

基于小尺度滚刀直线切割试验的岩石强度预测

耿麒¹, 李晓斌¹, 黄雨枫¹, 汪学斌^{1*}, 杨沐霖¹, 郭惠川², 章慧健³

(1. 道路施工技术与装备教育部重点实验室(长安大学), 陕西 西安 710064; 2. 中铁十八局集团有限公司, 天津 300222; 3. 西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031)

摘要:为支撑岩土、隧道工程中的岩石选样及现场施工的岩石强度测试,研究利用小尺度滚刀直线切割试验反推岩石强度。从隧道工程现场和岩石矿场采集单轴抗压强度为50~230 MPa的岩石试样共9批次,制备棒状和块状试样并分别开展单轴压缩、巴西劈裂和小尺度滚刀直线切割试验;选取其中7批次试验数据,分别得到单轴抗压强度、劈裂抗拉强度与直线切割试验的法向力均值、峰值及峰均值的拟合函数,用剩余2批次试验结果验证所得预测模型的准确性。结果表明:岩石单轴抗压强度与法向载荷的拟合相关系数大于0.9,劈裂抗拉强度与法向载荷的拟合相关系数大于0.8,说明岩石强度与切割载荷成强线性相关性;验证试验发现,利用法向力均值、峰均值验证时,岩石单轴抗压强度的预测值与试验值误差小于5%,劈裂抗拉强度的预测值与试验值误差小于10%,说明所建模型具有较高的准确性。使用本研究所提出的试验方法及所建模型,可以快速准确地预估岩石试样的强度,为室内试验时岩石采样和现场施工时岩石强度评估提供了一种有效的手段。

关键词:滚刀破岩;岩石强度;直线切割试验;缩尺试验;预测模型

中图分类号:TU458+3

文献标志码:A

引用格式:耿麒, 李晓斌, 黄雨枫, 等. 基于小尺度滚刀直线切割试验的岩石强度预测[J]. 山东大学学报(工学版), 2025, 55(3): 111-120.

GENG Qi, LI Xiaobin, HUANG Yufeng, et al. Rock strength prediction based on scaled linear cutting test by disc cutter[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2025, 55(3): 111-120.

Rock strength prediction based on scaled linear cutting test by disc cutter

GENG Qi¹, LI Xiaobin¹, HUANG Yufeng¹, WANG Xuebin^{1*}, YANG Mulin¹, GUO Huichuan², ZHANG Huijian³

(1. Key Laboratory of Road Construction Technology and Equipment, Ministry of Education (Chang'an University), Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. China Railway 18th Bureau Group Corporation Limited, Tianjin 300222, China; 3. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China)

Abstract: In order to support geotechnical and rock sample selection in tunnel engineering and rock strength testing in on-site construction, the research used scaled linear cutting test to infer rock strength. A total of 9 batches of rock samples with uniaxial compressive strength of 50-230 MPa were collected from tunnel engineering sites and rock mines. Rod-shaped and block-shaped samples were prepared and subjected to uniaxial compression, Brazilian splitting and scaled linear cutting test respectively; selected 7 batches of test data to obtain the fitting functions of the uniaxial compressive strength, splitting tensile strength and normal force mean, peak value and peak mean value of the scaled linear cutting test, and used the remaining 2 batches of test results to verify the accuracy of the resulting prediction model. The results showed that the fitting correlation coefficients between rock uniaxial compressive strength and normal load were greater than 0.9, and the fitting correlation coefficients between splitting tensile strength and normal load were greater than 0.8, indicating that rock strength had a strong linear correlation with cutting load. The verification test found that when using the average normal force and the average peak value to verify, the error between the predicted value and the experimental value of the uniaxial compressive strength of the rock was less than 5%, and the error between the predicted value and the experimental value of the splitting tensile strength was less than 10%. It showed that the built model had high accuracy. Using the test methods and models proposed in this research, the strength of rock samples could be quickly and accurately estimated, which provided an effective means for rock sampling during indoor testing and rock strength assessment during on-site construction.

Keywords: rock breaking by disc cutter; rock strength; linear cutting test; scaled test; predictive model

收稿日期:2024-07-15

基金项目:国家自然科学基金面上资助项目(52278390);陕西省自然科学基金面上资助项目(2025JC-YBMS-416);陕西省留学人员科技活动择优资助项目(2024006)

第一作者简介:耿麒(1989—),男,山东淄博人,副教授,博士生导师,博士,主要研究方向为大型隧道掘进装备研制及施工。

E-mail: gengqi@chd.edu.cn

* **通信作者简介:**汪学斌(1986—),男,陕西商洛人,讲师,硕士生导师,博士,主要研究方向为工程机械的设计与仿真。

E-mail: wangxuebin@chd.edu.cn

0 引言

强度是岩石最重要的力学性能指标,以单轴抗压强度和劈裂抗拉强度的应用最为普遍^[1]。在隧道机械化掘进施工中,需要快速获取不同围岩的强度以匹配设备的运转参数^[2-3];在室内研究中,常需要采集制备不同强度的岩石试样来开展特定试验。然而,由于工程现场及岩石矿场试验条件有限,不易快速准确获取岩石强度。

测试岩石强度最普遍可靠的方法是单轴压缩和巴西劈裂试验,需要按照相应标准^[4]进行岩石试样制备和加载,所得岩石强度结果最为准确可靠,同时能获得杨氏模量、泊松比等多项力学性质参数,但是需要专门的大型试验设备,且试验过程要求严格、制样精度要求高、试验周期较长。在工程现场,常用的岩石强度粗估方法是点载荷试验,一般采用点载荷仪对岩石试样直接压载,该方法所需设备简便易携带、对岩石试样无严格专门要求,但该方法测得的岩石抗压强度误差相对较大,一般为5%~70%^[5],且无法获得岩石的抗拉强度。鉴于此,本研究提出一种借助小尺度滚刀直线切割试验以快速准确测试岩石强度的方法。

滚刀直线切割试验是指利用全尺度或小尺度滚刀直线切割试验台,如图1^[6]所示,通过控制滚刀和岩石的相对运动,模拟全断面岩石隧道掘进机(tunnel boring machine, TBM)的滚刀破岩过程。在全尺度试验研究方面:文献[7]基于大量的滚刀直线切割试验,建立了较为可靠的CSM(Colorado School of Mines)模型以预测平刃滚刀破岩载荷;文献[8-9]开展不同刀间距和贯入度的滚刀直线切割试验,研究刀间距和贯入度对破岩机理及破岩效率的影响;文献[10]开展了8种不同强度岩石(36~183 MPa)的滚刀直线切割试验,确定了针对每种岩石的最优刀间距与贯入度比值;文献[11-12]基于滚刀直线切割试验,分析了围压对滚刀破岩载荷和破岩效率的影响;文献[13]针对3种不同强度的岩石开展滚刀直线切割试验,将试验结果与CSM公式对比,对CSM公式进行修正;文献[14]开展了不同刃宽滚刀直线切割硬岩试验,发现刃宽为12 mm时滚刀法向力最小、破岩效率最高;文献[15]用V型滚刀对3种不同强度岩石开展直线切割试验,并与TBM现场掘进所得滚刀平均载荷进行了对比。由于全尺度滚刀直线切割试验规避了尺寸效应的影响,因此其试验结果可

准确反映TBM滚刀的实际破岩情况。然而,全尺度滚刀直线切割试验台属于大型专用设备,造价昂贵、试验周期长、试验成本高,用其开展批量试验的难度较大。

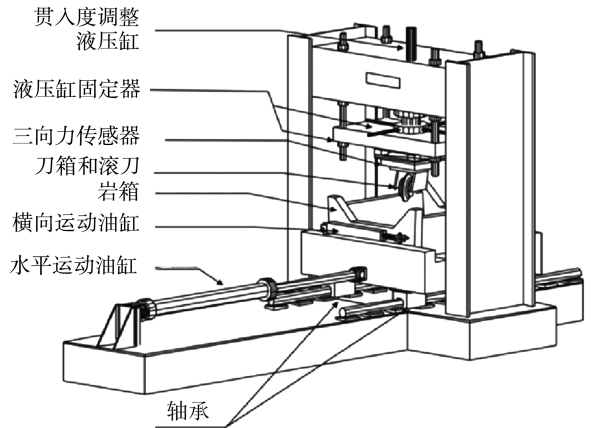


图1 全尺度直线切割试验台^[6]
Fig.1 Full-scale linear cutting rig^[6]

许多国内外学者研制了各种形式的小尺度滚刀直线切割试验台,用于开展滚刀破岩机理或滚刀磨损研究。文献[16]基于滚刀直线切割试验,研究了滚刀破岩时裂纹扩展的宏观变化和微观机理;文献[17]基于滚刀直线切割试验和仿真,揭示了滚刀切削过程中滚刀磨损的演变特性;文献[18]在不同边界条件下对花岗岩开展滚刀直线切割试验,研究了不同贯入度下破岩效能的变化规律;文献[19]针对10种岩石开展了小尺度和全尺度滚刀直线切割试验,对两套试验所得破岩载荷进行了关联性分析;文献[20]开展了水射流预切槽辅助的小尺度滚刀直线切割岩石试验,分析了预切槽位置和尺寸对滚刀破岩载荷的影响规律;文献[21]开展了新型螺旋槽滚刀直线切割软岩的小尺度试验,分析了刃形对滚刀破岩效率的影响规律。相比全尺度试验,小尺度滚刀直线破岩试验的设备成本低、制作方便、灵活便捷、结果可靠,在研究岩石强度、滚刀尺寸与刃形、切削参数等各种因素对破岩效果的影响规律方面,具有很强的可实施性。然而,受制于尺寸效应,小尺度试验所得结果一般仅用于定性分析,需要进行与全尺度情况的关联分析方可指导工程实践。

上述研究说明,现有的滚刀直线切割试验大多关注破岩机理及效率,从而指导TBM设备的设计、优化和掘进参数优选,鲜有通过直线切割试验来反向预测岩石强度的探究。本研究基于课题组自主研发的小尺度滚刀直线切割试验台,针对9批次不同类型与强度岩石开展直线切割试验,并

开展标准的单轴压缩与巴西劈裂试验,将岩石抗压和抗拉强度与直线切割载荷进行拟合,所得预测模型可对强度为 50~230 MPa 范围内的岩石进行快速准确强度预估,从而为室内试验的岩石选样及现场施工的岩石强度测试提供一种有效的手段。

1 试验设备与岩石试样

1.1 单轴压缩及巴西劈裂试验设备

为避免试验结果的局限性,采用图 2 所示的 2 套岩石力学性能测试设备开展单轴压缩和巴西劈裂试验。随机选取 4 批次岩石,使用图 2(a)所示的西南交通大学 GCTS 岩石三轴系统开展试验。该试验系统符合国际岩石力学学会制定的岩石三轴试验标准,可基于应变或应力控制策略测定岩石的各种力学和物性参数。使用图 2(b)所示的西安理工大学多功能材料试验机对剩余 5 批次岩石进行试验。该试验机由三轴压缩和直剪两套试验模块构成,采用了德国 DOLI 公司 EDC 全数字伺服测控器、自平衡压力室、轴向和径向变形引伸计等技术,配备了声波检测系统,可进行复杂应力条件下的单、三轴压缩试验、剪切试验、疲劳试验和流变试验,并可进行试验过程中的实时声波检测。

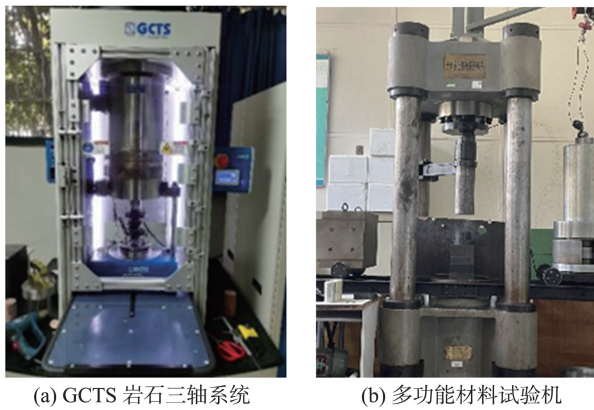


图 2 岩石力学性能测试设备

Fig.2 Rock mechanical properties testing equipment

1.2 小尺度滚刀直线切割试验台

使用图 3 所示的小尺度滚刀直线切割试验台进行滚刀直线切割岩石试验,其工作原理与全尺度滚刀直线切割试验台相同。试验台总体结构为“立式框架+双层岩箱”形式,滚刀箱与三向力传感器安装在纵向丝杠下方的承力平台上,通过转动纵向丝杠使滚刀竖向升降以调节其贯入深度,通过转动横向丝杠使传感器和刀箱水平移动以调节滚刀切削位置,使用内外层岩箱间的液压千斤顶夹紧岩石并施

加围压。三向力传感器的各通道量程为 0~50 kN,测试精度为 1 N,采样频率设置为 100 Hz。本次试验用滚刀为直径 432 mm 商用平刃滚刀的 1:10 缩小版,刀圈直径 43.2 mm、刃宽 1.2 mm。使用高强度合金钢进行刀圈机加工,并进行渗碳热处理,表面硬度达到 61 HRC;选用高强度滚动轴承对刀轴进行支撑。

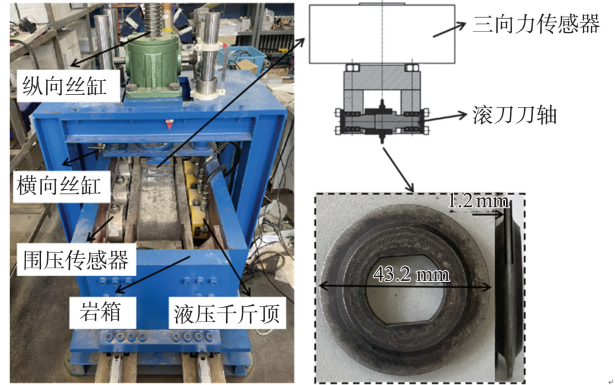


图 3 小尺度直线切割试验平台
Fig.3 Scaled linear cutting rig

1.3 岩石试样制备

对于单轴压缩和巴西劈裂试验,为了更准确地获取实际工程条件下岩石力学性质参数,采用原岩材料进行试验。为使本研究具有一定的普遍性和通用性,结合研究者目前所接触的隧道工程现场及岩石矿场的既有货源,选取了 9 种具有不同岩性和构造的岩石,包括 5 种沉积岩和 4 种火成岩。然而,本研究并未针对典型的变质岩进行采样研究,导致研究结论可能存在一定的局限性,需要在后续研究中持续补充。针对本研究目标,以单轴抗压强度作为岩石选取的主要考量因素,所选取的 9 种岩石结构完整、无明显裂隙,单轴抗压强度范围为 50~230 MPa。原状岩样都进行了钻取、切割和打磨 3 道工序,首先使用直径规格为 50 mm 的金刚石钻筒进行钻孔取芯;然后将钻取出来的岩芯放在切割机上上进行切割,切割量略高于试件标准高度 100 mm,在两端留有余量;最后将切割好的试样固定在自动打磨机上,将岩样的两端磨平。单轴压缩和巴西劈裂试验岩样制备工序如图 4 所示。



图 4 单轴压缩和巴西劈裂试验岩样制备工序

Fig.4 Rock sample preparation procedures for uniaxial compression and Brazilian splitting tests

制备滚刀直线切割试验用岩石试样时,仅对现场和矿场采集到的原岩试样进行初步切割加工,重点确保顶、底两面的平行度。为规避边界效应的影响,结合小尺度滚刀切割的影响范围,建议试样的宽和高不小于 80 mm,且滚刀沿试样中部切割;为确保试样的正常装载和夹持,试样的长、宽、高分别不大于 500、200、150 mm;建议将试样切割成标准的长方体,但为提高取样制样的灵活性和试样利用率,如试样在确保顶、底面平行度的前提下,能牢固

夹持在岩箱中,则不对其侧面的平整度做额外要求。将用于进行单轴压缩和巴西劈裂试验的试样命名为试样 a—i,对应的用于进行直线切割试验的同种岩石命名为试样 A—I,所制备的岩石试样如图 5 所示。可以发现,各组试验的岩石规格并不一致,尤其试样 D、F 和 I 的侧面不规整,为已开展的滚刀破岩试验的废料,但在顶、底面平整平行且试样内部无明显破裂的前提下,仍可用于本试验研究,可提高试样的利用率。


















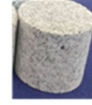
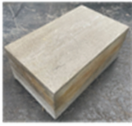
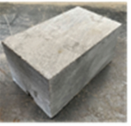

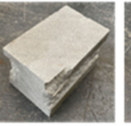
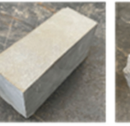
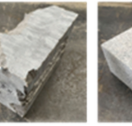



岩石种类	黄砂岩1	石灰岩1	玄武岩	黄砂岩2	灰砂岩	石灰岩2	花岗岩1	花岗岩2	闪长岩
单轴压缩 试样									
直径(mm)× 高度(mm)	试样a 50×100	试样b 50×100	试样c 50×100	试样d 50×100	试样e 50×100	试样f 50×100	试样g 50×100	试样h 50×100	试样i 50×100
巴西劈裂 试样									
直径(mm)× 高度(mm)	试样a 50×50	试样b 50×50	试样c 50×50	试样d 50×50	试样e 50×50	试样f 50×50	试样g 50×50	试样h 50×50	试样i 50×50
直线 切割 试样									
长(mm)× 宽(mm)× 高(mm)	试样A 250×150×100	试样B 250×150×120	试样C 400×160×80	试样D 150×100×100	试样E 200×80×100	试样F 200×100×150	试样G 200×200×100	试样H 320×100×100	试样I 250×100×150

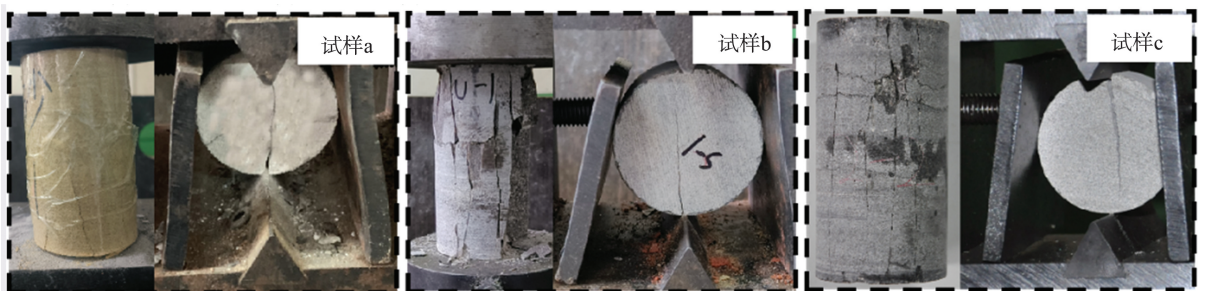
图5 岩石试样
Fig.5 Rock samples

2 试验结果分析

2.1 单轴压缩与巴西劈裂试验

9个批次的岩石单轴压缩与巴西劈裂破坏形态如图6所示。单轴压缩试验中的岩石主要呈现两种破坏模式:(1)竖向劈裂破坏,当岩石主裂隙与轴向压应力方向平行时,试样首先在主破裂面附近强度较弱区域出现次生裂隙,其后主裂隙沿原有方向继续扩展,最终连通导致试样破坏,

如试样 a—c、试样 f、试样 h 和试样 i;(2)竖向劈裂与剪切组合破坏,当主裂隙方向与轴向压应力方向呈一定夹角时,主破裂面产生,在岩石强度较低区域出现微破裂面,其后微破裂面继续扩展到原主破裂面处,最后表现出竖向劈裂与剪切组合的破坏形式,试样 d、试样 e 和试样 g 就是这种组合形式破坏,试样 g 硬且脆,故在压力最大时崩断破碎。9个批次岩石试样在巴西劈裂试验中都呈现出中部劈裂破坏形式,裂纹沿压载板扩展并相互连通。



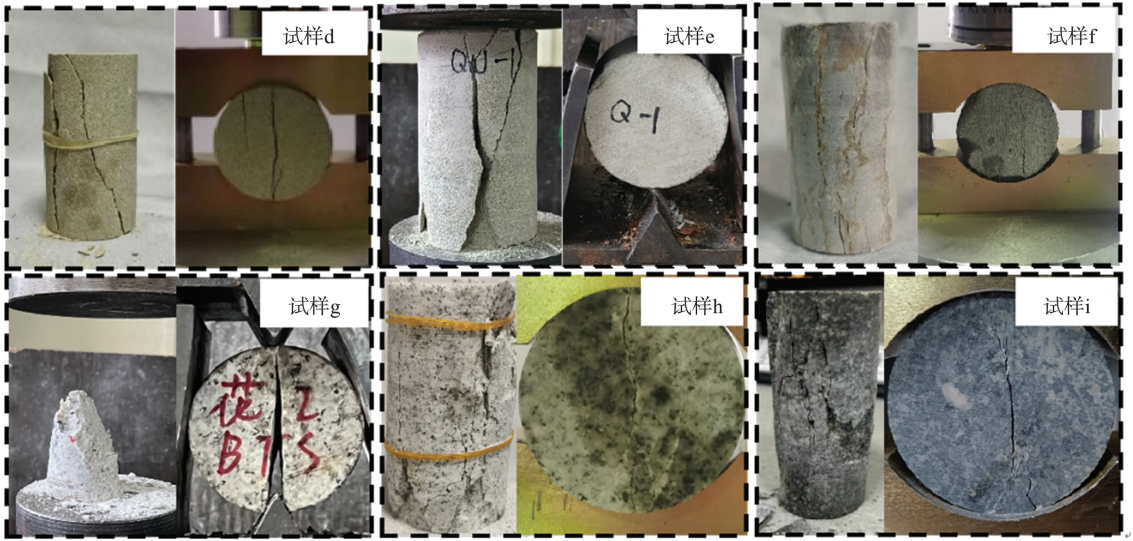


图6 试样 a—i 单轴压缩与巴西劈裂破坏形态

Fig.6 Uniaxial compression and Brazilian splitting failure morphology of specimens a-i

每种岩石分别重复3次单轴压缩和巴西劈裂试验,将试验数据记录整理,得9批次不同岩石的单轴抗压强度 σ_c 和劈裂抗拉强度 σ_t ,如表1所示。

表1 不同批次岩石的单轴抗压强度和劈裂抗拉强度
Table 1 Uniaxial compressive strength and splitting tensile strength of different rock samples

试样编号	试验序号	σ_c /MPa		σ_t /MPa	
		样本值	均值	样本值	均值
a	1	55.06		4.550	
	2	45.88	52.44	3.230	3.68
	3	56.38		3.260	
b	1	70.49		4.838	
	2	80.51	75.49	4.742	4.25
	3	75.47		3.171	
c	1	88.55		5.230	
	2	88.15	89.93	6.650	5.51
	3	93.09		4.650	
d	1	94.67		7.670	
	2	95.72	93.83	7.310	7.18
	3	91.09		6.570	
e	1	123.56		9.320	
	2	92.76	117.32	7.990	8.95
	3	135.64		9.540	
f	1	125.15		8.990	
	2	130.86	129.51	8.940	9.01
	3	132.52		9.100	
g	1	151.45		8.090	
	2	129.76	158.65	8.500	8.38
	3	194.74		8.550	
h	1	193.10		24.960	
	2	200.40	201.90	25.670	25.18
	3	212.30		24.920	
i	1	236.12		18.960	
	2	230.99	234.56	23.490	20.96
	3	236.57		20.430	

从试验结果看,同类型岩石的强度亦存在显著差别。黄砂岩1和黄砂岩2分别采集自四川省某矿场和重庆市某TBM隧道,其平均单轴抗压强度分别约为52 MPa和94 MPa;石灰岩1和石灰岩2分别采集自山东省某矿场和山西省某TBM隧道,其平均单轴抗压强度分别约为75 MPa和130 MPa;花岗岩1和花岗岩2分别采集自山东省和江苏省矿场,其平均单轴抗压强度分别约为159 MPa和202 MPa。上述差别的产生,可能是矿物组分、孔隙率、风化程度等多种原因造成的,来自隧道现场的岩石其强度明显高于来自矿场的岩石,推测因为隧道现场岩石埋深大、孔隙率小、风化程度低、强度高。总体而言,砂岩、石灰岩和花岗岩的强度是依次增大的,符合常规工程认知。

2.2 滚刀直线切割试验

对9个批次岩石进行滚刀直线切割试验,设定贯入度均为2 mm,具体考量如下:第一,所用的小尺度滚刀直线切割试验台虽然灵活方便,但由于滚刀、刀轴、轴承、刀箱及三向力传感器等关键零部件和装配体的尺寸较小、结合界面多,导致其刚度有限,在切削单轴抗压强度160 MPa以上的高硬岩时,当贯入度大于3 mm时,滚刀载荷峰值接近乃至超过15 kN,切削模块压缩变形量大,导致实际贯入度明显小于设定贯入度,同时滚刀卷刃、崩刃损坏和轴承损坏的频次显著增大,为全面考虑各种强度岩石的切削特性,建议设定贯入度不大于2 mm;第二,当设定贯入度小于1 mm时,切削结果受试样表面平整度、平行度和贯入度调定误差的影响很大,而在硬岩表面大多仅出现一道压痕而并未进入到破裂阶段。综上,建议设定贯入度固定为2 mm。

直接对岩石上表面进行单把滚刀直线切割,不对岩石表面进行预切处理,每组切割试验重复3次,各批次岩石切割后如图7所示。由图7可知,在2 mm贯入度下,岩石表面均有明显切痕,测量发现各组试验切痕深度均接近2 mm,与设定贯入度数值接近,而切痕宽度约为1.2 mm,与滚刀刀宽值接近。根据滚刀滚压破岩机理,滚刀破岩载荷主要取决于刀下密实核演化及压力分布情况,而岩碴产生则主要由于侧向裂纹向相邻切痕及岩石表面的生长和连通。当岩石强度较低时,如试样A—D,刀下不仅有明显的切痕,在切痕两侧亦不规则分布着由侧向裂纹连通至岩石表面而形成的凹坑,由于本试验为单刀切削,不存在相邻切痕连通而形成的大片岩碴。随着岩石强度的增大,滚刀切割岩石难度逐渐加大,切痕两侧岩碴凹坑减少且变小,因为此时破岩载荷不足以驱动侧向裂纹向岩石表面的生长连通,但在滚刀的强制碾磨切割作用下,滚刀正下方的岩石仍被切割碾碎,形成了一道孤立的平直切槽,这与实际TBM滚刀切割高硬岩的掌子面切痕形态类似,此时滚刀在极大载荷下碾磨掌子面,岩碴生成量少且细碎、破岩效率低,但滚刀磨损强烈。上述分析说明,小尺度滚刀的破岩过程与全尺度滚刀类似,从切痕形态上能总体反映出岩石强度对破岩难度的影响。



图7 各批次岩石切割破坏形态

Fig.7 Cutting failure forms of each batch of rocks

滚刀载荷可以直接、定量地反映破岩难度。9个批次岩石的切割法向力与滚刀切削时间的关系如图8所示。各组试验的法向力曲线形式总体是相似的,曲线的多阶段波动表明了脆性岩石的阶跃破坏形式,载荷曲线的波谷值并未直接降到0,这是因为刀下密实核被碾碎后,滚刀仍与岩石表面处于直接接触状态,而非脱空,这与全尺度滚刀破岩试验的载荷曲线形态是一致的。在滚刀切削的前10 s,不同批次岩石对应的法向力都随着滚刀的贯入而快速增大,而后滚刀法向力不再显著增长,而是围绕均值上下波动。对比不同岩石法向力曲线可知,各批次岩石的切割法向力大小有明显差距,说明在其他变量保持一致的前提下,岩石强度对破岩法向力有显著影响。9组试验的法向力均值分别约为2.4、3.0、3.4、3.2、4.4、4.8、5.6、7.1和7.7 kN,说明法向力随岩石强度的增大而逐渐增大,两者具有一定的正相关性,将于第3节详细分析其关系。需要指出,试样I的载荷曲线长度明显小于其他试样,这是为了提高试样利用率,在试样中部制备了分割槽,每组切割试验仅在半幅岩面开展。

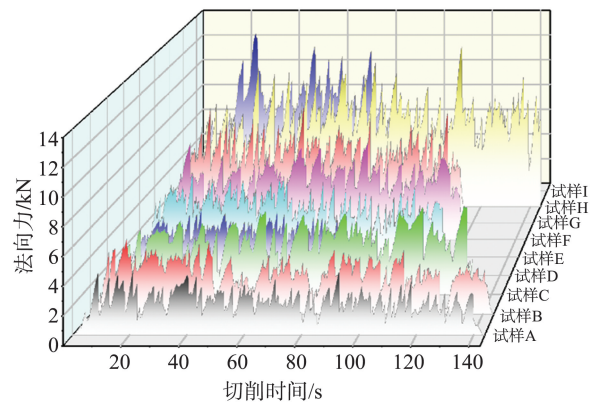


图8 各批次岩石试样法向力与切削时间关系曲线

Fig.8 Relationship curve between normal force and cutting time of each batch of rock samples

由于在滚刀直线切割试验前并未对岩石表面进行预处理,试验时可能出现破岩不稳定、载荷数据波动大的现象,故采用两个时间序列稳定性检验方法对9批次岩石试样的法向载荷数据进行稳定性分析。使用增强迪基-福勒(augmented Dickey-Fuller, ADF)检验^[22]和菲利普斯-佩隆单元根(Phillips-Perron unit root, PP)检验^[23]对9条曲线中间稳定段数据进行分析,分析结果如表2所示。两个检验方法的基本原理是判断在自回归模型中是否存在单元根,如果存在,则认为时间序列呈现出随机趋势并且是稳定的,表2中9条曲线的两个检验方法结果都为1,表明法向力是随机且稳定的,使用此时间段内的法向载荷数据对岩石强度进行

预测是可靠的。

表2 稳定性检验结果
Table 2 Stability test results

岩石试样	ADF	PP
试样 A	1	1
试样 B	1	1
试样 C	1	1
试样 D	1	1
试样 E	1	1
试样 F	1	1
试样 G	1	1
试样 H	1	1
试样 I	1	1

3 基于切割载荷的岩石强度预测

3.1 切割载荷与岩石强度拟合

在9批次岩石试样中试样C与试样D、试样E与试样F的单轴抗压强度相近,故选取试样C和试样E为检测预测模型准确性的样本,其余7批次岩石试验数据用来建立切割载荷与岩石强度的预测模型。对9批次岩石试样的法向载荷曲线进行处

表4 预测模型及统计参数

Table 4 Prediction models and statistical parameters

模型	变量	系数	标准差	均方误差	t 值	F 值	调整后 R ²	
单轴抗压强度拟合	$\sigma_c = AF_N + B$	A	32.29	1.50	7.52	21.46	0.958	
		B	-21.37	7.85				-2.72
	$\sigma_c = AF_{NP} + B$	A	18.48	1.20	14.06	15.41		0.922
		B	-12.84	10.38				
	$\sigma_c = AF_{NPM} + B$	A	31.11	1.37	6.77	22.66		0.962
		B	-21.58	7.44				
劈裂抗拉强度拟合	$\sigma_t = AF_N + B$	A	3.71	0.40	0.52	9.34	0.812	
		B	-6.73	2.07				-3.26
	$\sigma_t = AF_{NP} + B$	A	2.21	0.21	0.55	10.77		0.852
		B	-6.46	1.78				
	$\sigma_t = AF_{NPM} + B$	A	3.54	0.39	0.41	9.02		0.801
		B	-6.60	2.13				

7批次不同岩石试样法向载荷与对应岩石试样单轴抗压强度的拟合曲线如图9所示。由图9可知,岩石单轴抗压强度越大,滚刀切割法向力越大,且岩石的单轴抗压强度与法向力均值、法向力峰值和法向力峰均值线性关系显著,三者拟合的相关系数分别为0.9583、0.9220和0.9625,说明利用小尺度直线切割试验的滚刀法向力来预测岩石单轴抗压强度是可行的。由3个预测模型得出的各参数对比发现,利用法向力峰值得出的预测模型的均方误差是法向力均值和法向力峰均值预测模型的两倍,说明利用此模型计算的预测值与实际值偏差更大,

为规避边界效应,舍弃前、后各10s数据,使用中间稳定段数据进行计算,提取每条曲线的法向力均值 F_N (数据总平均)、法向力峰值 F_{NP} (数据最大值)和法向力峰均值 F_{NPM} (数据各波峰的平均值),提取整理的数据如表3所示。为避免拟合数据过少带来的误差,将每批次岩石重复三次的单轴抗压强度和巴西劈裂强度都与对应的法向载荷进行拟合。拟合得到的预测模型及统计参数如表4所示。

表3 不同批次岩石试样法向力

Table 3 Normal force of rock samples from different batches
单位:kN

试样编号	F_N	F_{NP}	F_{NPM}
A	2.416	4.294	2.528
B	3.047	5.274	3.178
C	3.381	6.298	3.483
D	3.240	4.795	3.398
E	4.382	6.186	4.535
F	4.824	7.328	4.964
G	5.572	9.198	5.767
H	7.134	12.615	7.297
I	7.710	12.584	8.165

拟合的效果相较于法向力均值和法向力峰均值更低,考虑原因为法向力峰值是整个切削过程中某一时刻的最大值,受岩石材质影响较大,导致其数值波动变化大,拟合效果下降。

7批次不同岩石试样法向载荷与对应岩石试样劈裂抗拉强度的拟合曲线如图10所示。由图10可知,岩石试样的劈裂抗拉强度与法向力均值、法向力峰值和法向力峰均值的线性拟合关系较显著,三者拟合公式的相关系数都大于0.8,说明利用直线切割试验的滚刀法向力预测岩石劈裂抗拉强度较为可靠。与利用法向载荷预测岩石单轴抗压强度相

比,预测岩石劈裂抗拉强度的准确性有所下降,可能原因有:岩石的劈裂抗拉强度数值小,9批次岩石的劈裂抗拉强度均小于25 MPa,其中试样a—g数值波动小,而试样g—h数值波动大,导致拟合效果变差;进行巴西劈裂试验时,两套仪器使用的夹具不同,GCTS岩石三轴系统为弧形压头,而多功能材料试验机为三角压头,使得两者试验得出的劈裂抗拉强度存在差异,但差异化设备与结果或许更能反映预测模型的普适性。

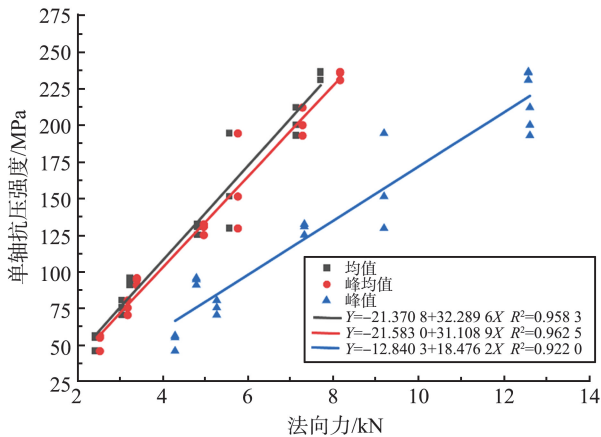


图9 法向载荷与单轴抗压强度的拟合曲线

Fig.9 Fitting curve of normal load and uniaxial compressive strength

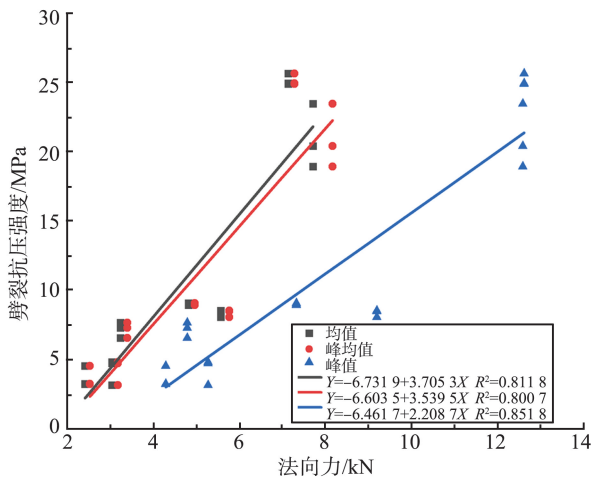


图10 法向载荷与劈裂抗拉强度的拟合曲线

Fig.10 Fitting curve of normal load and splitting tensile strength

3.2 预测模型验证

由3.1节分析可知,利用岩石试样的法向力均值和法向力峰均值预测岩石的单轴抗压强度和劈裂抗拉强度可靠性最高,将岩石试样C和试样E的法向力均值和法向力峰均值代入表4拟合公式中,拟合结果如表5所示。由表5可知,单轴抗压强度拟合方面,两种岩石试样利用法向力均值和法向力峰均值预测的结果与实际值误差较低,均控制在5%以内,而

使用法向力峰值拟合的结果误差超过10%;劈裂抗拉强度拟合方面,利用法向力均值和法向力峰均值预测的结果与实际值误差在10%以内,法向力峰值拟合的结果误差值较大。总体来看,基于切割载荷预测岩石强度的方法是可行的,在利用切割载荷预测岩石劈裂抗拉强度时虽然误差较大,但由于岩石劈裂抗拉强度在数值上较小,使得预测值与实际值在数值大小上相差不大。在预测岩石强度时推荐使用法向力均值和法向力峰均值的预测模型。

表5 单轴抗压强度与劈裂抗拉强度拟合结果对比

Table 5 Comparison of fitting results between uniaxial compressive strength and splitting tensile strength

岩石强度	岩石种类	拟合方式	拟合值	实际值	误差/%
单轴抗压强度拟合	试样C	均值拟合	87.800		2.37
		峰值拟合	103.520	89.93	15.11
		峰均值拟合	86.769		3.51
	试样E	均值拟合	120.122		2.39
		峰值拟合	101.450	117.32	13.53
		峰均值拟合	119.496		1.85
劈裂抗拉强度拟合	试样C	均值拟合	5.800		5.26
		峰值拟合	7.450	5.51	35.21
		峰均值拟合	5.720		3.81
	试样E	均值拟合	9.500		6.15
		峰值拟合	7.200	8.95	19.55
		峰均值拟合	9.450		5.59

3.3 与经典CSM模型的反问题对比

现有的滚刀载荷预测模型大多从正问题的角度,把岩石强度作为自变量,计算得到滚刀切削载荷,其中最具有代表性的为CSM模型^[7],其公式为

$$F_N = 2.12TR\varphi \sqrt{\frac{\sigma_c^2 \sigma_t S}{\varphi \sqrt{RT}}} \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right), \quad (1)$$

式中: F_N 为滚刀破岩法向力平均值; T 为滚刀刃宽; R 为滚刀半径; φ 为滚刀接岩角, $\varphi = \arccos\left(\frac{R-P}{R}\right)$, P 为贯入度; S 为刀间距。

对于特定TBM工程,在滚刀半径、刃宽、刀间距已知,通过主机获取贯入度和总推力数据后,可以基于CSM公式反向推断岩石强度。以试样I闪长岩为例,该试样采集自都四山地轨道交通项目紫荆隧道,该隧道使用直径为10.23 m的开敞式TBM施工,滚刀直径为483.2 mm,刃宽为19 mm,平均刀间距为80 mm,在该地段开展了不同推力等级的TBM现场掘进试验,滚刀平均法向力 F_N 与贯入度 P 的数据如表6所示,根据工程经验,假定闪长岩的 σ_c 与 σ_t 比值为10,计算得到 σ_c 与 σ_t 的预测值。

表6 紫荆隧道现场掘进数据与岩石强度预测值
Table 6 Data from field penetration tests in Zijing Tunnel Project and the predicted rock strength values

F_N/kN	P/mm	σ_c 预测值/MPa	σ_t 预测值/MPa
77.5	0.81	86.1	8.6
105.6	0.90	113.3	11.3
98.1	1.20	95.7	9.6
117.8	1.50	106.7	10.7
125.3	1.60	111.1	11.1
164.6	2.00	135.5	13.5
133.2	2.40	103.2	10.3
159.4	3.40	110.1	11.0
155.3	3.60	105.2	10.5
188.9	5.64	110.4	11.0
186.3	5.80	107.9	10.8
224.9	8.61	114.4	11.4
平均		108.3	10.8

闪长岩的单轴抗压和劈裂抗拉强度平均预测值分别为 108.3 MPa 和 10.8 MPa,与表 1 给出的试验值的相对误差分别为 54% 和 48%,远高于本研究所建模型的预测误差,主要原因如下:首先,CSM 模型是基于全尺度滚刀直线切割试验结果而回归建立的,本身具有一定误差,在预测 TBM 现场掘进性能时误差更大;其次,岩石的抗压和抗拉强度比值是假定的,与实际情况存在一定出入。上述分析说明,使用本研究试验方法和所建模型进行岩石强度预测,其准确度明显高于使用现有经典模型进行反向预测所得的结果。

4 结论

本研究开展 9 批次不同岩石的单轴压缩试验、巴西劈裂试验和滚刀直线切割试验,得出的主要结论为:(1)岩石在单轴压缩试验中呈现竖向劈裂破坏和竖向劈裂与剪切组合破坏,在巴西劈裂试验中呈现中部劈裂破坏,与目前公认的结果和理论一致;(2)滚刀直线切割试验中,不同批次岩石的法向力均随岩石强度的增大而增大,同时对法向力进行时间序列稳定性分析,分析结果显示均存在单元根;(3)利用 7 批次岩石试验数据建立预测模型,发现岩石强度与切割载荷呈显著的线性关系,法向载荷与岩石单轴抗压强度的拟合相关系数大于 0.9,与劈裂抗拉强度的拟合相关系数大于 0.8;(4)利用 2 批次岩石试验数据验证预测模型,当使用法向力均值和法向力峰均值预测模型时,预测的岩石单轴抗压强度误差在 5% 以内,单劈裂抗拉强度误差在 10% 以内;(5)本研究所建模型的预测精度,远高于

利用经典 CSM 模型反求岩石强度的方法。

理论方面,本研究通过滚刀直线切割试验,从法向载荷与岩石强度成正相关关系出发,建立了岩石强度与切割载荷的预测模型,利用预测模型可快速准确预测岩石强度,为室内试验的岩石选样和现场施工的岩石强度测试提供一种有效的手段。

实践方面,相比于开展单轴压缩和巴西劈裂试验所需的大型材料试验机,小型滚刀直线切割试验台的制作更加灵活多样、成本更低,其核心部件为刀箱及传感器、平移驱动模块和岩石夹持模块,研究人员可对废旧机床进行改造或自行设计加工;之后,加工与本研究相同形式和尺寸的小滚刀,按 2 mm 贯入深度开展直线切割试验,将所得载荷代入本研究所建预测模型,即可快速获取岩石强度,并可进一步扩充和完善所建模型。相比于点载荷仪,用本研究试验方法能同时预测得到岩石的抗压和抗拉强度,且准确度更高。

参考文献:

- [1] 石振明, 黄雨. 工程地质学[M]. 3 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [2] 钟长平, 竺维彬, 王俊彬, 等. 双模盾构机/TBM 的原理与应用[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2022, 4(3): 47-66.
ZHONG Changping, ZHU Weibin, WANG Junbin, et al. Principle and application of double-mode shield machine/TBM[J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2022, 4(3): 47-66.
- [3] 谭忠盛. 隧道与地下工程建设理念及关键技术——记王梦恕院士的主要学术思想和科研成就[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2019, 1(2): 1-6.
TAN Zhongsheng. Construction concepts and key technologies for tunnel and underground engineering: a celebration of main academic thoughts and achievements of Academician WANG Mengshu[J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2019, 1(2): 1-6.
- [4] 中国电力企业联合会. 工程岩体试验方法标准: GB/T 50266—2013[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.
- [5] 段伟强, 张小强. 现场岩石点载荷试验分析研究[J]. 工程勘察, 2009(增刊 2): 66-70.
DUAN Weiqiang, ZHANG Xiaoqiang. On-site rock point load test analysis and research [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2009(Suppl.2): 66-70.
- [6] BALCI C. Correlation of rock cutting tests with field performance of a TBM in a highly fractured rock formation: a case study in Kozyatagi-Kadikoy Metro Tunnel, Turkey[J]. Tunnelling and Underg-round Space

- Technology, 2009, 24(4): 423-435.
- [7] ROSTAMI J. Development of a force estimation model for rock fragmentation with disc cutters through theoretical modeling and physical measurement of crushed zone crush [D]. Golden, USA: Colorado School of Mines, 1997.
- [8] 龚秋明, 何冠文, 赵晓豹, 等. 掘进机刀盘滚刀间距对北山花岗岩破岩效率的影响实验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(1): 54-60.
GONG Qiuming, HE Guanwen, ZHAO Xiaobao, et al. Influence of different cutter spacings on rock fragmentation efficiency of Beishan granite by TBM[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(1): 54-60.
- [9] 龚秋明, 吴帆, 殷丽君. 岩石复合地层滚刀线性切割破岩试验研究[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2019, 1(2): 67-73.
GONG Qiuming, WU Fan, YIN Lijun. Experimental study on the rock mixed ground under disc cutter by linear cutting[J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2019, 1(2): 67-73.
- [10] 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.
- [11] PAN Y C, LIU Q S, LIU J P, et al. Full-scale linear cutting tests in Chongqing sandstone to study the influence of confining stress on rock cutting forces by TBM disc cutter [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2018, 51(6): 1697-1713.
- [12] PAN Y C, LIU Q S, KONG X X, et al. Full-scale linear cutting test in Chongqing sandstone and the comparison with field TBM excavation performance[J]. Acta Geotechnica, 2019, 14(4): 1249-1268.
- [13] XIA Y M, GUO B, TAN Q, et al. Comparisons between experimental and semi-theoretical cutting forces of CCS disc cutters [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2018, 51(5): 1583-1597.
- [14] NING B, XIA Y M, LIN L K, et al. Experimental study on the adaptability of cutters with different blade widths under hard rock and extremely hard rock conditions[J]. Acta Geotechnica, 2020, 15(11): 3283-3294.
- [15] 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 Incorporating Trenchless Technology Research, 2012, 30: 183-193.
- [16] 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.
- [17] SUN R X, MO J L, ZHANG M Q, et al. Interaction between partial-worn TBM cutters and rocks: experimental and numerical investigation[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2023, 82(4): 111.
- [18] 冀国栋, 付柏毅, 章慧健, 等. TBM 滚刀贯入度对破岩效能的影响规律研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(12): 4755-4768.
JI Guodong, FU Boyi, ZHANG Huijian, et al. Study on the influence law of TBM disc cutter penetration on the rock-breaking efficiency[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(12): 4755-4768.
- [19] COMAKLI R, BALCI C, COPUR H, et al. Experimental studies using a new portable linear rock cutting machine and verification for disc cutters [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 108: 103702.
- [20] 贺飞, 张金良, 鲁义强, 等. 滚刀-高移速水射流耦合切削极硬花岗岩试验与模拟研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2023, 54(3): 1187-1203.
HE Fei, ZHANG Jinliang, LU Yiqiang, et al. Experimental and simulation study on cutting extremely hard granite by disc cutter-high velocity waterjet coupling [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2023, 54(3): 1187-1203.
- [21] 张蒙祺, 勾斌, 邓雨, 等. 新型 TBM 螺旋槽滚刀破岩性能及接触行为研究[J]. 机械工程学报, 2023, 59(5): 259-270.
ZHANG Mengqi, GOU Bin, DENG Yu, et al. Study on rock breaking performance and contact behavior of new TBM spiral groove cutter [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(5): 259-270.
- [22] DICKEY D A, FULLER W A. Distribution of the estimators for autoregressive time series with a unit root [J]. Journal of the American statistical association, 1979, 74(366a): 427-431.
- [23] PHILLIPS P C B, PERRON P. Testing for a unit root in time series regression[J]. Biometrika, 1988, 75(2): 335-346.