文章编号:1009-6582(2019)05-0206-05 DOI: 10.13807/j.cnki.mtt.2019.05.028

地铁盾构隧道管片预埋槽道关键技术研究

李积鸿[1] 靳世鹤[1] 梁庆国[2] 严松宏[2]
(1 兰州市轨道交通有限公司,兰州 730000;2 甘肃省轨道交通力学应用工程实验室,兰州 730070)

摘 要 为了确定地铁盾构隧道管片预埋槽道的最佳断面尺寸、槽体材料、防腐层材料、绝缘层材料等关键参数,以便在国内地铁工程中通用,文章以兰州地铁盾构隧道管片预埋槽道的应用案例为基础,通过理论研究和工程实践,提出了地铁盾构隧道管片槽道的抗疲劳、耐火、绝缘和防腐等性能指标,并对盾构隧道管片预埋槽道的断面尺寸、主槽体和防腐层等关键技术问题进行了研究。研究结果表明:(1)采用断面尺寸为30 mm×20 mm的预埋槽道无论在力学性能还是成本方面都是最佳的;(2)兰州地铁盾构隧道管片预埋槽道采用的主槽体材料、防腐等参数是科学合理的;(3)研究成果不仅为相关国家技术标准的建立奠定了基础,也为同类工程的预埋槽道设计、生产和安装等提供了技术依据。

关键词 兰州地铁 盾构隧道管片 预埋槽道 断面尺寸 防腐技术 性能指标
中图分类号:U454 **文献标识码:A**

1 前 言

盾构隧道管片预埋槽道是一次性预埋在管片中,在后期机电安装时不需要在管片上打孔植入膨胀螺栓[1]。预埋槽道技术不仅使得在盾构隧道内机电安装快捷、方便,综合成本低,维护方便,节约工期,同时还避免了因打孔造成盾构隧道管片结构损坏和打伤管片内部钢筋等现象,因而近几年得以在我国开始普及应用[2]。

预埋槽道在国外应用已有近百年的历史,但因国外技术封锁等原因,国内尚无技术标准可循。虽然国内铁路工程接触网应用预埋槽道技术有近十年的历史[3],但由于地铁盾构隧道工程的特殊条件,铁路工程预埋槽道技术标准难以完全涵盖地铁盾构隧道预埋槽道的技术要求,同时国内的盾构隧道管片宽度不一,在预埋槽道的断面尺寸、防腐等关键技术方面仍存在认识上的误区,对推广运用盾构隧道管片预埋新材料、新技术造成很大的困扰[4]。因此,及时开展盾构隧道管片预埋槽道关键技术研究就显得非常迫切和必要。

2 预埋槽道的材质

2.1 预埋槽道的槽体

盾构隧道管片预埋槽道(图1)、锚杆和相应配件的材质选用低碳高合金钢[5],其中各元素(包括但不限于以下几类元素)的含量要求见表1。

通过在地铁盾构隧道管片预埋槽道槽体中添加其它金属元素,使得预埋槽道在疲劳频率为1~3 Hz、正弦波波形、荷载基准及幅值为$(1.0\pm3.0)\times10^4$ N的情况下,自由状态时的疲劳试验不小于100万次;在预埋混凝土中受约束时,疲劳试验不小于300万次,同时满足1 200 h的耐火能力。

2.2 合金共渗材料

地铁盾构隧道管片预埋槽道及锚杆的防腐层采用多元合金共渗层[6,7](包括但不限于以下几类元

修改稿返回日期:2018-05-22
基金项目:国家自然科学基金 (41562013).
作者简介:李积鸿(1979-),男,工程师,主要从事岩土与地下工程设计与施工技术研究工作,E-mail:251535893@qq.com.
通讯作者:靳世鹤(1979-),男,硕士,高级工程师,主要从事岩土与地下工程设计与施工技术研究工作, E-mail:shihe-jin@163.com.

素),其组成见表2。

2.3 绝缘封闭材料

地铁盾构隧道管片预埋槽道及锚杆的绝缘层元素组成(包括但不限于以下几类元素)见表3。

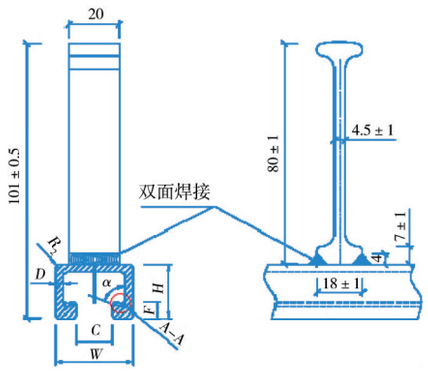


图1 预埋槽道样图(单位:mm)

Fig.1 Master drawing of the embedded channel (Unit: mm)

表1 盾构隧道管片预埋槽道槽体各元素含量

Table 1 Contents of various elements of embedded channel of shield tunnel segment

元素	含量/(%)	备注
碳(C)	≤0.08	低碳高合金钢
镍(Ni)	≥0.40	增强防腐能力
铬(Cr)	≥0.35	增强防腐能力
钼(Mo)	≥0.30	增强耐火能力
锰(Mn)	≤0.5	增强槽体强度
…	…	…

表2 盾构隧道管片预埋槽道防腐层各元素含量

Table 2 Contents of various elements of erosion resistance coating of embedded channel for shield tunnel segment

元素	含量/(%)	备注
锌(Zn)	≥95	提高防腐能力
铝(Al)	≤5	增强延展性、吸附性
锰(Mn)	<0.3	增强耐磨性能
…	…	…

表3 盾构隧道管片预埋槽道常见绝缘层材质

Table 3 Common insulation materials of the embedded channel for shield tunnel segment

材质	绝缘性	抗酸碱能力	粘附性	耐老化能力
改性环氧树脂[5]	良好	好	好	好
防腐漆	良好	好	好	好
柔性陶瓷	良好	良好	一般	良好
…	…	…	…	…

3 预埋槽道的断面尺寸

3.1 预埋槽道的断面尺寸

目前国内地铁盾构隧道衬砌管片的宽度主要有1.2 m,1.5 m和2.0 m(应用于盾构直径11 m以上的大直径隧道),对应的盾构隧道管片预埋槽道宽高尺寸主要有30 mm×20 mm, 30 mm×25 mm和38 mm×23 mm。

地铁盾构隧道管片预埋槽道槽口设计有两种形式:

(1)燕尾槽,槽口边角度α值为75°;

(2)平口槽,α值为90°。

采用燕尾槽还是平口槽,需根据工程实际来决定。

考虑地铁盾构隧道列车运营动荷载要求,地铁盾构隧道管片预埋槽道一次热轧成型,以便解决冷弯时的应力集中问题[8]。

3.2 槽道的极限破坏试验

为了提高槽道自身的防腐和耐火能力,在槽道的槽体中添加镍、铬等其它金属元素后,使得槽道的力学性能大大提高。为进一步验证槽道的力学性能,进行了槽道的抗拉、抗剪性破坏试验[9],如图2和图3所示。



图2 槽道拉拔试验

Fig.2 Pull-out test of embedded channel



图3 槽道剪切力试验

Fig.3 Shearing test of embedded channel

现代隧道技术

通过对尺寸为30 mm(宽)×20 mm(高)预埋槽道的抗拔、抗剪性能的破坏试验可知,预埋槽道在施加40 kN的抗拔、抗剪力时,槽体和内齿才开始发生变形,这是因为地铁盾构隧道管片预埋槽道设计要求施加的14 kN抗拔力、10 kN抗剪力的2.8倍以上。从试验可知,地铁盾构隧道管片预埋槽道主材通过添加一定量的特殊金属元素后,其力学性能远远超出其设计荷载的要求,因此预埋槽道的断面尺寸可以减小。在地铁盾构隧道运营阶段机电设备荷载一定的情况下,尺寸为30 mm×20 mm的预埋槽道经济性更优于30 mm×25 mm和38 mm×23 mm两种断面型式。

4 预埋槽道的防腐技术

4.1 电化腐蚀

地铁盾构隧道列车的牵引电流是1 500 V直流电。在列车供电过程中,由于种种因素存在,在轨行区会形成一定的杂散电流[10],对预埋在盾构隧道管片中的槽道造成腐蚀。因此,地铁盾构隧道管片的预埋槽道需在表层设置绝缘层(表3)。地铁盾构隧道管片预埋槽道的绝缘层能抵抗1 500 V击穿的能力,且表面电阻不小于50 MΩ。

4.2 化学腐蚀

钢材不管在酸性、碱性或者中性水溶液中都能发生化学反应,从而造成腐蚀。地铁盾构隧道管片预埋槽道工作环境处在阴冷潮湿的隧道内,极易遭到腐蚀,而预埋槽道要求满足100 a的使用寿命,因此,地铁盾构隧道管片预埋槽道的防腐层非常关键。地铁盾构隧道管片采用目前最先进的锌铝锰等多元合金共渗层,能满足中性烟雾试验2 400 h或者铜盐加速试验300 h不出现红绣的要求[11]。

5 工程应用

兰州地铁1号线、2号线一期工程全线采用盾构隧道管片预埋槽道技术,盾构隧道每环管片预埋30 mm×20 mm的槽道(图4),共计约4万环,管片宽1.2 m,厚0.35 m,成型隧道外径6.2 m,内径5.5 m。兰州地铁盾构隧道管片预埋槽道的剪切力、轴向力工作荷载为1.0×10^4 N,设计荷载为1.4×10^4 N,槽道在拉力、轴力加载到3.0×10^4 N时不发生任何屈服变形[4]。预埋槽道的防腐体系由里及表分别是槽道合金钢体自防腐、多合金共渗中间层防腐、绝缘层的表层防腐。预埋槽道的绝缘层采用改性环氧树脂[12]、防腐漆、柔性陶瓷等材料,均满足设计的各项性能指标要求。



图4 兰州地铁盾构隧道预埋槽道机电安装实例

Fig.4 Mechanical and electrical installation in embedded channel of the shield tunnel of Lanzhou Metro

兰州地铁盾构隧道管片预埋槽道的抗疲劳、耐火等性能要求均满足本文的研究结论。

5.1 槽道的预埋标准

兰州地铁盾构隧道管片槽道在管片模具中垂直向预埋的嵌入误差不大于5 mm,与管片的表面倾斜误差不大于3 mm,见图5。长1 000 mm的槽道预埋垂直误差为±5 mm,见图6。

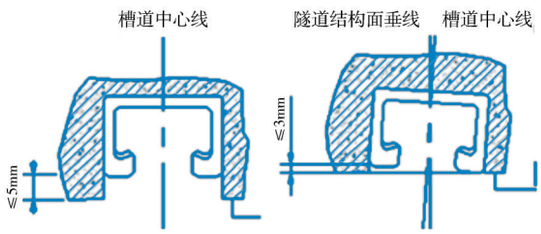


图5 槽道预埋时的嵌入、倾斜误差示意

Fig.5 Schematic of the errors of embedment and inclination during channel embedding

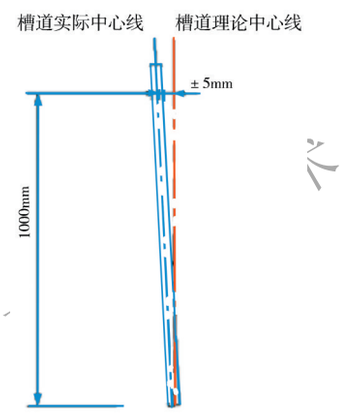


图6 槽道预埋时的垂直误差示意

Fig.6 Schematic of the vertical errors during channel embedding

盾构隧道管片预埋槽道环与环之间的预埋误差不大于3 mm。槽道预埋时的端头错位误差要求控制在±10 mm。

5.2 槽道的固定方法

兰州地铁盾构隧道管片预埋槽道的固定方法是在盾构隧道管片模板底部打设非贯穿性的螺栓孔，在槽道预留相应的孔洞，采用一次性遇热易软化的塑料螺栓把槽道固定在盾构隧道管片模具底部。通过兰州地铁近4万环槽道的预埋情况来看(图7)，该方法不仅简单易操作，而且也很经济，同时也满足槽道的预埋精度，值得推广使用。



图7 槽道在管片模具中的预埋固定

Fig.7 Embedding and fixing of channel in segment mold

5 结论与建议

(1) 兰州地铁盾构隧道管片采用的预埋槽道参数在各项试验检测中均合格，后期的盾构隧道机电设备安装也取得了很好的效果，验证了该标准是科学合理的。兰州地铁盾构隧道管片预埋槽道在设计、生产以及应用安装所取得的成果，可为建立地铁盾构隧道管片预埋槽道的国家技术标准提供依据。

(2) 通过预埋槽道的抗拔、抗剪破坏试验可知，30 mm×20 mm槽道的力学性能远大于设计要求。因此，在今后的工程设计中，槽道的结构尺寸应该宜小不宜大，以降低工程成本。同时，只有采用统一断面尺寸的预埋槽道，才能在国内地铁工程中通用，大大降低生产成本。

(3)地铁盾构隧道管片预埋槽道的防腐是其关键技术之一，不管采用哪种材料，只要满足电化腐蚀和化学腐蚀的要求即可；另外，因为不锈钢材料的诸多优点，盾构隧道管片预埋槽道的主材采用不锈钢材料应该是今后的发展方向，应尽快开展相关的研究。

参考文献

References

[1] 邓剑荣, 丁先立. 预埋滑槽技术在城市轨道交通工程中的应用[J]. 城市轨道交通研究, 2016, 19 (8): 90-93.
DENG Jianrong, DING Xianli. Application of Pre-embedded Chute Technology in Urban Rail Transit[J]. Urban Mass Transit, 2016, 19 (8): 90-93.

[2] 靳世鹤, 严松宏, 梁庆国. 盾构隧道衬砌管片预埋槽道抗碱性试验研究[J]. 铁道工程学报, 2016, 33 (5): 55-58.
JIN Shihe, YAN Songhong, LIANG Qingguo. Research on the Anti-alkaline Test of Embedded- channel in Lining Segment in Shield Tunnel[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2016, 33 (5): 55-58.

[3] 张伯阳, 严少发, 任 浩. 高速铁路隧道接触网预埋槽道施工控制技术[J]. 铁道工程学报, 2012, 29 (9): 75-79.
ZHANG Boyang, YAN Shaofa, REN Hao. Construction Control Technology for Precast Channel for Catenary in Tunnel of High-speed Railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2012, 29 (9): 75-79.

[4] 靳世鹤, 孙红斌, 曲明玉, 等. 地铁盾构管片预埋槽道防腐技术研究[J]. 铁道标准设计, 2017, 61 (8): 121-124.
JIN Shihe, SUN Hongbin, QU Mingyu, et al. Study on Anticorrosion Technology of Embedded-channel in Shield Segment of Metro [J]. Railway Standard Design, 2017, 61(8): 121-124.

[5] 马晓波. 盾构管片预埋滑槽技术在兰州地铁中的应用[J]. 铁道标准设计, 2016 (3): 101-105.
MA Xiaobo. Application of Embedded Chute in Shield Segment of Lanzhou Metro Line[J]. Railway Standard Design, 2016 (3): 101-105.

[6] 周 海, 陈 飞, 姚 斌, 等. 铸钢表面多元共渗工艺和性能研究[J]. 材料热处理学报, 2006, 27 (5): 104-107.
ZHOU Hai, CHEN Fei, YAO Bin, et al. Study on Process of Multi-element Permeation on Cast Steel Surface[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2006, 27 (5): 104-107.

[7] 肖作安, 费锡明, 邹勇进. 锌镍合金镀层耐腐蚀性的研究[J]. 材料保护, 2005, 38 (3): 15-17.

XIAO Zuoan, FEI Ximing, ZOU Yongjin. Corrosion Resistance of Zinc-Nickel Alloy Plating[J]. Materials Protection, 2005, 38 (3): 15-17.

[8] 杜 峰. 深圳地铁9号线盾构法隧道管片预埋滑槽设计研究及探讨[J]. 隧道建设, 2014, 34 (3): 249-253.
DU Feng. Design of and Study on Embedded Channels of Segments of Shield-bored Tunnels of Line 9 of Shenzhen Metro[J]. Tunnel Construction, 2014, 34 (3): 249-253.

[9] 徐淑美, 周德源, 毕大勇. 预埋式槽型锚轨抗拔性能的试验研究[J]. 结构工程师, 2010, 26 (5): 115-120.
XU Shumei, ZHOU Deyuan, BI Dayong. Test Study on Tensile Behavior of Cast-in Channels[J]. Structural Engineers, 2010, 26 (5): 115-120.

[10] 路春莲, 李 锋. 地铁杂散电流腐蚀防护系统相关问题探讨[J]. 都市快轨交通, 2013, 26 (1): 64-67.
LU Chunlian, LI Feng. Study on Protective Systems against Metro Stray Current Corrosion[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2013, 26 (1): 64-67.

[11] 中华人民共和国国家标准. 人造气氛腐蚀试验盐雾试验: GB/T 10125-1997[S]. 北京:中国标准出版社,1997.
National Standard of the People's Republic of China. Corrosion Tests in Artificial Atmospheres-salt Spray Tests: GB/T 10125-1997 [S]. Beijing: China Standard Press,1997.

[12] 武 龙, 李著萍, 沈宁祥. 防腐蚀涂料基料树脂水性化研究进展[J]. 材料保护, 2001, 34 (7): 18-19.
WU Long, LI Zhuping, SHEN Ningxiang. Development of Studies of Water-Borne Resin for Anticorrosion Paints[J]. Materials Protection, 2001, 34 (7): 18-19.

Study on Key Technology of Embedded-channel for the Segment of Shield Tunnels

LI Jihong[1] *JIN Shihe*[1] *LIANG Qingguo*[2] *YAN Songhong*[2]

(1 Lanzhou Rail Transit Co., Ltd., Lanzhou 730000; 2 Gansu Rail Transit Mechanical Application Engineering Laboratory, Lanzhou 730070)

Abstract In order to determine the key parameters of optimal section dimension, channel material, material of erosion-resistant coating and insulation layer and etc., the performance indexes of anti-fatigue, fire-resistance, insulation and erosion-resistance were proposed based on the theoretical research and engineering application of the embedded channel for the shield tunnel segment of Lanzhou metro, and the key techniques of section dimension of the segment embedded channel, main channel body and erosion-resistance coating were studied. The results show that it is optimal to have the embedded channel with the section dimensions of 30 mm×20 mm both in terms of mechanical behavior and cost; it is scientific and reasonable regarding the parameters of material for main channel body and erosion resistance of the embedded channel for the segment of shield tunnel of Lanzhou metro; this research provides a foundation of establishing relative national standards and technical basis for the design, production and installation of embedded channel of similar projects.

Keywords Lanzhou metro; Shield tunnel segment; Embedded channel; Section dimension; Erosion resistance technique; Performance index