

基于改进LCPC测试方法的盾构隧道土体磨蚀性试验

杨志勇, 朱俊伟, 杨 星, 邵小康, 江玉生, 王允龙

An improved soil abrasion testing method for shield tunnelling based on LCPC

YANG Zhiyong, ZHU Junwei, YANG Xing, SHAO Xiaokang, JIANG Yusheng, and WANG Yunlong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202211036>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

软土地区双线区间盾构隧道施工对周边地表以及建筑物沉降的影响

Influences of double-track shield tunnel construction on settlements of adjacent ground and buildings in a soft soil area

潘涛 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 101-108

排弃物料力学性质大型三轴剪切试验研究

A study of large-scale triaxial shear test of the mechanical properties of abandoned materials

刘小平, 刘天林, 曹晓毅, 张宝元, 王玉涛 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 191-198

盾构地铁隧道穿越既有铁路桥的沉降分析

An analysis of the settlement of a shield tunnel passing under the operating railway bridge

于德海, 舒娇娇, 秦凯凯 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 148-152

基于层次聚类算法的孔压静力触探土体分类方法及试验研究

Soil classification method and experimental research onCPTU based on the hierarchical clustering algorithm

邱敏, 宋友建, 丛璐, 梅年峰, 王闫超 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 117-117

深埋小净距多线平行盾构掘进相互作用分析

An analysis of interaction of deep buried close approaching multi-line parallel shield tunneling

付钊, 柯宁静, 卢康明, 郭萧阳, 张孟喜 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 44-54

岩土体吸水膨胀应力系数的试验研究

Experimental research on water absorption expansion stress coefficient of rock and soil mass

郭永春, 许福周, 许嘉伦, 屈智辉 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 86-92



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202211036

杨志勇, 朱俊伟, 杨星, 等. 基于改进 LCPC 测试方法的盾构隧道土体磨蚀性试验 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(6): 90-98.
YANG Zhiyong, ZHU Junwei, YANG Xing, *et al.* An improved soil abrasion testing method for shield tunnelling based on LCPC[J].
Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(6): 90-98.

基于改进 LCPC 测试方法的盾构隧道 土体磨蚀性试验

杨志勇, 朱俊伟, 杨星, 邵小康, 江玉生, 王允龙
(中国矿业大学(北京)力学与土木工程学院, 北京 100083)

摘要: 法国桥梁道路实验室磨蚀性(Labroatoire Central de Ponts et Chaussées, LCPC)试验是测试土体磨蚀性的一种常用方法,但现有 LCPC 试验在评估盾构隧道土体磨蚀性时存在土体颗粒有效破碎率高、测试过程中颗粒级配变化较大等问题。鉴于此,采用圆形测试钢片替代原有矩形测试钢片,并进行对比试验。结果表明:改进后的圆形测试钢片比原有矩形测试钢片导致的土样颗粒有效破碎率大幅降低,提高了土样在 LCPC 试验过程中颗粒级配的稳定性和改进后的圆形测试钢片在测试过程中的磨损以磨粒磨损为主,有效剔除了冲击磨损,更符合盾构隧道工程特点;在以磨粒磨损为主时,2 种测试条件下的磨损指数(LCPC abrasivity coefficient, LAC)值换算关系为 $LAC_{\text{圆}}=0.93LAC_{\text{矩}}$,其中 $LAC_{\text{矩}}$ 为矩形钢片测试条件下的 LAC 值, $LAC_{\text{圆}}$ 为圆形钢片测试条件下的 LAC 值;改进后的试验方法准确评估了北京地铁 19 号线右安门外站—牛街站区间和大兴国际机场线 3#风井—草桥站区间的圆砾卵石地层的磨蚀性。本研究对于提高 LCPC 试验方法评价盾构隧道土体磨蚀性的准确性提供了重要途径。

关键词: LCPC 磨蚀性试验;盾构隧道;土体磨蚀性;颗粒破碎;刀具磨损

中图分类号: U455.43

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)06-0090-09

An improved soil abrasion testing method for shield tunnelling based on LCPC

YANG Zhiyong, ZHU Junwei, YANG Xing, SHAO Xiaokang, JIANG Yusheng, WANG Yunlong
(School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing),
Beijing 100083, China)

Abstract: The Labroatoire Central de Ponts et Chaussées (LCPC) test is a commonly used method to test the abrasivity of soil, however, the existing LCPC tests have some shortcomings in evaluating the abrasivity of shield tunnel soil, such as the high effective breakage rate of soil particles and large changes in particle size distribution during testing. In view of this, a circular steel sheet is used to replace the original rectangular steel sheet, and a comparative test is carried out. The test results show that the improved circular steel sheet significantly reduces the effective breakage rate of soil samples compared with the rectangular steel sheet, and improves the stability of particle size distribution in the LCPC test. The wear of the circle steel sheet in the test process is mainly abrasive wear, which effectively eliminates the impact wear and is more in line with the characteristics of shield tunnel

收稿日期: 2022-11-10; 修订日期: 2023-02-20

投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1261212)

第一作者: 杨志勇(1980-), 男, 博士, 副教授, 主要从事隧道工程相关科研与教学工作。E-mail: yangzy1010@126.com

engineering. The analysis shows that the conversion relationship between the two LCPC abrasivity coefficients is $LAC_{短}=0.93LAC_{圆}$ when abrasive wear is the main wear. The improved testing method accurately evaluates the abrasivity of the pebble layer crossed by the shield tunnel sections Youanmen-Niujiie of Beijing Subway Line 19 and 3# Fengjing-Caoqiao of the Beijing Daxing International Airport Line. This study improves the accuracy of the LCPC test method in evaluating the soil abrasion of shield tunnel.

Keywords: LCPC abrasivity test; shield tunnel; soil abrasivity; particle breakage; cutting tool wear

土体磨蚀性是指土体与金属器具(如盾构刀具)相互作用时,土体对金属器具的磨损程度。强磨蚀性的土体(如:卵石、圆砾等)会造成盾构刀具的严重磨损,这不仅影响工程进度,也会导致工程成本的增加^[1-3]。因此准确测试土体的磨蚀性,对于预测刀具寿命^[4-6],合理确定换刀位置,降低工程成本有着重要意义^[7-9]。

目前国际上关于土体磨蚀性的测试方法有标准磨蚀性试验(soil abrasion testing, SAT)^[10-11]、软土磨蚀性试验(soft ground abrasion tester, SGAT)^[12]、磨蚀性试验系统(soil abrasion testing system, SATS)^[13]、宾州州立大学土体磨蚀性试验(Penn State soil abrasion index, PSAI)^[14]、法国桥梁道路实验室磨蚀性(Labroatoire Central de Ponts et Chaussées, LCPC)试验^[15-17]。其中应用最广泛的是 LCPC 试验^[18-19],主要原因是 LCPC 试验建立了基于磨损指数(LCPC abrasivity coefficient, LAC)值的磨蚀性强弱评价标准,这是其他试验所不具备的,因此目前评价土体磨蚀性大多还是基于 LCPC 试验^[20-23]。

部分学者基于 LCPC 试验,研究了土体矿物成分、粒径、颗粒形状、含水率等因素对磨蚀性的影响^[24-25]。Hashemnejad 等^[26]研究发现 LAC 值与矿物含量有着很好的线性关系,磨蚀性矿物含量高或等效石英含量(equivalent quartz content, EQC)较高的土样 LAC 值较高,磨蚀性较强。Hamzaban 等^[27]研究发现影响土体磨蚀性的主要因素是土体粒径分布,并讨论了细颗粒和含水率及应力大小对磨蚀性的影响。Kahraman 等^[28]讨论了土体颗粒结构参数对 LAC 值的影响,在研究过程中分析了 3 个颗粒参数(平均直径、纵横比、圆度)与 LAC 值的关系。Sun 等^[29]研究了不同颗粒级配、含水率对 LAC 值的影响,发现在等效石英含量不变的情况下影响土样磨蚀性的主要因素为颗粒级配和含水率。

然而采用 LCPC 试验来测试盾构隧道土体的磨蚀性,存在较大的不足,即 LCPC 测试过程中电机转速达到 4 500 rpm(转/分钟),高转速的测试钢片将土体颗

粒在短时间内大量破碎,测试过程中土体的级配发生了很大改变,严重影响了测试的准确性。因此,本文提出了一种改进的圆形钢片 LCPC 测试方法,并与常规矩形钢片 LCPC 试验进行了对比,最后,结合现场实际工程的刀具磨损情况证明了改进 LCPC 试验在评估盾构刀盘和刀具磨蚀性的准确性。

1 LCPC 试验及存在的不足

1.1 LCPC 试验

LCPC 试验是由法国桥梁和道路实验室建立的一套试验方法,用于测试土体的磨蚀性。试验仪器如图 1 所示,配备一台功率为 750 W 的驱动电机,驱动固定在旋转轴上的测试钢片以 4 500 rpm 的转速在装有(500±2)g 土体的容器内旋转 5 min,然后采用高精度天平(精度为 0.1 mg)对测试前后钢片称重。称重前对钢片进行超声波清洗及烘干以去除钢片表面附着的土颗粒。LCPC 试验采用 LAC 值作为土样的磨蚀性评价指标,LAC 计算方法如式(1)所示:

$$LAC = \frac{m_0 - m}{M} \quad (1)$$

式中: m_0 ——试验前钢片的质量/g;

m ——试验后钢片的质量/g;

M ——土样的质量/t。

测试钢片尺寸为 50 mm × 25 mm × 5 mm,由洛氏硬度为 65 HRB 的标准钢制成,如图 1(b)所示。基于 LAC 值的土体磨蚀性强度判断标准如表 1 所示。

1.2 LCPC 试验存在的不足

为进一步分析 LCPC 试验过程中土体的颗粒级配变化情况,选取北京地铁 19 号线 06 标右安门外站—牛街站区间(以下简称“右—牛区间”)盾构始发井处的圆砾卵石地层进行试验。由于 LCPC 试验粒径不能超过 10 mm,因此将原状土样中粒径大于 10 mm 的土体采用等质量的 8 ~ 10 mm 粒径土颗粒替换。

LCPC 试验测试过程中的颗粒级配变化情况及 LAC 值如表 2 所示,图 2 显示了颗粒级配曲线随测试时间的变化情况。由表 2 和图 2 可知,在试验过程中,

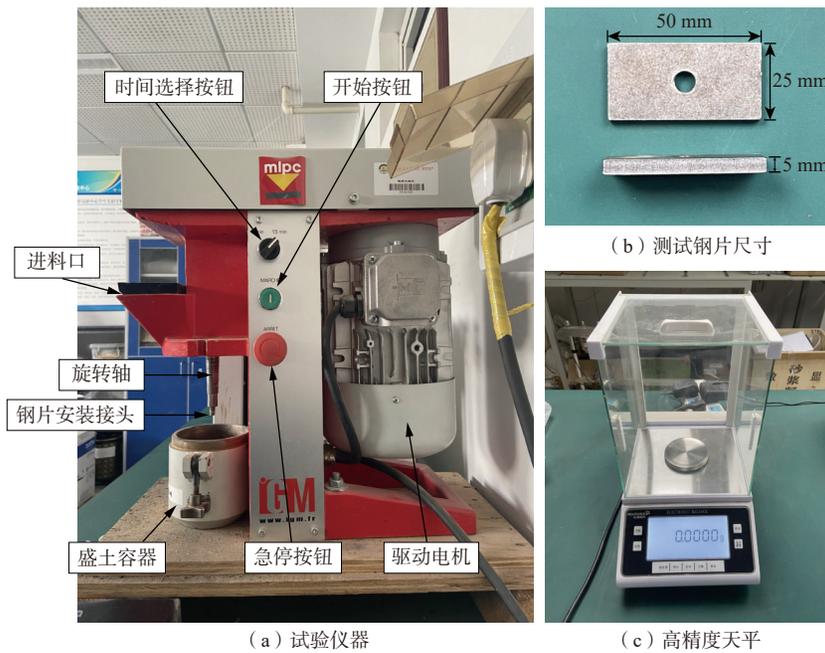


图 1 LCPC 试验装置及钢片

Fig. 1 LCPC test device and steel sheet.

表 1 LAC 值与磨蚀性强度判断标准^[15-17,29,30]

Table 1 LAC value and standard for judging abrasive^[15-17,29,30]

LAC 值	磨蚀性强度
>2 000	超高的磨蚀性
1 250 ~ 2 000	高磨蚀性
500 ~ 1 250	较高的磨蚀性
250 ~ 500	一般的磨蚀性
50 ~ 250	微小的磨蚀性
0 ~ 50	没有磨蚀性

颗粒级配发生了明显的变化,尤其是在前 0.5 min 内,颗粒级配曲线变化最明显。

图 3 显示了测试后钢片的磨损情况,可以发现钢片的主要磨损区域在 4 个边角处,矩形钢片的边角处在高速旋转过程中,与土样中大粒径颗粒发生剧烈碰撞,导致了土样颗粒的破碎。

由于 LCPC 试验过程中土体颗粒级配在测试前后

变化明显,而颗粒级配是影响 LAC 值的一项重要因素^[29],因此现有 LCPC 试验方法影响了土体磨蚀性测试的准确性,需要优化。

2 改进 LCPC 试验及试验方案

2.1 改进 LCPC 试验

导致 LCPC 试验过程中大量土颗粒破碎的主要原因是测试矩形钢片边角对土体颗粒的撞击,因此将 LCPC 试验中尺寸为 50 mm × 25 mm × 5 mm(图 1)的矩形测试钢片,替换为直径 $d=50$ mm、厚度 $h=5$ mm 圆形测试钢片(图 4),2 种钢片材质相同,均由洛氏硬度为 65 HRB 的标准钢制成,2 种测试钢片的形状及质量等参数如表 3 所示。

优化后的圆形测试钢片在与 1.2 节相同初始试验条件下进行试验,磨损情况如图 4(b)所示,主要体现

表 2 LCPC 试验过程中土体颗粒级配变化及 LAC 值

Table 2 Change of soil particle size and LAC value during LCPC test

测试时间 /min	LAC 值 /($\text{g}\cdot\text{t}^{-1}$)	土样质量/g	不同粒径土颗粒质量/g									
			<0.075 mm	0.075 ~ <0.25 mm	0.25 ~ <0.5 mm	0.5 ~ <1 mm	1 ~ <2 mm	2 ~ <4 mm	4 ~ <5 mm	5 ~ <6.5 mm	6.5 ~ <8 mm	8 ~ 10 mm
0	0	500	12	17	34	65	47	29	14	25	31	226
0.5	111.97	499	33	32	40	55	43	31	24	41	69	131
1	193.60	499	47	37	49	51	46	34	30	49	70	86
2	336.29	498	61	42	52	58	42	43	31	39	56	74
3	453.87	497	69	43	61	64	50	40	35	35	45	55
5	633.93	496	77	45	72	74	39	47	31	24	42	45

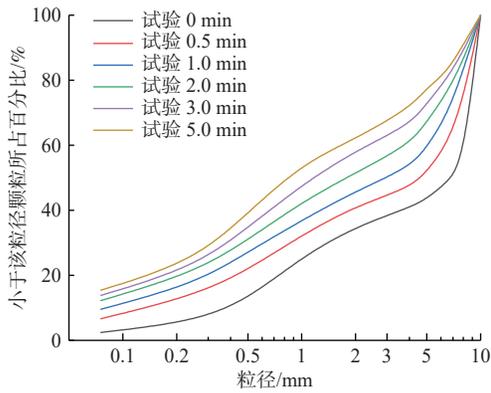


图 2 颗粒级配曲线随试验时间的变化情况

Fig. 2 Variation of particle size distribution with different test times

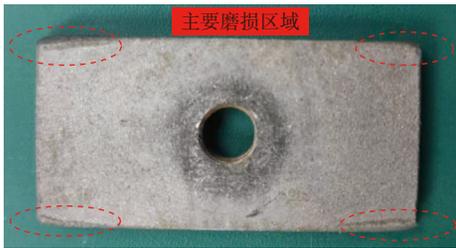
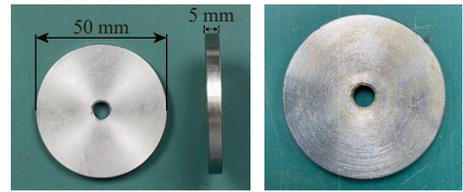


图 3 试验 5 min 后测试钢片磨损情况

Fig. 3 Wear condition of steel sheet after 5 min-test



(a) 改进后的圆形钢片 (b) 试验后的圆形钢片

图 4 圆形钢片

Fig. 4 Circle steel sheet.

表 3 测试钢片形状及质量参数

Table 3 Test steel sheet shape and quality parameters

种类	尺寸/mm	表面积/mm ²	体积/mm ³	质量/g
矩形钢片	长50, 宽25, 厚5	3 183.7	12 168.3	47.0±0.3
圆形钢片	直径50, 厚5	4 643.7	19 293.3	73.7±0.3

为土样与钢片摩擦产生的划痕磨损, 在原本光滑的表面上产生了形似年轮状的圆形划痕。

2.2 土体材料

本次试验采用的土样取自北京地铁 19 号线右一牛区间盾构始发井处的圆砾卵石地层(土样与 1.2 节的试验土样相同)。对现场取回的土样进行烘干, 然后对干燥的土样进行筛分, 筛分后的土样被分为 11 种组分的颗粒, 具体分组见表 4。

表 4 试验方案及结果

Table 4 Test scheme and results

组别	不同粒径土颗粒质量/g										LAC值/(g·t ⁻¹)			有效破碎率/%	
	<0.075 mm	0.075 ~ <0.25 mm	0.25 ~ <0.5 mm	0.5 ~ <1 mm	1 ~ <2 mm	2 ~ <4 mm	4 ~ <5 mm	5 ~ <6.5 mm	6.5 ~ <8 mm	8 ~ 10 mm	LAC _矩	LAC _圆	k	矩形	圆形
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	500	841.71	322.89	2.61	39.7	3.3
2	0	0	0	0	0	0	0	0	500	0	665.37	201.11	3.31	35.7	2.9
3	0	0	0	0	0	0	0	500	0	0	555.33	127.53	4.36	29.6	5.2
4	0	0	0	0	0	0	500	0	0	0	343.10	119.40	2.87	28.3	4.9
5	0	0	0	0	0	500	0	0	0	0	201.53	59.30	3.40	24.4	4.2
6	0	0	0	0	500	0	0	0	0	0	97.53	56.47	1.73	12.9	2.4
7	0	0	0	500	0	0	0	0	0	0	47.79	52.53	0.91	7.2	0.6
8	20	20	60	400	0	0	0	0	0	0	45.61	50.46	0.90	3.4	0.1
9	25	25	100	350	0	0	0	0	0	0	38.22	39.70	0.96	2.8	0.1
10	30	50	120	300	0	0	0	0	0	0	35.84	38.13	0.94	1.4	0.1
11	12	17	34	65	47	29	14	25	31	226	633.93	154.47	4.10	32.8	3.0

注: LAC_矩为矩形钢片测试条件下的LAC值; LAC_圆为圆形钢片测试条件下的LAC值; k为LAC_矩与LAC_圆的比值。

2.3 试验方案及试验结果

为验证改进方案的效果, 进行对比试验, 在其他条件均相同的情况下, 分别对圆形测试钢片和矩形测试钢片进行试验, 将粒径大小分为 11 个测试组(表 4), 第 1—7 组为单一粒径组, 第 8—10 组为小粒径组, 第 11 组为原状土样粒径组(原状土体, 超过 10 mm 粒径部分采用 8 ~ 10 mm 粒径等质量替换)。将这 11 组土

样分别进行 LCPC 试验以获取 LAC 值, 为确保试验的准确性, 每组颗粒级配进行 3 次试验并取平均值作为最终试验结果(表 4)。

3 试验结果分析

3.1 有效破碎率对比分析

根据 Hardin^[31]有效破碎率算法, 计算得出第 1—

11 组试验后的土样颗粒破碎率,如表 4 及图 5 所示。试验结果表明,圆形钢片测试条件下的土体颗粒破碎率均明显低于矩形钢片。在第 1—7 组单一粒径组中,第 1 组 8~10 mm 粒径土样在矩形钢片测试条件下,破碎率高达 39.7%,而圆形钢片测试条件下土样颗粒的破碎率仅为 3.3%,破碎率下降了 36.4%。圆形钢片测试条件下土样颗粒破碎率除第 3 组为 5.2% 外,其余组均低于 5%,第 7 组最低仅为 0.6%。

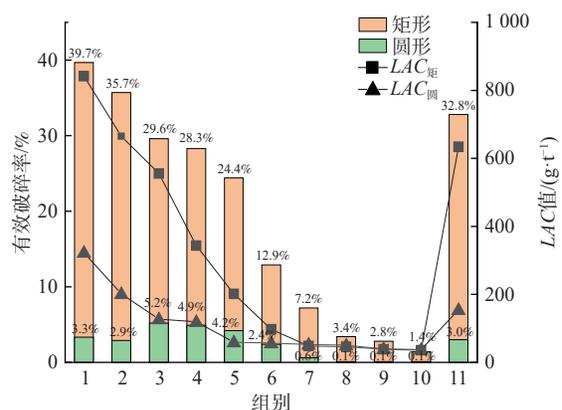


图 5 土样颗粒有效破碎率及 LAC 值

Fig. 5 Effective breakage rate and LAC value of soil samples

在第 8—10 组小粒径组中,随着细颗粒在土样中的占比提高,2 种钢片导致的土样颗粒破碎率均有所下降,矩形钢片分别为 3.4%、2.8%、1.4%,但圆形钢片表现更优,破碎率低至 0.1%。

在第 11 组原状粒径组中,对比之下圆形测试钢片的优势更加明显,矩形钢片测试条件下土样颗粒破碎率为 32.8%,而圆形钢片测试条件下仅为 3.0%,下降了 29.8%,圆形钢片测试条件下土样颗粒有效破碎率更低。

从第 1—11 组试样的土样颗粒有效破碎率的对比来看,改进后的圆形测试钢片导致的土样颗粒有效破碎率大幅降低,提高了土样在 LCPC 试验过程中颗粒级配的稳定性。

3.2 LAC 值对比分析

为进一步分析 2 种测试条件下 LAC 值的相关性,定义 k 为 2 种测试条件下 LAC 值的比值,即: $k=LAC_{\text{矩}}/LAC_{\text{圆}}$ 。基于表 4 和图 5 中 k 值的大小和土样有效破碎率的差异,有以下 2 种情况:

(1) 第 1—6 组及第 11 组试样, $LAC_{\text{矩}}>LAC_{\text{圆}}$,且 k 在 1.73~4.36 之间。2 种测试条件下的 LAC 值与有效破碎率密切相关,有效破碎率差异越大, LAC 值差异越大。这 7 组试样中,矩形钢片测试条件下的土样有

效破碎率较大(12.9%~39.7%),矩形测试钢片在高速旋转过程中与土颗粒发生撞击作用,不但击碎了土颗粒,也造成了矩形测试钢片的冲击磨损,因此矩形测试钢片除了受到摩擦作用的磨粒磨损外,还受到冲击磨损,导致磨损量大且 LAC 值高。而圆形测试钢片测试条件下的土样有效破碎率较小(2.4%~5.2%),圆形测试钢片的磨损以磨粒磨损为主,受到的冲击磨损较小,因此 LAC 值较小。

(2) 第 7—10 组试样, $LAC_{\text{矩}}<LAC_{\text{圆}}$, k 在 0.90~0.96 之间。7—10 组试样细颗粒含量较大,矩形钢片和圆形钢片测试条件下的土样有效破碎率均较低(矩形测试钢片为 1.4%~7.2%,圆形测试钢片为 0.1%~0.6%),2 种测试钢片的磨损均以磨粒磨损为主,由于圆形测试钢片的表面积大于矩形测试钢片(表 3),因此磨损区域更大,导致 LAC 值略大。对比第 7—10 组试样, k 基本稳定在 0.90~0.96 之间,平均值为 0.93,因此在以磨粒磨损为主时,2 种测试条件下的换算关系可以表示为:

$$LAC_{\text{矩}} = 0.93LAC_{\text{圆}} \quad (2)$$

实际盾构隧道工程中,盾构刀盘转速范围一般在 0~2.8 rpm,除非遇到大粒径的漂石,在一般的土体中盾构刀具与土体以摩擦作用为主,刀具的磨损主要为磨粒磨损。对比分析这 11 组试样在 2 种测试条件下的 LAC 值可以发现,改进后的圆形测试钢片在测试过程中的磨损以磨粒磨损为主,有效剔除了冲击磨损,其测试结果更加准确,也更符合盾构隧道工程特点。

4 工程应用

4.1 北京地铁 19 号线

北京地铁 19 号线 06 标右一牛区间全长 2 231 m,区间隧道采用圆形预制钢筋混凝土管片结构,错缝拼装,弧形螺栓连接,管片厚度 300 mm、宽度 1 200 mm、内直径 5 800 mm、外直径 6 400 mm。右一牛区间采用 2 台配置一样的土压平衡盾构由右安门外站北侧的始发井始发,盾构刀盘开挖直径 6 688 mm,刀盘由 4 根主辐条(辐条 1、3、5、7)和 4 根副辐条(辐条 2、4、6、8)组成,开口率 52%,盾构刀盘及刀具布置如图 6 所示。盾构刀具主要包括:中心刀(刀高 380 mm)、高撕裂刀(刀高 180 mm)、低撕裂刀(刀高 150 mm)、高刮刀(刀高 127 mm,布置于主辐条上)、低刮刀(刀高 100 mm,布置于副辐条上)。

右一牛区间盾构隧道穿越地层主要为圆砾卵石⑤

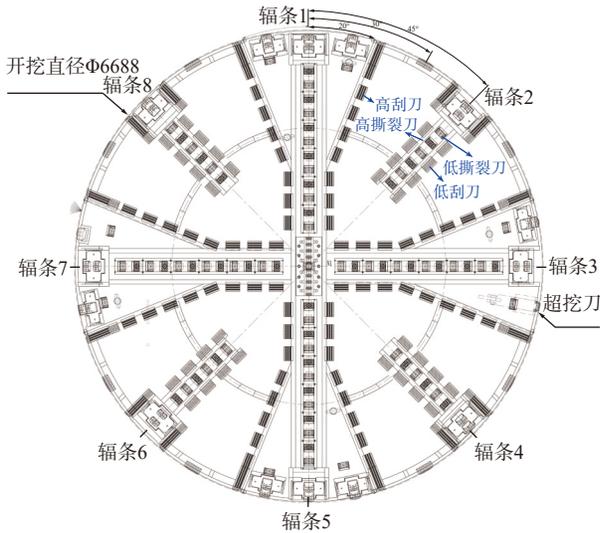


图 6 右一牛区间盾构刀盘刀具布置图

Fig. 6 Shield cutter layout of section You-Niu

层中粗砂充填, 圆砾粒径一般在 0.5 ~ 2 cm, 最大 4 cm, 卵石粒径一般在 3 ~ 5 cm, 最大 12 cm, 圆砾卵石质量分数约 65%, 现场开挖出的圆砾卵石⑤层如图 7 所示。



图 7 圆砾卵石⑤层现场开挖照片

Fig. 7 Excavated pebbles-⑤ on site

为测试地层的磨蚀性, 在盾构始发井开挖时, 取盾构隧道穿越的圆砾卵石⑤层原状土进行 LCPC 试验, 测试结果见表 4(表 4 中第 11 组试样即为原状土样), 在矩形钢片测试条件下该地层 $LAC_{矩} = 633.93$, 根据表 1 的磨蚀性判别标准为较高的磨蚀性地层。但圆形钢片测试条件下该地层 $LAC_{圆} = 154.47$, 根据式 (2) 换算为 $LAC_{矩} = 0.93 \times 154.47 = 143.66$, 参考表 1 标准属于微小磨蚀性地层。实际工程中, 采用了圆形钢片的测试结果, 未对盾构刀具进行更换及检修, 2 台盾构均一次性掘进完成 2 231 m 长的隧道。

选取右一牛区间右线盾构刀具磨损量进行分析, 取每个轨迹上所有撕裂刀和刮刀磨损量的平均值作为这个轨迹上刀具的磨损量, 高撕裂刀、低撕裂刀、高刮刀、低刮刀的磨损量规律如图 8 所示。高撕裂刀

最大磨损量 45 mm、低撕裂刀最大磨损量 31 mm, 均小于撕裂刀的硬质合金块高度 55 mm, 高刮刀最大磨损量 19 mm, 低刮刀磨损最大磨损量仅 5 mm, 也均小于刮刀硬质合金块高度 35 mm, 可见整个区间隧道掘进完成后, 刀具的磨损仍然有富余量, 地层磨蚀性的判断准确。由图 8 可知, 高撕裂刀、低撕裂刀及高刮刀的磨损量与安装半径有良好的线性关系, 安装半径越大, 该处刀具的轨迹越长, 因此磨损量越大, 符合磨粒磨损的特性^[29]。而低刮刀磨损量比较小且与安装半径线性关系不强, 主要是由于高刮刀磨损量较小最大仅 19 mm, 高刮刀与低刮刀的高差 27 mm, 因此低刮刀一直低于高刮刀, 低刮刀在掘进过程中并未参与工作, 所以磨损量较小。

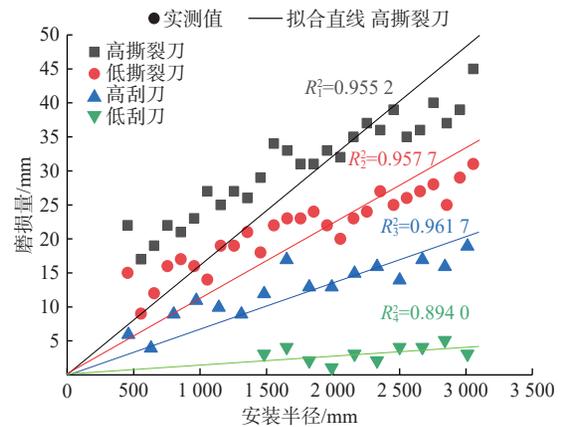


图 8 右一牛区间不同安装半径刀具磨损量

Fig. 8 Cutter wear with different cutter head radius of section You-Niu

4.2 北京地铁大兴国际机场线

北京地铁大兴国际机场线 08 标 3#风井—草桥站盾构区间(以下简称 3—草区间)隧道全长 3 065 m, 管片外径 8.8 m、内径 7.9 m、环宽 1.6 m。采用 2 台直径 9.15 m 的土压平衡盾构施工, 盾构从 3#风井始发向草桥站掘进, 右线在前, 左线在后。左、右线 2 台盾构均为铁建重工制造, 配置完全一样, 辐条式刀盘, 开口率 60%, 刀盘结构及刀具布置如图 9 所示。盾构撕裂刀分 2 层布置, 高撕裂刀刀高 175 mm, 低撕裂刀刀高 145 mm, 刮刀刀高 125 mm。

3—草区间隧道穿越主要地层为卵石⑦层, 卵石一般粒径 2 ~ 6 cm, 揭露最大粒径约 10 cm, 亚圆形, 粒径大于 2 cm 颗粒的质量占总质量的 75%, 局部为圆砾, 中粗砂填充。

3#风井施工时, 取盾构穿越的原状卵石⑦层进行 LCPC 测试, 在矩形钢片测试条件下该地层 $LAC_{矩} =$

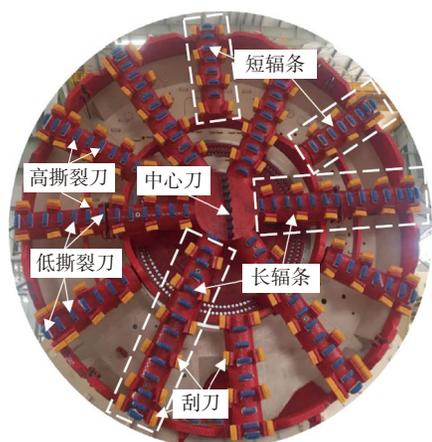


图 9 3—草区间盾构刀具盘刀具布置图
Fig. 9 Shield cutter layout of section 3—Cao

1 050.68, 根据表 1 属于较高的磨蚀性地层。圆形钢片测试条件下该地层 $LAC_{\text{圆}}=483.39$, 根据式(2)换算为 $LAC_{\text{矩}}=0.93 \times 483.39=449.55$, 根据表 1 属于一般的磨蚀性地层。

实际盾构施工过程中, 初期采用了矩形钢片的测试结果, 认为地层磨蚀性较高, 最初规划每隔 600 m 设置一个盾构换刀检修井, 右线第一个检修井位于 380 环(608 m), 但盾构到达检修井后发现刀具磨损很小, 最外侧撕裂刀磨损量最大仅 18 mm, 低撕裂刀最大磨损量约 5 mm, 刮刀基本没有磨损, 鉴于刀具磨损量较小, 因此没有进行刀具的更换。

鉴于右线盾构在第一个检修井刀具磨损量小, 可见地层的磨蚀性并不强, 矩形钢片的测试结果与实际存在较大偏差, 导致换刀距离判断失误。因此考虑圆形钢片的测试结果, 将地层评价为一般的磨蚀性地层, 将原先每隔 600 m 设置一个换刀检修井调整为仅在隧道中间处设置一个检修井, 检修井位于 948 环(1 516.8 m), 右线盾构到达中间检修井后, 刀具磨损量如图 10 所示。高撕裂刀最大磨损量 53 mm, 低撕裂刀最大磨损量 31 mm, 刮刀最大磨损量 15 mm, 撕裂刀硬质合金高度 55 mm, 高撕裂刀基本达到磨损极限, 刮刀硬质合金高度 35 mm, 刮刀磨损量较小尚未磨损到一半。盾构到达中间检修井后对高撕裂刀全部进行了更换, 对磨损量超过 20 mm 的低撕裂刀进行了更换, 没有更换刮刀。换完刀后的盾构从中间换刀井成功掘进 1 548.2 m 到达草桥站接收。

通过北京大兴国际机场线 08 标 3—草区间的工程实例很好地证明了, 圆形钢片的测试结果能更准确地反映地层的磨蚀性, 便于准确预估换刀井距离, 避免过多设置换刀井, 造成工程成本的增加。

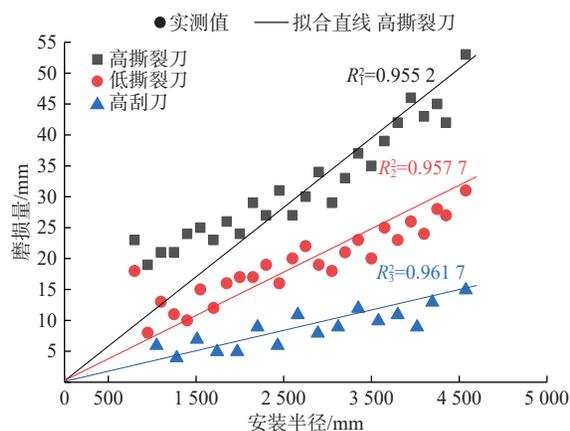


图 10 3—草区间不同安装半径刀具磨损量
Fig. 10 Cutter wear with different cutterhead radius of section 3—Cao

5 结论

(1)改进后的圆形测试钢片比原有矩形测试钢片导致的土样颗粒有效破碎率大幅降低, 提高了土样在 LCPC 试验过程中颗粒级配的稳定性。

(2)改进后的圆形测试钢片在测试过程中的磨损以磨粒磨损为主, 有效剔除了冲击磨损, 分析得到在以磨粒磨损为主时, 2 种测试条件下的换算关系为 $LAC_{\text{矩}}=0.93LAC_{\text{圆}}$ 。改进后的测试方法, 相比矩形测试钢片, 结果更加准确, 也更符合盾构隧道工程特点。

(3)基于改进后的 LCPC 试验对北京地铁 19 号线 06 标右—牛区间和北京地铁大兴国际机场线 08 标 3—草区间圆砾卵石层的磨蚀性进行了准确判定, 工程应用效果良好。

参考文献 (References) :

- [1] 周建军, 宋佳鹏, 谭忠盛. 砂卵石地层地铁盾构盘形滚刀磨蚀性研究 [J]. 土木工程学报, 2017, 50(增刊 1): 31 - 35. [ZHOU Jianjun, SONG Jiapeng, TAN Zhongsheng. Study on abrasive properties of shielded hob in subway shield of sandy gravel formation [J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(Sup 1): 31 - 35. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 付钊, 柯宁静, 卢康明, 等. 深埋小净距多线平行盾构掘进相互作用分析 [J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(2): 44 - 54. [FU Zhao, KE Ningjing, LU Kangming, et al. An analysis of interaction of deep buried close approaching multi-line parallel shield tunneling [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(2): 44 - 54. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 胡焕校, 杨万松, 孙端阳. 长沙板岩地层地铁盾构施

- 工渣土改良试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(4): 100 - 107. [HU Huanxiao, YANG Wansong, SUN Duanyang. Soil conditioning test for EPB shield tunneling in slate stratum in the Changsha region[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(4): 100 - 107. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 杨志勇,王霆,江玉生. 无水砂卵石地层土压平衡盾构主动换刀技术研究[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(1): 147 - 152. [YANG Zhiyong, WANG Ting, JIANG Yusheng. Active cutter replacement techniques for EPB shield tunnelling in a waterless sandy cobble stratum[J]. Modern Tunnelling Technology, 2016, 53(1): 147 - 152. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 杨育. 厦门轨道交通 3 号线跨海段盾构滚刀磨损预测[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(增刊 1): 182 - 187. [YANG Yu. Prediction of disc cutter wear of shield used in sea-crossing section on Xiamen rail transit line No. 3[J]. Tunnel Construction, 2018, 38(Sup 1): 182 - 187. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 蔡昱,祝和意,杨小玉,等. 引汉济渭秦岭隧洞高磨蚀性硬岩 TBM 滚刀磨损试验研究[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(9): 1579 - 1584. [CAI Yu, ZHU Heyi, YANG Xiaoyu, et al. Experimental study of disc cutter abrasion of TBM used in Qinling tunnel of Hanjiang River-Weihe River water conveyance project with high abrasive hard rock[J]. Tunnel Construction, 2018, 38(9): 1579 - 1584. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 潘涛. 软土地区双线区间盾构隧道施工对周边地表以及建筑物沉降的影响[J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(1): 101 - 108. [PAN Tao. Influences of double-track shield tunnel construction on settlements of adjacent ground and buildings in a soft soil area[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(1): 101 - 108. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 苏永华,王栋. 基于离散元法的砂石混合物直剪试验结果分析[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(6): 97 - 104. [SU Yonghua, WANG Dong. An analysis of direct shear test results of sand-gravel mixture based on the discrete element method[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(6): 97 - 104. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 张晓平,唐少辉,吴坚,等. 苏通 GIL 综合管廊工程泥水盾构穿越致密复合砂层磨蚀性预测分析[J]. 工程地质学报, 2017, 25(5): 1364 - 1373. [ZHANG Xiaoping, TANG Shaohui, WU Jian, et al. Prediction and analysis of abrasiveness of dense sandy stratum by slurry shield at Sutong GIL utility tunnel engineering[J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(5): 1364 - 1373. (in Chinese with English abstract)]
- [10] NILSEN B, DAHL F, HOLZHAUSER J, et al. SAT: NTNU's new soil abrasion test[J]. Tunnels and Tunnelling International, 2006, 38(5): 43 - 45.
- [11] JAKOBSEN P D, BRULAND A, DAHL F. Review and assessment of the NTNU/SINTEF Soil Abrasion Test (SAT™) for determination of abrasiveness of soil and soft ground[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, 37: 107 - 114.
- [12] JAKOBSEN P D, LANGMAACK L, DAHL F, et al. Development of the Soft Ground Abrasion Tester (SGAT) to predict TBM tool wear, torque and thrust[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, 38: 398 - 408.
- [13] ROSTAMI J, GHASEMI A, GHARAHBAGH E A, et al. Study of dominant factors affecting cerchar abrasivity index[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2014, 47(5): 1905 - 1919.
- [14] ROSTAMI J, GHARAHBAGH E A, PALOMINO A M, et al. Development of soil abrasivity testing for soft ground tunneling using shield machines[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2012, 28: 245 - 256.
- [15] ABU BAKAR M Z, MAJEED Y, ROSTAMI J. Influence of moisture content on the LCPC test results and its implications on tool wear in mechanized tunneling[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 81: 165 - 175.
- [16] HAMZABAN M T, JAKOBSEN P D, SHAKERI H, et al. Water content, effective stress, and rotation speed impact on the abrasivity of granular soils in LCPC test results[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 87: 41 - 55.
- [17] ABU BAKAR M Z, MAJEED Y, RASHID M A, et al. Wear mechanisms of LCPC rock abrasivity test impellers of materials equivalent to TBM cutter head face tools[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 116: 104122.
- [18] 李潮. 砂卵石地层土压平衡盾构关键参数计算模型研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2013. [LI Chao. Study on the calculation models of key parameters of the EPB shield machine in sandy cobble ground [D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2013. (in Chinese with English abstract)]
- [19] HAMZABAN M T, TAVANA N H, JAKOBSEN P D, et

- al. The effect of the plastic behavior of clay particles on LCPC abrasive coefficient[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, 92: 103054.
- [20] BARZEGARI G, UROMEIHY A, ZHAO Jian. A newly developed soil abrasion testing method for tunnelling using shield machines[J]. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 2013, 46(1): 63 – 74.
- [21] WEI Yingjie, YANG Yuyou, TAO Mingjiang. Effects of gravel content and particle size on abrasivity of sandy gravel mixtures[J]. *Engineering Geology*, 2018, 243: 26 – 35.
- [22] GHARAHBAGH E A, QIU Tong, ROSTAMI J. Evaluation of granular soil abrasivity for wear on cutting tools in excavation and tunneling equipment[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2013, 139(10): 1718 – 1726.
- [23] ALAVI G E, ROSTAMI J, TALEBI K. Experimental study of the effect of conditioning on abrasive wear and torque requirement of full face tunneling machines[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2014, 41: 127 – 136.
- [24] GHARAHBAGH E A, ROSTAMI J, PALOMINO A M. New soil abrasion testing method for soft ground tunneling applications[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2011, 26(5): 604 – 613.
- [25] BARZEGARI G, UROMEIHY A, ZHAO Jian. Parametric study of soil abrasivity for predicting wear issue in TBM tunneling projects[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2015, 48: 43 – 57.
- [26] HASHEMNEJAD A, GHAFORI M, AZALI S T. Utilizing water, mineralogy and sedimentary properties to predict LCPC abrasivity coefficient[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2016, 75(2): 841 – 851.
- [27] HAMZABAN M T, MOHAMMADI N R S, JAKOBSEN P D. The effect of the particle size distribution curve on the abrasivity of non-cohesive soils in LCPC test[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2020, 105: 103573.
- [28] KAHRAMAN S, FENER M, KÄSLING H, et al. The influences of textural parameters of grains on the LCPC abrasivity of coarse-grained igneous rocks[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2016, 58: 216 – 223.
- [29] SUN Zhengyang, YANG Zhiyong, JIANG Yusheng, et al. Influence of particle size distribution, test time, and moisture content on sandy stratum LCPC abrasivity test results[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2021, 80(1): 611 – 625.
- [30] YANG Zhiyong, YANG Xing, DING Yanjie, et al. Characteristics of conditioned sand for EPB shield and its influence on cutterhead torque[J]. *Acta Geotechnica*, 2022, 17(12): 5813 – 5828.
- [31] HARDIN B O. Crushing of soil particles[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1985, 111(10): 1177 – 1192.

编辑: 刘真真