

盾尾密封油脂防水密封性能评价指标的相关性分析

郭世情

(中国铁建股份有限公司南京地铁9号线一期工程施工总承包, 210019, 南京)

摘要 [目的] 盾尾油脂的性能对盾尾防水密封效果有显著的影响。盾尾油脂的性能检测指标较多,但这些指标与盾尾防水性能的关系尚未阐明,需对油脂各检测指标与防水性能之间的关系展开研究。[方法] 选取了4种典型的盾尾油脂材料,分别进行了泵送性试验、稠度试验及耐水压密封性试验,获取了4种油脂的泵送量、锥入深度、保压时间及防水失效压力等4个性能指标的测试数据。基于自主设计的盾尾防水性能试验装置,开展了盾尾油脂的防水性能试验。采用皮尔逊相关系数法,分析了这4个性能指标与防水性能的相关性。[结果及结论] 具有长纤维的油脂可以抵抗一定的应力,且较好的保压性能。不同盾尾油脂的防水失效压力有较大差异,其防水失效压力在0.41~0.70 MPa之间,并不是所有盾尾油脂都能满足0.60 MPa的设计防水压力,在油脂选型时应对应油脂的性能进行检测。锥入深度与耐水压密封性、锥入深度与防水失效压力之间均呈高度负相关。

关键词 地铁隧道施工; 盾尾油脂; 防水密封性能; 性能指标; 相关性分析

中图分类号 U455.43

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.04.034

Correlation Analysis of Evaluation Indicators for Shield Tail Sealing Grease Waterproof Performance

GUO Shiqing

(Nanjing Metro Line 9 Project Phase I General Contract, China Railway Construction Co., Ltd., 210019, Nanjing, China)

Abstract [Objective] The performance of shield tail grease significantly influences the effectiveness of the shield tail waterproof seal. While there are numerous performance indicators for shield tail grease, the relationship between these indicators and the waterproof performance of the shield tail is not yet clarified. It is essential to conduct research on the correlation between various grease testing indicators and waterproof performance. [Method] Four typical shield tail grease materials are selected for pumpability tests, consistency tests, and water pressure sealing tests. Test data for pump delivery, penetration depth, holding pressure time, and waterproof failure pressure are obtained for the four types. Using a self-designed shield tail waterproof performance test device, waterproof performance

tests for shield tail grease are conducted. The Pearson correlation coefficient method is employed to analyze the correlation between the four performance indicators and waterproof performance. [Result & Conclusion] Grease with long fibers can resist certain stresses and exhibit good pressure-holding performance. There is a significant difference in the waterproof failure pressure of different shield tail greases, with the pressure ranging from 0.41 and 0.70 MPa. Not all shield tail greases can meet the design waterproof pressure of 0.60 MPa, and grease performance testing should be considered during grease selection. The penetration depth shows a highly negative correlation with water pressure sealing performance and waterproof failure pressure.

Key words metro tunnel construction; shield tail grease; waterproof sealing performance; performance indicator; correlation analysis

越来越多的地铁隧道采用盾构法进行施工。在盾构施工过程中,一旦盾尾密封系统发生防水失效,地下水进入盾构机内部,将严重影响施工安全和施工进度^[1-3]。盾尾油脂作为盾尾密封的主要材料,其性能对盾尾的防水密封效果至关重要。

目前,针对盾尾油脂的研究集中于油脂配方改进和油脂性能检测2个方面。一些学者在对盾尾油脂组成成分进行深入研究后,提出了各种油脂优化配方。文献[4]通过添加复合黏度指数改进剂,提高了油脂的泵送性;文献[5-6]设计了新型环保型油脂,该油脂可减少对土体环境的污染;文献[7]通过添加胶黏剂,提升了油脂的黏附性。盾尾密封油脂性能的评价指标主要有泵送性、稠度、耐水压密封性、抗水冲性及挥发性等^[8],但研究并没有阐述这些指标检测的必要性和合理性,且检测指标与防水性能的关系也不明确,因此有必要对盾尾密封油脂防水施工性能的评价指标进行相关性分析。

本文以盾尾油脂为研究对象,开展盾尾油脂性能指标检测试验及防水失效试验。通过分析各性能指标检测数据之间的相关性,探究油脂各性能指标

与防水性能的关系, 以期为盾尾油脂性能检测指标的选取与优化提供参考。

1 盾尾油脂性能试验及其检测指标

本文针对广泛使用的盾尾油脂开展了指标检测试验, 选取了 4 种典型的盾尾油脂, 其特征如表 1 所示。

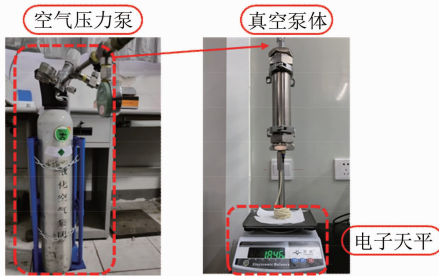
表 1 4 种典型盾尾油脂的特征分析

Tab. 1 Characteristic analysis of four typical shield tail greases

油脂	颜色	纤维长度	气味
油脂 A	浅黄色	纤维较长	无气味
油脂 B	深黄色	多为长纤维	无气味
油脂 C	灰白色	短纤维	无气味
油脂 D	黑色	无明显纤维	有刺鼻气味

1.1 泵送性试验

盾尾密封油脂泵送性的测试方法为: 将油脂装填入泵体中, 通过施加一定的外部压力, 测试油脂在压力作用下通过毛细管的难易程度。此试验的检测指标为单位时间内通过毛细管的油脂质量(单位为 g/min), 检测精度为 $0.1 \text{ g}/\text{min}$ 。泵送性试验装置如图 1 所示, 主要包括真空泵体、毛细管、空气压力泵及电子天平等。



注: 箭头表示施压方向。

图 1 泵送性试验装置实物图

Fig. 1 Photo of pumpability test device

按照泵送性试验流程, 对这 4 种油脂开展泵送性检测, 得到不同压力下 4 种油脂的泵送量测试结果, 如图 2 所示。由图 2 可知: ①在相同的气压条件下, 油脂 A 的泵送性能最差; 油脂 B 和油脂 C 的泵送性能基本相同; 油脂 D 的泵送性能最优。②对于同一种油脂, 随着气压的增大, 其泵送量也相应增大; 在检测的范围内, 气压与泵送量之间呈现线性增长关系。③随着气压的增大, 不同油脂泵送性能的差异越来越大。在气压为 0.60 MPa 时, 4 种油脂泵

送性能指标差异很小, 油脂 D 泵送量 ($3.58 \text{ g}/\text{min}$) 是油脂 A 泵送量 ($2.26 \text{ g}/\text{min}$) 的 1.58 倍; 在气压为 1.00 MPa 时, 4 种油脂泵送性能指标有明显差异, 油脂 D 泵送量 ($82.24 \text{ g}/\text{min}$) 是 A 油脂泵送量 ($13.54 \text{ g}/\text{min}$) 的 6.07 倍。

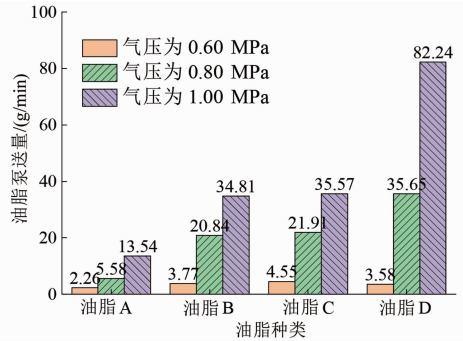


图 2 不同压力下 4 种油脂的泵送量

Fig. 2 Pumping quantity of four greases under different pressures

1.2 稠度试验

盾尾密封油脂稠度的测试方法为: 将油脂装填在样品杯中, 释放锥体, 测试锥体刺入油脂的难易程度。此试验的检测指标为锥入深度(即在规定的质量、时间和温度条件下锥体垂直刺入油脂的深度, 单位为 mm), 测试精度为 0.1 mm 。锥入深度值越大, 表示油脂越软。

按照稠度试验流程, 对 4 种油脂开展稠度检测, 得到 4 种油脂锥入深度时程曲线如图 3 所示。通过对比不同油脂的锥入深度值可知: 油脂 D 的锥入深度最大, 油脂 C 和油脂 B 的锥入深度次之, 油脂 A 的锥入深度最小。这说明油脂 D 的稠度最低, 在外力作用下抵抗变形的能力最弱; 油脂 A 的稠度最高, 在外力作用下抵抗变形的能力最强。油脂 C 和油脂 B 的锥入深度差异较小, 这两种油脂稠度相似。

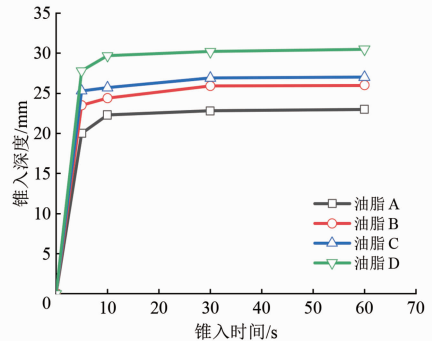
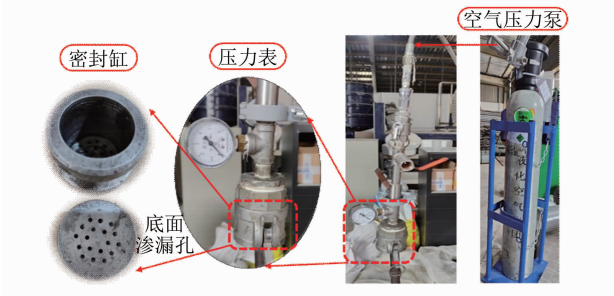


图 3 4 种油脂锥入深度时程曲线

Fig. 3 Time-history curves of cone penetration depth with four greases

1.3 耐水压密封性试验

盾尾密封油脂耐水压密封性的测试,广泛采用 Matsumura 法^[9]。油脂耐水压密封性试验装置如图 4 所示,仪器设备主要包括密封缸、空气压力泵及压力表等,钢丝网铺设在密封缸的底部,油脂涂抹在钢丝网上。



注:虚框及箭头表示图片的局部放大。

图 4 油脂耐水压密封性试验装置实物图

Fig. 4 Photo of grease waterproof hydraulic sealing test device

按照耐水压密封性试验流程,对 4 种油脂开展耐水压密封性检测。设定的试验条件为:钢丝网规格为 16 目、油脂层厚度为 2 cm。在该试验条件下测试油脂在不同气压下的压力保持时间(以下简称“保压时间”)。在加压之后,油脂渗漏分为 3 个阶段:①在压力作用下,油脂从底部孔隙处被挤压出去,油脂呈条状;②大约 2 min 后,密封缸底部孔隙处开始渗水,有少量水珠呈滴落状流出;③随后发生突涌并伴随漏气,密封缸内部无法保压,压力表读数瞬间下降,大量油水混合物被挤出。

图 5 为油脂在不同压力下的保压时间曲线。通过对比这 4 种油脂的保压时间可以发现:在相同压力下,油脂保压时间从长到短的排序为油脂 A>油脂 B>油脂 C>油脂 D,这说明油脂 A 的耐水压密封性能最好,油脂 B 和油脂 C 次之,油脂 D 的耐水压

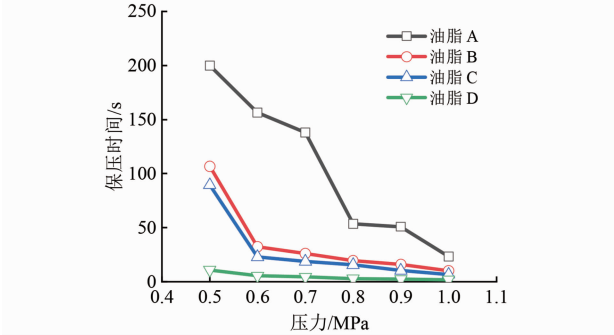


图 5 油脂在不同压力下的保压时间曲线

Fig. 5 Pressure-holding time curves of grease under different pressures

密封性能最差;B 油脂与 C 油脂的保压时间相差很小,这说明二者的耐水压密封性能基本一致。

试验结束打开密封缸后发现,在油脂内部出现了明显的渗漏孔和渗漏通道。4 种油脂出现了不同的渗漏特征,如图 6 所示。油脂 A 仍具有一定纤维状结构,没有发生明显乳化;油脂 B 和油脂 C 已看不出纤维,油脂发生了乳化;油脂 D 发生了明显乳化,油脂与水混合充分,变成黏性较低的流体。

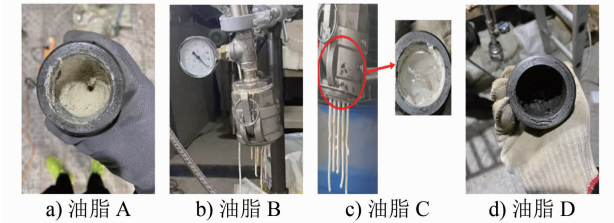


图 6 4 种油脂的渗漏特征

Fig. 6 Leakage characteristics of four greases

综上所述:不同油脂的保压时间呈现不同的变化规律,保压时间可能与油脂的组分及配比有关,纤维的长短、基础油的配比等均会影响油脂的耐水压密封性能。长纤维的存在使得油脂可以抵抗一定的应力而不发生流动。同时,长纤维会堵塞底部的渗漏孔,在密封缸底部形成黏稠状的“纤维饼”,使得油脂不易发生渗漏。油脂 A 具有较长的纤维,因此具有较好的保压性能。油脂 D 没有明显的纤维,因此油脂很容易从底部渗漏孔被挤出,导致保压失败。

2 防水失效试验

防水失效试验的目的是测试盾尾密封系统所能抵抗的最大水压力。试验时,若观察到装置尾部有油脂和水流出,即视为装置被击穿,盾尾防水失效。试验过程中,盾尾密封系统承受的最大水压力即为该系统的防水失效压力。

图 7 为本文设计的盾尾密封系统防水性能试验装置。该装置由盾尾模拟装置和配套仪器构成,配

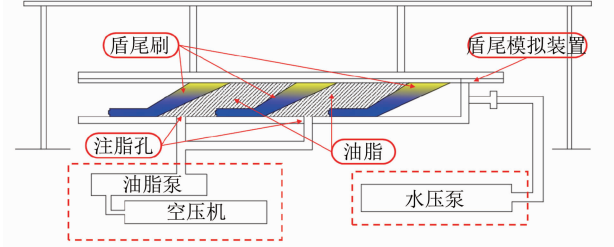


图 7 盾尾密封系统防水性能试验装置示意图

Fig. 7 Diagram of waterproof performance test device of shield tail sealing system

套仪器主要包括盾尾油脂加注设备、模拟水压设备、姿态调节设备及数据监测设备等。

防水性能测试结果如下:油脂 A 的防水失效压力为 0.70 MPa;油脂 B 的防水失效压力为 0.56 MPa;油脂 C 的防水失效压力为 0.53 MPa;油脂 D 的防水失效压力为 0.41 MPa。不同油脂的渗漏状态不同,图 8 为油脂 A 和油脂 B 的渗漏状态对比。由图 8 可知:油脂 B 中的某些成分与水相溶,形成了乳黄色液体,剩余组分仍然呈现纤维状。油脂 C、油脂 D 的渗漏状态与油脂 B 类似。

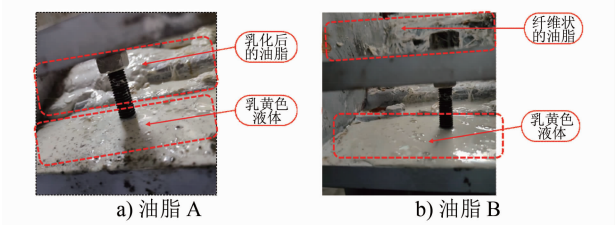


图 8 油脂 A 和油脂 B 的渗漏状况对比

Fig. 8 Comparison of leakage conditions between grease A and grease B

3 各性能指标的相关性分析

油脂性能指标较多,施工现场无法对油脂的全部性能指标进行试验检测。为简化油脂性能检测指标,本文通过对油脂性能指标数据进行数理统计分析,探究油脂各指标之间的相关性。选取的油脂各性能指标的统计结果如表 2 所示。

表 2 油脂各性能指标的统计结果

Tab. 2 Statistical results of grease performance indicators

油脂种类	泵送量/(g/min)	锥入深度/mm	保压时间/s	防水失效压力/MPa
油脂 A	13.54	20.0	23.5	0.70
油脂 B	34.81	23.5	10.3	0.56
油脂 C	35.57	25.3	6.7	0.53
油脂 D	82.24	27.8	2.0	0.41

注:泵送量和保压时间取气压等于 1.00 MPa 时的数据;锥入深度取锥入时间等于 5 s 时的数据。

应用 SPSS 统计软件进行相关性分析,并选用皮尔逊积差相关系数法分析表 2 数据的相关性。变量间相关强度由皮尔逊相关系数 r 的绝对值取值范围来判断,如表 3 所示。 r 的计算结果如表 4 所示。

由表 4 可知:①锥入深度与保压时间之间呈高度负相关,其相关系数为-0.982,这说明锥入深度越大的油脂,其耐水压密封性能越差。②锥入深度与防水失效压力之间呈高度负相关,其相关系数为

-0.992,这说明锥入深度越大的油脂,其防水失效压力越小,即防水密封效果越差。

表 3 变量间相关强度的判断依据

Tab. 3 Judgment basis of correlation strength between variables

r 的绝对值取值范围	相关强度
$>0\sim0.3$	弱相关或不相关
$>0.3\sim0.5$	低度相关
$>0.5\sim0.8$	中度相关
$>0.8\sim1.0$	高度相关

表 4 油脂各性能指标间的皮尔逊相关系数计算结果

Tab. 4 Calculation results of Pearson correlation coefficient among grease performance indicators

指标名称	皮尔逊相关系数 r			
	泵送量	锥入深度	保压时间	防水失效压力
泵送量	1.000			
锥入深度	0.919	1.000		
保压时间	-0.854	-0.982	1.000	
防水失效压力	-0.950	-0.992	0.974	1.000

由于锥入深度和保压时间之间高度相关,建议施工现场开展油脂性能检测时,可在锥入深度和保压时间这 2 个指标中选择 1 个进行检测即可,然后根据这 2 个指标之间的关系推算出另 1 个指标的情况,这样既可以减少油脂的消耗,也可以减轻现场油脂性能检测的工作量。

4 结语

本文以盾尾油脂为研究对象,采用室内性能检测、模型试验等方法,分析了盾尾油脂的各项性能,并对各性能指标间的相关性进行了分析,得出结论:

1) 不同油脂的性能差异较大,在油脂选型时有必要对油脂的性能进行检测。

2) 不同盾尾油脂的防水失效压力有较大差异,其防水失效压力在 0.41~0.70 MPa 之间,并不是所有盾尾油脂都能满足 0.60 MPa 的设计防水压力。

3) 锥入深度与保压时间、锥入深度与防水失效压力之间均呈高度负相关。在开展油脂性能检测时,可根据指标间的相关性,简化部分油脂性能指标的检测工作。

参考文献

[1] YU C, ZHOU A, CHEN J, et al. Analysis of a tunnel failure

- caused by leakage of the shield tail seal system[J]. *Underground Space*, 2020, 5(2): 105.
- [2] LYU H M, SHEN S L, ZHOU A, et al. Perspectives for flood risk assessment and management for mega-city metro system[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, 84: 31.
- [3] SHEN X, YUAN D, CAO L, et al. Experimental investigation of the failure of shield grease seals under the influence of environmental factors: a case study[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2022, 133: 105975.
- [4] 王德乾. 一种盾尾密封油脂的配方研究与性能表征[J]. *隧道建设*, 2013, 33(4): 277.
WANG Deqian. Formulation research and property characterization of a kind of shield tail sealing grease[J]. *Tunnel Construction*, 2013, 33(4): 277.
- [5] ZHANG J, WANG Y, WANG J, et al. Primary research on preparation and properties of shield tail sealing grease[C]//Proceedings of the 2017 6th International Conference on Energy and Environmental Protection (ICEEP 2017). Zhuhai, China. Paris: Atlantis Press, 2017: 858.
- [6] 王德乾, 张锋, 贺春龙, 等. 安达环保型盾尾密封油脂的研究与应用[J]. *铁道建筑技术*, 2015(2): 86.
WANG Deqian, ZHANG Feng, HE Chunlong, et al. Research and application of ANDR environment-friendly shield tail sealing grease[J]. *Railway Construction Technology*, 2015(2): 86.
- [7] 谢宇飞, 王德乾, 廖剑平, 等. 增黏剂对盾尾密封油脂性能影响的试验研究[J]. *国防交通工程与技术*, 2021, 19(5): 70.
XIE Yufei, WANG Deqian, LIAO Jianping, et al. Experimental study on the effect of tackifier on shield tail sealing grease performance[J]. *Traffic Engineering and Technology for National Defence*, 2021, 19(5): 70.
- [8] 斯芳芳. 盾尾密封油脂的研究现状与发展趋势[J]. *铁道建筑技术*, 2022(1): 26.
SI Fangfang. Research situation and development tendency of shield tail sealing grease[J]. *Railway Construction Technology*, 2022(1): 26.
- [9] 王德乾. 关于盾尾密封油脂抗水压密封性和泵送性测试的探讨[J]. *隧道建设*, 2014, 34(2): 107.
WANG Deqian. Study on water-tightness and pumpability of shield tail sealing grease[J]. *Tunnel Construction*, 2014, 34(2): 107.
- 收稿日期:2023-08-14 修回日期:2023-10-06 出版日期:2024-04-10
Received:2023-08-14 Revised:2023-10-06 Published:2024-04-10
· 作者:郭世情,高级工程师,gsq-73@163.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第180页)

- DENG Ting, HUANG Maosong, SHI Zhenhao, et al. Ground deformation response induced by jacking process of deep rectangular tunnel in soft clay[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2023, 56(S2): 157.
- [3] 谢义华, 李翔. 探究长距离煤浆管道顶管工程施工中关键技术环节的控制[J]. *化工管理*, 2020(2): 164.
XIE Yihua, LI Xiang. Discussion on the control of key technical links in the construction of long-distance coal slurry pipeline jacking project[J]. *Chemical Enterprise Management*, 2020(2): 164.
- [4] 李辉, 杨贵阳, 宋战平, 等. 矩形顶管施工引起土体分层变形计算方法研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2019, 15(5): 1482.
LI Hui, YANG Guiyang, SONG Zhanping, et al. Study on calculation method of soil delamination deformation caused by rectangular pipe jacking construction[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2019, 15(5): 1482.
- [5] 许有俊, 王雅建, 冯超, 等. 矩形顶管施工引起的地面沉降变形研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2018, 14(1): 192.
XU Youjun, WANG Yajian, FENG Chao, et al. Research on ground deformation caused by rectangular pipe jacking construction[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2018, 14(1): 192.
- [6] 张明磊, 隆威, 王李昌. 基于 FLAC-3D 的顶管施工护壁泥浆套研究[J]. *科技视界*, 2019(9): 197.
ZHANG Minglei, LONG Wei, WANG Lichang. Study of protective mud screen of pipe-jacking based on FLAC-3D[J]. *Science & Technology Vision*, 2019(9): 197.
- [7] 邴凤举, 王新, 习宁, 等. 顶管施工三维数值模拟及土质适用性研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2011, 7(6): 1209.
BING Fengju, WANG Xin, XI Ning, et al. 3D numerical simulation of pipe jacking and its soil applicability study[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2011, 7(6): 1209.
- [8] 邓长茂, 彭基敏, 沈国红. 软土地区矩形顶管施工地表变形控制措施探讨[J]. *地下空间与工程学报*, 2016, 12(4): 1002.
DENG Changmao, PENG Jimin, SHEN Guohong. Discussion on control methods of ground surface settlement caused by rectangular pipe jacking construction in soft soils[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2016, 12(4): 1002.
- [9] 江晨悦. 城市道路下大断面矩形顶管沉降变形分析[D]. 太原理工大学, 2022.
JIANG Chenyue. Analysis of settlement deformation of large-section rectangular pipe jacking under urban roads [D]. Taiyuan University of Technology, 2022.
- 收稿日期:2021-11-03 修回日期:2022-03-04 出版日期:2024-04-10
Received:2021-11-03 Revised:2022-03-04 Published:2024-04-10
· 第一作者:邢慧堂,高级工程师,happyxht@163.com
通信作者:李鹏飞,硕士研究生,469153087@qq.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license