

# 负压吸附式机器人喷涂跨海大桥墩台混凝土防腐涂层的施工控制参数试验研究

胡奥华<sup>1</sup>, 马宗豪<sup>2</sup>, 冯海暴<sup>1\*</sup>, 杨磊<sup>2</sup>

(1. 河北工程大学土木工程学院, 河北 邯郸 056038; 2. 中交第一航务工程局有限公司, 天津 300461)

**摘要:** 针对跨海大桥预制墩台的混凝土防腐涂层施工存在的传统人工喷涂防腐涂层效率低、质量不均、作业风险高等问题, 开展负压吸附式机器人喷涂施工控制参数试验研究。以漆膜厚度作为评价指标, 采用正交试验设计方法, 系统研究喷涂机器人的喷涂压力、移动距离、移动速度等关键控制参数对喷涂质量的影响规律。试验结果表明: 当喷涂压力 1 500 kPa、移动距离 100 mm、移动速度 200 mm/s 时, 防腐涂层的漆膜厚度平均值为 254  $\mu\text{m}$ , 满足跨海大桥墩台防腐设计要求(250  $\mu\text{m} \pm 10 \mu\text{m}$ )。并严格按试验参数进行验证, 得出明确的验证结论。研究明确了负压吸附式机器人喷涂防腐涂层的最优参数组合, 验证了该施工技术的可行性与优越性, 为跨海大桥墩台混凝土防腐工程的高效、高质量施工提供了技术支撑和参考依据。

**关键词:** 负压吸附式; 喷涂机器人; 正交试验; 参数控制; 工程验证

中图分类号: U6; U655.4; TU689 文献标志码: A 文章编号: 2095-7874(2026)03-0006-05

doi: 10.7640/zggwjs202603002

## Experimental study on construction control parameters of negative pressure adsorption robot spraying anticorrosive coating for concrete pier abutments of cross-sea bridges

HU Ao-hua<sup>1</sup>, MA Zong-hao<sup>2</sup>, FENG Hai-bao<sup>1\*</sup>, YANG Lei<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China;

2. CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Tianjin 300461, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of low efficiency, uneven quality and high operation risk in traditional manual spraying of anticorrosive coatings for prefabricated piers of cross-sea bridges, experimental research on construction control parameters of negative pressure adsorption robot spraying was carried out. Taking film thickness as the evaluation index, orthogonal test design was adopted to systematically study the influence laws of key control parameters such as spraying pressure, moving distance and moving speed of the spraying robot on spraying quality. The test results show that when the spraying pressure is 1 500 kPa, moving distance is 100 mm and moving speed is 200 mm/s, the average film thickness of the anti-corrosion coating reaches 254  $\mu\text{m}$ , which meets the anti-corrosion design requirements(250  $\mu\text{m} \pm 10 \mu\text{m}$ ) for piers and abutments of cross-sea bridges. Verification was conducted strictly in accordance with the test parameters, and clear verification conclusions were obtained. The optimal parameter combination of negative pressure adsorption robot for anticorrosive coating spraying was clarified, and the feasibility and superiority of this construction technology were verified. This research provides technical support and reference for efficient and high-quality construction of concrete anticorrosive projects for cross-sea bridge piers.

**Key words:** negative pressure adsorption type; spraying robot; orthogonal test; parameter control; engineering verification

收稿日期: 2025-09-01 修回日期: 2025-12-18

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (42277139)

作者简介: 胡奥华 (1999—), 男, 河北石家庄人, 硕士研究生, 研究方向为工程数字化建造技术。

\*通讯作者: 冯海暴, E-mail: zjyhjfb@foxmail.com

## 0 引言

目前,跨海大桥预制桥墩外表面混凝土防腐涂层施工仍以人工喷涂为主,作业需借助登高车开展高空作业,且硅烷、油漆等化学材料的使用要求工人佩戴防毒面具施工,既存在高处坠落的安全风险,也不利于作业人员职业健康;同时,人口老龄化加剧导致的劳动力短缺,叠加人工操作效率低、重复性作业劳动强度大的因素,进一步制约了施工效率。因此,开展负压吸附式喷涂机器人相关研究,对解决人工喷涂的多重弊端、提升防腐涂层施工质量与效率、缓解行业劳动力压力、推动桥梁工程施工领域可持续发展具有重要现实意义与应用价值。

其中,李永鑫等<sup>[1]</sup>采用真空负压吸附的原理完成外墙的喷涂工作。马宇涛<sup>[2]</sup>通过CFD数值模拟及最小二乘法对建筑喷涂机器人平面喷涂成膜规律及涂层累积模型进行研究。乔新义等<sup>[3]</sup>将高压无气喷涂方式用于桥梁钢支座重防腐涂料体系的自动喷涂。赵天宇等<sup>[4]</sup>阐述了喷涂工艺参数中的喷涂流量、整形空气流量、静电电压以及旋杯转速对涂装质量的影响。员超等<sup>[5]</sup>论述了高层建筑喷涂机器人系统的组成和特点,机器人支援系统和机器人本体结构的设计。刘雪梅等<sup>[6]</sup>建立了喷涂工艺参数和膜厚分布规律之间的映射模型,应用该模型计算出的最优漆膜搭接宽度能获得厚度均匀的涂层。

以上研究对喷涂机器人的行走方式和喷涂模型模拟等方向进行了部分针对性的研究,而涉及现场作业参数方面未进行实地试验与测试。本文根据喷涂机器人在实际工程中的工艺需要,针对喷涂机器人施工工艺,开展喷涂机器人作业参数设计研究,通过正交试验获得满足现场作业要求的喷涂机器人作业参数。

## 1 工程概况

### 1.1 项目概况

厦金大桥(厦门段)起自厦门市思明区环岛路,止于大嶝岛翔安新机场,全长19.615 km,其中主线长17.340 km。预制墩台混凝土表层涂装分为硅烷防腐及景观涂装,墩台最大高度26.95 m,承台底面宽度11 m,分为上、中、下3个节段进行喷涂作业,涂装总面积213 126.9 m<sup>2</sup>,如图1所示。

墩台构件脱模后,先对表面模板接缝处打磨处理,采用水平靠尺检测验收,确保混凝土表面

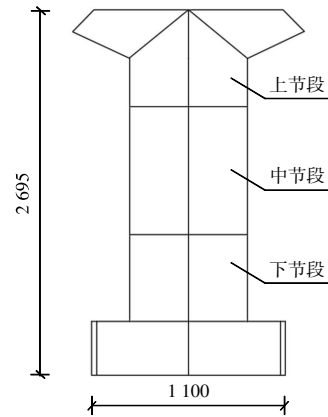


图1 墩台尺寸图(cm)

Fig. 1 Dimensions of pier (cm)

平整连续,实现“零错台”效果;同时对表面细小气泡、砂线等缺陷修补完善。混凝土表面打磨完成后,用淡水冲洗干净并自然干燥2 d,再开展硅烷浸渍施工;施工结束后,需间隔至少1 d方可进行景观涂装作业。景观涂层底漆施工前,须确认预制墩台外表面完全干燥,避免涂层后期出现起皮。为保障施工质量及漆膜综合性能,环境温度低于0℃时严禁施工。为确保涂层整体性能稳定,底漆与面漆之间需涂装专用保护中间漆作为过渡层,以提升面漆黏结性;中间漆施工前需确认底漆完全干燥(通常为底漆施工2 h后);面漆施工前需确认中间漆完全干燥(通常为中间漆施工4 h后)。面漆采用喷涂工艺一遍成型,要求表面均匀一致,无漏涂、流坠、气泡、裂缝等缺陷<sup>[7]</sup>。漆膜厚度的技术要求如表1所示。

表1 漆膜厚度技术要求

Table 1 Technical specifications for film thickness

涂层结构	涂料名称	干膜最小平均厚度/ $\mu\text{m}$
底层	环氧树脂封闭漆	无厚度要求
中间	环氧树脂漆	250
面层	水性聚酯面漆	200

### 1.2 喷涂机器人关键参数

真空负压吸附式喷涂机器人由安全防坠模块、负压吸附模块、行走模块、喷涂系统模块组成,通过真空风机和负压吸盘提供吸附力,通过防坠安全装置保护机器人和工人的安全,利用无气喷涂机通过高压软管泵送至喷枪完成喷涂作业,机器人设计图如图2所示,机器人技术参数如表2所示。

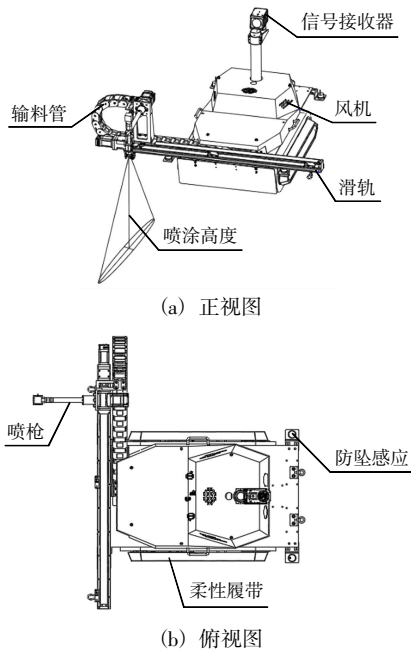


图 2 机器人设计图

Fig. 2 Design drawing of the robot

表 2 机器人技术参数

Table 2 Technical parameters of the robot

技术参数	数据
尺寸	1 035 mm×1 440 mm×618 mm
重量/kg	45
最大行进速度/(mm·s <sup>-1</sup> )	400
最大移动速度/(mm·s <sup>-1</sup> )	600
最大移动行程/mm	800

喷涂机器人采取自上而下的路径进行喷涂作业，推动控制台中的操作杆使机器人移动至作业面顶端时，开始自动循环喷涂系统，在自动循环喷涂作业时，涂料特性、喷涂装置在同一喷涂作业环节中是不变的，由喷涂机提供的喷涂压力以及机器人向下移动时的移动距离和移动速度来调节作业时的喷涂效果，如图 3 所示。

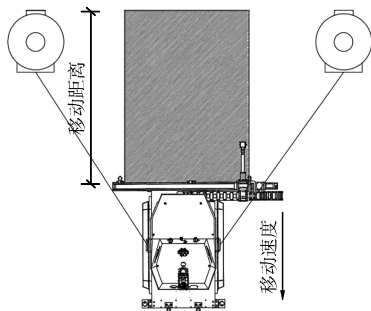


图 3 机器人作业示意图

Fig. 3 Schematic diagram of robot operation

## 2 试验设计

### 2.1 试验方案

#### 2.1.1 试验目的

采用正交试验法，探究负压吸附式喷涂机器人的核心喷涂参数(喷涂压力、移动速度、移动距离)对预制墩台混凝土防腐涂层漆膜厚度的影响规律；明确各参数对漆膜厚度影响的主次顺序，筛选出可使漆膜厚度满足跨海大桥墩台防腐设计要求(250 μm±10 μm)的最优参数组合，同时验证该最优参数组合在设定作业工况下的稳定性与可靠性，为跨海大桥预制墩台混凝土防腐的实际工程施工提供科学且可靠的技术依据。

#### 2.1.2 作业面预处理

采用与跨海大桥预制墩台同批次、同配比的 C50 混凝土试块，试块表面经喷砂除锈、除尘处理，在进行防腐涂料施工作业前，要对基层进行坑槽填补和腻子找平，为防腐涂料的施工提供良好的作业面<sup>[8]</sup>。

### 2.2 原材料

底漆、中间漆、面漆的原材料都采用嘉宝莉牌，其中底漆采用水性环氧树脂封闭底漆(透明)，产品编码为 QA608；中间漆采用水性环氧树脂中间漆(灰色)，产品编码为 QA615；面漆采用水性聚酯面漆(洋鹭白 0502 低光)，产品编码为 QB7220L，并采用漆料相对应的固化剂进行一定比例的调和，如表 3 所示，本次试验选用中间漆进行对比试验。

表 3 中间漆性能指标

Table 3 Performance indicators of intermediate coat

序号	品类	特征
1	颜色	灰色
2	密度/(kg·L <sup>-1</sup> )	1.3±0.1
3	体积固体份/%	42±2
4	挥发性有机化合物含量/(g·L <sup>-1</sup> )	85
5	闪点/℃	>93
6	湿膜厚度/(μm·道 <sup>-1</sup> )	96~143
7	干膜厚度/(μm·道 <sup>-1</sup> )	40~60
8	理论涂布率(干膜厚度 40 μm)/(m <sup>2</sup> ·L <sup>-1</sup> )	8.076

### 2.3 正交试验方法

考虑到喷涂装置、涂料特性等在同一喷涂机器人同一批喷涂作业来说是不变的，所以重点选择对喷涂压力(A)、移动距离(B)和移动速度(C)3个喷涂工艺参数展开试验研究。空白对照组(D)

中的“水平 1”、“水平 2”和“水平 3”为  $L_9(3^4)$  正交表的固有水平编码,无具体试验参数意义,仅作为正交表结构组成部分以维持水平搭配均衡性,用于后续辅助方差分析。采用正交试验设计法设计试验。 $L_9(3^4)$  正交试验参数表见表 4。

表 4 试验参数表

Table 4 Experimental parameter table

水平	因素 A (喷涂压力/kPa)	因素 B (移动距离/mm)	因素 C (移动速度/(mm·s <sup>-1</sup> ))
1	1 000	100	100
2	1 500	150	150
3	2 000	200	200

设备安装调试完毕后,记录下环境参数,包括相对湿度、相对温度和风速。根据正交试验表中的喷涂工艺参数进行喷涂试验,标注试验编号并将漆膜晾干。待漆膜完全干透后,用膜厚测量仪测量膜厚。

喷涂后得到的漆膜厚度测试面如图 4 所示。以中间漆喷涂测试为案例,测量时以漆膜中心点  $O$  为原点<sup>[9]</sup>,在平行于  $x$  轴的位置均匀地取截面,本次试验取 13 个截面,每个截面的间距根据试验时喷涂的宽幅来绘制。在每个截面上间隔 50 cm 取点,测量每个点的漆膜厚度并记录,将平行于  $x$  轴所有点的漆膜厚度值的均值作为一次试验的漆膜厚度数据。

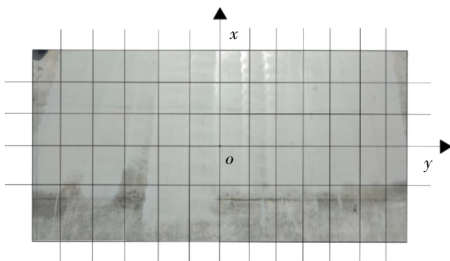


图 4 漆膜厚度测试面图示

Fig. 4 Diagram of film thickness testing surface

试验步骤如下:

- 1) 选取 1 个预制桥墩进行喷涂试验,现场作业环境体感温度 31 °C,阵风 2 级,相对湿度 60%,模拟桥梁施工常规环境;
- 2) 准备试验材料并调试设备,记录相对湿度、相对温度和样板粗糙度等环境参数;
- 3) 喷涂作业面为标准预制桥墩,进行同一参数下的 3 次试验,喷涂作业如图 5 所示。喷枪始终垂直于工件表面,喷涂高度 300 mm;



图 5 机器人喷涂作业图示

Fig. 5 Robot spraying operation diagram

- 4) 按照表 4 中设置的试验参数进行试验;
- 5) 作业面喷涂完成后,妥善放置 24 h 使得漆膜完全凝固;
- 6) 测量记录节点处的膜厚值;
- 7) 分析并处理所得到的数据,试验数据见表 5。

表 5 试验数据表

Table 5 Experimental data table

试验号	A	B	C	D	漆膜厚度/ $\mu\text{m}$
1	1	1	1	1	150
2	1	2	2	2	125
3	1	3	3	3	117
4	2	1	3	2	254
5	2	2	1	3	230
6	2	3	2	1	177
7	3	1	2	3	260
8	3	2	3	1	247
9	3	3	1	2	186

### 3 试验结果与分析

由表 5 可得试验结论:试验 4 漆膜厚度为 254  $\mu\text{m}$ ,试验 7 漆膜厚度 260  $\mu\text{m}$ ,试验 8 漆膜厚度 247  $\mu\text{m}$ ,符合防腐设计要求(250  $\mu\text{m} \pm 10 \mu\text{m}$ )。

#### 3.1 极差分析

极差  $R$  描述了某一因素不同水平时对试验结果的影响程度。极差越大,说明该因素对结果的影响程度越大<sup>[10]</sup>,漆膜厚度的极差分析见表 6。

表 6 漆膜厚度极差分析

Table 6 Range analysis of film thickness  $\mu\text{m}$

项目	A	B	C	D
$k_1$	130.7	222.3	188.7	191.3
$k_2$	220.3	200.7	188.3	188.3
$k_3$	232.0	160.0	206.0	203.3
$R$	101.3	62.3	17.7	15.0

注:  $k_i(i=1,2,3)$  为某一因素下对应水平的试验结果平均值。

各因素对漆膜厚度的影响显著性从大到小依

次是喷涂压力、移动距离、移动速度，故在施工中应首先控制喷涂压力和移动距离，再对移动速度进行控制。

### 3.2 方差分析

方差分析可以计算各个因素和空白平均偏差的二次方和，再通过计算某因素的  $F$  值，定量评价各个因素对试验结果影响的显著性。 $F$ =因素均方/误差均方， $F$  越大说明该因素对试验结果的影响越显著；需结合  $F$  分布表查得临界值，若  $F$  大于临界值，可在对应置信水平下判定该因素影响显著，进而排序确定关键影响因素。方差分析如表 7 所示。

表 7 漆膜厚度方差分析

Table 7 Variance analysis of film thickness

因素	二次方和/ $\mu\text{m}^2$	自由度	均方/ $\mu\text{m}^2$	$F$
A	18 444.7	2	9 222.3	48.8
B	6 008.7	2	3 004.3	15.9
C	612.7	2	306.3	1.6
D	378.0	2	189.0	

由查表可知， $F(\alpha=0.1)=3.1$ ， $F(\alpha=0.05)=6.9$ ， $F(\alpha=0.01)=18$ 。 $\alpha$  为显著性水平，代表将无显著影响因素误判为有显著影响的最大容忍概率，本试验取  $\alpha=0.1$ 、0.05、0.01 对应不同显著程度判定标准。在方差分析表中  $F$  值  $> 18$  时，表示该因素对指标的影响极其显著； $F$  值介于 18 和 6.9 之间时，表示该因素对指标的影响显著； $F$  值介于 6.9 和 3.1 之间时，表示该因素对指标的影响较显著； $F$  值小于 3.1 时，表示不显著<sup>[1]</sup>。

由表 7 可知，各因素对漆膜厚度的影响显著性从大到小依次是喷涂压力、移动距离、移动速度，其结果与极差分析一致，详细的分析结果主要包括：

1) 喷涂压力对喷涂作业中漆膜厚度的影响极其显著，从试验数据中分析得出，在喷嘴高度固定的情况下，随着喷涂压力的加大，漆料从喷枪中喷出的速率越快，漆膜厚度也会越厚；

2) 移动距离对于喷涂作业中漆膜厚度的影响显著，从试验数据中分析得出，在喷涂装置不变的情况下，随着移动距离的加大，喷涂路径所重叠的范围越小，漆膜厚度也会越薄；

3) 移动速度对于喷涂作业中漆膜厚度的影响不显著，从试验数据中分析得出，在喷涂装置和路径不改变的情况下，机器人的移动速度对于喷

涂作业中的效果影响显著性不高，移动速度越大时，由于惯性和甩动的原因会导致漆膜厚度越薄。

根据规范的要求，中间漆在大气区涂层干膜最小平均厚度应大于 250  $\mu\text{m}$ ，结合试验测试情况，选择试验组 4 喷涂压力 1 500 kPa、移动距离 100 mm、移动速度 200 mm/s 时中间漆喷涂为最优喷涂方案。

### 4 工程验证

为验证负压吸附式机器人喷涂跨海大桥墩台防腐涂层最优参数的工程适用性，选取厦金大桥(厦门段)79 号墩柱作为测试对象，严格遵循试验分析结论组织施工，确保机器人喷涂作业的各项控制指标与试验结论高度一致。

选择试验组 4 喷涂压力 1 500 kPa、移动距离 100 mm、移动速度 200 mm/s 进行实际工程验证，通过对墩台施工预处理后，机器人自上而下进行喷涂，吸附稳定无滑移，实时监控喷涂压力、移动距离、移动速度等参数偏差及时校准。

通过工程现场实测得出结论：

1) 干膜厚度均值 254  $\mu\text{m}$ ，240~260  $\mu\text{m}$  区间达标率 95%，满足要求；

2) 墩台表面平整均匀，无漏涂、流挂等缺陷，达标率 100%。

### 5 结语

本文针对负压吸附式机器人喷涂跨海大桥墩台混凝土防腐涂层的施工控制参数进行试验研究，并对试验所得最优参数喷涂压力 1 500 kPa、移动距离 100 mm、移动速度 200 mm/s 进行工程验证。从干膜厚度及表面平整度角度来看，均满足现场施工的要求。采用负压吸附式机器人进行喷涂施工提高了施工质量，极大地降低了安全风险，具备较高的应用价值。

### 参考文献：

[1] 李永鑫,郭安福,李俊颀,等. 高层建筑外墙喷涂机器人的结构设计及仿真分析[J]. 现代制造技术与装备, 2021, 57(1): 100-105.  
LI Yong-xin, GUO An-fu, LI Jun-jie, et al. Structural design and simulation analysis of spraying robot for high-rise building exterior wall[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2021, 57(1): 100-105.

[2] 马宇涛. 建筑喷涂机器人平面喷涂成膜规律及涂层累积模型研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2024.  
MA Yu-tao. Research on the film formation law and coating accumulation modeling of architectural spraying robot planar coating

(下转第 89 页)