doi: 10. 20238/j. issn. 1671-4172. 2026. 06. 009
朱大铭, 李选科, 加　恒, 等. 金川三矿硬岩滚刀滚压破岩力学性质与磨蚀性指数试验研究[J]. 有色金属(矿山部分), 2026, 78(6): 88-96.
Zhu Daming, Li Xuanke, Jia Heng, et al. Experimental study on mechanical property and abrasivity index of rock cutting by disc cutter of hard rock at Jinchuan No. 3 Mine[J]. Nonferrous Metals(Mining Section), 2026, 78(6): 88-96.

金川三矿硬岩滚刀滚压破岩力学性质与磨蚀性指数试验研究

朱大铭[1], 李选科[1], 加　恒[1], 王　想[2], 达斯坦·恩提马克[3], 王振宇[2], 赵　健[2]
(1. 金川集团镍钴股份有限公司 三矿区, 甘肃 金昌 737100;
2. 矿冶科技集团有限公司, 北京 100160;
3. 新疆喀拉通克矿业有限责任公司, 新疆 富蕴 836107)

摘　要: 针对金川三矿区硬岩矿岩条件下TBM滚刀滚压破岩的应用需求, 本文以矿区典型矿岩为研究对象, 采用全尺寸滚刀线性切割试验与CERCHAR岩石磨蚀性试验相结合的技术方案, 系统开展硬岩滚压破岩力学性质、矿岩磨蚀性研究。首先通过常规岩石力学试验, 测试矿体与围岩岩石的单轴抗压强度, 为结合磨蚀性指数分析滚刀磨损量提供数据支撑。然后针对典型硬岩矿体岩石, 开展2 mm和4 mm贯入度的滚刀滚压破岩试验, 获得滚压破岩所需作用力与比能耗, 为分析滚压破岩可掘性提供数据支撑。最后利用CERCHAR磨蚀性试验测定矿岩磨蚀性指标, 结合岩石力学性质评估磨蚀等级与滚刀磨损量。试验与分析结果表明, 矿体超基性岩单轴抗压强度为125. 24～181. 42 MPa, 围岩大理岩单轴抗压强度为96. 64 MPa; 2 mm、4 mm贯入深度时的峰值法向力分别约为42 kN、60 kN, 法向力与贯入度之比平均为18, 根据基于贯入度指数的岩体可掘进性分级方法, 评估滚刀滚压破岩可掘性为高; 矿体磨蚀性指标为2. 9～3. 8, 大理岩磨蚀性指标为3. 3, 根据2种行业分级标准, 评估滚刀滚压破岩磨蚀性等级为高, 同时根据滚刀磨损量与CAI值经验关系, 分析特征滚刀磨损量。研究成果明确了金川三矿区滚刀滚压破岩的力学响应与磨蚀特性, 可以为矿区滚刀的刀盘优化设计、采掘施工参数制定提供科学依据。

关键词: 硬岩; 贯入度; 滚压破岩; 磨蚀性指数; 滚刀磨损量
中图分类号: TD421; TD853　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1671-4172(2026)06-0088-09

Experimental study on mechanical property and abrasivity index of rock cutting by disc cutter of hard rock at Jinchuan No. 3 Mine

Zhu Daming[1], Li Xuanke[1], Jia Heng[1], Wang Xiang[2], Dastan Entimak[3], Wang Zhenyu[2], Zhao Jian[2]
(1. No. 3 Mine, Jinchuan Group Nickel and Cobalt Co., Ltd., Jinchang 737100, Gansu, China;
2. BGRIMM Technology Group, Beijing 100160, China;
3. Xinjiang Karatunk Mining Co., Ltd., Fuyun 836107, Xinjiang, China)

Abstract: To address the application requirements of TBM (Tunnel boring machine) disc cutters for rock cutting under hard rock conditions at the Jinchuan No. 3 Mine, this study employs full-size disc cutter linear cutting tests and rock abrasivity tests to investigate the mechanical properties of hard rock cutting and the abrasiveness, taking the typical ore rock of the mining area as the research subject. Initially, rock mechanics tests are conducted to obtain the UCS (uniaxial compressive strength) of both the ore body and the surrounding rock, providing data support for analyzing cutter wear based on the abrasivity index. For the ore body rocks, a typical hard rock, disc cutter rock cutting tests are performed at penetration depths of 2 mm and 4 mm, to obtain the rock cutting forces and the specific energy, providing data support for analyzing the boreability by disc cutters. The abrasivity index of the ore and surrounding rock is determined using the CERCHAR

收稿日期: 2026-06-29
基金项目: 矿冶科技集团有限公司项目(04-2527)
作者简介: 朱大铭, 高级工程师, 采矿工程专业。

abrasivity test. The abrasiveness grade and cutter wear are evaluated in combination with the rock mechanical properties. Results show that the UCS of the ore body ranges from 125.24 MPa to 181.42 MPa, of which rock type is ultrabasic rock, while the UCS of the surrounding rock marble is 96.64 MPa. The peak normal forces at penetration depths of 2 mm and 4 mm are approximately 42 kN and 60 kN, respectively, and the ratio of normal force to penetration depth averages 18. According to the rockmass boreability classification method based on penetration index, the boreability is high. The abrasivity index of the ore body ranges from 2.9 to 3.8, and 3.3 for the marble. According to two classification standards, the rock abrasivity is high. Also, the wear characteristic of disc cutters is analyzed, based on the empirical relationship between cutter wear and CAI values. These findings clarify the mechanical response and abrasiveness characteristics of rock cutting by disc cutters at the Jinchuan No. 3 Mine, providing a scientific basis for optimizing disc cutter head design and determining construction parameters for mining and excavation.

Key words: hard rock; penetration depth; rock cutting with disc cutter; abrasivity index; cutter wear

钻爆法采矿在金属矿和非金属矿山中广泛应用[1-3]，但爆破作业本身存在爆炸安全隐患，并伴有飞石和冲击波[4]，威胁作业人员的安全。随着非爆破机械采矿技术和机械破岩采矿设备的进步，包括中国[5]、美国[6]、波兰[7-8]等在内的许多国家正在向非爆破采矿方法转型。与钻爆法相比，非爆破机械采矿更安全、更经济，一方面非爆机械采矿消除了爆炸事故、对围岩的扰动更小、开挖质量更高，另一方面减少了炸药、雷管、钻杆和钻头等材料的消耗[9]。此外，非爆破机械破岩采矿也是未来发展无人化和智能化采矿的先决条件和基础。不同于钻爆法采矿，非爆破机械破岩采矿对破岩刀具、岩石力学性质有特殊要求，为保障械破岩采矿成果落地和应用效果，开展机械采矿前，有必要开展机械破岩相关研究，评估机械破岩采矿可行性。

非爆破机械开采或开挖在煤矿和隧道施工中较为常见，目前主要非爆破机械采掘设备包括滚刀滚压破岩和截齿截割破岩。煤矿开采主要采用截齿破岩采矿设备，例如悬臂式掘进机和滚筒采煤机[10]，而隧道施工则主要采用基于盘形滚刀的全断面掘进机。但由于截齿的破碎能力有限，截齿类采掘设备主要适用于破岩单轴抗压强度小于80～100 MPa的完整岩石[11]，对于破碎单轴抗压强度大于100 MPa的完整硬岩，盘形滚刀滚压破岩设备是更成熟、更理想的选择。例如图1所示的Epiroc移动式采矿机系列[12]和Robbins移动式采矿机[13]，使得在硬岩矿山(岩石强度≥100 MPa[14])中实现非爆破机械化开采逐渐成为可能。

为了更好地理解圆盘刀具的岩石切削机理并优化切削性能，研究人员主要通过线性切割试验研究了滚刀滚压破岩过程的切削力学特性。Cho等[15-16]采用摄影测量法评估了韩国花岗岩中全尺寸盘形滚刀的开挖量，计算了滚刀破岩的比能耗，并利用数值



(a)Robbins MM130移动式采矿机



(b)Epiroc 22H移动式采矿机

图1　盘形滚刀滚压破碎硬岩的采矿设备

Fig. 1　Mining equipment for breaking hard rock via disc cutters

模拟方法优化了4 mm贯入深度下TBM圆盘刀具的间距。Entacher等[17]研究了盘形滚刀滚压破岩过程中裂纹扩展及岩石破坏特征，通过拍摄裂纹网络的高分辨率图像，获得了典型裂纹模式的横截面。Thyagarajan等[18]开发了一种改进的滚压破岩试验方法，实现了可变贯入模式下的线性切割试验，采用可变贯入法测得的力略低于传统恒定贯入试验的力，并指出法向力是破碎岩石的主要作用力。

除了滚刀滚压破碎岩石力学性质，Cerchar磨蚀性指数(CAI)是预测刀具磨损和优化设备选择的关键参数[19]，Bieniawski等[20]根据单轴抗压强度(UCS)对岩石进行分类，然后利用刀具寿命指数(CAI)和岩体可掘进性(RME)预测刀具消耗。Karami等[21]提出了刀具寿命的经验模型和图表，将CAI作为岩石材料参数和代表岩体参数的岩石质量指标(RQD)的函数，结果显示，岩体中的节理对隧道

掘进过程中圆盘刀具的磨损率具有显著影响。Jeong等[22]分析了岩石脆性与切削性能参数之间的相关性,并利用LCM和CAI试验结果,提出了用于预测刀具破岩作用力、比能耗和CAI的经验公式。以往的研究表明,岩石磨蚀和岩体性质是刀具磨损过程中的关键因素。目前,Cerchar试验是检测岩石磨蚀的常用方法,并基于ASTM[23],ISRM[24]等标准进行分级。

现有研究较少开展超基性岩硬岩滚压破岩试验研究,为了掌握金川三矿区超基性岩使用滚刀滚压破岩的力学响应,以及岩石的磨蚀特性,为矿区滚刀的刀盘优化设计、采掘施工参数制定提供科学依据,本文首先开展硬岩岩石力学性质、滚刀滚压破岩力学特征与磨蚀性试验等研究,获得岩石强度、滚压破岩作用力、比能耗、CAI值,进而分析金川三矿区矿岩条件采用滚压破岩可行性,评估磨蚀性等级,以及破岩完整岩体时的滚刀消耗量。相比前人试验成果,本文重点结合试验数据,根据岩体可掘性分级表、滚刀磨损量与CAI值经验关系,分析了金川三矿区坚硬完整岩体的滚刀滚压破岩可掘性,以及滚刀磨损量。

1 工程背景

1.1 金川三矿区矿体条件概况

金川三矿区2#矿体由于成矿后F17断层的错动,矿体在水平和垂直方向发生位移而分为东、西两部分。矿体走向310°,倾向南西,倾角25°~65°,沿走向长约1 300 m,平均厚度为118 m,其中,富矿体长900 m,平均厚度为37 m。矿体上端尖灭于1 500 m标高,下端尖灭于1 100~950 m标高之间。矿体呈不规则的扁豆状产出,分布于岩体深部、底部,矿体走向与岩体基本一致,沿走向、倾斜多呈分枝尖灭,膨缩变化大,42行以东矿体倾角逐渐变缓。矿区为一南西倾斜的单斜构造,含矿超基性岩体为侵入该单斜构造中的同向岩墙,区内矿床属于超基性岩型硫化铜镍矿床,大理岩和片麻岩直接成为超基性岩体(容矿岩石)的围岩。本文研究岩硬岩位置主要集中在F17断层以东的1 300分段Ⅰ盘区,如图2所示。

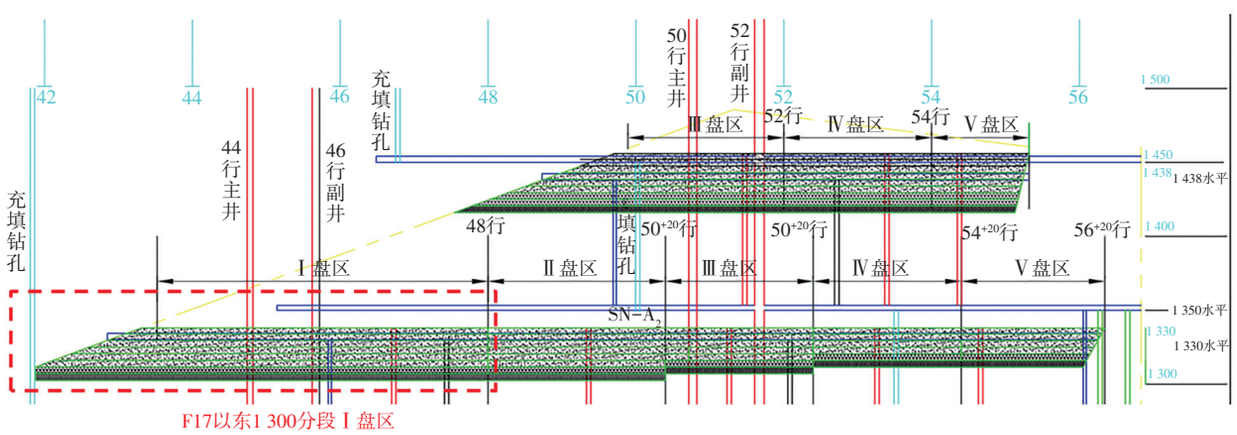


图2 硬岩力学性质研究范围

Fig. 2 Research area

金川三矿区单块岩石的单轴抗压强度较高,同一种岩石强度随围压、加载速度等变化较大,矿体底板大理岩,以及顶板辉绿岩、花岗岩等坚硬岩石的单轴抗压强度(UCS)普遍达到70~160 MPa,矿体原生带矿石UCS约80~150 MPa。金川矿区地应力以水平应力为主导,应力值随深度增加而增大,在200~500 m深度最大主应力值一般为20~30 MPa,最高达到50 MPa。

1.2 硬岩采矿工艺与装备概况

目前,金属非金属矿山主要采用钻爆法采矿工艺,其中,爆破落矿环节对围岩及相邻采场充填体影响较大,增大了围岩的冲击损伤范围,加大回采进路变形来压,地压控制难度大、安全系数低;采场围岩及充填体局部冒落片帮的情况较为多见。随着矿产资源开发向深部迈进,采深越大,采掘难度越大,现有采掘模式、采掘装备、采掘工艺技术,日益无法满足深部开采的需求。

非爆破机械采掘装备主要是悬臂式掘进机和矿用TBM。悬臂式掘进机(又称部分断面掘进机)是一种集岩石切割、行走、渣石装运、喷雾灭尘多功能于一体的高效开挖的联合作业机械,采用非爆破机械化开挖方式。其主要针对岩石单轴抗压强度≤80 MPa

的采掘工程。具有作业效率高、作业人员少、对围岩扰动小、安全性高、开挖出渣连续、适应断面形状多样化等特点，已被广泛应用于矿山、公路、铁路、市政、水利等领域项目施工。TBM(全断面岩石掘进机)技术密集程度较高的机、电、液一体的大型地下施工设备，采用滚刀破岩，破岩能力可达150 MPa，主要用于岩石地质结构的铁路、公路、水利水电引水导洞、地铁及地下工程隧道掘进建筑施工，TBM可交替完成掘进、步进工作，并可实现掘进、出碴连续作业，将挖掘的碴石通过刀盘头部送达皮带输送机，运出隧道。但是，针对硬岩矿山采矿作业，悬臂式掘进机法和全断面TBM法还存在诸多问题：1)悬臂式掘进机对于坚硬完整岩体，截割效率低，截齿损耗大，掘进速度慢。2)全断面TBM采用滚刀破岩，破岩能力可达到150 MPa，月进尺300～400 m，掘进效率高，但因设备长、体积大、拆装不便，在小转弯半径、中短巷道施工场景中应用受到一定的制约。因此，全断面TBM主要应用于长距离掘进工程，针对采矿作业，可以采用图1所示的装备完成滚压破岩采掘。

2　矿体岩石力学性质

2.1　取样与加工

矿岩取样位置主要在F17断层以东的1300分段的采掘工作面、1330分段的采掘工作面，包括2个1300分段采场位置超基性岩矿体岩石和1个下盘大理岩围岩，取样方式为现场爆堆大块、掌子面撬毛大块取样，采样区域深度约390 m。取样后，将岩石加工为标准试样，其中，单轴压缩试验试样尺寸为高100 mm、直径50 mm的圆柱，滚压破岩试验试样尺寸为边长150 mm的正方体，磨蚀性试验试样尺寸为高25 mm、直径50 mm的圆盘，如图3所示。



(a)矿岩取样



(b)试样加工

图3　矿岩取样与试样加工

Fig. 3　Rock sampling and specimen processing

2.2　单轴压缩试验

单轴压缩试验采用压缩试验平台，试验平台可进行各种材料压缩的试验，试验数据汇总于表1。试验结果表明，矿岩单轴抗压强度96.64～181.42 MPa，其中，矿体岩石单轴抗压强度平均约为150 MPa，属于硬岩岩石。矿体岩石强度超过大部分依赖截齿破岩的悬臂式掘进机标称的适用范围，当采场掌子面矿体为完整性较好的岩体时，无法采用悬臂式掘进机进行采掘。为了满足完整硬岩矿体的采掘，可以采用滚刀滚压破岩设备进行机械采掘，或者对硬岩矿体进行大范围预裂后，再使用悬臂式掘进机进行机械采掘。

表1　矿岩单轴抗压强度

Table 1　Uniaxial compressive strength of rock

试样位置与岩性	试件编号	单轴抗压强度 σ/MPa	强度均值 $\bar{\sigma}$/MPa	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ
1300分段Ⅰ盘区下盘大理岩围岩	KZ1－1	102.68	96.64	24.98	0.19
	KZ1－2	69.42		16.44	0.26
	KZ1－3	117.83		21.07	0.22
1300分段Ⅰ盘区1分层56#进路超基性岩矿体	KZ2－1	75.67	125.24	18.2	0.2
	KZ2－2	195.96		33.98	0.22
	KZ2－3	104.08		20.79	0.15
1300分段Ⅰ盘区1分层13#进路超基性岩矿体	KZ3－1	148.30	144.01	23.52	0.16
	KZ3－2	173.01		30.49	0.1
	KZ3－3	110.72		22.81	0.17
1330分段Ⅴ盘区6分层超基性岩矿体	KZ4－1	196.74	181.42	36.76	0.11
	KZ4－2	122.87		25.41	0.14
	KZ4－3	180.97		35.45	0.17
	KZ4－4	225.10		37.13	0.12

3　滚刀滚压破岩力学性质

3.1　试验装置

滚压破岩试验采用多功能机械破岩试验平台，平台主体机械结构如图4所示，主要包括：主框架、贯入度调节系统(贯入度调节电缸和伸缩)、岩石推进系统(推进电缸、十字交叉平台和截线距调节电缸)、辅助系统(电动吊臂)。多功能机械破岩试验平台采用三支高精度伺服电缸驱动刀具破岩、贯入度调节。试验机机械运动机构全部采用高精度大推力的伺服电缸系统控制。围压加压系统采用高压手动液压泵和高压油缸组成，手动压力泵压力最高可达到70 MPa，在岩样尺寸为350 mm×200 mm×200 mm时，岩石施加围压最高达到30 MPa。

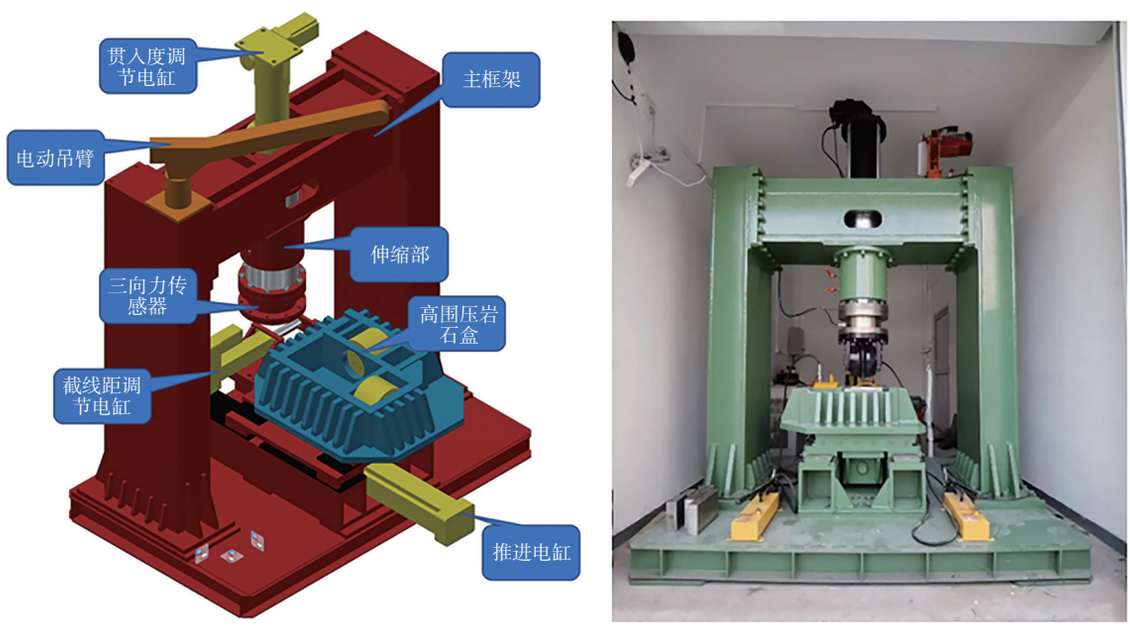


图4　机械破岩试验平台

Fig. 4　Mechanical rock-breaking test platform

相较于单轴压缩试验所需试样，滚压破岩试验所需试样尺寸较大，现场取大尺寸岩样困难，滚刀破岩试验试样仅选用1300分段56#进路超基性岩矿体岩石，其单轴抗压强度为125 MPa，满足硬岩试样标准(≥100 MPa)，试验所用岩石试样的尺寸为：长×宽×高为150 mm×150 mm×150 mm，试验滚刀选用305 mm(12英寸)直径的全尺寸常截面滚刀，试样与岩石试样盒之间的空隙，利用侧塞板填充。试样安装后如图5所示，试验前为了保证施加恒定贯入度的准确性，将滚刀缓慢推向岩石表面，当贯入方向检测到作用力后，停止推进，作为0 mm贯入度基准。然后保持0 mm贯入度基准将滚刀沿切割方向退至出岩石试样范围外，设置滚刀在贯入方向继续移动一定距离作为贯入度后，沿切割方向滚动切割岩石。共开展2次贯入度条件下的无侧限滚压试验，分别为2 mm、4 mm，滚刀切割速度为1 mm/s。本文初始阶段采用无侧限条件开展滚压试验，核心目的是先获取矿区矿岩在无约束状态下的基础破岩力学响应特征，作为后续有侧限试验的基准对照组。且由于试验加工的试样尺寸较小，不具备开展有围压条件试验。



图5　试样安装

Fig. 5　Rock specimen installation

3.2　试验结果

3.2.1　滚压破岩力学特征

试验过程中，记录不同贯入度条件下滚刀的破岩作用力，如图6所示。对比滚刀三向作用力可知，滚刀滚压破岩过程中，法向力远大于侧向力和滚动力。2 mm贯入深度时的峰值法向力为42 kN，峰值法向力与贯入度之比为21，峰值滚动力为5.1 kN，平均为3.5 kN；4 mm贯入深度时的峰值法向力为60 kN，

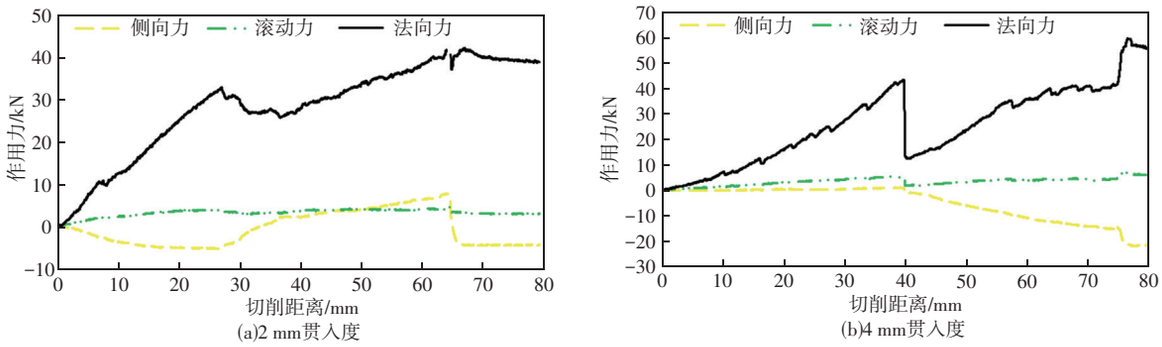


图6　不同贯入度条件下的破岩作用力

Fig. 6　Rock cutting force evolutions under different penetration conditions

峰值法向力与贯入度之比为15，峰值滚动力为7.2 kN，平均为3.6 kN。随着滚刀贯入深度的增大，滚刀峰值法向力增大。从法向力曲线可以看出，在滚刀破岩过程中，破岩是阶跃性的，且侧向力、滚动力与法向力的变化基本保持一致，即岩石产生滚压破裂时，滚刀三向作用均出现跌落。

滚压破岩试验后，收集不同贯入度条件下的岩渣，称重，在统计岩渣体积时，主要统计滚刀滚动切割力平稳以后产生岩屑。2 mm贯入度条件下，岩渣质量为30.75 g，按2.9 g/cm^{3}的密度计算，岩渣体积为10.6 cm^3。4 mm贯入度条件下，岩渣质量为27.47 g，岩渣体积9.5 cm^3。2 mm和4 mm贯入度条件下，滚刀破岩比能分别为26.4 MJ/m^{3}和30.3 MJ/m^3，平均为28.4 MJ/m^3。滚压破岩后的试验结果显示(图7)，2 mm贯入度条件下产生2条宏观裂纹，4 mm贯入度条件下产生1条宏观裂纹，导致2 mm贯入度岩渣体积略大于4 mm的。

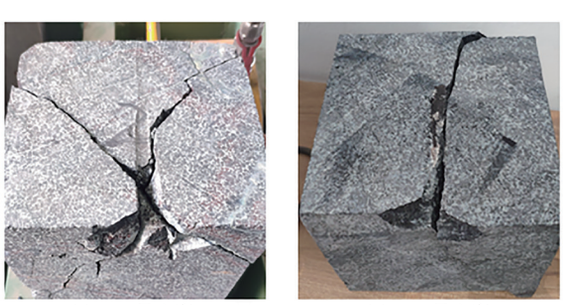


图7　不同贯入度条件下的宏观裂纹

Fig. 7　Rock fractures under different penetration conditions

此外，图7还显示滚刀首先接触并切割岩石的边缘位置破碎严重，滚刀接触岩石之后破碎不严重。滚刀切割岩石试样边缘时，沿岩石切割方向的反方向，没有岩石基质限制岩石变形，在滚刀切割力、法向力的作用下，岩石边缘向无岩石基质限制一侧产生较大块的破碎。随着滚刀切削距离的增加，岩石内部的岩石基质会限制大块破碎的产生，滚刀切割力、法向力对岩石的作用以裂纹扩展的形式体现。

3.2.2　可掘性分级

根据李子琛等[25]的总结，可掘性(boreability)、可切削性(cuttability)和可钻性(drillability)3个术语通常用于评价岩石切削工具在岩体破岩中的相对能力。可切削性主要应用于煤矿开采，可掘性和可钻性广泛用于各类公路水利岩石隧道施工，同时可掘性的概念在矿业类学科中的石油工程和采矿工程中应用也极为普遍。岩石可掘性的研究是影响盘形滚刀破岩装备掘进效率和成本控制的重要因素之一。岩石可掘性的研究可应用到为刀具设计、选型、施工参数确定、成本控制提供依据。整体而言，可掘性的定义可归纳为两类：

1)从岩石物理力学参数角度定义，代表岩石自身的破碎难易程度。从岩石力学特性的角度，可掘性评价主要考虑单轴抗压强度、抗拉强度、磨蚀性等参数，这些参数越高，岩石越难以进行切削。其中，单轴抗压强度、抗拉强度与岩石的断裂发育和扩展密切相关。

2)从滚压破岩掘进效率角度定义，综合考虑岩石参数与机械参数，代表在特定岩石中的掘进性能。从机械层面考虑，刀盘的设计、刀具及贯入度的选择都会对掘进及刀具磨损产生巨大影响。对于不同类型的岩石，存在不同的刀间距和贯入度，使得滚刀切削岩石时破岩比能耗达到最小。

针对TBM滚刀破岩掘进，场贯入度指数FPI作为可掘性评价的量化指标，广泛应用于岩石的可掘性评价中。FPI指数最初由Klein等提出，定义为单刀推力与贯入度之比，代表岩石单位切深所需的滚刀推力[26-27]。FPI值越大，表示滚刀越难以切削岩石，

滚刀滚压破岩的适应性越差。FPI作为复合参数，其反映的是岩体抵抗刀具贯入的能力，是更加具有通用性的岩体可掘性评价指标。本文主要参考同济大学薛亚东等[27]介绍的岩体可掘进性分级方法，对金川三矿硬岩滚压破岩可掘性进行分级，如表2所示。

表2 岩体可掘进性分级

Table 2 Boreability classification of rockmass

可掘进性分级	FPI	可掘进性
1	＜50	高
2	50～100	较高
3	＞100～150	一般
4	＞150～300	较低
5	＞300～600	低
6	＞600	很低

滚压破岩试验显示，峰值法向力与贯入度之比分别为21(2 mm贯入度)和15(4 mm贯入度)，均值为18，因此，推测金川三矿区硬岩的场贯入度指数FPI理论值在18左右，结合可掘性分级标准，金川三矿区坚硬完整岩体的滚刀滚压破岩可掘性高。

4 矿岩磨蚀性特征

4.1 试验装置

岩石磨蚀性实验设备包括岩石磨蚀试验主机、伺服控制系统、电子显微镜，如图8所示。试验时，启动电缸伺服系统对钢针施加70 N的恒力，稳定后启动岩样推进伺服系统，推动岩样运动10 mm，推进速度为10 mm/min，钢针直径Φ10 mm，锥角90°，电子显微镜对钢针磨损的测量精度达到0.001 mm。钢针针尖损失的平均直径乘以10被定义为岩石磨蚀系数。试验过程中的部分岩石表面划痕、测试钢针如图9所示。试验过程中，每处岩样制备2个Φ49 mm×29 mm的圆盘试验样本，样本按照钢针0°、120°、240°等不同角度分别测量磨损直径，最终CAI取测试平均值，以平衡数据离散性。

4.2 试验结果与磨蚀性分析

金川三矿区矿岩磨蚀性测试结果见表3。结果显示，1300、1330分段采场内矿体，以及下盘岩体，采用滚刀破碎完整岩石时，均具有高磨蚀性，矿岩体的磨蚀性指标CAI值的范围区间约为2.9～3.8。为了进一步分析滚刀磨损量，需要综合下盘大理岩围岩、不同盘区超基性矿体岩石磨蚀试验与单轴试验数



图8 岩石磨蚀性试验系统

Fig. 8 Rock abrasivity test system



图9 岩石磨蚀性试验

Fig. 9 Rock abrasivity test

表3 矿岩CAI值测试结果

Table 3 Test results of CAI value for ore and rock

试样位置与岩性	CAI值	ISRM标准磨蚀等级	ASTMD标准磨蚀等级	单轴强度/MPa	滚刀开挖石方量/(m^3·$disc^{-1}$)	特征滚刀磨损量/(1·m^{-3})
1300分段Ⅰ盘区下盘大理岩围岩	3.3	高	高	97	720	1/720
1300分段Ⅰ盘区1分层7#进路超基性岩矿体	2.9	中等	高	135	760	1/760
1300分段Ⅰ盘区1分层14#进路超基性岩矿体	2.9	中等	高	135	760	1/760
1330分段Ⅴ盘区5分层10#进路超基性岩矿体	3.8	高	高	180	340	1/340

据进行研究。根据Maidl等统计的常见岩石的CAI值、单轴抗压强度与滚刀开挖石方量关系[28-30]，如图10所示，结合金川三矿区矿岩单轴抗压强度，初步评估滚刀开挖石方量。由于岩石磨蚀性试验取样时间与单轴压缩试验、滚压破岩试验取样时间不一致，试样位置存在偏差，其中，同一分段、盘区的两次试样取样位置距离偏差在5～20 m左右，同一盘区的矿体单轴强度取试验结果均值。

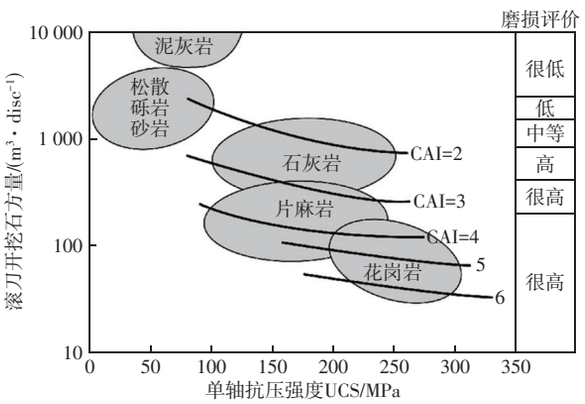


图10　滚刀磨损量与CAI值经验关系

Fig. 10　Correlation of TBM cutter life, UCS and CAI for some common rock types

5　结论

1）金川三矿区岩石力学试验表明，1300分段下盘大理岩围岩单轴抗压强度为96.64 MPa，矿体岩石单轴抗压强度为125.24～181.42 MPa，矿岩强度高，属于坚硬岩石，为实现完整硬岩非爆破机械破岩采掘，可以采用滚刀滚压破岩设备，或者对硬岩矿体进行大范围预裂后，再使用悬臂式掘进机进行机械采掘。

2）金川三矿区硬岩滚刀滚压破岩过程中，法向力远大于侧向力和滚动力。且随着贯入度的增加，峰值法向力增大。2 mm贯入深度时的峰值法向力为42 kN，峰值法向力与贯入度之比为21，4 mm贯入深度时的峰值法向力为60 kN，峰值法向力与贯入度之比为15，坚硬矿体岩石采用滚刀滚压破岩的可掘性评价分级为高。

3）金川三矿区1330分段采场内矿体磨蚀性指标CAI为3.8，1300分段矿体CAI为2.9，1300分段下盘大理岩围岩CAI为3.3，按照美国材料与试验协会的标准(ASTM D7625-10)，1300、1330分段矿岩体的磨蚀等级均为高。采用滚刀滚压破岩时，1330分段矿体的特征滚刀磨损量为1/340 disc/m^3，1300分段矿体的特征滚刀磨损量为1/760 disc/m^3。

4）本文获取的不同贯入度下的破岩力数据，可直接用于指导现场滚刀所需破岩推力计算，结合磨蚀试验结果可初步给出不同采掘进尺下的滚刀更换周期建议。后续可以通过引入多滚刀破岩试验、围压变量等完成多工况破岩试验，最终形成适配该矿区的刀盘结构优化方案与采掘施工参数。

参　考　文　献

[1] Ebadinia Z, Rahimdel M J, Aryafar A. Assessment of environmental hazards in a mine tailings dam using the fuzzy SAM method[J]. Journal of Geomine, 2025, 3(3): 182-187.

[2] Kononenko M, Khomenko O, Cabana E, et al. Using the methods to calculate parameters of drilling and+blasting operations for emulsion explosives[J]. Acta Montanistica Slovaca, 2023, 28(3): 655-667.

[3] Yilmaz O. Drilling and blasting designs for parallel hole cut and V-cut method in excavation of underground coal mine galleries[J]. Scientific Reports, 2023, 13: 2449. DOI: 10.1038/s41598-023-29803-6.

[4] Bhatawdekar R M, Kumar R, Sabri Sabri M M, et al. Estimating flyrock distance induced due to mine blasting by extreme learning machine coupled with an equilibrium optimizer[J]. Sustainability, 2023, 15(4): 3265. DOI: 10.3390/su15043265.

[5] Wang Shaofeng, Sun Licheng, Huang Linqi, et al. Non-explosive mining and waste utilization for achieving green mining in underground hard rock mine in China[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2019, 29(9): 1914-1928.

[6] Alexander C, Board M, Johnson W, et al. Mobile mechanical vein miner: new machine developed for Lucky Friday Mine[J]. Mining Engineering, 2018, 70(1): 16-24.

[7] Krzysztof K, Piotr M. Methods of mechanical mining of compact-rock: a comparison of efficiency and energy consumption[J]. Energies, 2019, 12(18): 3562. DOI: 10.3390/en12183562.

[8] Bołoz Ł, Biały W. Automation and robotization of underground mining in Poland[J]. Applied Sciences, 2020, 10(20): 7221. DOI: 10.3390/app10207221.

[9] Zhao Jian, Huang Dan, Zhu Daming, et al. Investigations on rockmass structure characteristics and mechanical mining efficiency and economics in the Jinchuan No. 3 mine with hard rock[J]. Advances in Civil Engineering, 2026, 2026: 2598677. DOI: 10.1155/adce/2598677.

[10] Dziurzyński W, Krach A, Krawczyk J, et al. Numerical simulation of shearer operation in a longwall district[J]. Energies, 2020, 13(21): 5559. DOI: 10.3390/en13215559.

[11] Zhang Mengqi, Yan Xianguo, Qin Guoqiang. A new method for roadheader pick arrangement based on meshing pick spatial

position and rock cutting verification[J]. PLoS One, 2021, 16(11): e0260183. DOI: 10.1371/journal.pone.0260183.

[12] Bołoz Ł, Kalukiewicz A. Machines for mechanical mining of hardly workable and abrasive rocks[J]. Multidisciplinary Aspects of Production Engineering, 2020, 3(1): 150-160.

[13] Lyly J, Hartwig S, Nord G. Epiroc Mobile Miner: hard rock cutting is now a reality[C]//Svenska Bergteknikföreningen. Stockholm, Sweden, 2018: 277-290.

[14] Singh B, Goel R K. Engineering rock mass classification[M]. Boston: Butterworth-Heinemann, 2011.

[15] Cho J W, Jeon S, Jeong H Y, et al. Evaluation of cutting efficiency during TBM disc cutter excavation within a Korean granitic rock using linear-cutting-machine testing and photogrammetric measurement[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, 35: 37-54.

[16] Cho J W, Jeon S, Yu S H, et al. Optimum spacing of TBM disc cutters: a numerical simulation using the three-dimensional dynamic fracturing method[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2010, 25(3): 230-244.

[17] Entacher M, Schuller E, Galler R. Rock failure and crack propagation beneath disc cutters[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2015, 48(4): 1559-1572.

[18] Thyagarajan M V, Rostami J. Study of cutting forces acting on a disc cutter and impact of variable penetration measured by full scale linear cutting tests[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2024, 175: 105675. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2024.105675.

[19] Sharghi M, Jeong H. Enhanced estimation of cerchar abrasivity index using mineralogical composition analysis[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2026, 59(8): 9185-9199.

[20] Bieniawski Z T, Celada B, Galera J M, et al. Prediction of cutter wear using RME[C]//Proc, ITA Congress. Budapest, 2009.

[21] Karami M, Zare S, Rostami J. Tracking of disc cutter wear in TBM tunneling: a case study of Kerman water conveyance tunnel[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, 80(1): 201-219.

[22] Jeong H, Choi S, Lee Y K. Evaluation of cutting performance of a TBM disc cutter and cerchar abrasivity index based on the brittleness and properties of rock[J]. Applied Sciences, 2023, 13(4): 2612. DOI: 10.3390/app13042612.

[23] ASTM D7625-22 Standard test method for laboratory determination of abrasiveness of rock using the CERCHAR method[S].

[24] Alber M, Yaralı O, Dahl F, et al. ISRM suggested method for determining the abrasivity of rock by the Cerchar abrasivity test[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2014, 47(1): 261-266.

[25] 李子琛, 朱杰兵, 张宜虎, 等. TBM隧道岩石可掘性评价指标及其应用研究综述[J]. 地下空间与工程学报, 2024, 20(增刊1): 508-520.
Li Zichen, Zhu Jiebing, Zhang Yihu, et al. A review of rock boreability evaluation index and its application in TBM tunnel construction[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2024, 20(S1): 508-520.

[26] Klein S, Schmoll M, Avery T. TBM performance at four hard rock tunnels in California[C]//Proceedings of the Rapid Excavation and Tunneling Conference. Society for Mining, Metallogy & Exploration, INC, 1995: 61-76.

[27] 薛亚东, 李兴, 刁振兴, 等. 基于掘进性能的TBM施工围岩综合分级方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(增刊1): 3382-3391.
Xue Yadong, Li Xing, Diao Zhenxing, et al. Comprehensive classification method of surrounding rock in TBM construction based on tunneling performance[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(S1): 3382-3391.

[28] Maidl B. Tunnelbohr maschinen im hartgestein[M]. Berlin: Ernst & Sohn Verlag, 2001.

[29] Plinninger R J, Kasling H, Thuro K. Wear prediction in hardrock excavation using the Cerchar abrasiveness index(CAI)[C]// Schubert W. Rock Engineering Theory and Practice, Proceedings of the ISRM Regional Symposium EUROCK 2004 & 53rd Geomechanics Colloquy. Berlin, Germany, 2004: 599-604.

[30] 龚秋明, 许弘毅, 李立民. 岩石磨蚀性指数分级讨论[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(3): 748-758.
Gong Qiuming, Xu Hongyi, Li Limin. Discussions on the rock abrasivity index classification[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(3): 748-758.