

便携式全液压钻机在稀土矿勘查中的应用与分析

曾思敏, 杨永顺*, 王艺凯, 张秉强, 马衡, 王宝龙

(中国地质调查局西宁自然资源综合调查中心, 青海 西宁 810000)

摘要:在牦牛坪稀土矿区勘查中对便携式全液压钻机的应用开展了研究,探讨了其在复杂地质条件下的性能和优势。模块化设计提高了钻机的环境适应性,采用薄壁系列钻杆与低固相冲洗液等先进钻进技术,形成了一套适用于该矿区破碎地层的钻进技术,并成功提升了钻探效率与岩心采取率,结合工程实践探讨了便携式钻机的施工情况 and 应用效果,总结存在的问题并提出了相应改进措施。研究表明,便携式全液压钻机在稀土矿复杂地层钻探中表现出显著的适用性,可为该类型矿产勘查钻进施工提供重要的参考。

关键词:便携式全液压钻机;稀土矿勘查;复杂地层;模块化设计;钻探效率;岩心采取率

中图分类号:P634 **文献标识码:**B **文章编号:**2096-9686(2025)02-0080-07

Application and analysis of portable fully hydraulic drill for rare earth mineral exploration

ZENG Simin, YANG Yongshun*, WANG Yikai, ZHANG Bingqiang, MA Heng, WANG Baolong

(Xining Natural Resources Comprehensive Survey Center, China Geological Survey, Xining Qinghai 810000, China)

Abstract: The study of application of portable fully hydraulic drill is carried out in the exploration of Maoniuping rare earth mining area, and the performance and advantages under complex geological conditions are explored. The modular design improved the environmental adaptability of the drill. Advanced drilling technologies such as thin wall series drill rods and low solid flushing fluids are adopted to form a set of drilling technical parameters suitable for the fractured strata in the mining area, and the drilling efficiency and core recovery rate are successfully improved. Based on the engineering practice, the construction situation and application effect of portable drill have been discussed, and the existing problems and the countermeasures are summarized and proposed. The research shown that portable fully hydraulic drill have demonstrated significant applicability in drilling complex strata of rare earth minerals, which provides important references for the exploration and construction for this type of mineral.

Key words: portable fully hydraulic drill; rare earth mineral exploration; complex strata; modular design; drilling efficiency; core recovery rate

0 引言

《关于在新一轮找矿突破战略行动中全面实施绿色勘查的通知》指出,“在新一轮找矿突破战略行动中全面实施绿色勘查,是新时代新征程推进生态文明建设、美丽中国建设的重要举措,是绿色发展

理念在地质勘查领域的具体实践,是新形势新要求下保障国家能源资源安全的重要途径,是促进地质勘查行业可持续发展的迫切需要”。随着地质勘探与矿产资源开发领域的不断发展,对于钻探设备的要求也日益提高^[1]。特别是在复杂多变的地质条件

收稿日期:2024-12-26; 修回日期:2025-02-11 DOI:10.12143/j.ztgc.2025.02.011

基金项目:中国地质调查局地质调查项目“西部地区战略性矿产靶区查证技术支撑(西宁中心)”(编号:DD20243419)

第一作者:曾思敏,男,汉族,1995年生,工程师,地质工程专业,主要从事钻探施工管理与技术研究工作,青海省西宁市城中区奉青路2号,919234180@qq.com。

通信作者:杨永顺,男,汉族,1986年生,工程师,探矿工程专业,主要从事钻探施工管理与技术研究工作,青海省西宁市城中区奉青路2号,403441878@qq.com。

引用格式:曾思敏,杨永顺,王艺凯,等.便携式全液压钻机在稀土矿勘查中的应用与分析[J].钻探工程,2025,52(2):80-86.

ZENG Simin, YANG Yongshun, WANG Yikai, et al. Application and analysis of portable fully hydraulic drill for rare earth mineral exploration[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(2):80-86.

下,如何高效、稳定地进行钻探作业,成为了业界关注的焦点。便携式全液压钻机作为一种新型钻探设备,以其高效、灵活、易维护等特点,在矿产勘查等领域展现出了巨大的应用潜力^[2-3]。

稀土作为战略性矿产资源,其勘查工作对保障国家矿产资源安全具有重要意义。近年来,随着新能源、新材料等产业的快速发展,稀土资源的重要性愈发凸显^[4-5]。牦牛坪稀土矿区作为我国重要的稀土资源基地之一,其地质勘查工作对于提升区域稀土资源储量具有重要意义。该矿区地质构造复杂,矿体赋存于断裂构造带中,具有地层破碎、岩性多变等特点^[6-7]。在此类复杂地质条件下进行钻探作业,常面临岩心采取率低、孔壁失稳等技术难题,这对钻探设备和施工工艺提出了更高要求。

在牦牛坪稀土矿区勘查中应用卓优MD800型模块化便携式钻机,同时对应用情况开展研究,通过对应用效果的深入分析,探讨便携式全液压钻机在复杂地层条件下的适应性以及存在的问题,提出改进措施建议。旨在为类似地质环境中开展钻探工作提供参考。

1 工作区基本情况

1.1 交通地理

牦牛坪稀土矿区属中高山深切割地貌,地势起伏较大。毛家山、牦牛山东西耸峙,矿带沿山间谷地展布。矿区海拔较高,最高海拔可达3500 m,最低海拔为2320 m,相对高差较大。钻孔位于四川省凉山州冕宁县牦牛坪矿区外围,区内有多条村村通公路及江铜修筑的牦牛坪矿山公路与过道G248线连接。矿区至冕宁县城30 km,至成昆铁路冕宁站63 km,至成都357 km,至西昌110 km。

1.2 地层情况

牦牛坪矿区地层具有复杂性和多样性。地层主要由泥盆系的泥砂碎屑岩和碳酸盐岩、上二叠统的峨眉山玄武岩以及多期次的岩浆岩组成,地层之间交错分布,且常伴随有断裂构造和岩浆活动的痕迹^[8]。同时,由于区内稀土矿化主要富集在碱性杂岩体内,与碱性花岗岩小侵入体关系密切,因此钻探时还需精确识别并追踪这些有利的地质体,以准确揭示稀土矿体的位置和形态^[9-10]。以ZK7601孔为例,地层结构及其岩石主要物理性质见表1。

表1 ZK7601孔钻遇地层及其岩石主要物理性质

Table 1 Lithology and main physical properties of rocks drilled by ZK7601

孔段/m	地层描述	可钻性级别	研磨性	硬度	完整程度
0~53.28	第四系冲洪积物	1~3	弱	软	破碎
53.28~245.89	碱长花岗岩、稀疏脉状碱长花岗岩、云煌岩	6~8	强	中硬、硬	较破碎
245.89~246.97	稀疏脉状碱长花岗岩	6~8	强	中硬、硬	较完整
246.97~283.76	萤石重晶石方解石稀土矿脉	3~5	弱	较软	较破碎
283.76~286.00	密集脉状碱长花岗岩	4~7	中	中硬	较破碎
286.00~322.94	密集脉状碱长花岗岩、碳酸岩化煌斑岩	4~6	中	中硬	较破碎
322.94~323.30	萤石重晶石方解石稀土矿脉	2~4	弱	软	破碎
323.30~412.12	云煌岩、稀疏脉状碱长花岗岩、煌斑岩	4~6	中	中硬	较破碎
412.12~412.44	萤石重晶石方解石稀土矿脉	3~5	弱	软	破碎
412.44~441.81	稀疏脉状碱长花岗岩	6~8	强	中硬、硬	较完整
441.81~442.16	萤石重晶石方解石稀土矿脉	3~5	弱	较软	破碎
442.16~453.76	稀疏脉状碱长正长岩	6~8	强	中硬、硬	较完整
453.76~457.99	稀疏脉状碱长正长岩	6~8	强	中硬、硬	较完整
457.99~458.38	萤石重晶石方解石稀土矿脉	3~5	弱	较软	破碎
458.38~522.26	碳酸岩化煌斑岩、稀疏脉状碱长正长岩	6~8	强	中硬、硬	较完整

1.3 钻探施工难点

稀土矿区地质条件复杂,存在多种岩石类型和构造特征,因地层破碎、软硬交错等因素的影响,钻

探施工时容易出现钻孔弯曲、偏斜超差等问题,导致钻孔轨迹难以控制在靶区范围内,难以满足钻孔质量要求。且在钻探过程中,孔内易发生卡钻、夹

钻、漏失等问题,严重影响钻探施工效率和安全性。

2 钻机选型

牦牛坪稀土矿区地处中高山深切割地貌,地形起伏较大,海拔高差达1180 m,且交通条件受限。综合考虑矿区地形较为复杂,植被茂盛,通行条件差的地理特点和钻孔设计(终孔孔深550 m,终孔口径 >70 mm),选用卓优MD800型模块化便携式钻机进行钻孔施工。该钻机采用模块化设计,最大模块质量仅180 kg,各功能部件可根据施工需求灵活组装,便于在复杂地形条件下运输。同时,设备占地面积小,仅需 $4.5\text{ m}\times 4.5\text{ m}$ 场地即可完成安装,大大减少了场地平整工程量。此外,全液压驱动系统保证了钻机在复杂地层条件下的施工效率和可靠性,当出现故障时可快速更换维修,有效降低了维护成本。这些特点使其特别适合在该矿区复杂的地形地质条件下开展钻探工作。

2.1 钻机的基本组成

卓优MD800型模块化便携式钻机是一种高度集成的钻探设备,该钻机的核心部件包括操作控制台、液压油箱、柴油发动机组及其油箱、钻机稳固底座、桅杆、泥浆泵、卷扬以及泥浆混合器等核心组件^[11],见图1。此钻机的全部驱动系统均依赖于高压油管内的液压油作为动力来源。通过精细调控控制阀门,可以灵活地改变油管内液压油的流量大小,进而实现对钻压、转速以及泥浆泵送量的无级平滑调节,以适应多样化的钻探作业需求。

2.2 钻机性能参数

卓优MD800型钻机特别配备了三台动力头液



图1 MD800型便携式全液压钻机

Fig.1 MD800 portable fully hydraulic drill

压马达,分别对应高速、中速和低速三种模式,这种设计使得钻机能够轻松应对多种地层类型和不同孔深的钻探挑战,确保钻探作业的高效与精准。钻机基本性能参数见表2。

表2 MD800钻机性能参数

Table 2 Performance parameters of MD800 drill

组成	性能	参数
动力系统	发动机型号	久保田V1505T
	电动机型号	无极调速伺服电机 (柴油版)
	额定功率/kW	$33\times 3/30\times 3$
	额定转速/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	3000/2000
	BTW 钻杆钻探能力/m	800
	NTW 钻杆钻探能力/m	500
HTW 钻杆钻探能力/m	200	
液压系统	控制形式	多泵合流恒流量分配系统
	系统压力/MPa	21
	最大流量/($\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$)	200
	冷却方式	水冷
回转系统	液压油箱容量/L	90
	驱动方式	德用甲驱式动力头
	最大转速/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	1300
进给系统	最大扭矩/($\text{N}\cdot\text{m}$)	1300
	钻进角度/($^{\circ}$)	$45\sim 90$ (可定制 $0\sim 90$)
	桅杆高度/m	5.2
	油缸行程/m	1.83
泥浆泵	提拔力/kN	120(双油缸)
	进给力/kN	60(双油缸)
夹持器	驱动方式	全液压顶驱式动力头
	最大输出流量/($\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$)	110
绳索卷扬	最大压力/MPa	7
	夹持方式	液压夹持器
夹持器	驱动方式	双向液压驱动
	最大通孔直径/mm	130
绳索卷扬	驱动方式	液压马达
	容绳能力	1000 m (6 mm)
	最大提升力/kN	14

3 施工工艺

3.1 钻进技术

MD800模块化便携式全液压钻机配套使用“薄壁系列钻杆+薄壁系列绳索取心钻具+无(低)固相

冲洗液”钻进技术方法,薄壁钻具及钻头(见图2),冲洗液采用低固相或无固相^[12]。在机械岩心钻探技术中,薄壁钻头的设计具有较大的优势,其钻头底唇设计得较为狭窄,从而减少了钻头与岩石的直接接触面积,这一设计可降低钻进扭矩^[13-14]。配合钻机的高转速,钻头碎岩效率可显著提升。相较于传统的标准Q系列钻具,薄壁钻具取心直径更大,这一改进使得岩心质量能够更好地满足地质勘探工作的实际需求。此外,薄壁钻具所形成的孔壁环状间隙相对较小,使钻柱整体稳定性提升,有助于控制孔斜,一定程度上还可降低孔壁失稳所造成的卡钻风险^[15]。

3.2 钻孔结构

在本次工程实践中,工区上部覆盖第四系松散堆积物,厚度0~40 m,下部为裂隙较为发育的基岩



图2 薄壁系列钻具及钻头

Fig.2 Thin wall series drilling tool and bit

层,对于孔深>400 m的钻孔,采用 $\text{O}110\text{ mm}-\text{O}96.7\text{ mm}-\text{O}74.1\text{ mm}$ 三级钻孔结构。HTW钻具钻进至较稳定的基岩地层时,无需提出HTW钻杆,可直接使用 $\text{O}108\text{ mm}$ 的钻杆,并配以套管鞋进行扩孔作业至稳定基岩地层。随后,继续使用HTW钻具进行钻进,直至达到相对稳定的地层或达到预定的深度。此时,提出孔内HTW钻具,将取心钻头更换为套管鞋,并重新将其下入孔内,作为二级套管使用,遇到复杂易坍塌地层,也可无需提出HTW钻具,直接采用NTW钻具磨铤HTW钻头内径,实现正常钻进。具体钻孔设计结构见图3,钻具选择见表3。

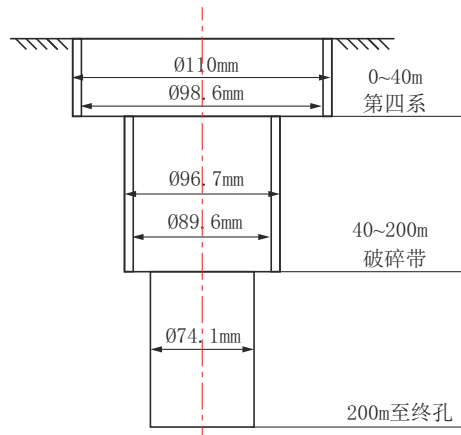


图3 钻孔结构设计

Fig.3 Configuration design

表3 钻具组合

Table 3 Drilling tool assembly

开始次序	地层	钻进口径/mm	钻具组合	取心方式
一开	第四系覆盖层	110	$\text{O}110\text{ mm}$ 硬质合金钻头+ $\text{O}111.4\text{ mm}$ 扩孔器+ $\text{O}108\text{ mm}$ 单管钻具+ $\text{O}108\text{ mm}$ 钻杆	提钻取心
二开	基岩	96.7	$\text{O}96.7\text{ mm}$ 金刚石钻头+ $\text{O}97.9\text{ mm}$ 扩孔器+HTW 绳索取心钻具+ $\text{O}91.2\text{ mm}$ 钻杆	绳索取心
三开	基岩	74.1	$\text{O}74.1\text{ mm}$ 金刚石钻头+ $\text{O}76.4\text{ mm}$ 扩孔器+NTW 绳索取心钻具+ $\text{O}73.3\text{ mm}$ 钻杆	绳索取心

3.3 钻进工艺参数

此次施工区域位于断裂带,地层具有破碎、松散、胶结程度低等特点,稀土矿层主要由细小颗粒组成,易被冲洗液所携带,通过对冲洗液配方优化及钻压、转速、泵量等参数及时调整,确保矿层岩心采取率。同时,为保证采取率的准确性,根据岩心采取长度及矿层厚度,对采取的岩心进行称重,防止岩心被人为拉长造成采取率不准确。通过分析

牦牛坪矿区的地质情况,形成了一套适用于该地区破碎地层的钻进技术参数,见表4。

4 应用效果

4.1 施工情况

利用MD800型便携式全液压钻机,在四川冕宁地区成功实施了钻探作业,共完成4个钻孔。各钻孔施工情况见表5。

表4 钻进技术参数选择

Table 4 Selection of drilling technical parameters

钻具类型	钻压/kN	转速/(r·min ⁻¹)	泵量/(L·min ⁻¹)	冲洗液类型及配方
Ø108 mm 单管	5~10	300~600	40~60	低固相冲洗液:1%膨润土+0.6%植物胶+0.5%防塌解卡剂+0.5%特效润滑剂+0.5%腐殖酸钾+0.25%聚丙烯酰胺
HTW	8~14	400~800	30~45	低固相冲洗液:1%膨润土+0.6%植物胶+0.5%防塌解卡剂+0.5%特效润滑剂+0.5%腐殖酸钾+0.25%聚丙烯酰胺
NTW	5~9	600~1000	25~40	低固相冲洗液:2%膨润土+0.6%植物胶+0.5%防塌解卡剂+0.5%特效润滑剂+0.5%腐殖酸钾+0.25%聚丙烯酰胺

表5 钻孔施工情况

Table 5 Drilling construction status

孔号	设计倾角/(°)	终孔顶角/(°)	终孔孔深/m	台月效率/m	岩心采取率/%	钻孔结构/mm	主要地层	工作区
ZK7601	60	27.7	522.17	1044.34	97.75	Ø110-Ø96.7-Ø74.1	第四系冲洪积物、碱性花岗岩、氟碳铈矿-霓辉石-重晶石-萤石脉型稀土矿体	牦牛坪 外围
ZK7602	60	31.3	591.17	1245.97	98.43	Ø110-Ø96.7-Ø74.1	第四系冲洪积物、碱性花岗岩、氟碳铈矿-霓辉石-重晶石-萤石脉型稀土矿体、英碱正长岩	牦牛坪 外围
ZK7901	60	29.3	346.67	1298.34	97.36	Ø96.7-Ø74.1	第四系冲洪积物、碱性花岗岩、氟碳铈矿-霓辉石-重晶石-萤石脉型稀土矿体	牦牛坪 外围
ZK002	60	27.9	571.67	1224.13	98.30	Ø110-Ø96.7-Ø74.1	第四系冲洪积物、稀疏脉状碱长花岗岩、大理岩夹灰岩、含角砾碳酸盐岩、英碱正长岩	登加山

从表5中可知,该工作区钻机施工台月效率1000~1300 m,较为稳定,所有钻孔均为60°斜孔,深度在500 m左右,岩石可钻性6~8级,地层破碎、裂隙发育,软硬地层交错,最深钻孔591.17 m。在钻孔施工至500 m以后,孔内扭矩明显过高,只能提钻,在钻杆外侧涂抹润滑脂后重新下钻扫孔,以降低孔内扭矩,一定程度上降低了施工效率。

4.2 应用效果分析

(1)地层适应性较好,钻进效率高。牦牛坪矿区地层破碎、复杂多变,包括泥盆系的泥砂碎屑岩、碳酸盐岩,以及上二叠统的峨眉山玄武岩和多期次的岩浆岩。MD800型钻机通过其高效的动力系统和灵活的钻进参数调节,成功降低了这些复杂地层带来的难度。同时,由于稀土矿层充填于断裂带裂隙中,具有破碎、松散、胶结程度低的特点,在钻进过程中,如不能及时根据泵压、钻进速度等参数调整冲洗液配方、钻压、泵量、转速等参数,极易造成被冲洗液冲散,导致岩心采取率降低,达不到地质要求^[16]。此次施工矿层岩心采取率均达到95%以上。在钻探施工中,MD800型钻机累计完成钻探工

作量2031.68 m,平均岩心采取率达98%,平均日进尺35.64 m/d,终孔最大孔斜误差 $\geq 3^\circ$,相较于传统的立轴式钻机,极大提高了钻探施工效率和钻孔质量^[17]。总体分析得出,便携式全液压钻机在该稀土矿区施工中适应性良好,钻进效率高,岩心采取率高,孔斜控制较好,确保了钻孔的成孔质量。

(2)轻便式钻机模块化轻量化设计,适应复杂地形施工。在此次施工的林地及农田等复杂地形运输过程中可采用小型爬山虎或人工搬运的方式,可有效支撑在环境恶劣的偏远地区或大型设备难以进入的工作区开展钻探工作。各个部件之间采用液压油管连接,极大节省了设备搬迁时间(1 d)和组装时间(1~2 d)。便携式全液压钻机设计紧凑、体积较小且高度集成,大大减少了机台占用面积(与传统立轴式钻机相比减少50%~70%占用面积),在狭小或复杂地形条件下也能灵活作业,提高了空间利用效率,降低了对作业现场环境的依赖和要求,具体见图4。



图4 作业现场环境

Fig.4 Working site environment

4.3 存在的问题及改进措施

4.3.1 折叠式铝合金材质桅杆易发生断裂

在实际施工过程中,在ZK7602钻孔钻进到550 m深度时,钻机的主桅杆在折叠处发生了断裂,导致岩心无法被打捞,将钻具提升至相对安全的位置,以便对断裂的桅杆进行紧急修复。由于机台条件限制,无法对铝合金材质进行焊接修复,且焊接后的主桅杆在强度和耐久性方面存在较大的隐患。经研究决定采用更为坚固耐用的铁质材料加工新的桅杆,以确保在后续施工过程中能够承受更大的负荷,从而有效预防类似钻机事故再次发生^[18]。这一案例不仅揭示了折叠式铝合金材质桅杆在高负荷作业中的潜在风险,也提供了宝贵的经验和教训。在未来的设计和施工中,应更加关注桅杆材质的选择和结构的设计,以确保其能够承受施工过程中的各种负荷,保障钻井作业的安全顺利进行。

4.3.2 相较立轴式钻机处理事故能力弱

当遇到卡钻、埋钻、断钻、套管难以拔起等复杂情况时,该钻机常出现动力不足和操作灵活度欠缺等问题,一定程度上限制了其事故处理的能力。为此,机组配备了一台液压拔管机,有效降低发生孔内事故后的处理难度,确保钻探工作的连续性和稳定性。

4.3.3 便携式全液压钻机对冲洗液要求较高

当便携式钻机配套的泥浆泵输送清水或无固相冲洗液时,其故障率极低,稳定性和耐久性较好。当冲洗液中混入了较多的泥沙等有害固相时,会对泥浆泵和水接头等关键部件造成严重的磨损和堵塞,进而引发故障。固相颗粒的冲刷和撞击会加速泥浆泵密封件的损坏,导致泄漏问题;同时,固相颗粒还可能在水接头处积聚,造成流通不畅或完全堵塞。这些问题不仅增加了泥浆泵和水接头等部件的损坏风险,还降低了施工效率。为此,必须严格控制冲洗液的质量,减少其中的有害固相含量,选择适当的黏土、添加剂和配比,并定期检测和调整冲洗液的性能参数。必要时还可通过更换往复式泥浆泵,实现低固相冲洗液循环钻进,以满足钻探作业的具体需求。

5 结论

通过对便携式全液压钻机在稀土矿勘查中的实际应用研究,可以看出其在复杂地质条件下的突出适应性和优势。该钻机适用于可钻性6~8级的地层,HTW钻具施工深度以100~200 m为宜,NTW钻具施工深度以400~550 m为宜。模块化设计使设备具有极大的灵活性,尤其是在应对复杂地形时,具有高效率与可靠性。此外,合理的钻进技术与参数优化可显著提高钻探效率(台月效率平均1200 m)与岩心采取率(平均98%),为地质勘查提供了强有力的技术支持,为绿色勘探提供了重要示范。随着国家对生态文明建设和绿色发展的持续推进,该设备的推广应用将对地质勘查行业的技术升级和可持续发展发挥积极作用,同时为稀土资源的科学勘查提供了新的思路与借鉴。

施工过程存在的问题,如桅杆强度的不足及设备处理事故能力的限制,需要通过改进设计和加强配套措施来进一步优化。

参考文献(References):

- [1] 周治刚,黄帆,姚震桐,等. 水利水电工程勘察钻机应用现状及发展趋势[J]. 钻探工程, 2024, 51(S1): 35-41.
ZHOU Zhigang, HUANG Fan, YAO Zhen tong, et al. Application status and development trend of exploration drilling rigs in water conservancy and hydropower engineering[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(S1): 35-41.
- [2] 王太平,蒋光旭,向成,等. 模块化全液压钻机在页岩地层钻探

- 施工中的应用[J]. 钻探工程, 2024, 51(S1):303-306.
- WANG Taiping, JIANG Guangxu, XIANG Cheng, et al. Application of full hydraulic drilling rig in shale formation drilling construction[J]. *Drilling Engineering*, 2024, 51(S1):303-306.
- [3] 薛倩冰, 王晓赛, 樊广月, 等. 钻井利器之“全液压岩心钻机”[J]. 钻探工程, 2024, 51(4):172-176.
- XUE Qianbing, WANG Xiaosai, FAN Guangyue, et al. The story of a drilling weapon: Full hydraulic core drill[J]. *Drilling Engineering*, 2024, 51(4):172-176.
- [4] 尚振, 赵超, 支成龙, 等. 鲁西龙宝山稀土矿重稀土矿体的发现及其勘查意义[J]. 地质通报, 2024, 43(2):484-488.
- SHANG Zhen, ZHAO Chao, ZHI Chenglong, et al. Discovery of heavy rare earth ore body in the Luxi Longbaoshan rare earth deposit and its exploration significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 2024, 43(2):484-488.
- [5] 付燕刚, 段壮, 李勇, 等. 北山成矿带灰石山稀土矿床稀土元素赋存状态、成矿时代及地质意义[J]. 新疆地质, 2024, 41(S1):51.
- FU Yangang, DUAN Zhuang, LI Yong, et al. Occurrence state, mineralization age, and geological significance of rare earth elements in the Huishishan rare earth deposit, Beishan Metallogenic Belt[J]. *Xinjiang Geology*, 2023, 41(S1):51.
- [6] 张冀. 三稀矿产资源的成矿特征及找矿勘查现状研究[J]. 世界有色金属, 2024(10):100-102.
- ZHANG Ji. Research on the mineralization characteristics and exploration status of three rare mineral resources[J]. *World Non-ferrous Metals*, 2024(10):100-102.
- [7] 付伟, 董春放, 许成, 等. 广西离子吸附型重稀土找矿突破方向研究与科研性示范勘查进展[J]. 地球科学, 2024, 49(6):1931-1945.
- FU Wei, DONG Chunfang, XU Cheng, et al. Research on prospecting direction of ion-adsorption type heavy rare earth element resources in Guangxi and progresses in scientific demonstration exploration[J]. *Editorial Committee of Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 2024, 49(6):1931-1945.
- [8] 兰君, 李兆令, 张鹏, 等. 重磁放综合物探方法在鲁西微山稀土矿勘查中的应用[J]. 物探与化探, 2023, 47(6):1417-1424.
- LAN Jun, LI Zhaoling, ZHANG Peng, et al. Research on the application of the integrated gravity-magnetic-radioactive geophysical exploration method in the exploration of rare earth deposit in Weishan, western Shandong[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2023, 47(6):1417-1424.
- [9] 郑小刚, 王伟, 蒲广平, 等. 中国硬岩型稀土矿找矿勘查方法综述[J]. 四川地质学报, 2023, 43(3):435-439.
- ZHENG Xiaogang, WANG Wei, PU Guangping, et al. A review of hard-rock type rare earth ore prospecting in China[J]. *Acta Geologica Sichuan*, 2023, 43(3):435-439.
- [10] 刘袁坤, 葛蕊. 稀土矿产地质勘查技术的应用研究[J]. 中国金属通报, 2023(17):91-93.
- LIU Yuankun, GE Rui. Application research on geological exploration techniques for rare earth minerals[J]. *China Metal Bulletin*, 2023(17):91-93.
- [11] 李军, 施超平, 张远义. 便携式全液压钻机在贵州某矿山勘查中的应用和分析[J]. 四川地质学报, 2024, 44(S1):79-84, 91.
- LI Jun, SHI Chaoping, ZHANG Yuanyi. Application and analysis of portable full hydraulic drill in exploration of a mine in Guizhou[J]. *Acta Geologica Sichuan*, 2024, 44(S1):79-84, 91.
- [12] 刘蓓, 张晨, 杨可, 等. 便携式全液压钻机在秦岭地区地质钻探中的应用[J]. 钻探工程, 2021, 48(11):93-102.
- LIU Bei, ZHANG Chen, YANG Ke, et al. Application of the portable full hydraulic drill in geological drilling in the Qinling region[J]. *Drilling Engineering*, 2021, 48(11):93-102.
- [13] 刘蓓, 寇少磊, 朱芝同, 等. 便携式模块化钻机在绿色地质勘查工作中的应用实践[J]. 钻探工程, 2022, 49(2):30-39.
- LIU Bei, KOU Shaolei, ZHU Zitong, et al. Practical application of the portable modular drill in green geological exploration work[J]. *Drilling Engineering*, 2022, 49(2):30-39.
- [14] 谷存磊. 地质钻探工程施工的关键技术环节分析与应用[J]. 世界有色金属, 2024(18):178-180.
- GU Cunlei. Analysis and application of key technical links in geological drilling engineering construction[J]. *World Non-ferrous Metals*, 2024(18):178-180.
- [15] 巩建平, 黎波, 张中, 等. 地质钻探工程安全管理工具的应用探讨[J]. 四川地质学报, 2024, 44(S1):32-34.
- GONG Jianping, LI Bo, ZHANG Zhong, et al. Application of safety management tools in geological drilling engineering[J]. *Acta Geologica Sichuan*, 2024, 44(S1):32-34.
- [16] 罗凡, 严加永, 梁健, 等. 稀土资源领域物探技术应用现状及展望[J]. 中国稀土学报, 2024, 42(6):1088-1101.
- LUO Fan, YAN Jiayong, LIANG Jian, et al. Application status and prospect of geophysical technology in rare-earth resources field[J]. *Journal of the Chinese Society of Rare Earths*, 2024, 42(6):1088-1101.
- [17] 张雄, 张耀澎, 牛恩宁, 等. EGR便携式全液压钻机在萤石矿勘查中的应用与分析[J]. 黄金科学技术, 2023, 31(5):856-864.
- ZHANG Xiong, ZHANG Yaopeng, NIU Enning, et al. Application of EGR portable full hydraulic drill in fluorite mine exploration[J]. *Gold Science and Technology*, 2023, 31(5):856-864.
- [18] 伦庆忠, 李建平. 大孔径自动化卸压钻机的设计[J]. 煤矿机械, 2020, 41(9):104-105.
- LUN Qingzhong, LI Jianping. Design of large aperture automatic pressure-relieving drilling rig[J]. *Coal Mine Machinery*, 2020, 41(9):104-105.

(编辑 王文)