



移动扫码阅读

刘志强,宋朝阳,程守业,等.全断面竖井掘进机凿井围岩分类指标体系与评价方法[J].煤炭科学技术,2022,50(1):86-94.

LIU Zhiqiang, SONG Zhaoyang, CHENG Shouye, *et al.* Classification grading evaluation index system and evaluation method of surrounding rock for full section shaft boring machine[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(1):86-94.

# 全断面竖井掘进机凿井围岩分类指标体系与评价方法

刘志强<sup>1,2</sup>, 宋朝阳<sup>1,2</sup>, 程守业<sup>1,2</sup>, 荆国业<sup>1,2</sup>

(1.北京中煤矿山工程有限公司,北京 100013;2.煤炭科学研究总院 建井研究分院,北京 100013)

**摘要:**针对全断面竖井掘进机凿井过程中软弱或破碎围岩失稳坍塌、高硬度岩石难破碎、地层涌水、地层节理构造等一系列地层复杂性带来的工程难题,开展了适用全断面竖井掘进机凿井的围岩分类指标体系与评价方法研究,考虑了全断面竖井掘进机凿井“岩”与“机”互馈作用下各因素的独立性和相关性,构建了围岩分类指标体系与评价方法,提出了全断面竖井掘进机凿井地层适应性综合判别方法。首先基于全断面竖井掘进机凿井工艺特征,分析了竖井掘进机凿井面临的地质难题以及防控措施,围绕竖井掘进机凿井“岩-机”相互作用下围岩岩石力学特性、装备破岩能力、岩体构造特征、围岩与装备相互支撑、地层防治水等多因素的影响,提出了围岩分类指标选取原则,构建了岩石可切割性、围岩自稳性、地层控水性 3 个准则层指标以及所属 13 个基础评价指标组成的评价指标体系框架;确定了围岩分类指标体系权重,并采用模糊综合评价和百分制方法量化基础指标,构建了多维矩阵结构围岩分类评价数学模型,经计算和分析将岩石可切割性、围岩自稳性、地层控水性划分为有利、一般有利、适中、不利和很不利 5 类,进而根据计算结果将竖井掘进机凿井围岩条件分为 I ~ V 类,评判了全断面竖井掘进机凿井与地层之间的适应性,提出了竖井掘进机凿井围岩控制措施;以我国首台套导井式全断面竖井掘进机凿井工程为例,验证了围岩分类指标体系与评价方法的可行性和合理性。全断面竖井掘进机凿井围岩分类指标体系与评价方法对破岩掘进、灾害防控、围岩稳定控制等技术方案的制定和实施提供了科学依据。

**关键词:**机械破岩;竖井掘进机;岩体质量评价;评价指标体系;围岩稳定

中图分类号:TD421;TD265

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2022)01-0086-09

## Classification grading evaluation index system and evaluation method of surrounding rock for full section shaft boring machine

LIU Zhiqiang<sup>1,2</sup>, SONG Zhaoyang<sup>1,2</sup>, CHENG Shouye<sup>1,2</sup>, JING Guoye<sup>1,2</sup>

(1.Beijing Coal Mine Construction Company Ltd., Beijing 100013, China;

2.Mine Construction Branch, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China)

**Abstract:** In view of the instability and collapse of weak or broken surrounding rock, hard rock is difficult to break, formation water gushing, fault joints and other engineering problems caused by the complexity of formation. The classification index system and evaluation method of surrounding rock were studied. The independence and correlation of each factor under the interaction of “rock” and “machine” are considered. The classification index system and evaluation method of surrounding rock are established. A comprehensive identification method of stratum adaptability for borehole sinking by for full section shaft boring machine is proposed. First, based on the characteristics of full section shaft boring machine sinking technology, analysis of the formation problems faced by the shaft boring machine sinking and

收稿日期:2021-11-10;责任编辑:常琛

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52004125);天地科技股份有限公司创新创业资金面上资助项目(2021-TD-MS012)

作者简介:刘志强(1962—),河北徐水人,研究员,博士生导师,博士。E-mail:liuzhiqiang@vip.sohu.com

通讯作者:宋朝阳(1986—),山东邹平人,副研究员,硕士生导师,博士。E-mail:szhaoyang123@126.com

prevention and control measures. Based on the influence of rock mechanics characteristics of surrounding rock, rock breaking ability of equipment, rock structure characteristics, mutual support of surrounding rock and equipment, and water prevention and control of stratum under the interaction of rock-machine, the selection principle of surrounding rock classification index is put forward. Three criteria, namely, rock cuttability, surrounding rock self-stability and water control, are constructed, as well as 13 basic evaluation index system frames. The weight value of surrounding rock classification index system is determined, and the basic index is quantified by fuzzy comprehensive evaluation and percentage system. The mathematical model of multi-dimensional matrix structure surrounding rock classification and evaluation is established. According to the calculation and analysis, the influence of rock cutting ability, surrounding rock self-stability and stratum water-controlling ability on the shaft drilling machine can be divided into 5 categories: favorable, generally favorable, moderate, unfavorable and very unfavorable. According to the calculation results, the surrounding rock conditions of the shaft excavation machine can be divided into I - V categories. The adaptability between drilling and formation adaptability of full-section vertical shaft boring machine is evaluated. The control measures of surrounding rock for full section shaft boring machine are put forward. The feasibility and rationality of surrounding rock classification index system and evaluation method are verified by taking the sinking project of the first full-section vertical shaft boring machine with guide shaft in China as an example. The classification index system and evaluation method of surrounding rock of full-section vertical shaft boring machine can provide scientific basis for the formulation and implementation of technical schemes of rock breaking tunneling, disaster prevention and control, surrounding rock stability control and so on.

**Key words:** mechanical rock breaking; shaft boring machine; rock mass quality evaluation; evaluation index system; grading evaluation; stability of surrounding rock

## 0 引言

深地资源开采和空间利用是我国深地战略的重要组成部分,竖井井筒作为深部矿产资源开采和地下工程建设的核心构筑物,担负着矿物、人员、材料和装备提升以及通风、供排水、供电与安全通道等多种功能<sup>[1-3]</sup>。据统计,2000年以来我国超千米竖井已建成150余条,近10年增速超200%<sup>[4]</sup>,我国已成为深地开发大国。井筒建设也称为凿井,通常采用钻孔爆破方法,对地层探识不足及爆破工艺原因,造成井筒施工安全事故频发,地层有害气体突出、涌水淹井、炮烟窒息、物料坠落等重大伤亡事故时有发生,同时钻爆法凿井,存在井下作业人员多、安全和职业伤害严重、作业不连续、建井效率低、智能化进程缓慢等问题<sup>[5]</sup>,难以符合现代化工业要求的安全、高效、绿色、智能化建设的总原则。

人类从人工鑿凿破岩发展到爆破破岩,实现了第1次破岩方式的质变;从爆破破岩发展到连续的机械破岩或者非接触的高能破岩,将是破岩技术的第2次重大变革<sup>[6]</sup>。目前,国内外研究机构或企业已开展了非爆破机械凿井技术和装备的研发与应用。针对井筒穿过复杂地层条件和工程条件,形成了适用于深厚冲积地层和富水软岩地层的竖井钻机钻井<sup>[7]</sup>,以及适用于具有下部排渣通道工程条件和稳定地层条件的反井钻机钻井<sup>[6]</sup>,但受地层条件、破岩能力、钻进技术和工艺的限制,均未突破千米深度。千米竖井全断面掘进机凿井关键技术与装备是国家高端装备制造战略新兴产业发展的迫切需求,

实现高性能制造技术和重大装备的自主可控,对提高我国战略性高端产品和重大工程关键装备的核心竞争力具有重要意义。

目前,我国竖井掘进机及其凿井技术、装备和工艺处于研发起步阶段,千米深井穿过地层的高地压、高水压、高地温和高岩石硬度等工程地质条件带来的复杂性、不确定性和未知性,给竖井掘进机凿井地层稳定控制、涌水治理技术以及核心装备与配套装备、工艺和示范带来重大的风险和挑战<sup>[8]</sup>。因此,要实现竖井掘进机安全、高效、绿色、智能化凿井,首要解决竖井掘进机凿井地层适应性难题。普通钻爆法凿井具有工作灵活特性,形成的短段掘砌凿井工艺,特别适应于较为复杂的地层,通过掘进段高的改变减少空帮距离,进而减少掘进对围岩的破坏和控制围岩的变形失稳;而全断面竖井掘进机一次推进最大行程固定,既要实现井筒有效断面内岩石的低能耗破碎,同时要保障井筒围岩稳定<sup>[9]</sup>,达到井筒结构在地压、扰动、渗水等作用下,不发生巨大的变形和结构破坏,避免钻头或刀盘卡死或被埋。所以,针对千米竖井全断面掘进机凿井的井筒围岩分类指标体系与科学表征方法研究,一方面保证了建井地质探测信息科学合理分析,另一方面对指导竖井掘进机的支撑、迈步、推进等功能以及掘支协同支护技术工艺的研发具有极其重要的科学意义和工程应用价值。

岩体分类无论是从科学研究的角度还是工程应用的观点来看,是地质力学、岩土力学、地球物理学等领域的研究学者或者工程师重点关注的问题。从

1774 年罗曼提出岩体质量评价概念以来,截至目前已发展出上百种工程岩体分类方法。根据岩体特征或岩体力学性能,TERZAGHI 等<sup>[10-11]</sup>将岩体从自稳到破裂坍塌的特性范围内分为若干等级。1976 年 DEERE<sup>[12]</sup>提出的 RQD 值定量判断岩体质量,一直沿用至今。1972 年南非 BIENIAWSKI<sup>[13]</sup>建立了岩体地质力学分类(RMR)分类方法,采用岩石单轴抗压强度、RQD 指标、节理间距、节理面特征、节理面走向和地下水量 6 个指标参数对岩体进行分类;RMR 分类方法主要通过岩心和地质力学数据进行分析,简单实用,但是获得的分类结果通常过于保守,往往导致对岩体的过度支护,需要现场施工过程中连续监测从而适当修正分类系统。1974 年挪威 BARTON 等<sup>[14-15]</sup>提出了岩体质量  $Q$  分类方法,采用 RQD 指标、节理组系数、节理组粗糙系数、节理组风化蚀变系数、节理水折减系数和应力折减系数 6 个参数指标对岩体进行分类;随后 BARTON 等以  $Q$  分类指标为基础,考虑了不同岩石的切割性和刀具磨损建立了 TBM 掘进的  $Q_{TBM}$  分类指标;并基于工程项目跟踪和分析,建立了 RMR 和  $Q$  分类系统之间的应验关系<sup>[16]</sup>:  $RMR \approx 15 \lg Q + 50$  即  $Q = 10^{\frac{RMR-50}{15}}$ 。RMR 和  $Q$  分类方法在岩体质量发展历史上具有里程碑式的意义,在国际上具有极高的影响力。至今国内外学者仍不断对其进行不断修订和完善,形成了以地应力、岩爆、岩体电阻率、岩石可切割性、刀具磨蚀性、岩体支护等作为主控因素的岩体分类方法<sup>[17-19]</sup>,以及我国目前常用的《工程岩体分级标准》的修正 BQ 法<sup>[20]</sup>、《水利水电工程地质勘察规范》的 HC 法<sup>[21]</sup>,并结合 RMR 和  $Q$  分类法共同使用的组合评价方法或模型。

现有的岩体分类方法是从普通钻爆法的基础上发展起来的,从而确定工程岩土体开挖和围岩支护方法,然而,竖井掘进机破岩与爆破破岩技术原理和工艺有本质区别。与爆破破岩凿井相比,机械破岩以“破岩兼顾防控围岩破坏”的理念为指导,相比于爆破破岩对围岩的扰动明显降低,有效降低了围岩新增裂隙渗水、透水等水害风险。值得注意的是竖井掘进机凿井时撑靴对岩体持续施加的动态作用力增加,围岩体质量非常差时将对围岩稳定产生负面影响;其次竖井掘进机凿井对井筒空帮的距离要求更小,近刀盘或钻头井帮通常采用护盾或者随掘喷浆支护等。因此,笔者基于全断面竖井掘进机凿井技术和工艺的分析,提出了评价竖井掘进机凿井地层适应性分析基本原则,构建了竖井掘进机凿井围岩分级评价指标与科学表征方法。

## 1 全断面竖井掘进机凿井及面临的地质难题

### 1.1 全断面竖井掘进机凿井关键技术与工艺

全断面竖井掘进机是机械科学、机械振动学、材料学、结构力学、控制科学等多学科融合,集“材料-结构-性能”一体化设计、“设计-制造-运行”全过程融合、“破岩-排渣-支护”多动作、多系统协同的高性能凿井装备,主要包括破岩系统、旋转系统、排渣系统、支撑系统、推进系统、支护系统、悬吊系统、方向控制与纠偏系统等<sup>[22]</sup>。全断面竖井掘进机凿井工艺示意,如图 1 所示。竖井掘进机入井后撑靴作用于井筒围岩上并撑紧,启动旋转和推进系统驱动刀盘旋转和切割岩体,刀盘上的镶齿滚刀、盘形滚刀、刮刀等刀具将岩石从岩体上破碎下来;同时采用激光导向或陀螺仪导向等实现钻进导向判识,并通过调整不同位置的撑靴实现钻进实时纠偏;同步采用机械或流体排渣系统将掘进工作上的岩渣收集并通过悬吊系统提运至地面;一般近刀盘井帮采用护盾支撑或采用高强薄喷技术实现临时支护,同时竖井掘进机上部吊盘进行井壁永久支护;完成一个掘进行程后撑靴松开竖井掘进机迈步下移,完成一个循环掘进。

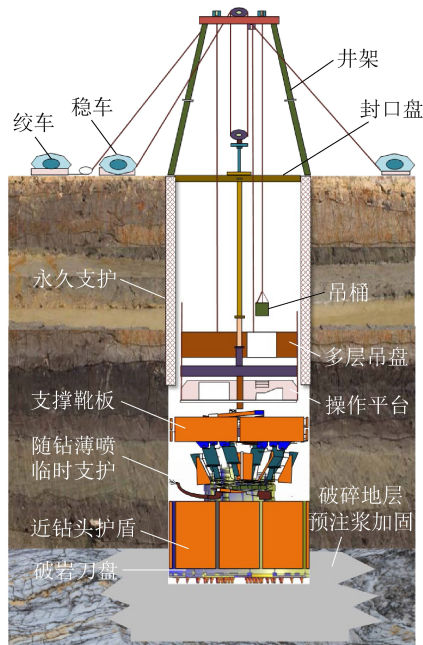


图 1 全断面竖井掘进机凿井示意

Fig.1 Digging process of full section shaft boring machine

竖井掘进机凿井工艺相比于普通钻爆法凿井井下作业人减少约 70%;克服了钻爆法破岩的不可控因素,有效控制超挖和欠挖,同时对围岩扰动影响最小,可充分利用围岩自身支撑能力降低人工支护强度,减少材料消耗;显著减少了环境污染,以采用钻



爆法施工直径 8 m、深度 600 m 井筒为例,需要消耗炸药约 100 t,排放到大气中的 CO、NO、NO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O 等有害气体超过 1 万 m<sup>3</sup>,而竖井掘进机机械破岩凿井无有害气体排放,明显减少碳排放量。

## 1.2 面临的地质难题与控制措施

岩土工程问题的复杂性,在很大程度上来自于工程地质条件,无论从地层年代、地层构造、地层接触、岩层产状和地质力学等地学的角度,还是从成岩特性、岩体(石)力学、岩石结构和矿物成分等地层岩性的角度分析,井筒穿过地质及水文地质条件具有多样性、复杂性和不确定性等特征,如我国东部煤矿井筒穿过的深厚不稳定冲积地层、我国西部煤矿井筒穿过的富水弱胶结地层、金属矿竖井穿过的坚硬花岗岩地层、云贵高原地区井筒建设穿过岩溶发育地层等等;此外,即便同一条井筒穿过地层自上而下也存在应力场、温度场、渗流场等多场和岩体、水体、气体等多相的分布规律,具有差异性、多层次、非线性和不可逆性等特征<sup>[23-24]</sup>。井筒穿越复杂地质条件示意,如图 2 所示。因此,复杂地质环境和工况下高可靠、高效率、智能化的机械破岩装备要实现安全、高效和绿色凿井,必须首要攻克面临的地质难题,为实现竖井掘进机待掘井筒的“干井掘进”提供“透明地质、靶域改性、主动控灾”的地质安全保障。

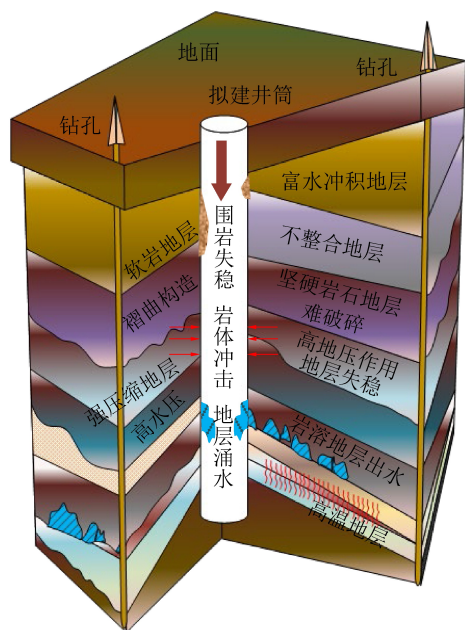


图 2 井筒穿越复杂地层条件示意

Fig.2 Shaft crossing complex formation conditions

全断面竖井掘进机凿井面临地质难题时可行的防控措施简述如下:

1) 井筒穿越软弱地层时,井筒围岩自稳能力差,不足以提供竖井掘进机撑靴支撑反作用力和反

扭矩时,可采用地层预改性加固技术,提高井筒围岩的承载能力,保障工程施工安全。

2) 井筒穿过坚硬岩石地层时,可通过研制新型抗磨蚀滚刀,采用多刀镶齿滚刀、盘形滚刀等多刀组合与高压水射流联合破岩模式,并通过优化刀盘结构和滚刀布置来实现坚硬岩石大体积低能耗高效破岩,降低工程施工成本。

3) 井筒穿过破碎不稳定地层时,应减少空帮距离,同时采用护盾或近工作面快速临时支护,避免围岩坍塌导致刀盘被埋等施工风险。

4) 井筒将穿过含水或涌水地层时,利用随掘超前精准探测技术进行实时探测与监测,根据地层富水程度、工作面涌水量和水质情况,采用地层超前预注浆堵水或配合工作面随掘排水等方法,保障竖井掘进机“干井掘进”。

5) 井筒穿过断层、节理、不整合地层时,应采用实时导向技术随掘随测,避免刀盘破岩过程中滑移或不均匀受力而导致的掘进偏斜,保障工程施工质量。

## 2 全断面竖井掘进机凿井围岩分类指标体系

### 2.1 围岩分类指标体系构建的基本原则

工程地质条件具有隐蔽性、复杂性以及工程围岩体动态变化的特点以及竖井掘进机凿井功能特点,2 者共同决定了构建适应竖井掘进机凿井的围岩分类评价指标体系,必须结合竖井掘进机技术工艺特征及其面临的地质难题。构建竖井掘进机凿井围岩分类指标体系框架时应遵循以下基本原则:

1) 整体系统性原则。因竖井掘进机凿井的各个工艺环节是一个有机系统,所以构建指标体系应从系统角度出发,不能脱离整体工艺特征,不可忽略各技术指标和工艺之间的相互联系,即指标体系的构建尽可能涵盖竖井掘进机凿井“岩-机”相互作用下的各类因素,要能整体反映竖井掘进机凿井过程中对围岩产生的各种扰动以及围岩对竖井掘进机功能的反作用影响。

2) 简明科学性原则。即各个指标的选取必须坚持可行性和合理性原则,能够客观反映岩石可切割性、围岩自稳性、围岩承载能力的特征和要求;指标体系不能过于繁杂、重叠,亦不能过于简化而不能反映真实状态,且指标权重系数的确定应科学合理。

3) 主成分性和独立性原则。因竖井掘进机凿井是典型的“岩-机”互馈模式,应重点围绕岩体强度、围岩自稳、地层水条件等客观主要的变量,以及刀具耐磨性能、刀盘结构和刀具布置、竖井掘进机撑

靴支撑力和最大扭矩等独立且可控变量,依据重要性、可控性、贡献率确定指标的设置为划分标准。

4) 可获取、可量化原则。即评价指标的选取必须充分考虑指标相关数据获取的难易程度,同时考虑能否进行量化处理,以便于进行数学计算和分析。

5) 对立统一性原则。竖井掘进机机械破岩凿井既是目标也是过程,必然存在矛盾的、模糊的、对立的评价指标,因此必须考虑静态与动态的发展变化特征,即包含如岩石质量、岩体节理等静态指标以及围岩稳定、刀具磨损量等动态指标;同时考虑岩石破碎与围岩自稳之间的双面性原特点,如岩石硬度、岩体完整性对机械破岩来说是负相关指标,而对围岩自稳性却是正相关指标。

6) 综合性原则。岩体破碎-围岩稳定-装备低能耗等参数之间的互动“双赢”是竖井掘进机凿井的最终目标,也是综合评价的重点,应综合考虑工程安全、施工周期、经济成本、装备性能等诸多因素,并

进行综合分析和评价。

2.2 评价指标体系的基本框架

本研究构建的全断面竖井掘进机凿井围岩分级指标体系框架的基本指导思想是:围绕竖井掘进机凿井“岩-机”互馈机制,即井筒内岩体低扰动高效破碎、围岩自稳控制、围岩与靴板之间的稳定支撑、刀具低磨损以及装备低能耗,遵循本文 2.1 节确定的基本原则,合理地借鉴和吸收国内外岩体质量分级方法,以及竖井掘进机凿井相关领域的研究成果,构建科学的、可量化的竖井掘进机凿井围岩分类指标体系的基本框架,以期能够为竖井掘进机凿井地层适应性研判、地层预改性或防控技术的实施提供理论指导。

本研究构建的评价指标体系融合了“岩”与“机”2 者的相关性和独立性,分为岩石可切割性、围岩自稳性、地层控水性 3 项准则层指标以及所属的 13 个基础评价指标,评价指标体系的基本框架见表 1。

表 1 评价指标体系的基本框架

Table 1 Basic framework of evaluation index system

目标层	准则层	序号	指标层	指标含义
全断面竖井掘进机凿井围岩分类相关评价指标体系	岩石可切割性 Rock Cuttability, RC	1	岩石单轴抗压强度 Uniaxial Compression Strength of Rock, UCSR	表征滚刀破碎岩石的难易程度
		2	岩石点荷载强度指数 Point Loading Strength Index, PLSI	表征刀齿贯入岩石的难易程度
		3	岩心质量指标 Rock Quality Designation, RQD	表征滚刀破岩难易程度并与破岩效率相关
		4	刀具磨蚀量 Hobbing Cutter's Abrasion, HCA	表征滚刀刀齿形制优劣及其材料耐磨性
	围岩自稳性 Rock Self-stability, RS	5	岩石破碎比能耗 Specific Energy of Cutting, SEC	表征破碎单位体积岩石所消耗的能量
		6	围岩承载能力 Bearing Capacity of the Host Rock, BCHR	表征围岩承载力与撑靴作用力之比
		7	岩爆倾向性 Rockburst Proneness, RP	表征地应力与岩石自蓄能之间耦合程度
		8	节理间距 Joint and Fissure Spacing, JFS	表征围岩裂隙的发育程度
	地层控水性 Watery Stratum, WS	9	节理条件 Joint Conditions, JC	表征节理面的风化程度及张开量大小
		10	断层走向和倾向方向 Fault Strike and Dip, FSD	表征地层断层对刀盘破岩的影响程度
		11	井内涌水量 Shaft Yield, SY	表征井筒穿过含水地层时井内的涌水量
		12	地层水压力 Groundwater Pressure, GP	表征井筒涌水封堵的难易程度
		13	岩体渗透系数 Permeability Coefficient of Rock, PCR	表征井筒围岩体的渗透性强弱

2.3 围岩分类综合评价与计算方法

采用专家测评意见和工程施工经验综合分析的方法,确定全断面竖井掘进机凿井围岩分类评价指标权重,见表 2。

表 2 评价体系各指标权重  
Table 2 Indicator weight of criteria

准则层参数	权重	指标层参数	权重
岩石可切割性	0.32	岩石单轴抗压强度	0.30
		岩石点荷载强度指数	0.20
		岩心质量指标	0.24
		刀具磨蚀量	0.12
		岩石破碎比能耗	0.14
围岩自稳性	0.28	围岩承载能力	0.40
		岩爆倾向性	0.28
		节理间距	0.10
		节理条件	0.10
		断层走向和倾向方向	0.12
地层控水性	0.40	井内涌水量	0.50
		地层水压力	0.35
		岩体渗透系数	0.15

准则层指标参数权重的设置侧重地层富水程度对竖井掘进机是否适用的决定性,考虑竖井掘进机破岩能力对装备核心能力的重要性,兼顾围岩自稳性能对掘支协同和快速掘进的关键性,并综合考虑

了不良地质条件下围岩质量指标人工改善的可行性和经济性,体现了技术进步、安全掘进和灾害防控难易程度并重的原则,指导竖井掘进机凿井施工实现地质保障。指标层基础指标参数权重的设置思路如下:

1) 岩石可切割性参数下属各指标权重的设置侧重岩体强度、质量等客观因素,降低竖井掘进机装备性能、材料等可提高、可优化、可改善的主观因素的影响。

2) 围岩自稳性参数下属各指标权重的设置侧重围岩承载能力、岩爆倾向性等关键参数,节理和断层构造对竖井掘进机凿井功能影响相对较小,因而降低其指标权重。

3) 地层控水性参数下属各指标权重侧重地层涌水量和地层水压力指标,通过地层改性技术实现地层涌水控制后,因而岩体渗透系数对竖井掘进机凿井功能影响相对较弱,所以降低渗透系数指标权重。

本研究构建的评价指标体系的基本框架中各评价指标参数,可通过室内试验、地层探测、装备监测和工程现场测试等可行的技术手段获得计算分析所用的基础数据。采用模糊评价方法对“岩-机”相互作用下的围岩条件进行综合评价;为了便于考评和操作,每项指标按照百分制方法进行评判<sup>[25]</sup>,见表 3。

表 3 评价指标及取值

Table 3 Evaluation index and value range

综合指数	准则层指标	序号	基础指标	估值				
全断面竖井掘进机凿井围岩分类综合指数	岩石可切割性	1	单轴抗压强度/MPa	<30	30~80	80~150	150~250	>250
			评分	100	80	60	40	10
		2	岩石点荷载强度指数	<2	2~4	4~7	7~10	>10
			评分	100	80	60	40	10
		3	岩心质量 RQD 指标/%	<25	25~50	50~75	75~90	90~100
			评分	100	85	65	40	15
		4	刀具磨蚀量/mm	<0.2	0.2~0.4	0.4~0.8	0.8~1.3	>1.3
			评分	100	85	65	40	10
		5	岩石破碎比能耗/( $\text{kN} \cdot \text{mm}^{-3}$ )	<0.5	0.5~2.5	2.5~5.5	5.5~8.5	>8.5
			评分	100	85	65	40	15
	围岩自稳性	6	围岩承载能力	>1.8	1.5~1.8	1.2~1.5	0.8~1.2	<0.8
			评分	100	80	60	40	10
		7	岩爆倾向性	无	弱	中	强	极强
			评分	100	90	70	40	0
		8	节理间距/cm	<6	6~20	20~60	60~200	>200
			评分	100	75	50	40	25
	地层控水性	9	节理条件	未风化	微风化	中风化	强风化	极风化
			评分	100	85	65	35	5
		10	断层走向和倾向方向	很有利	有利	适中	不利	很不利
			评分	100	85	45	15	0
		11	井内涌水量/ $\text{m}^3$	<10	10~20	20~30	30~50	>50
			评分	100	85	65	40	15
		12	地层水压力/MPa	<1	1~3	3~6	6~10	>10
			评分	100	85	65	40	10
		13	岩体渗透系数/( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	< $10^{-6}$	$10^{-6} \sim 10^{-5}$	$10^{-5} \sim 10^{-4}$	$10^{-4} \sim 10^{-2}$	> $10^{-2}$
			评分	100	85	65	40	15



将表 2 中 13 个指标层基础指标的权重向量作为列向量 $[r_i]$ ,将表 3 中 13 个指标层基础指标的评分值向量作为行向量 $[w_{ij}]$ ,分别获得准则层参数岩石可切割性、围岩自稳性和地层控水性的分类依据,计算方法为

$$\mathbf{V}_{RC} = \begin{bmatrix} w_{11} & \cdots & w_{51} \\ \vdots & & \vdots \\ w_{15} & \cdots & w_{55} \end{bmatrix} \times [r_1 \ r_2 \ r_3 \ r_4 \ r_5]^T \quad (1)$$

$$\mathbf{V}_{RS} = \begin{bmatrix} w_{11} & \cdots & w_{51} \\ \vdots & & \vdots \\ w_{15} & \cdots & w_{55} \end{bmatrix} \times [r_1 \ r_2 \ r_3 \ r_4 \ r_5]^T \quad (2)$$

$$\mathbf{V}_{WS} = \begin{bmatrix} w_{11} & \cdots & w_{31} \\ \vdots & & \vdots \\ w_{15} & \cdots & w_{35} \end{bmatrix} \times [r_1 \ r_2 \ r_3]^T \quad (3)$$

根据式(1)~式(3)计算出的得分结果分别对准则层指标进行分类,可划分为有利、一般有利、适中、不利、很不利 5 类,见表 4。

将表 2 中 3 个准则层指标的权重向量作为列向量 $[R_i]$ ,将表 4 中 3 个准则层指标的评分值向量作为行向量 $[W_{ij}]$ ,获得全断面竖井掘进机凿井围岩条件的综合分类依据,计算方法为

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} W_{11} & \cdots & W_{31} \\ \vdots & & \vdots \\ W_{15} & \cdots & W_{35} \end{bmatrix} \times [R_1 \ R_2 \ R_3]^T \quad (4)$$

根据式(4)计算出的得分结果对全断面竖井掘进机凿井围岩条件进行分类,评判结果集为 $\{\text{I 类, II 类, III 类, IV 类, V 类}\} = \{100 \sim 83.752, 83.752 \sim 62.94, 62.92 \sim 39.02, 39.02 \sim 11.068, 11.068 \sim 0\}$ 。

表 4 准则层指标分类结果

Table 4 Criterion layer parameter classification results

准则层指标分类结果	有利	一般有利	适中	不利	很不利
岩石可切割性评分	100~82.5	82.5~62.5	62.5~40	40~11.9	<11.9
围岩自稳性评分	100~83.4	83.4~60.5	60.5~36.5	36.5~7.0	<7.0
地层控水性评分	100~85.0	85.0~65.0	65.0~40.0	40.0~13.25	<13.25

竖井掘进机凿井围岩综合分类和评价时,将按照最不利原则,将上述竖井工程地质条件和装备性能条件参数输入围岩分类指标和评价体系,由式(1)~(3)计算得到岩石可切割性评价结果为 79.5 分,属一般有利类别;围岩自稳性评价结果为 63.1 分,属适一般有利类别,但值的注意的是该值接近该类别的下限值;地层控水性的评价结果为 95.75 分,

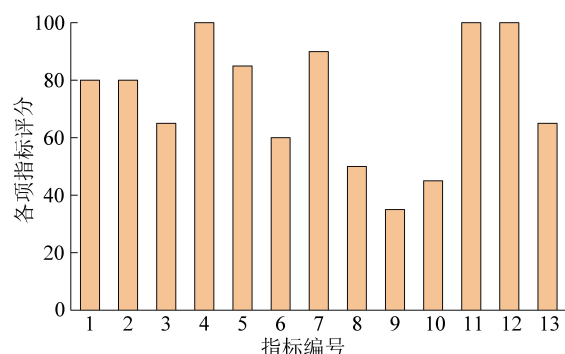
根据本研究构建的全断面竖井掘进机围岩分类指标体系与科学表征方法,评判全断面竖井掘进机对于地层的适应性: I 类围岩条件可以直接采用竖井掘进机凿井; II 类围岩条件竖井掘进机凿井需要对近刀盘围岩进行随钻支护; III 类围岩条件竖井掘进机凿井需要提前进行地层预改性加固且掘进过程中采用近钻头临时支护; IV 类围岩条件在改良装备、近钻头高强临时支护、地层预改性、围岩超前支护等成套技术保障下依然需要谨慎采用; V 类围岩条件不适合采用全断面竖井掘进机凿井。

### 3 围岩分类指标方法验证

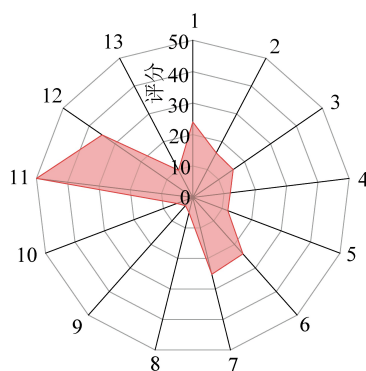
为了验证竖井掘进机凿井围岩评价方法的可行性和合理性,以我国首台套导井式全断面竖井掘进机凿井工程为样本,对井筒穿越地层条件进行综合分类和评价。样本为云南白鹤滩配套水电站出线竖井工程,采用 MSJ5.8/1.6D 型竖井掘进机凿井直径为 5.8 m,深度为 282.5 m,竖井掘进机最大破岩能力达 150 MPa,径向支撑力  $8 \times 300$  kN,最大推进力 6 000 kN,最大转矩 1 000 kN·m。井筒待穿越地层 0~41.4 m 深为二叠系峨眉山组中风化玄武岩,单轴抗压强度为 32.4~80.0 MPa,下部岩性为二叠系栖霞-茅口组弱风化灰岩,单轴抗压强度范围为 42.2~53 MPa,完整岩心试样经测试为弱冲击倾向性;井筒待穿越地层 110 m 处断层少量发育,竖向裂隙较大,宽度 10~50 cm,充填碎裂岩、方解石脉及次生泥;井筒待穿越地层 58.5~106.8, 141.7~175.3 m 范围内,多处岩体破碎,完整性差,呈碎裂和镶嵌结构;井筒待穿越地层内地下水总体不发育,以基岩裂隙水为主,局部可见沿构造与节理面渗水;井筒待穿越地层无岩溶发育地层。

属有利类别。由式(4)计算得到竖井掘进机凿井围岩条件综合评价结果为 81 分,属 II 类围岩条件。因此,可通过提升优化竖井掘进机破岩能力,并配合近刀盘围岩随掘临时支护后采用。指标层各指标取值与评分,如图 3 所示。

经钻孔地质探测、井下电视观测结果,以及竖井掘进机实际凿井过程中揭露,竖井掘进机凿井穿过



(a) 指标层各指标取值



(b) 指标层各项指标评分值

1—单轴抗压强度;2—岩石点荷载强度指数;3—岩心质量 RQD 指标;  
4—刀具磨蚀量;5—岩石破碎比能耗;6—围岩承载能力;7—岩爆  
倾向性;8—节理间距;9—节理条件;10—断层走向和倾向方向;  
11—井内涌水量;12—地层水压力;13—岩体渗透系数

图3 指标层各指标评分结果

Fig.3 Scoring results of each evaluation index

破碎地层总厚度约 80 m,并通过护盾临时支护近钻头围岩、随钻随喷临时支护等技术,实现了日进尺 3.6~5.0 m;机械破岩显著降低了对围岩的扰动,同时提高了井帮围岩的自稳性,保障了竖井掘进机单日最高进尺 10.30 m 的记录,连续 30 d 掘进进尺 159.97 m,成井偏斜率 0.15%。实践证明本研究构建的全断面竖井掘进机围岩分类指标体系和评价方法具有一定的准确性和可靠性,其评价结果反映了竖井掘进机凿井围岩条件存在的不足,并为后续地层围岩控制、灾害防治、随掘支护、围岩永久支护等技术方案制定实施,以及竖井掘进机装备性能优化升级提供了指导。

## 4 结 论

1) 基于全断面竖井掘进机凿井工艺特征,针对竖井掘进机凿井面临的地质难题以及地质灾害防控措施的可行性,考虑竖井掘进机凿井“岩-机”互馈作用下围岩岩石力学特性、装备破岩能力、岩体构造特征、围岩与装备相互支撑、地层防治水等因素的影响,提出全断面竖井掘进机凿井围岩分类指标选取

原则,并构建了岩石可切割性、围岩自稳性、地层控水性 3 个准则层指标,以及所属的 13 个基础指标的围岩分类指标体系框架。

2) 全断面竖井掘进机凿井是一个复杂系统,融合“岩”与“机”2 者的相关性和独立性,综合专家测评和工程施工经验确定了围岩分类指标体系权重,并采用模糊综合评价和百分制方法量化基础指标,构建了多维矩阵结构围岩分类评价数学模型,经计算分析后将岩石可切割性、围岩自稳性、地层控水性划分为有利、一般有利、适中、不利和很不利 5 类,进而计算分析将竖井掘进机凿井围岩条件划分为 I ~ V 类,评判了围岩分类与竖井掘进机凿井适应性之间的对应关系,并给出了可行的优化改善措施。

3) 以我国首台套导井式全断面竖井掘进机凿井工程为例,验证了竖井掘进机凿井围岩分类指标体系与评价方法的准确性和可靠性;实际掘进过程中竖井掘进机通过破碎地层时,通过采用近钻头围岩护盾临时支护和随钻随喷临时支护,实现了日进尺 3.6~5.0 m,稳定地层中单日最高进尺 10.30 m,成井偏斜率 0.15%。

4) 全断面竖井掘进机凿井围岩分类指标体系与科学表征方法,是基于竖井掘进机凿井装备性能、技术难度、工艺流程和地质条件而研究制定的,对竖井掘进机破岩掘进、灾害防控、围岩稳定控制等技术方案的制定和实施具有指导作用;随着凿井装备研发能力、制造水平、地层改性技术的提高和优化,竖井掘进机凿井围岩分类标准、指标体系和评价方法将与之进行修订和完善。

## 参考文献 (References):

- [1] 刘 峰,曹文君,张建明,等.我国煤炭工业科技创新进展及“十四五”发展方向[J].煤炭学报,2021,46(1):1-15.  
LIU Feng, CAO Wenjun, ZHANG Jianming, et al. Current technological innovation and development direction of the 14th Five-Year Plan period in China coal industry[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(1): 1-15.
- [2] 刘志强,宋朝阳,程守业,等.千米级竖井全断面科学钻进装备与关键技术分析[J].煤炭学报,2020,45(11):3645-3656.  
LIU Zhiqiang, SONG Zhaoyang, CHENG Shouye, et al. Equipment and key technologies for full-section scientifically drilling of kilometer-level vertical shafts[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(11): 3645-3656.
- [3] 刘志强,宋朝阳,纪洪广,等.深部矿产资源开采矿井建设模式及其关键技术[J].煤炭学报,2021,46(3):826-845.  
LIU Zhiqiang, SONG Zhaoyang, JI Hongguang, et al. Construction mode and key technology of mining shaft engineering for deep mineral resources[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(3): 826-845.



- [4] 谭杰,刘志强,宋朝阳,等.我国矿山竖井凿井技术现状与发展趋势[J].金属矿山,2021(5):13-24.  
TAN Jie, LIU Zhiqiang, SONG Zhaoyang, *et al.* Status and development trend of mine shaft sinking technique in China [J]. Metal Mine, 2021(5):13-24.
- [5] 王国法,任怀伟,庞义辉,等.煤矿智能化(初级阶段)技术体系研究与工程进展[J].煤炭科学技术,2020,48(7):1-27.  
WANG Guofa, REN Huaiwei, PANG Yihui, *et al.* Research and engineering progress of intelligent coal mine technical system in early stages [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(7):1-27.
- [6] 刘志强,宋朝阳,程守业,等.我国反井钻机钻井技术与装备发展历程及现状[J].煤炭科学技术,2021,49(1):32-65.  
LIU Zhiqiang, SONG Zhaoyang, CHENG Shouye, *et al.* Development history and status quo of raise boring technologies and equipment in China [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(1):32-65.
- [7] 洪伯潜,刘志强,姜浩亮.钻井法凿井井筒支护结构研究与实践[M].北京:煤炭工业出版社,2015.  
HONG Boqian, LIU Zhiqiang, JIANG Haoliang. Research and practice on support structure of borehole sinking by drilling method [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2015.
- [8] 纪洪广.“十三五”国家重点研发计划重点专项项目“深部金属矿建井与提升关键技术”开始实施[J].岩石力学与工程学报,2016,35(9):1.  
JI Hongguang. The key projects of the national key research and development plan of the 13th five-year plan, “deep metal mining and upgrading key technologies”, have been implemented [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(9):1.
- [9] 刘志强.竖井掘进机[M].北京:煤炭工业出版社,2019.  
LIU Zhiqiang. shaft boring machine [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2019.
- [10] TERZAGHI K. Rock defects and loads on tunnel support [M]. Massachusetts: Harvard Univ, 1946.
- [11] 王石春,何发亮,李苍松.隧道工程岩体分级[M].成都:西南交通大学出版社,2007.  
WANG Shichun, HE Faliang, LI Cangsong. Rock mass classification for tunnel engineering [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2007.
- [12] DEERE D U. Technical Description of rock cores for engineering purpose[J]. Rock Mechanics and Engineering Geology, 1963, 1(1):16-22.
- [13] BIENIAWSKI Z T. Engineering Rock Mass Classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil and petroleum engineering[J]. Petroleum, 1989, 251(3):357-365.
- [14] BARTON N, LIEN R, LUNDE J. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support [J]. Rock Mechanics, 1974, 6(4):189-236.
- [15] BARTON N, LOSET F, LIEN R, *et al.* Application of the Q-system in design decisions concerning dimensions and appropriate support for underground installations [J]. Subsurface Space, 1981, 553-561.
- [16] BIENIAWSKI Z T. Geomechanics classification of rock masses and its application in tunneling, 3. Kongress der IGFM. Advances in Rock Mechanics, 1974, II a:27-32.
- [17] 闫长斌,王贵军,常福庆,等.基于结构面间距标准的层状岩体结构分类方法探讨与应用[J].资源环境与工程,2010,24(5):574-578.  
YAN Changbin, WANG Guijun, CHANG Fuqing, *et al.* Discussion on the division methods of layered rock mass structure types based on the discontinuity spacing and its application [J]. Resources Environment and Engineering, 2010, 24(5):574-578.
- [18] AKSOY C O. Review of rock mass rating classification: historical developments, application, and restrictions [J]. Journal of Mining Science, 2008, 44(1):56-68.
- [19] 宋彦辉,聂德新.坝基层状岩体质量评价探讨[J].长江科学院院报,2005,22(1):39-42.  
SONG Yanhui, NIE Dexin. Discussion for quality appraisal of layered rock mass [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2005, 22(1):39-42.
- [20] 中华人民共和国国家标准编写组. GB 50218—2014 工程岩体分级标准[S]. 北京:中国计划出版社,2015.  
The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB 50218—2014 Standard for engineering classification of rock mass [S]. Beijing: China Planning Press, 2015.
- [21] 中华人民共和国国家标准编写组. GB 50487—2008 水利水电工程地质勘察规范[S]. 北京:中国计划出版社,2009.  
The National Standards Compilation Group of Peoples Republic of China. GB 50487—2008 Code for engineering geological investigation of water resources and hydropower [S]. Beijing: China Planning Press, 2009.
- [22] 刘志强.竖井掘进机凿井技术[M].北京:煤炭工业出版社,2018.  
LIU Zhiqiang. Shaft boring machine sinking technique [M]. BEIJING: China Coal Industry Publishing House, 2018.
- [23] 谢和平,鞠杨,高明忠,等.煤炭深部原位流态化开采的理论与技术体系[J].煤炭学报,2018,43(5):1210-1219.  
XIE Heiping, JU Yang, GAO Mingzhong, *et al.* Theories and technologies for in-situ fluidized mining of deep underground coal resources [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(5):1210-1219.
- [24] 谢和平,高峰,鞠杨.深部岩体力学研究探索[J].岩石力学与工程学报,2015,34(11):2161-2177.  
XIE Heiping, GAO Feng, JU Yang. Research and development of rock mechanics in deep ground engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(11):2161-2177.
- [25] 王国法,徐亚军,孟祥军,等.智能化采煤工作面分类、分级评价指标体系[J].煤炭学报,2020,45(9):3033-3044.  
WANG Guofa, XU Yajun, MENG Xiangjun, *et al.* Specification, classification and grading evaluation index for smart longwall mining face [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(9):3033-3044.