

TBM 滚刀破岩试验台设计与分析

王 贺¹, 吴玉厚¹, 孙 健¹, 孙 红¹, 安 冬¹, 赵凯军²

(1. 高档石材数控加工装备与技术国家地方联合工程实验室, 辽宁 沈阳 110168;

2. 全断面掘进机国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110141)

摘 要 目的 设计可调整间距的双滚刀破岩试验台, 解决全断面硬岩掘进机(TBM)刀盘设计时所需滚刀破岩最佳刀间距与贯入度等相关数据问题. 方法 利用压力机对3种典型花岗岩在不同加载速率下进行了单向加载的破碎试验, 确定了岩石破碎力并分析了加载速率对岩石破碎力的影响; 基于试验结果确定了滚刀试验台的受力、运动速度等设计参数并进行了双滚刀综合试验台的结构设计, 对设计的刀具系统、工作台、刀具调节等核心部件的结构及工作原理进行了说明; 对试验台的主要受力部件进行了有限元受力分析. 结果 完成了试验台的制造、装配和调试, 利用试验台进行了花岗岩的滚压破碎试验. 3种花岗岩单向破岩试验的破碎力在180~300 kN, 核心部件的应力分析结果小于材料的许用应力, 破岩过程中的受力在设计许可范围内. 结论 试验台可以满足硬岩掘进机设计时所需的岩石滚压试验要求.

关键词 岩石破碎; 试验台; 设计; 滚刀

中图分类号 TU94⁺9; TH16

文献标志码 A

Breaking Test Bed Design and Analysis of the TBM Disc Cutter Rock

WANG He¹, WU Yuhou¹, SUN Jian¹, SUN Hong¹, ZHAO Kaijun²

(1. National-Local Joint Engineering Laboratory of High-Grade Stone Numerical Control Machining Equipments and Technology, Shenyang, China, 110168; 2. State Key Laboratory of Tunnel Boring Machine, Shenyang, China, 110141)

Abstract: The double disc cutter test bed with adjustable spacing is designed to solve cutter disc design problems of full face rock tunnel boring machine (TBM). Three granites uniaxial loading breaking were experimented to attained breaking force by pressure tester. The effect of loading rate on breaking force was analyzed. The pressure force and move speed of test bed were determined to be designed the double disc cutters test bed based on experimental results. The main parts structures of test bed were explained. The main stress parts were analyzed by finite element method. The manufacture, assembly, debugging of the test were completed and the rock breaking experiments

收稿日期: 2017-02-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51675353); 教育部创新团队计划项目(IRT_15R45); 沈阳市科技计划项目(F16-234-7-08); 国家(地方)联合工程实验室开放基金项目(SJSC-2015-5, SJSC-2015-13)

作者简介: 王贺(1981—), 男, 博士研究生, 主要从事掘进机刀盘刀具系统研究.

were done. The breaking force of three granites was in 108 ~ 300 kN in one-way rock brecking test. The stress analysis of the core component is less than the allowable stress of the material ,and the force in the rock breaking process is within the design permit. The test bed can meet the requirement of rock rolling test in the design of Hard Rock Roadheader.

Key words: rock breaking ; test bed ; design ; disc cutter

全断面硬岩掘进机是铁路、水利、地下等施工中不可缺少的重要装备,且我国需求量巨大^[1-2].刀盘是影响掘进机性能的关键部件,其中贯入度、刀间距等是刀盘设计的主要参数,选择不合理,刀具磨损会加快,影响施工^[3-4].目前我国在刀盘主要参数的确定主要手段是依靠设计人员的经验,此方式易受个人主观影响,而试验测试研究需要大量的时间和成本,各研究单位和企业还未形成完善数据库,我国缺乏相应经验^[5-6].刀盘设计所需试验装备性能也亟待提高,国内外现有滚刀试验台在滚压速度、刀具数量等方面还未达到完全模拟掘进机工作状态^[7-9],因此,研制滚刀综合试验台对于解决刀盘设计问题有实际意义.根据TBM(Tunnel Boring Machine)实际施工过程可知,滚刀滚压速度多处于0~1.5 m/s,实际施工过程中由于存在着滚动动力,破岩力小于单向压力破岩^[10-11].笔者以实际经常遇到且硬度大的花岗岩为对象,选择单向加载进行破碎试验,测定试验中破岩力数据并进行分析,确定滚刀试验台设计参数,研发试验台,保证设计的合理性、可靠性.

1 岩石破碎机理

岩体强度是工程设计的重要参数,但是岩体试验工程量大、费用高、难度大,因此利用试验数据对岩体强度进行估算是研究的可行手段,常用的方法有两种^[12]:

(1)准岩体强度

准岩体抗压强度 σ_{mc} 为

$$\sigma_{mc} = K\sigma_c. \tag{1}$$

式中: σ_c 为岩石试件的抗压强度; K 为岩体完整性系数.

准岩体抗拉强度 σ_{mt} 为

$$\sigma_{mt} = K\sigma_t. \tag{2}$$

式中: σ_t 为岩石试件的抗拉强度.

$$K = \left(\frac{v_{ml}}{v_{cl}} \right)^2. \tag{3}$$

式中: v_{ml} 为岩体中弹性波纵波传播速度; v_{cl} 为岩块中弹性波纵波传播速度.

(2)Hoek - Brown 经验方程

Hoek 和 Brown 根据试验结果并结合理论分析,确定了岩块和岩体破坏时主应力之间的关系.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m\sigma_c\sigma_3 + s\sigma_c^2}. \tag{4}$$

式中: σ_1 为破坏时的最大主应力; σ_3 为作用在岩石试样上的最小主应力; σ_c 为岩块的单轴抗压强度; m,s 为与岩性及结构面情况相关的常数,可查岩体质量与经验常数关系表确定.

滚刀对岩石的破碎是岩石受到挤压、张拉、剪切等作用而形成的过程.岩石的变形破碎分为弹性变形、塑性变形和破碎3个阶段.能量转化贯穿于岩石破坏的全过程,本质上就是在能量作用下的失稳破裂.机械能作用在岩石上,首先部分能量转化为弹性能,随着能量在岩石体内的积聚,岩石材料出现损伤、塑性变形,岩石内部结构发生变化^[13-15].当能量继续积聚并达到岩石强度极限时,岩石则产生破碎,释放能量^[16-18].

2 滚刀试验台设计与分析

2.1 试验台设计原始数据的获取

为了获得滚刀压碎岩石的破岩力数据,采用HYE-2000电液式恒加载压力试验机(见图1)对岩石进行破岩试验,试验机参数如表1,该试验机可按照设定加载速度由下承压板向上运

动,以完成试件的破碎试验^[19-20].

为了真实反映滚刀破岩试验,将实际施工中使用的滚刀刀圈截取一部分焊接到钢板上,截取刀圈时需要将刀圈内孔加工成平面,保证与铁板焊接时该刀圈的正确角度.

焊接完成的破岩刀具通过螺栓连接到压力试验机上(见图2),刀具焊接的钢板厚度为20 mm,钢板四个角上留有孔,通过两个压板,用螺栓将刀具固定在上承压板上.



图1 恒加载压力试验机

Fig. 1 Picture of constant loading pressure tester

表1 试验机参数

Table 1 Tester parameter

压力/kN	上下承压板长宽/mm	上下承压板最大间距/mm	外形长宽高/mm	示值精度/%	电压/V	功率/kW
2 000	250×200	320	850×400×1350	±1	380	1.5



图2 刀具安装

Fig. 2 Cutter installation picture

调整并固定试验台上部压板的位置,利用液压系统按设定加载条件驱动下部压板向上运动,下部压板推动岩石形成破碎.试验中根据压板的宽度以及上下压板之间的距离,选用20 cm×20 cm×20 cm的黄金麻,芝麻灰,芝麻黑3种花岗岩作为研究对象.花岗岩是岩浆岩,按所形成的环境来分,属深成岩,岩性均一,变化较小,岩体结构呈典型的块状,岩石性能如表2.

表2 岩石性能

Table 2 Rock performance

岩石类型	密度/(g·mm ⁻³)	弹性模量/GPa	泊松比	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa
黄金麻	2.57	70.8	0.28	100	15.4
芝麻灰	2.79	72.3	0.28	132.5	16.8
芝麻黑	2.78	73.8	0.28	132.3	16.8

试验以0.5 kN/s,1 kN/s,1.5 kN/s加载速率分别对3种花岗岩进行破岩试验,岩

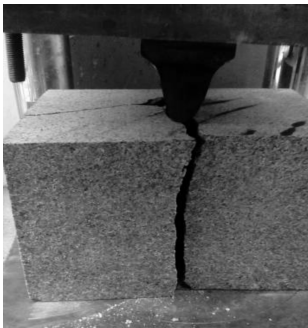
石破碎如图3~图5所示.



(a)黄金麻



(b)芝麻灰



(c)芝麻黑

图3 0.5 kN加载速率时岩石破碎情况

Fig. 3 Rock breaking at 0.5 kN loading rate

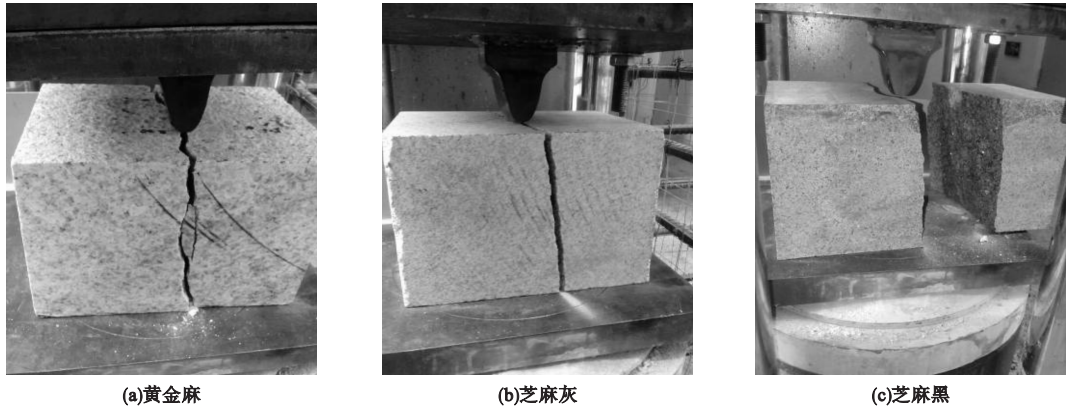


图 4 1 kN 加载速率时岩石破碎情况
Fig. 4 Rock breaking at 1 kN loading rate

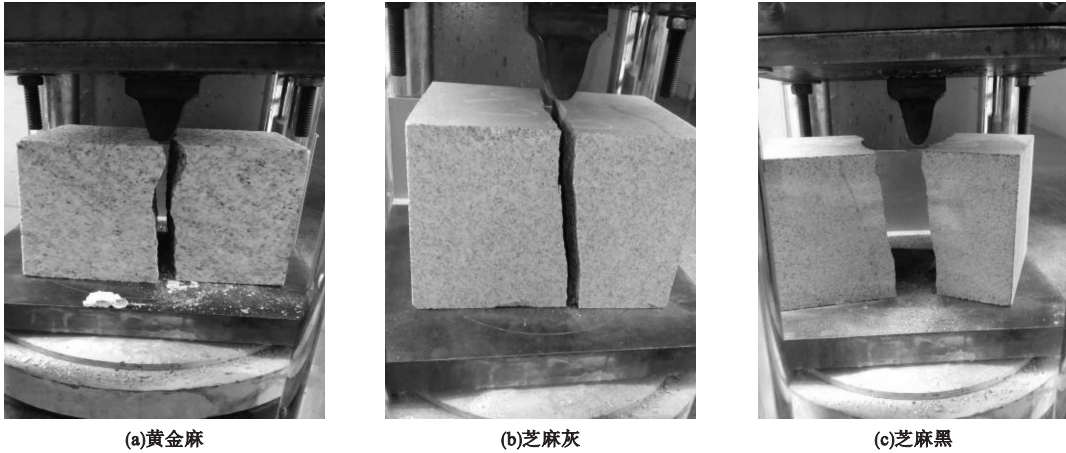


图 5 1.5 kN 加载速率时岩石破碎情况
Fig. 5 Rock breaking at 1.5 kN loading rate

由图 3 ~ 图 5 可知,黄金麻样岩的崩裂距离随加载速率下逐渐变大. 这说明随着加载速率的增加,黄金麻破坏时释放的能量在增大,岩石的动能与移动距离也在增加.

不同加载速率下芝麻灰花岗岩的崩裂距离都不大. 这说明芝麻灰破坏时释放的能量小,产生动能小、移动距离短. 芝麻黑花岗岩在破碎过程中产生了多次加载速率的波动,这与岩石自身的材料性质有关,芝麻黑花岗岩致密;芝麻黑的试件崩裂距离较大,所需的破岩压力也大. 通过试验台压碎试验可以得到 3 种岩石在不同加载速率下的破岩力的大小,绘制破岩力随加载速率变化的曲线图(见图 6).

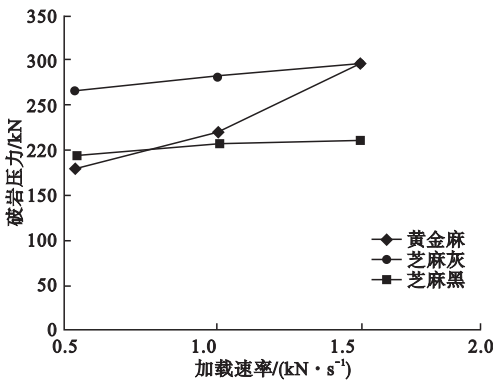


图 6 破岩力与加载速率变化曲线
Fig. 6 The curve of breaking force and loading rate

由图 6 可看出,3 种岩石中,芝麻黑的破岩压力最大. 3 种岩石破碎压力都随着加载速率的提高而增大,芝麻灰花岗岩和芝麻黑

花岗岩的破岩力随着加载速率的增加而缓慢增加. 黄金麻花岗岩的破岩压力随着加载速率的增加而快速增大. 3 种花岗岩的破岩力范围在 180 ~ 300 kN, 该数值为试验台的设计参数确定提供了数据支持.

2.2 滚刀试验台设计

双滚刀试验台可以对岩石掘进机设计过程中岩石的可切削性、岩石破碎机理和刀具位置布置对破岩效率的影响进行试验, 获得相应数据, 用于结构设计与施工设计.

根据上海交通大学 640 教研室预测公式可知, 由破岩径向力, 根据滚刀轴向力和滚动力的预测公式^[21], 可计算出滚刀各向力的大小:

$$F_s = \frac{F_v}{2 \tan \frac{\alpha}{2}}, \tag{5}$$

$$F_R = F_v \left(\sqrt{\frac{h}{D}} + \mu \frac{d}{D} \right). \tag{6}$$

式中: F_s 为滚刀侧向力; F_v 为滚刀垂直力; F_R 为滚刀滚动力; h 为滚刀预定切深; D 为滚刀刀圈外径; d 为刀轴直径; μ 为当量摩擦系数, 一般取 0.02.

根据破岩试验结果及各向力的计算、合成、并综合考虑安全系数等因素, 拟定设计的双滚刀岩石试验台滚刀径向最大可承受载荷为 1 000 kN, 双滚刀前后、侧向间距可调, 双滚刀侧向间距 0 ~ 150 mm 可调, 前后调整间距 300 ~ 500 mm, 试件台和刀具由液压系统驱动, 由试件与刀具的相对运动, 模拟滚刀滚压岩石, 液压缸活塞行程最大 300 mm, 滚刀滚压速度 0.2 ~ 1.5 m/s.

设计的双滚刀岩石综合试验台见图 7. 该试验台全部由液压系统驱动, 滚刀安装于滚刀架上, 滚刀架安装在刀盘上, 刀盘由液压系统带动可实现调节, 移动工作台带动试件台在滑动导轨上进行运动.

工作台(见图 8)由液压系统带动在试验台的导轨上滑动, 工作台底部有滑动导轨面; 试件台在工作台上, 岩石试件放置在试件台

内, 试件台通过液压缸对其在工作台上的位置进行调整.

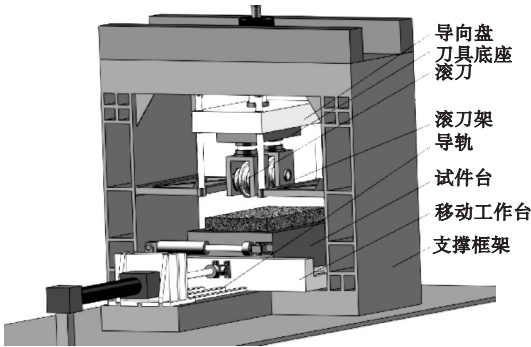


图 7 双滚刀岩石试验台
Fig. 7 Double disc cutters test bed

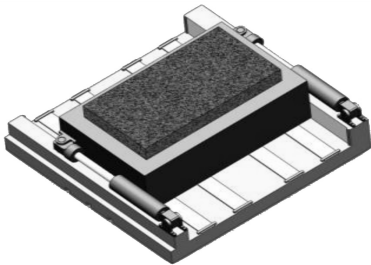
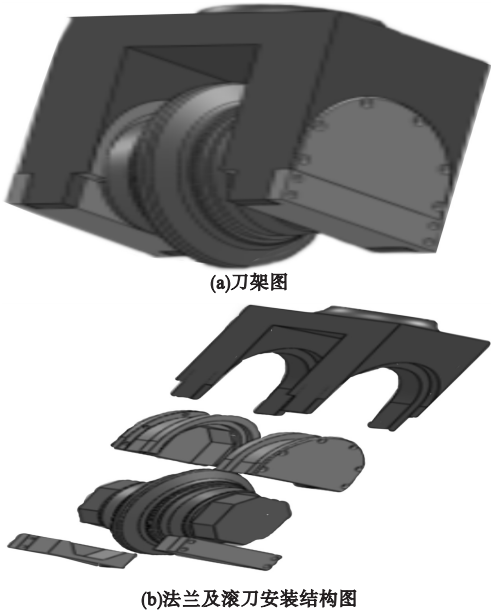


图 8 工作台及试件台结构
Fig. 8 Worktable and specimens table

刀架两侧加法兰和底部支撑法兰的刀架结构见图 9. 滚刀通过两侧法兰及底部法兰固定在刀架内部, 刀架通过螺栓与底座相连.



(b)法兰及滚刀安装结构图

图 9 刀架结构图

Fig. 9 Disc cutter holder

刀盘系统(见图 10)主要包括刀盘底座,侧向刀座及其滑移、锁紧装置,前后向刀座及其滑移、锁紧装置。

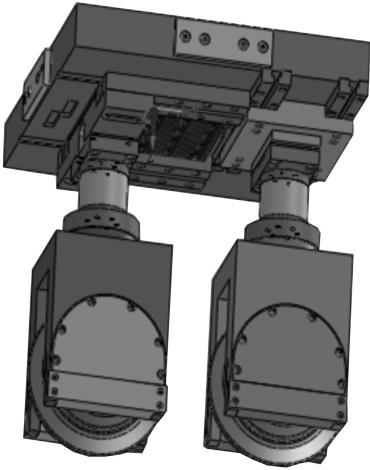


图 10 刀具系统结构图

Fig. 10 Disc cutter system

侧向刀座及其滑移、锁紧装置见图 11。刀座通过 T 型螺栓在刀盘 T 型槽中滑动;其中外侧 8 个螺栓起锁紧作用,中间 4 个起限位作用;通过手轮驱动滚珠丝杠副的螺母旋转,从而带动滑台移动,调节刀具侧向间距。

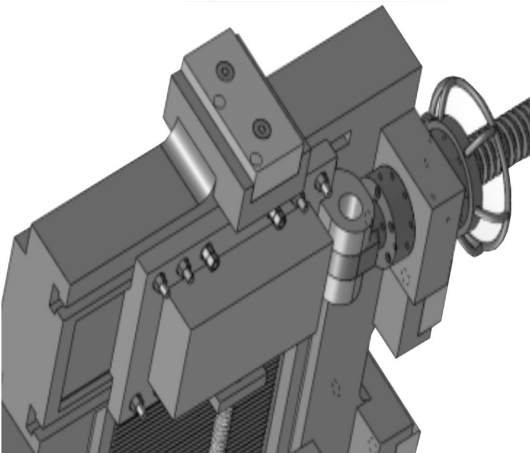


图 11 侧向刀具间距调节结构图

Fig. 11 Lateral cutter distance adjustment structure diagram

前后向刀座及其滑移、锁紧装置见图 12。通过分析,前后向刀具受力较大,为了增加前后向刀座的刚度和强度,通过螺栓使其

与刀盘底座的锯齿形螺牙锁紧,螺牙间距为 10 mm,调整范围为 300 ~ 500 mm,每间隔 10 mm 进行调整。

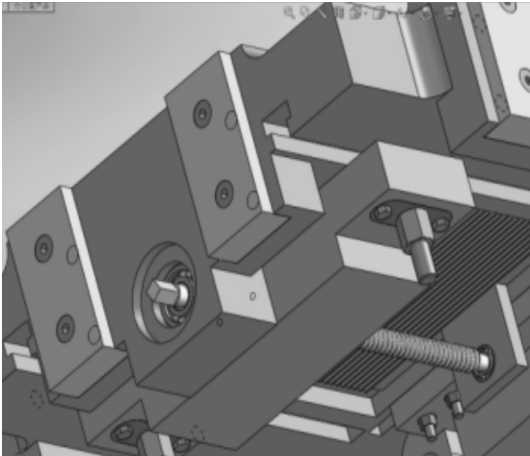


图 12 前后刀间距调节结构图

Fig. 12 Front and rear cutter distance adjustment structure diagram

2.3 试验台分析

破岩时,样岩放置试件台内并固定,通过试件台推动液压系统调节至起始位置,通过刀具底座的传动丝杠调整滚刀前后、侧向间距达到设定值。调节刀盘液压系统,使滚刀调整至试验设定贯入度。通过工作台液压系统带动工作台沿导轨按试验设定滚压速度移动,完成滚刀破岩试验。试验台可通过调整滚刀架安装直径 483 mm、432 mm 和 356 mm 3 种尺寸的盘形滚刀。

由工作过程可知,试验台的主要受力部件为滚刀架及刀盘底座,试验台支撑框架。采用 ABAQUS 分析软件,对试验台的核心受力部件进行了有限元分析,按照试验台设计载荷对受力部件进行加载,分析计算结果如图 13 所示。

图 13(a)为滚刀架按设计载荷加载时的应力分布图,从该图中可以看出滚刀破岩时所受的力由刀架承受,并将力传递给刀盘,最终由导向杆传递至试验台顶梁。由仿真结果得出该仿真条件下,试验台滚刀架所受最大应力值为 177 MPa,此应力出现在滚刀架与

刀盘的连接处.

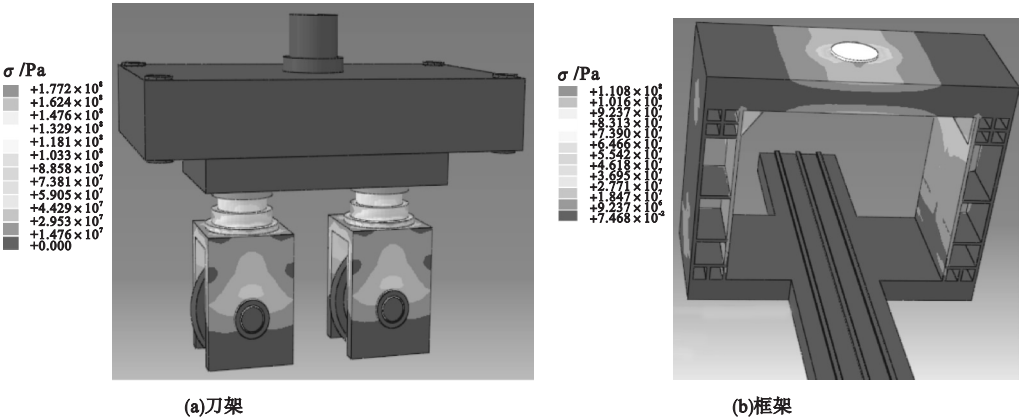


图 13 试验台应力分析

Fig. 13 Stress analysis of test bed

图 13(b)为试验台在设计参数载荷下,支撑框架的应力分布图.滚刀破岩时滚刀所受的力同时经过刀盘和工作台两个路线传递至支撑框架.框架是试验台最重要的受力部件,通过按设计参数的加载分析,可得框架的受力分布图,最大应力为 110.8 MPa,位于支撑框架的顶部与刀盘连接处.

由有限元分析结果可以看出,试验台在破岩时产生的破碎力通过刀具系统传递至试验台各部件,最大的应力值为 177 MPa,本试验台的支撑框架采用铸铁,刀架采用 16 Mn,经分析的应力值在试验台滚刀架和框架制造材料的许用应力范围内,试验台受力可满足使用要求.

2.4 试验台的调试及试验

2.4.1 试验台运行调试

试验台的安装直接决定着测得数据的精确度,影响数据的科学性、可靠性、准确性.主体和测力机构就位后,利用水平仪进行找正.支撑框架立柱要保证安装时与导轨的垂直,通过调整斜铁并拧紧地脚螺丝.安装完成的试验台如图 14 所示.

安装好试验台最大试验力相匹配的检定用的标准测力仪后,进行液压系统的调试,预加载 3 次并观察测力仪的加、卸荷过程的示值及回零差.当符合预定拉力、压力要求,重



图 14 安装完成的试验台

Fig. 14 Installed test bed

启液压系统,调节送、回油阀油量,缓慢调整至接近最大力值点并使示值于稳定,记录加载前后的示值并计算最大变动值.

2.4.2 试验测试

利用设计制造的试验台进行了试验测试,选择工程上常见的普通花岗岩,该种石材的物理特性参数如表 3 所示,抗压强度小于芝麻灰与芝麻黑花岗岩.破岩试验采用贯入度为 10 mm,侧向刀间距为 76 mm,滚压速度

表 3 花岗岩特性参数表

Table 3 Granite characteristic parameters

密度/ ($\text{g} \cdot \text{mm}^{-3}$)	抗压强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	弹性模量/ GPa	泊松比
2.64	127.5	18.6	67	0.17 ~ 0.36

1.5 m/s. 花岗岩的破岩效果如图 15 所示.



图 15 双滚刀破岩试验图

Fig. 15 Picwre of double disc cutters breaking rock test

通过试验台的滚压力测试采集系统对花岗岩破岩力进行测试,获得滚刀滚压花岗岩过程中的受力曲线如图 16 所示. 由曲线可知,破岩过程中,滚刀受力最大值为 702.3 kN,最小值为 595 kN. 花岗岩的滚压破碎中,滚刀受到的冲击力较大且变化明显,由于变化频率大,导致滚刀受力出现明显波动,滚刀受力不稳定. 由试验测试及分析可知,所设计的试验台在滚压岩石时,破岩力在设计范围内,试验台能够满足试验要求.

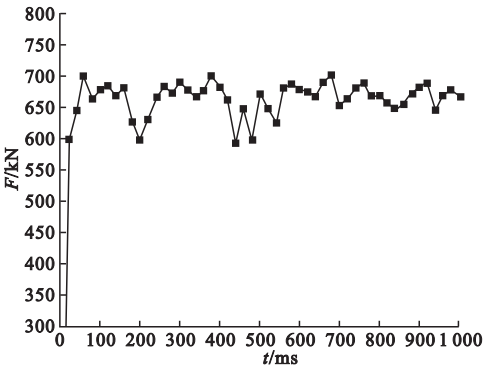


图 16 滚刀系统受力情况

Fig. 16 Force condition of disc cutter system

3 结 论

(1)通过滚刀单向加载的破碎试验显示,3 种花岗岩的破岩压力随着加载速率的增大而增大,芝麻灰和芝麻黑两种岩石增加

缓慢,黄金麻显著增加,3 种岩石的破碎力在 180 ~ 300 kN,以此作为原始数据进行滚刀试验台的设计.

(2)设计的试验台主要包括刀具刀盘系统、工作台系统、液压系统等,通过对主要受力部件的分析,均未超过材料的许用应力,满足使用要求.

(3)在最高滚压速度下,对花岗岩进行了破岩验证试验,获得了破岩力随时间变化的关系.

参考文献

[1] 王贺,吴玉厚,孙健,等. 双滚刀岩石综合试验台分析与破岩试验研究[J]. 机械设计与制造,2017,1(1):182 - 185.
(WANG He, WU Yuhou, SUN Jian, et al. Analysis and experimental research on rock breaking test bed with double disc cutters[J]. Machinery design & manufacture,2017,1(1): 182 - 185.)
[2] 王梦恕. 我国隧道技术现状和未来发展趋势[J]. 安徽建筑,2015 (4):9 - 13.
(WANG Mengshu. Status of tunneling technique and development tendency in China[J]. Anhui architecture,2015 (4):9 - 13.)
[3] MAIDL O, SCHMID L, RITZ W, et al. Hardrock tunnel boring machines[M]. Berlin: Ernst & Sohn Wiley Company,2008.
[4] 张珂,王贺,吴玉厚,等. 全断面硬岩 TBM 滚刀磨损关键技术分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2009,25(2):351 - 354.
(ZHANG Ke, WANG He, WU Yuhou, et al. Analysis on key wear technology of the TBM disc cutter[D]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2009, 25 (2): 351 - 354.)
[5] 刘志杰,史彦军,滕弘飞. 基于实例推理的全断面岩石隧道掘进机刀盘主参数设计方法[J]. 机械工程学报,2010,46(3):158 - 164.
(LIU Zhijie, SHI Yanjun, TENG Hongfei. Case-based reasoning approach for cutterhead principal parameter design of full face rock tunnel boring machine[J]. Journal of mechanical engineering,2010,46(3):158 - 164.)

- [6] ZHAO X B, YAO X H, GONG M G, et al. Comparison study on rock crack pattern under a single normal and inclined disc cutter by linear cutting experiments[J]. Tunnelling and underground space technology, 2015 (50): 479 – 489.
- [7] HUO J Z, SUN W, CHEN J, et al. Disc cutters plane layout design of the full-face rock tunnel boring machine(TBM) based on different layout patterns[J]. Computers & industrial engineering, 2011 (61): 1209 – 1225.
- [8] JUNG W C, SEOKWON J, SANG H Y, 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): 230 – 244.
- [9] WANG L H, KANG Y L, ZHAO X J, et al. Disc cutter wear prediction for a hard rock TBM cutterhead based on energy analysis[J]. Tunnelling and underground space technology, 2015 (50): 324 – 333.
- [10] MARTIN E, STEFAN L, ROBERT G. Tunnel boring machine performance prediction with scaled rock cutting tests[J]. International journal of rock mechanics & mining sciences 2014 (70): 450 – 459.
- [11] LEE S W, CHANG S H, PARK K H, et al. TBM performance and development state in Korea[J]. Procedia engineering, 2011 (14): 3170 – 3175.
- [12] 蔡美峰. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
(CAI Meifeng. Rock mechanics and engineering[M]. Beijing: Science Press, 2002.)
- [13] RAMONI M, ANAGNOSTOU G. Tunnel boring machines under squeezing conditions[J]. Tunnelling and underground space technology, 2010 (25): 139 – 157.
- [14] BALCI C, TUMAC D. Investigation into the effects of different rocks on rock cuttability by a V-type disc cutter[J]. Tunnelling and underground space technology, 2012 (30): 183 – 193.
- [15] MARTIN E, STEFAN L, ROBERT G. Tunnel boring machine performance prediction with scaled rock cutting tests[J]. International journal of rock mechanics & mining sciences, 2014 (70): 450 – 459.
- [16] 赵扬锋, 张超, 刘力强, 等. 循环载荷作用下岩石多参量特征规律研究[J]. 中国安全科学学报, 2016, 26(5): 105 – 111.
(ZHAO Yangfeng, ZHANG Chao, LIU Liqiang, et al. Experimental research on multi-parameter rules of rock under cyclic loading [J]. China safety science journal, 2016, 26 (5): 105 – 111.)
- [17] WANG H, WU Y H, SUN H, et al. Analysis of rock comprehensive test bed with double disc cutters[J]. Advanced science letters, 2011, 4: 2747 – 2751.
- [18] ENTACHER M, WINTER G, BUMBERGER T, et al. Cutter force measurement on tunnel boring machines-system design[J]. Tunnelling and underground space technology, 2012 (31): 97 – 106.
- [19] LI J Y, GONG Q M, MA H S, et al. Use of indentation tests to study the influence of confining stress on rock fragmentation by a TBM cutter[J]. International journal of rock mechanics & mining sciences, 2014 (72): 261 – 276.
- [20] HONG S M, LI J Y, HONG G J. Numerical study of the effect of confining stress on rock fragmentation by TBM cutters[J]. International journal of rock mechanics & mining sciences, 2011 (48): 1021 – 1033.
- [21] 张照煌. 全断面岩石掘进机及其刀具破岩理论[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2003.
(ZHANG Zhaohuang. Full face rock tunnel boring machine and rock breaking mechanics [M]. Beijing: China Railway Press, 2003.)