

磷酸-水玻璃浆液砂层渗透注浆模拟试验研究^{*}

郑选荣¹ 陈箐芮^{2**} 尚太昊¹ 陆宏朝³ 李军锋³ 侯建林³

(1. 西安科技大学建筑与土木工程学院, 710054, 西安; 2. 西安科技大学高新学院, 710109, 西安;

3. 中铁北京工程局集团有限公司, 230088, 合肥//第一作者, 副教授)

摘要 目的:为探究磷酸质量分数对水玻璃注浆材料性能的影响,以降低砂土渗流与固结周围土层,特进行本研究。方法:通过室内试验,对不同磷酸掺量的水玻璃浆液性质进行测定;自制一套渗流系数测定与模拟注浆一体化试验平台,探究不同配比注浆材料对砂层抗渗性能改良的效果。结果及结论:当注浆材料的pH值在3~5时,注浆材料凝结时间可控制在30 s至70 min内,凝结时间较碱性浆液更易调控,利于工程应用;随着磷酸含量的增加,注浆材料呈酸性时凝胶收缩现象越缓慢,而浆液呈碱性时凝胶收缩现象越快,且注浆材料呈碱性时脱水收缩情况较酸性时更为剧烈;当注浆材料呈酸性时,固砂体抗渗性能主要衰减时间随浆液pH值降低而提前,12 d后较为稳定;当注浆材料呈碱性时,固砂体1~3 d时的抗渗性能较稳定,3 d后固砂体抗渗性能衰减,且随着注浆材料pH值降低而愈发迅速。

关键词 工程材料;富水砂层;试验研究;磷酸-水玻璃;渗流系数

中图分类号 TU472.5

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.12.037

Simulation Experiment on Phosphoric Acid - Sodium Silicate Permeation Grouting in Sandy Layer

ZHENG Xuanrong, CHEN Qingrui, SHANG Taihao, LU Hongchao, LI Junfeng, HOU Jianlin

Abstract Objective: To investigate the influence of phosphoric acid mass fraction on the properties of sodium silicate grouting materials, with the goal of reducing sandy layer permeability and consolidating surrounding soil, the research is specifically carried out. Method: Through laboratory tests, the properties of sodium silicate slurry with different phosphoric acid concentrations are measured. A set of integrated experimental platforms for permeability coefficient measurement and simulated grouting are developed to explore the effects of different grouting material ratios on the improvement of sandy lay-

er anti-permeability performance. Result & Conclusion: When the pH value of the grouting material is between 3 and 5, the setting time can be controlled within 30 seconds to 70 minutes, which is easier to control than alkaline slurry, making it advantageous for engineering applications. As the phosphoric acid content increases, the gel shrinkage of the grouting material becomes slower in acidic conditions and faster in alkaline conditions. Moreover, when the grouting material is acidic, the decay time of the anti-permeability performance of the consolidated sand body advances as the slurry pH decreases and stabilizes after 12 days. In contrast, when the grouting material is alkaline, the anti-permeability performance of the consolidated sand body remains relatively stable for 1 to 3 days, with a decline in performance occurring after 3 days. Additionally, this decline becomes more rapid with decreasing pH values of the grouting material.

Key words engineering material; water-rich sandy layer; experimental research; phosphoric acid - sodium silicate; permeability coefficient

First-author's address College of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, 710054, Xi'an, China

0 引言

城市地铁建设中,时常用超前预注浆堵水来解决隧道穿越富水砂层的难题。传统水泥注浆材料在细粉砂层可注性差,难以形成完整加固圈,而水玻璃注浆材料造价低廉、可注性好,但存在耐久性较差的缺点^[1]。水玻璃添加磷酸,可控制生成不易溶于水的凝胶体,达到降低砂土渗流与固结周围土层的目的。随着磷酸、水玻璃相互调配,浆液可在碱性区和中酸性区凝胶化,目前普遍认为碱性水玻

^{*} 国家自然科学基金项目(42072319)

^{**} 通信作者

璃凝胶体较酸性水玻璃凝胶体的耐久性较差,且会污染环境。

目前,针对酸性水玻璃注浆材料研究主要偏向于探究不同外界条件的改变对注浆材料的固化机制、凝胶时间和固砂强度的影响。如文献[2-5]通过室内试验研究了水玻璃浆液的 pH 值对凝胶时间的影响规律和胶凝特性。文献[6]研究了碳酸钙的加入量对酸性水玻璃注浆浆液的成胶机制及固砂强度的影响。文献[7]系统地研究了磷酸-水玻璃注浆材料体系,获得了砂土固结体强度的影响因素。文献[8]系统地研究了以二元酸酯为固化剂的新型水玻璃-酯类浆液的凝胶特性,并得到了浆液填充率对固砂体强度和内摩擦角的影响。

针对磷酸-水玻璃浆液对土体抗渗性能影响的研究,由于现场试验存在注浆周期长且风险较大和钻孔样本随机性太大等因素,不宜进行现场试验。因此,本文自制了一套试验平台,实现了模拟注浆与渗流系数测定一体化。试验基本流程为采用磷酸-水玻璃注浆材料,通过预备试验研究不同质量分数磷酸对注浆材料凝结时间、凝结形态的影响,从而筛选出若干组适用于工程的磷酸-水玻璃注浆材料之配比;进而配置浆液进行室内注浆模拟试验,之后再行进行渗透试验以求探究不同配比浆液对固砂体渗流系数之影响。

1 磷酸-水玻璃浆液配比试验设置

磷酸-水玻璃浆液是隧道注浆中一种双液注浆材料,浆液中硅酸钠与磷酸通过离子交换法形成硅酸单体分子;硅酸单体在水溶液中扩散后迅速聚合,形成网状支架结构,最终成为硅酸凝胶。硅酸凝胶有较好的稳定性且不易溶于水,可大幅降低砂层渗流系数。

测量水玻璃类浆液的凝结时间和固结后凝胶体脱水率情况,是判断不同配比浆液是否适用于工程的通用衡量标准。设置若干不同配比对照组,采用倒杯法进行浆液凝结试验,以便得出不同质量分数磷酸对水玻璃浆液凝固的影响。

1.1 试验方法与步骤

选用 40 °Bé、模数 2.6 的工业水玻璃和质量分数为 85% 工业磷酸为试验原材料。当水玻璃与磷酸一方浓度过高时,混合后瞬间凝结。通过预备试验发现:选取 30 °Bé 工业水玻璃及质量分数范围为 1% ~ 15% 的磷酸,磷酸、水玻璃体积比为 1:1 进行

配比,浆液凝结时间较为容易控制。试验设计见表 1,具体操作步骤如下:

- 1) 稀释磷酸和水玻璃。
- 2) 调制碱性浆液时,将磷酸加入水玻璃中,使浆液 pH 值缓慢降低;调制酸性浆液时,将水玻璃加入磷酸中,使浆液 pH 值缓慢升高,并不断用玻璃棒搅拌,记录此时的时间。
- 3) 混合完全后,测量浆液的 pH 值。
- 4) 使用倒杯法检测浆液初凝时间。
- 5) 使用保鲜膜密封杯口并放置阴凉处,静置数日观察凝胶脱水收缩率及溃散情况。

表 1 试验设计
Tab. 1 Experimental design

试验 编号	磷酸质量 分数/%	水玻璃波美度/ °Bé	双液体积比
1	15.0	30	1:1
2	13.5	30	1:1
3	12.0	30	1:1
4	10.0	30	1:1
5	9.0	30	1:1
6	8.0	30	1:1
7	7.0	30	1:1
8	6.0	30	1:1
9	5.0	30	1:1
10	3.0	30	1:1
11	2.5	30	1:1
12	2.0	30	1:1
13	1.5	30	1:1

1.2 试验结果分析

1.2.1 初凝形态与初凝时间

凝胶时间试验结果见表 2。由表 2 可知:当浆液 pH 值小于 4.5 时,溶液中出现絮状物,且随 pH 值降低,絮状物量增大;浆液 pH 值大于 11.5 时,凝胶会逐渐泛白;随 pH 值减小,凝胶泛白速度变快。

磷酸质量分数对浆液凝胶时间影响关系见图 1 和图 2。由图 1 和图 2 可以看出:当浆液呈酸性时,随磷酸浓度降低,浆液初凝时间缩短;浆液呈碱性时,随磷酸浓度降低,浆液凝结时间延长;当浆液 pH 值处于 3.0 ~ 4.5 或 13.0 左右,即凝结时间处于 5 min 至 85 min 内时,浆液凝结速度适用于大部分隧道超前预注浆工程,选取试验编号 1、2、3、11、12、13 等 6 种适用于工程的浆液配比进行凝胶试验。

表 2 凝胶时间试验结果

Tab.2 Test results of gel time

试验 编号	凝胶 时间/s	pH 值	凝结现象
1	4 380	3.0	凝胶泛白,有大量白色颗粒
2	2 404	3.5	凝胶中有少量白色球粒掺杂
3	517	4.5	凝胶呈透明灰色、灰色
4	33	5.0	凝胶呈灰色,透明度较高
5	瞬凝	固态	大量晶体析出,浆液瞬间黏稠
6	瞬凝	固态	大量晶体析出,浆液瞬间黏稠
7	瞬凝	固态	大量晶体析出,浆液瞬间黏稠
8	瞬凝	固态	大量晶体析出,浆液瞬间黏稠
9	瞬凝	固态	大量晶体析出,浆液瞬间黏稠
10	30	11.5	凝结后迅速泛白
11	333	12.0	凝结后呈透明灰色,并迅速泛白
12	2 262	13.0	凝结后呈透明灰色,并较慢泛白
13	4 980	13.0	凝结后呈透明灰色,并缓慢泛白

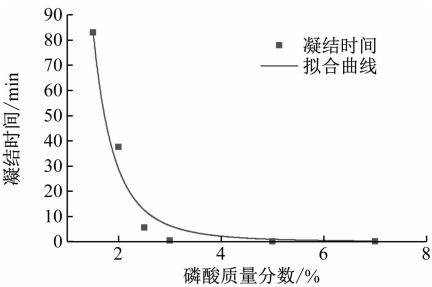


图 1 磷酸质量分数与碱性水玻璃初凝时间的关系曲线

Fig.1 Relationship curve between the mass fraction of phosphoric acid and the gel time of sodium silicate

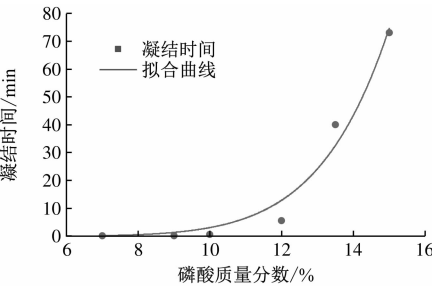


图 2 磷酸质量分数与酸性水玻璃初凝时间的关系曲线

Fig.2 Relationship between mass fraction of phosphoric acid and gel time of acid water glass

1.2.2 凝胶脱水收缩

因凝胶在砂土中会慢慢脱水收缩至溃散,在 1、3、6、12 d 测量不同配比浆液凝胶所析出水的体积,计算凝胶体积收缩率,分析磷酸含量对浆液凝胶脱水收缩的影响。凝胶收缩率变化见表 3。

表 3 凝胶收缩率变化

Tab.3 Variation of gel shrinkage ratio

试验 编号	不同凝胶时间收缩率/%			
	1 d	3 d	6 d	12 d
1	4.3	9.3	13.3	18.0
2	6.7	13.3	16.3	16.7
3	10.2	14.2	15.3	15.6
11	4.0	10.3	16.5	20.3
12	2.7	6.9	14.3	19.0
13	1.6	5.3	11.3	18.0

图 3 为酸性凝胶收缩率发展趋势与磷酸质量分数的关系。图 4 为碱性凝胶收缩率发展趋势与磷酸质量分数的关系。由图 3 和图 4 可知:浆液呈酸性时,随磷酸浓度升高,浆液脱水收缩现象越缓慢,且静置 14 d 时凝胶体溃散程度越小;浆液呈碱性时,随着磷酸浓度升高,浆液脱水收缩现象越剧烈,整体脱水收缩率要高于酸性凝胶体但均无出现溃散现象。

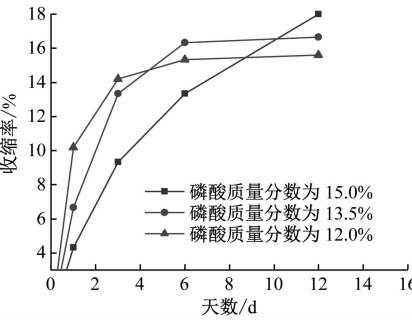


图 3 酸性凝胶收缩率发展趋势与磷酸质量分数的关系

Fig.3 Relationship between development trend of acid gel shrinkage and mass fraction of phosphoric acid

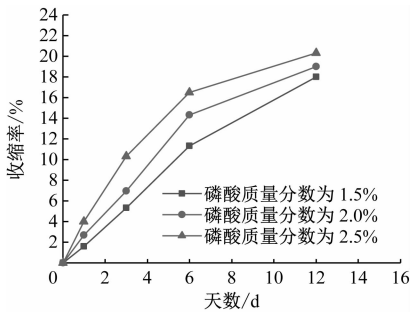


图 4 碱性凝胶收缩率发展趋势与磷酸质量分数的关系

Fig.4 Relationship between development trend of alkaline gel shrinkage and mass fraction of phosphoric acid fraction

2 模拟渗透注浆试验

2.1 试验装置介绍

为测定注浆加固后固砂体的渗流系数,设计一套试验装置。该装置由空压机、承压桶与注浆模具三部分构成,如图 5 所示。试验原理为利用空气压缩机产生的压缩空气,将承压桶中浆液以一定压力注入砂层中,注浆过程中维持注浆压力恒定。试验装置实物照片如图 6 所示。

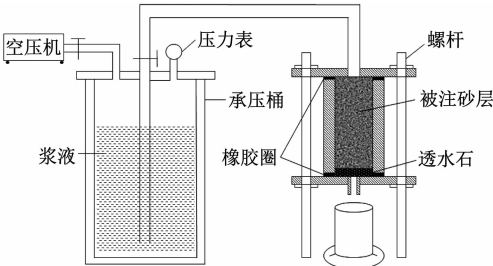


图 5 试验装置设计图

Fig. 5 Design drawing of testing device



图 6 试验装置实物照片

Fig. 6 Photo of the testing device

空气压缩机为提供气压的供压设备,承压桶用于完成气压向液压的转换,最大可承受 0.8 MPa;气压表用于调节气压向液压转换时压力大小,从而控制注浆压力稳定,经初步试验确定将压力控制在 0.1~0.3 MPa 较为合适。

注浆模具如图 7 所示。该模具由中空不锈钢圆筒、密封盖板、橡胶圈、透水石、螺杆和锁母式气动接头等组成,经测试最高可承受注浆压力为 0.8 MPa,满足试验需求。



图 7 注浆模具

Fig. 7 Grouting mold

2.2 试验流程

将试样用密封膜包裹外侧后放入注浆模具,密封盖板并拧紧螺杆,分别制备试验编号为 1、2、3、11、12、13 的 6 组浆液并倒入承压桶内,承压桶加压至 0.2 MPa 后进行注浆。

注浆完成 1 d 后,将承压桶内浆液换成净水,稳压阀控制空压机输出压力为 100 kPa,模拟 10 m 压力水头的地下环境,测量试样的单位时间渗水率。

3 固砂体抗渗性能试验结果分析

3.1 固砂体抗渗性能随时间变化规律

不同配比浆液注浆条件下固砂体的渗流系数会因其中凝胶脱水收缩等原因而逐渐增大,调节浆液中磷酸含量能有效控制浆液凝结后凝胶的稳定性。考虑隧道暗挖循环一般在 2 周内完成,因此每组试样在 1、3、6、12、18 d 测量其单位时间渗流量。固砂体渗透试验结果见表 4。

表 4 固砂体渗透试验结果

Tab. 4 Results of sand consolidation penetration test

试验 编号	单位时间渗流量/(mL/min)				
	1 d	3 d	6 d	12 d	18 d
1	41.2	44.5	50.2	63.0	68.1
2	37.8	45.4	53.0	60.5	63.6
3	36.3	46.6	52.4	55.7	57.2
11	46.0	48.4	56.0	68.4	85.7
12	44.8	46.0	51.2	64.2	79.0
13	45.7	46.3	49.9	59.3	66.9

图 8 为酸性情况下固砂体单位时间渗流量变化与磷酸质量分数的关系。图 9 为碱性情况下固砂体单位时间渗流量变化与磷酸质量分数的关系。由图 8 和图 9 可知:固砂体抗渗性能衰减率与浆液凝胶脱水收缩率趋势相似,均在 1 d 后不断衰减,由此可以看出,浆液凝胶的脱水收缩现象是影响固砂体渗流系数升高的一个重要因素。

当浆液呈酸性时,固砂体抗渗性能随浆液 pH 值升高而不断降低,固砂体抗渗性能主要衰减时间不断延后;其中,1 号试样抗渗性能在前 3 d 较为稳定,在 3~18 d 中抗渗性能衰减速率不断提高,2、3 号组试样 1~6 d 抗渗性能衰减速率相似且较高,3 号组试样 6 d 后较为稳定。当浆液呈碱性时,固砂体抗渗性能随浆液 pH 值降低而不断降低。通过对比可知,酸性组抗渗性能优于碱性组。

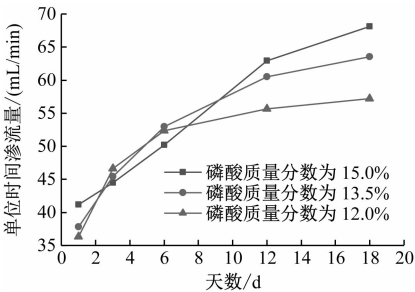


图 8 酸性情况下固砂体单位时间渗流量变化与磷酸质量分数的关系

Fig. 8 Relationship between variation of permeation quantity of sand consolidation sample per unit time under acid condition and mass fraction of phosphoric acid

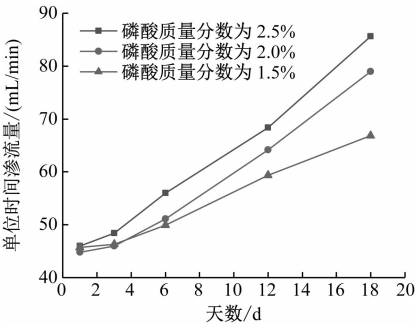


图 9 碱性情况下固砂体单位时间渗流量变化与磷酸质量分数的关系

Fig. 9 Relationship between variation of seepage quantity of sand consolidation sample per unit time under alkaline condition and mass fraction of phosphoric acid

3.2 磷酸质量分数对固砂体渗流系数的影响

渗透试验数据处理见表 5。其中,编号为 0 的试验组为砂土不进行注浆加固的对照渗透试验组,对照试验组渗流量差为 3.9 mL/min。这说明在 10 m 水头作用下,渗透试验对在该装置中的砂体渗流系数影响较小。经过 18 d 渗流系数测定试验,不同磷酸质量分数条件下试样经 18 d 的单位时间渗透量差如图 10 所示,不同磷酸质量分数条件下试样渗流系数如图 11 所示。

表 5 渗透试验数据处理

Tab. 5 Data processing of penetration test				
试验编号	初始渗流量/mL	最终渗流量/mL	渗流量差/mL	第 18 d 时渗流系数
0	125.7	129.6	3.9	2.92×10^{-2}
1	41.2	68.1	26.9	2.56×10^{-4}
2	37.8	63.6	25.8	2.39×10^{-4}
3	36.3	57.2	20.9	2.15×10^{-4}
11	46.0	85.7	39.7	3.22×10^{-4}
12	44.8	79.0	34.2	2.97×10^{-4}
13	45.7	66.9	21.2	2.51×10^{-4}

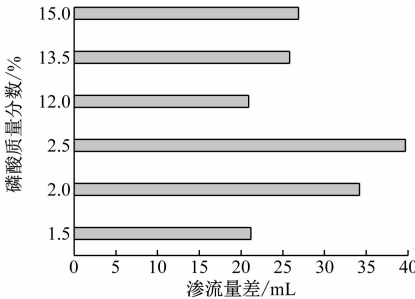


图 10 固砂体渗流量差与磷酸质量分数的关系

Fig. 10 Relationship between of seepage quantity difference of sand consolidation sample and mass fraction of phosphoric acid

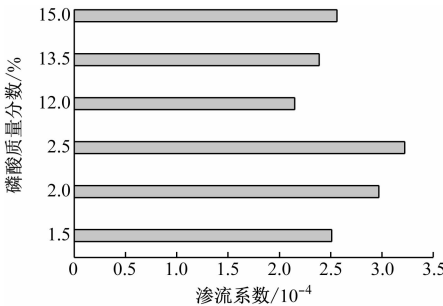


图 11 固砂体渗流系数与磷酸质量分数的关系

Fig. 11 Relationship between seepage coefficient of sand consolidation sample and mass fraction of phosphoric acid

由图 10 和图 11 可知:随着磷酸浓度升高,固砂体 18 d 内单位时间渗流量差逐渐升高,这是由于浆液在 pH 值较高的环境下凝结后脱水收缩现象较为严重所导致的;碱性组渗流量差普遍高于酸性组,这是因为碱性状态下水玻璃凝结后形成的絮状结块强度较低,浆液凝结后稳定性较差,且碱性状态下水玻璃凝结后脱水收缩效果持续时间较长且收缩率普遍大于酸性组,导致砂层更容易因注浆材料收缩而形成缝隙,降低了固砂体抗渗性能。

4 结语

本文研究了磷酸-水玻璃注浆材料凝结规律和注浆后对砂土体抗渗性能改良的状况,得到了磷酸-水玻璃注浆材料凝结时间、凝胶形态及磷酸含量对固砂体抗渗性能的影响规律。得到以下结论:

1) 浆液 pH 值范围在 3.0 ~ 5.0、11.5 ~ 13.0 时,凝结时间可控制在 30 s 至 80 min 内;pH 值在 3 ~ 5 时,浆液凝结时间曲线平滑,凝结时间容易调控。

2) 浆液 pH 值在 3.5 ~ 5.0 时,浆液呈酸性,随

磷酸浓度升高,浆液脱水现象减缓,凝胶溃散减轻,但随时间推移,凝胶脱水收缩率会偏高;当浆液 pH 值在 11.5~13.0,浆液呈碱性,随磷酸浓度升高,浆液脱水现象剧烈,整体脱水收缩率高于酸性凝胶体但无溃散现象。

3) 通过固砂体渗流试验结果可知,试样注浆 1~3 d 后抗渗性能开始小幅度衰减,当浆液 pH 值在 3.5~5.0 时,随浆液 pH 值降低,固砂体抗渗性能主要衰减时间不断提前,但后期较稳定;当浆液 pH 值在 11.5~13.0 时,固砂体前 3 d 抗渗性能较为稳定,但 3~18 d 抗渗性能衰减速率加快,随磷酸质量分数提高,后期衰减愈发迅速。建议工程堵水注浆浆液配比 pH 值应小于 5.0,试验结果显示 30 °Bé 水玻璃与 12% 质量分数磷酸采用体积比 1:1 混合后使用,堵水效果最佳。

参考文献

- [1] 姜瑜,郭飞,孔恒,等. 注浆材料的现状与发展策略[J]. 化工新型材料,2022,50(1):282.
- JIANG Yu, GUO Fei, KONG Heng, et al. Current situation and development strategy of grouting materials[J]. New Chemical Materials, 2022,50(1):282.
- [2] 关振伟. 粉细砂地层注浆施工酸性水玻璃凝胶时间研究[J]. 中国水能及电气化,2019(11):13.
- GUAN Zhenwei. Study on gelation time of acidic sodium silicate in silty-fine sand stratum grouting construction[J]. China Water Power & Electrification,2019(11):13.

- [3] 甄泽强,王梅. 酸性水玻璃凝胶时间的影响研究[J]. 煤炭技术,2018,37(10):360.
- ZHEN Zeqiang, WANG Mei. Study on effect of acid water glass gelation time[J]. Coal Technology,2018,37(10):360.
- [4] 李雪,赵海雷,李兴旺,等. 硫酸-水玻璃体系的成胶特点[J]. 化工学报,2007,58(2):501.
- LI Xue, ZHAO Hailei, LI Xingwang, et al. Characteristics of gelation process of H_2SO_4 -waterglass system[J]. Acta Chemologica Sinica, 2007, 58(2):501.
- [5] 王迎宾,董文凯,董文峰. 酸性水玻璃浆材的研究及应用[J]. 长江科学院院报,2000,12(6):32.
- WANG Yingbin, DONG Wenkai, DONG Wenfeng. Study and application of acid water glass grouting materials[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2000,12(6):32.
- [6] 肖尊群,刘宝琛,乔世范,等. 新型酸性水玻璃-碳酸钙注浆材料试验研究[J]. 岩土力学,2010,31(9):28.
- XIAO Zunqun, LIU Baochen, QIAO Shifan, et al. Experimental research on new grouting materials of acidic water glass-calcium carbonate[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010,31(9):28.
- [7] 李夏,徐军哲,刘人太,等. 新型酸性水玻璃注浆材料的研究与应用[J]. 隧道建设,2017,37(10):1296.
- LI Xia, XU Junzhe, LIU Rentai, et al. Study and application of a new acid water glass grouting material[J]. Tunnel Construction, 2017,37(10):1296.
- [8] 荣驰,陈卫忠,袁敬强,等. 新型水玻璃-酯类注浆材料及其固沙体特性研究[J]. 岩土力学,2020,41(6):2034.
- RONG Chi, CHEN Weizhong, YUAN Jingqiang, et al. Study on new sodium silicate-ester grouting materials and its properties of grouted-sand[J]. Rock and Soil Mechanics,2020,41(6):2034.

(收稿日期:2022-06-25)

有轨电车设计年限是多久

有轨电车工程由土建、机电、车辆等很多部分组成的,每个部分的使用年限是不一样的。通常所说的使用年限不低于 100 年,主要针对主体钢筋混凝土结构和桥梁,有轨电车工程中涉及这些内容的部分都可以说是“百年工程”。我国桥梁的设计使用年限一般为 100 年,对于某些有特殊要求的桥梁,设计时采用了 120 年的设计使用年限。日本提出桥梁的设计使用年限约为 100 年,英国规定桥梁的设计使用年限为 120 年,美国要求桥梁的设计使用年限为 75~100 年,欧盟在桥梁的设计规范中规定桥梁的设计使用年限为 100 年。

而对于钢轨,一般钢轨的使用寿命为 30 年,一般每隔 10 年会有一次大的维修。对于有轨电车车辆(主要是指车辆整体,不包括一些小零件),其设计结构寿命不小于 30 年。但是,使用频率的高低与使用时间的长短,或者行驶的里程等,这些也会影响车辆设计寿命与实际寿命的差距。30 年只是车辆的设计理论寿命,如果保养得当,“高龄”车辆仍然可以继续提供服务。比如,香港地铁的有些车辆已经到了 30 年的设计寿命,但是车辆的各项性能依然良好,还能继续在轨道上“奔跑”。

(来源:上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司“轨行致远”公众号)