, 76(6): 1-24.
Yang Xiaocong, Huang Dan, Yue Xiaolei, et al. Research progress and development trend of continuous mechanical mining technology in non-coal mine[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2024, 76(6): 1-24.

[17] GB 16423—2020 金属非金属矿山安全规程[S].
GB 16423—2020 Safety regulation for metal and nonmetal mines[S].

[18] 路振刚, 王建华, 朱安平, 等. 适用于超小转弯半径的紧凑型TBM设计关键技术研究及应用：以山东文登抽水蓄能电站排水廊道隧洞工程为例[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(6): 1047-1057.
Lu Zhengang, Wang Jianhua, Zhu Anping, et al. Design and application of a compact TBM for an ultrasmall turning radius: a case study on a drainage gallery tunnel project of Wendeng pumped storage power station in Shandong, China[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(6): 1047-1057.