

环境因素对地铁钢轨扣件绝缘性能影响的试验研究

李鲲鹏¹ 曹晓斌² 沈豪² 徐超²

(1. 广州地铁设计研究院有限公司, 510010, 广州; 2. 西南交通大学电气工程学院, 610031, 成都//第一作者, 教授级高级工程师)

摘要 城市轨道交通钢轨对地绝缘性能的好坏是影响杂散电流大小的主要原因。而对地绝缘性能的好坏主要由钢轨扣件的绝缘性能决定。扣件的绝缘工作环境相当复杂, 污秽、温度及湿度都会引起绝缘性能的下降, 造成过渡电阻的减小。通过搭建扣件绝缘性能测试平台, 研究了不同环境因素对扣件绝缘性能的影响, 研究发现: 湿度对绝缘性能的影响十分严重, 主要表现在其增大钢轨表面电导率, 形成泄漏电流的低阻流通过路; 温度的影响主要体现在其对水蒸气凝结起抑制作用, 温度越高钢轨表面越不容易凝露; 雾气中的盐分也会增加扣件绝缘性能的下降。

关键词 地铁; 钢轨扣件; 绝缘性能; 相对湿度; 温度

中图分类号 U213.53

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2020.03.013

Experimental Study of Environmental Influence on Metro Rail Fastener Insulation Performance

LI Kunpeng, CAO Xiaobin, SHEN Hao, XU Chao

Abstract The insulation performance of urban rail transit rail to ground is the main reason that influences the stray current, while the insulation performance is mainly determined by the insulation fasteners. The working environment of insulation fastener is quite complex, fouling, temperature and humidity will cause the degradation of insulation performance and the decrease of transition resistance. In this paper, the impact of different environmental factors on the fastener insulation performance is studied by constructing a fastener insulation test platform. The result shows that the influence of humidity on insulation performance is very serious following the increase of the rail surface conductivity, resulting in the low resistance flow path for leakage current. The temperature impact is mainly reflected in its inhibition of water vapor condensation, the higher the temperature is, the less exposed the rail surface will be. In addition, the salt content increase in the fog will reduce the fastener insulation performance.

Key words metro; rail fastener; insulation performance; relative humidity; temperature

First-author's address Design Institute of Guangzhou Metro Corporation, 510010, Guangzhou, China

钢轨对地绝缘性能的好坏主要由钢轨扣件的绝缘性能决定。因此, 研究扣件绝缘的工作环境对防治杂散电流有着十分重要的作用。钢轨每公里大约有 2 000 个扣件。既有扣件理论设计的实验室检测绝缘电阻为 $10^8 \Omega$ 以上, 理论上满足实际工况要求。但有的线路扣件在实际地铁运营环境中检测到的绝缘电阻每公里在 $1 \Omega/\text{km}$ 以下。究其原因, 随着运行年限的增加, 组成扣件的绝缘材料逐渐老化, 绝缘性能逐渐变差。另外, 地铁运行环境复杂, 扣件很容易受到水、灰尘和轮轨摩擦产生的金属屑等的影响, 导致扣件总绝缘电阻小于规定要求。

世界各国的铁路用扣件均根据行车要求和国情、传统等采用不同的型式。英国研发的 Pandrol 扣件成为在世界范围内应用最为广泛的扣件, 比利时、美国等数十个国家的铁路系统全部或部分应用了这种形式的扣件; 法国则在本国的轨道交通领域推广使用双曲拱形式的弹片作为钢轨扣压件^[9]。我国铁路及其它轨道交通上使用的扣件一般可分为刚性扣件和弹性扣件, 按轨枕结构可分为有挡肩扣件和无挡肩扣件, 按轨枕、垫板和扣压件的组合方式可分为分开式扣件和不分开式扣件^[10]等。我国轨道交通系统铺设了包括这些类型的多种扣件, 城市轨道交通的扣件主要有 I 型、II 型和 III 型, 目前 III 型扣件应用较广, 因此本文以 III 型扣件作为研究对象, 研究扣件的工作环境对扣件绝缘性能的影响。

本文以弹条 III 型分开式扣件作为研究对象, 通过人工污秽试验来研究扣件在多种模拟环境下的绝缘性能变化, 以找出扣件在实际环境中的绝缘薄弱环节。

1 试验方法

1.1 试验原理

在人工污秽试验中,由调压器和倍压整流装置组成的电压调节设备可稳定输出0~1 500 V 直流电压。利用人工雾室中由雾化器和空气加热装置组成的温湿度控制器可调节雾室内的温湿度,并可将温湿度通过高精度传感器显示出来。试验时利用导电性能优良的铜板制作测量电极,并将钢轨和铁垫板下垫板两端加上、下电极,在铁垫板侧面加中

电极。由钢轨散流到混凝土轨枕的泄漏电流将先后经过轨下垫板、轨距块和铁垫板下垫板,因此本文分别研究这些绝缘部件的电阻与温度、湿度等影响因素的关系。将上、中两电极间的电阻记为 R_1 (R_1 代表轨下垫板和轨距块的总电阻),中、下两电极间的电阻记为 R_2 (R_2 代表铁垫板下垫板的电阻),这里提出 R_1 、 R_2 是为了能更直观地反映几个绝缘部件的电阻值大小。同步读取电压表的电压和微安表示数便可获取扣件的伏安特性。人工污秽试验装置与六倍压整流电路如图1及图2所示。

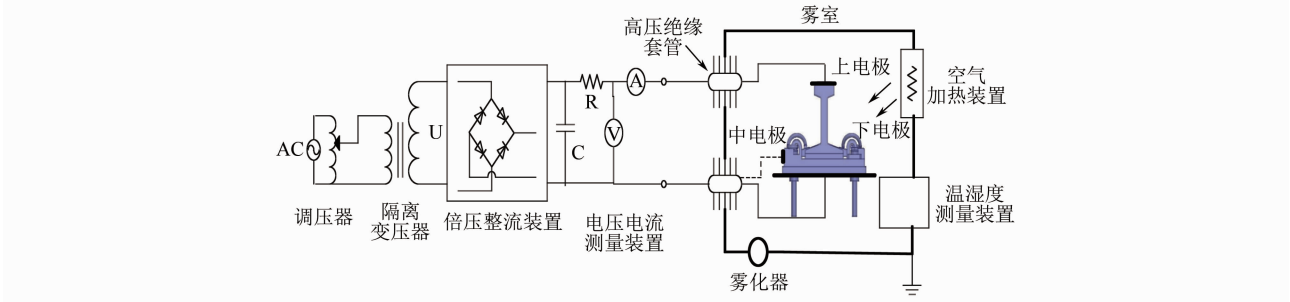


图1 人工污秽试验装置示意图

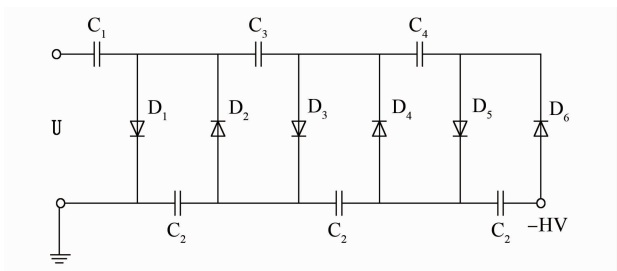


图2 六倍压整流电路示意图

1.2 试验材料与试品制备

绝缘材料表面的污秽对钢轨扣件绝缘性能影响大,因此作人工染污试验时选择轨距块、轨下垫板和铁垫板下垫板作为研究对象。试品的染污依据 GB/T 22707—2008,选择固体涂层法。染污前需将试品清洗干净并晾干。涂污时用到的污液依据标准规定的相应污秽等级下的盐密、灰密值来配比。钢轨扣件表面的污秽层物质,一般包括了水溶性物质和不溶性物质两类。本试验选用食用盐来模拟实际环境中的水溶性物质;选用高岭土来模拟实际环境中的不溶性物质。即采用 NaCl、高岭土分别和水按一定比例配比成一定盐密和灰密的污液。将配好的污液均匀涂抹于轨距块、轨下垫板,以及铁垫板下垫板裸露于空气中的部分表面,并将试品放于干燥通风处晾干,干燥后将扣件各部件组装以测得钢轨扣件整体的绝缘电阻。表1 参照 GB/T

16434—1996 规定的环境污秽等级,因扣件表面的污秽经长时间积累并受雾霾等恶劣天气的影响,本文试验采用污染较为严重情况下的盐密值 0.25 mg/cm^2 ,且盐灰比为1:3。

表1 环境污秽等级

污秽等级	污湿特征	盐密/(mg/cm^2)	
		线路	发电厂、变电所
0	大气及离海岸盐场50 km以上无明显污染地区	≤ 0.03	
I	大气轻度污染地区,工业区和人口低密集区,离海岸盐场10~50 km地区	$0.03 < \cdot \leq 0.06$	≤ 0.06
II	大气中度污染地区,轻盐碱和炉烟污秽地区,离海岸盐场3~10 km地区	$0.06 < \cdot \leq 0.10$	$0.06 < \cdot \leq 0.10$
III	大气污染较严重地区,重雾和重盐碱地区,近海岸盐场1~3 km地区	$0.10 < \cdot \leq 0.25$	$0.10 < \cdot \leq 0.25$
IV	大气特别严重污染地区,离海岸盐场1 km以内,离化学污源和炉烟污秽300 m以内的地区	$0.25 < \cdot \leq 0.35$	$0.25 < \cdot \leq 0.35$

1.3 试验方法

试验在密闭的人工雾室中进行。将涂污并组装后的扣件各部分置于雾室中,并用烘干机干燥使雾室内相对湿度稳定地保持在 $(50\pm 5)\%$,温度控制在 $(20\pm 2)^\circ\text{C}$,将组装好的扣件放到雾室中静置30 min。然后可通过雾化器和加热器迅速调节雾室内的温、湿度使其达到所需的试验条件(即模拟扣件

的实际工作情况)。扣件每次受潮达到一定时间后,打开电源,通过调压器调节电极间的电压,并保持 1 min,稳定后同步记录电流、电压值。并同时记录雾室内的温湿度值与受潮的时间。

本文分两部分测量扣件的绝缘性能,即 R_1 、 R_2 。绝缘材料的体电阻受环境中温度、湿度的影响很小,而且绝缘材料的体电阻很大,涂污后表面泄漏电流远大于体电流。因此测量结果可在一定程度上体现环境因素对扣件绝缘材料表面电阻的影响。

2 试验结果与分析

2.1 相对湿度对扣件绝缘性能的影响

现控制其它试验条件不变,针对不同相对湿度下钢轨扣件的绝缘电阻变化规律做出分析,了解扣件组在不同相对湿度下的绝缘损失情况。试验时在常温下即 $(20\pm2)^{\circ}\text{C}$ 的条件下进行,测量电压在 0~1 500 V 可调,不同相对湿度下的测试结果如表 2~3 所示。

表 2 不同相对湿度下的 I 值与 R_1 值

相对湿度/%	$I/\mu\text{A}$	$R_1/\text{M}\Omega$
55.0	220.6	6.80
70.4	221.5	6.77
81.8	224.2	6.69
91.2	234.0	6.41
99.8	261.8	5.73

注:测试电压为 1 500 V; I 代表扣件组泄漏电流;表 3 同

表 3 不同相对湿度下的 I 值与 R_2 值

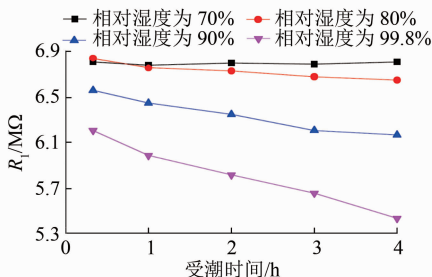
相对湿度/%	$I/\mu\text{A}$	$R_2/\text{M}\Omega$
52.0	179.60	8.35
71.7	217.70	6.89
81.5	280.40	5.35
90.3	641.00	2.34
99.8	781.25	1.92

表 2~3 显示了测试电压为 1 500 V 时雾室内湿度逐渐增加时扣件绝缘性能的变化。随着环境相对湿度的提高,流过钢轨扣件的泄漏电流开始增大,表面电阻由于污秽层吸收水分开始减小。但湿度从正常环境的 56% 到湿度接近 80% 的过程中, R_1 的阻值变化不大,维持在 6.7~6.8 $\text{M}\Omega$ 之间;当相对湿度高于 80% 时,随着相对湿度的增加,表面电阻下降导致 R_1 阻值降低,在相对湿度达到接近饱和湿度 99.8% 时, R_1 的阻值相对于正常情况时低了 1.57 $\text{M}\Omega$, 变化十分明显。而 R_2 的阻值在相对湿度逐渐增加的过程中一直变化明显,饱和湿度条件下

只有 1.92 $\text{M}\Omega$, 下降幅度很大。

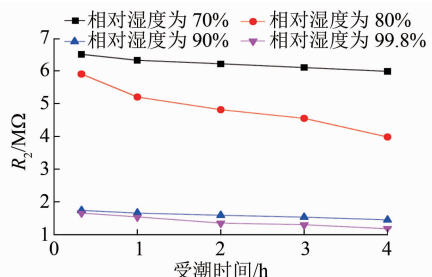
2.2 受潮时间对扣件绝缘性能的影响

为了研究受潮时间对扣件绝缘性能的影响,现控制其它试验条件不变,针对不同受潮时间对钢轨扣件的绝缘电阻变化规律做出分析。相对湿度为 70%、80%、90%、99.8% 下,扣件持续受潮 4 h 多的过程中绝缘电阻变化情况如图 3~4 所示。



注:测试电压为1 500 V

图 3 扣件 R_1 的值与受潮时间的关系



注:测试电压为1 500 V

图 4 扣件 R_2 的值与受潮时间的关系

结合图 3~4 可知,随着扣件在雾室中受潮时间的增加,表面污秽层吸附越来越多的水分,扣件两部分绝缘电阻均有不同程度下降。环境中的相对湿度没有变,而随着受潮时间的增加,钢轨扣件绝缘电阻下降,因为表面电阻的大小与因环境湿度大而在钢轨扣件表面冷凝的水珠有关。由此可以看出,在环境相对湿度不够高时,空气中的水蒸气无法在钢轨扣件表面冷凝成水珠,因此表面电阻的阻值不会产生任何变化;扣件两部分绝缘电阻值受潮相同时间后的下降幅度不同, R_2 对空气湿度非常敏感。当扣件在相对湿度大于 90% 的环境中受潮一段时间后, R_2 已经小于 2 $\text{M}\Omega$ 。这是由于在扣件的绝缘结构中,泄漏电流通过铁垫板下垫板的侧面污秽层散流,泄漏距离较小,水分很容易附着在侧面污秽层连接铁垫板和下电极形成通路,继续受潮时 R_2 变化不明显。此时,取出铁垫板下垫板后发现,侧面污秽层已较试验前有明显湿润。

2.3 盐溶液浓度对扣件绝缘性能的影响

相关研究表明,雾滴中除了含有粉尘颗粒外还有大量的导电离子,其导电离子的浓度与当地大气污染程度和性质有关。本试验中使用的盐雾由雾化器在盐溶液中产生,盐溶液则是参照相关人工污秽试验标准,使用纯 NaCl 和水配成的浓度为 20 kg/m³ 的溶液;与之对比的是由纯净水产生的雾环境。

表 4~5 为盐雾、非盐雾以及不同相对湿度下扣件的 R_1 值和 R_2 值。

受潮时间/ min	盐雾、非盐雾以及不同相对湿度下扣件的 R_1 值			
	相对湿度为 90%		相对湿度为 99.8%	
	非盐雾环境	盐雾环境	非盐雾环境	盐雾环境
20	6.55	5.60	6.20	5.18
60	6.43	5.39	5.98	4.76
120	6.34	5.32	5.81	4.54
180	6.20	5.27	5.65	4.27
240	6.16	5.19	5.43	4.05

注:测试电压为 1 500 V

受潮时间/ min	盐雾、非盐雾以及不同相对湿度下扣件的 R_2 值			
	相对湿度为 90%		相对湿度为 99.8%	
	非盐雾环境	盐雾环境	非盐雾环境	盐雾环境
20	1.74	1.27	1.66	0.95
60	1.66	0.92	1.54	0.84
120	1.59	0.81	1.35	0.69
180	1.53	0.75	1.30	0.57
240	1.45	0.62	1.18	0.43

由表 4~5 可知,盐雾环境对扣件绝缘性能有显著的影响。在盐雾环境中受潮一段时间后, R_1 下降了近 1 M Ω ,尤其是在饱和湿度下受潮 4 h 后,下降幅度达 1.38 M Ω 。而原本在高湿度环境下阻值已经大幅度下降的 R_2 在盐雾环境阻值低于 1 M Ω 时,下降幅度高达 30%~60%。因此在重污染的空气条件下,高架桥或地面的地铁线路扣件的绝缘性能会受到雾气中的盐份的影响。

2.4 温度对扣件绝缘性能的影响

环境温度对于绝缘材料的体电阻和表面电阻都有一定影响,温度对体电阻的影响主要体现在对绝缘介质电导率的影响。当温度升高时,水蒸气在扣件表面的凝结会受阻,因此表面电阻会增加。

本节通过钢轨扣件分别在 20 ℃ 和 30 ℃ 时的雾室中以饱和湿度持续受潮,来研究温度对扣件绝缘性能的影响。图 5~6 为测试电压为 1 500 V,以及饱和湿度和 80%湿度时雾室内温度分别为 20 ℃ 和

30 ℃ 时 R_1 随受潮时间的变化。在整个受潮的过程中,扣件 R_1 值在 30 ℃ 时始终大于 20 ℃ 时,并且 30 ℃ 时 R_1 随受潮时间的增加下降幅度要小得多,很明显此时环境湿度对扣件绝缘性能的影响变小。虽然温度升高时绝缘材料的体电阻降低,但高温对水蒸气在扣件表面凝结的抑制作用更明显。饱和湿度持续受潮的条件下,温度升高对扣件受潮的削弱作用更加明显了。因此温度升高时扣件的绝缘性能亦随之增加。

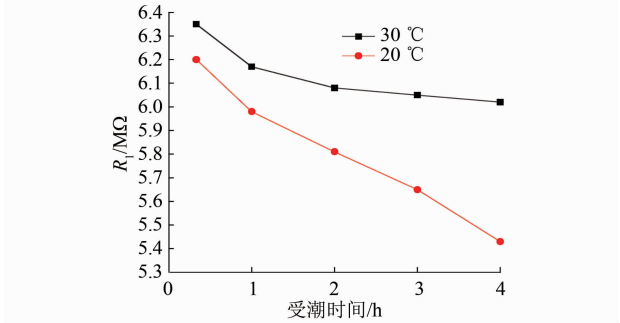


图 5 饱和湿度时不同温度条件下扣件 R_1 值与受潮时间的关系

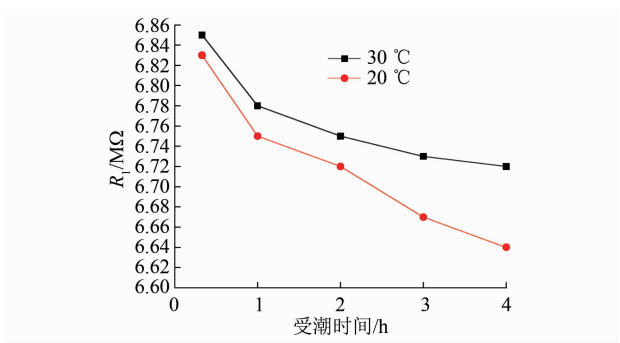


图 6 湿度为 80%时不同温度条件下扣件 R_1 值与受潮时间的关系

3 结论

1) 扣件在湿度大的环境中绝缘性能下降严重,并且受潮时间越久绝缘电阻越小。湿度对扣件的影响体现在空气中的水蒸气冷凝在钢轨扣件表面,增大了表面电导率,形成泄漏电流的低阻流通路径。试验中涂污后的铁垫板下垫板在湿度达到 90%时绝缘电阻由 8 M Ω 下降到小于 2 M Ω ,原因是铁垫板下垫板比较薄且侧面大,很容易在附着水蒸气的同时因湿润形成通路。因此铁垫板下垫板是扣件绝缘的薄弱环节。

2) 温度对扣件绝缘性能的影响主要体现在对水蒸气凝结的抑制作用。温度越高,空气中的水蒸

气越难在钢轨扣件表面形成凝露,其表面越干燥,表面电导率就越低,对应的绝缘性能就越好。

3) 盐雾环境对扣件表面电阻也有一定影响,相同湿度条件下,雾气中的盐分会增加扣件绝缘性能的下降程度。扣件的人工污秽试验无法完全地模拟自然污秽和自然环境,因此不可避免地存在一定的误差,今后对此需作更多的探索。

参考文献

- [1] 曹晓斌,吴广宁,付龙海,等.地铁杂散电流的危害及其防治[J].电气化铁道,2006(4):32.
- [2] 胡海涛,王江峰,何正友,等.地铁牵引供电系统交-直流潮流算法研究[J].铁道学报,2012(11):22.
- [3] 庞原冰,李群湛,刘炜,等.基于电场的地铁杂散电流模型研究[J].城市轨道交通研究,2008(2):27.
- [4] 秦峰,朱祥连,奚杰,等.城市轨道交通设施杂散电流的防护[J].机电工程,2013(1):102.
- [5] 战鹏.地铁杂散电流对钢筋混凝土结构腐蚀影响研究及防护[D].北京:北京交通大学,2009.
- [6] 于春华.铁路钢轨扣件发展综述[J].铁道标准设计,2006(增刊1):188.

(上接第 47 页)

2) 侧墙及侧墙与底角块接头处混凝土应力较大,超过混凝土强度设计值,但未达到混凝土抗压强度标准值,优化设计时应可通过改变该处接头的连接形式减小混凝土的受力。

3) 使用阶段接头螺栓的最大拉应力以及螺纹钢的最大拉应力变化不大,在施工过程中应注意对其预紧力进行监测。

4) 预制装配式车站结构节点的强度、刚度及抗震性能与现浇结构不同,后续应加强对接头连接措施及其性能的研究,以使结构达到安全可靠的要求。

参考文献

- [1] 刘建洪.明挖装配式地铁车站结构设计优化及施工过程力学特性研究[D].成都:西南交通大学,2007.
- [2] 李兆平,苏会峰,吕书清,等.装配式地铁车站结构双榀槽式接头抗弯力学性能试验研究[J].土木工程学报,2017(增刊2):28.
- [3] 苏会峰,李习伟,王臣.全装配式地铁车站结构接头抗弯承载

- [7] 吴伟,于冰.中欧铁路轨道主要产品技术标准对比分析[J].铁道技术监督,2016(4):1.
- [8] DAVIS M. Improving performance of crossties and fasteners[J]. Railway Track & Structures, 2013(12):16.
- [9] JUDGE T. Fasteners: A multiple-choice question[J]. Railway Age, 2008(3):28.
- [10] 吴建忠,李腾万,李湘久.城市轨道交通钢轨扣件的研究与设计[J].都市轨道交通,2005(3):50.
- [11] 许竞,高波,宋臻杰,等.不同环境因素对复合绝缘子憎水性影响的研究[J].高压电器,2018(2):103.
- [12] 孙继星,徐跃,胡学永,等.高速气流环境中电气化铁路绝缘子表面积污分布特性[J].高电压技术,2014(1):95.
- [13] 曹桂,王同来,曹保江,等.高速气流中沙尘对复合绝缘子闪络特性的影响研究[J].高压电器,2018(1):164.
- [14] 王建国,王康,姚森敬,等.不带电条件下复合绝缘子与 XP-70 绝缘子自然积污特性对比分析[J].高电压技术,2013(4):957.
- [15] 方春华,王建国,操平梅,等.污秽绝缘子泄漏电流与环境温湿度相关分析[J].高电压技术,2012(4):885.
- [16] 李亚伟,张星海,贾志东,等.不同覆冰类型绝缘子串的泄漏电流特征分析[J].电网技术,2017(11):3691.

(收稿日期:2018-05-09)

能力试验研究[J].铁道学报,2016(9):118.

- [4] 李习伟,刘强.预制装配式地铁车站单榀槽式接头抗弯刚度影响因素分析[J].铁道标准设计,2016(8):113.
- [5] 钟春玲,张乐乐.装配式地铁车站力学性能有限元分析[J].吉林建筑大学学报,2016(3):22.
- [6] 钟春玲,李雷.全预制装配式车站节点的连接方式研究[J].吉林建筑大学学报,2015(6):1.
- [7] 李兆平,王臣,苏会峰,等.预制装配式地铁车站结构榀槽式接头力学性能研究[J].中国铁道科学,2015(5):7.
- [8] 李兆平,王臣,苏会峰,等.装配式地铁车站结构接头混凝土裂缝及接缝变形规律试验研究[J].土木工程学报,2015(增刊1):409.
- [9] 谢云轩.长春市地铁2号线一期工程袁家店装配式车站拼装施工方案及试验情况汇报[R].长春:中铁十三集团有限公司,2013.
- [10] 王如路,张冬梅.超载作用下软土盾构隧道横向变形机理及控制指标研究[J].岩土工程学报,2013(6):1092.
- [11] 张厚美,张正林,王建华.盾构隧道装配式管片接头三维有限元分析[J].上海交通大学学报,2003(4):566.

(收稿日期:2018-05-07)

《城市轨道交通研究》欢迎投稿

投稿网址:tougao.umat1998.com