

# 转向架构架热喷涂技术应用研究

李方, 马晓光, 谢莹莹

中车南京浦镇车辆有限公司, 江苏 南京

收稿日期: 2023年5月15日; 录用日期: 2023年6月21日; 发布日期: 2023年6月28日

## 摘要

转向架是轨道车辆的走行部, 是轨道车辆最核心的部件之一。构架作为转向架的骨架, 联系转向架各组成部分和传递各方向的力, 是转向架的关键承载部件, 也是其他零部件的安装基础。目前转向架构架主要使用碳钢板材焊接而成, 在一些车型的构架设计中, 将构架内腔作为附加气室, 与空气弹簧连通, 以保障车辆运行过程舒适性。由于受外界气源影响, 随着运营时间的推移, 构架内腔会出现锈蚀现象。本文结合构架制造工艺流程, 阐述了采用热喷涂技术, 对构架内腔进行防腐的工艺方法及参数。

## 关键词

构架, 热喷涂, 电弧喷涂, 铝涂层, 热处理, 喷砂

# Study on the Application of Thermal Spraying Technology for Bogie Frame

Fang Li, Xiaoguang Ma, Yingying Xie

CRRC Nanjing Puzhen Co., Ltd., Nanjing Jiangsu

Received: May 15<sup>th</sup>, 2023; accepted: Jun. 21<sup>st</sup>, 2023; published: Jun. 28<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

Bogie is the running part of rail vehicles and is one of the core components of rail vehicles. The frame, as the skeleton of the bogie, is the key load-bearing part of the bogie and the basis for the installation of other components, which connects the components of the bogie and transmits the forces in all directions. At present, the frame is welded with carbon steel plate. In the frame design of some vehicles, the bogie chamber is used as an additional air chamber, which is connected with the air spring to ensure the comfort of the vehicle. Due to the influence of external origin, with the passage of operating time, the structure cavity will appear rust phenomenon. In this paper, based on the frame manufacturing process, the method and parameters of thermal spraying technology for

anti-corrosion of the frame inner cavity are described.

## Keywords

Frame, Thermal Spraying, Arc Spraying, Aluminum Coating, Heat-Treat, Sandblasting

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 概述

铁路客车的转向架是铁道车辆中的最关键部件，担负着支撑车体、运行、转向等功能，它决定着客车的运行品质和行车安全。目前转向架构架主要使用 P355-NL1 钢，并且在转向架构架的设计中，一部分构架内腔储存压缩空气，用以驱动空气弹簧。为了延长转向架构架内腔的使用寿命，需在其内表面做表面涂层防护处理。

P355-NL1 是一种屈服强度为 355 MPa 级车用耐候钢，强度高，韧性好，冷作成型性能很好，主要用于车辆的大梁、横梁、结构件等。P355-NL1 碳当量比较低，碳当量在 0.2 左右，焊接性比较优良。主要由铁素体和珠光体组织组成，铁素体和珠光体呈带状结构。

## 2. 热喷涂工艺方法

电弧喷涂特点是结合强度和喷涂效率高。电弧喷涂的结合强度可以达到 10 MPa 以上，当喷涂电流为 200 A 时，每小时可喷涂 30 Kg，喷铝或不锈钢也可喷涂 20 Kg。电弧喷涂的能源利用率可达 57%，喷铝或不锈钢时每公斤耗电只有 0.4 度。而氧乙炔火焰喷涂的能源利用率为 13%，等离子喷涂为 12%。同时，电弧喷涂采用电和压缩空气，相比采用乙炔等易燃气体，安全性更高。采用电弧喷涂技术对 P355-NL1 进行涂层附着，是一种可行的工艺方法。

电弧喷涂示意图如图 1。当两根金属丝端部相互接触时产生短路而形成电弧，金属丝端部瞬间熔化，此时利用压缩空气把熔化的金属雾化形成金属微熔滴，高速喷射到工件表面上，产生金属涂层[1]。

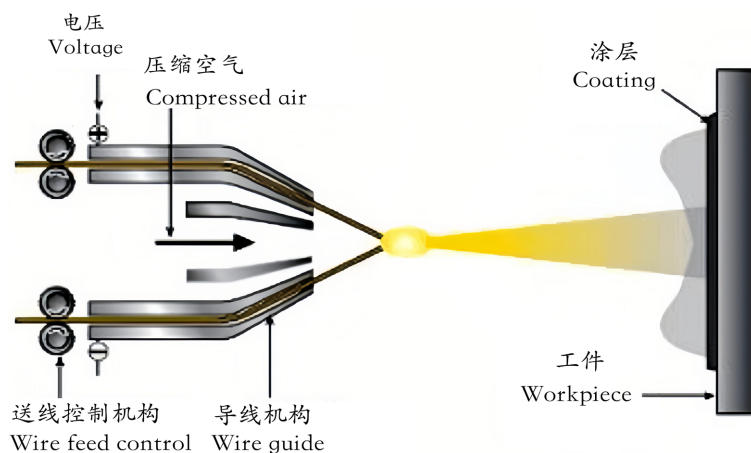


Figure 1. Schematic diagram of electric-arc spraying

图 1. 电弧喷涂示意图

### 3. 涂层材料选型

正确选择 P355-NL1 钢材防腐涂层材料是确保长周期使用的关键。选择涂层材料时,既要考虑工件工况条件和涂层需具备的性能,还要考虑涂层材料与 P355-NL1 钢材基体材料的相容性,以及材料的经济性。

铝涂层既可起到抑制腐蚀作用,也可以作为牺牲阳极对钢材基体起到电化学保护作用。铝与氧的亲合力大,能与空气中的氧反应,在表面快速生成一层(0.01~0.1)  $\mu\text{m}$  的具有自愈合能力的致密钝化膜。铝喷涂层广泛应用于防大气腐蚀,弱酸性介质环境(PH = 4~7)中。基于此,针对 P355-NL1 钢材进行电弧喷涂,采用铝元素作为涂层材料是可行的[1][2]。

### 4. 涂层厚度

铝涂层的厚度与防腐寿命大致成比例关系,GB/T9793-2012 对不同使用环境推荐的最小涂层厚度具有规定,具体见表 1。

**Table 1.** Minimum recommended coating thickness for different applications (mm)

**表 1.** 不同使用环境下推荐的最小涂层厚度(mm)

环境	环境分类	金属							
		Zn		Al		AlMg5		ZnAl5	
		未涂装	涂装	未涂装	涂装	未涂装	涂装	未涂装	涂装
盐水	Im2	N.R. <sup>a</sup>	100	200	150	250	200	N.R. <sup>b</sup>	100
淡水	Im3	200	100	200	150	150	100	150	100
城市环境	C2 和 C3	100	50	150	100	150	100	100	50
工业环境	C4 和 C5-1	N.R. <sup>a</sup>	100	200	100	200	100	150	100
海洋大气	C5-M	150	100	200	100	250 <sup>b</sup>	200 <sup>b</sup>	150	100
干燥室内环境	C1	50	50	100	100	100	100	50	50

N.R.<sup>a</sup> = 不推荐

<sup>b</sup> 近海环境应用

综上所述,并结合转向架实际运用场景,转向架构架内腔热喷涂的 Al 层厚度可定义为(160~200)  $\mu\text{m}$ 。

## 5. 电弧喷涂工艺流程

### 5.1. 喷砂

表面预处理的主要目的是将待喷涂表面除油、去污、除锈以及表面粗糙化等。喷砂可以去除待喷涂表面的油污、锈蚀、氧化层等,还可以使待喷涂表面粗糙化。

本研究喷砂采用(0.8~1.2) mm 合金钢砂,压缩空气压力为(0.6~0.7) MPa,喷枪枪口直径  $\varphi 8$  mm,喷嘴到基体钢材表面距离(150~200) mm,喷射方向与基体钢材表面法线夹角以  $15^\circ\sim 30^\circ$ ,喷涂时间约(0.5~1) min。喷砂后钢材表面粗糙度达到 Ra (6.3~12.5)  $\mu\text{m}$ ,清洁度符合 ISO 8501-1 标准中的 Sa2 1/2 等级。

### 5.2. 电弧喷涂铝

喷涂使用直径 2 mm 的 L1 纯铝焊丝,纯度 99.5% (标准 GB/T12608-2003 电弧喷涂用线材)。设备采用 LSARC400 电弧融射机,额定功率 18.8 KVA,空载电压(21~45) V,负载率 60%。喷涂电流 150 A,喷涂电压 30 V,雾化空气压力 0.6 MPa,喷涂距离 150 mm,喷涂时间 30 s,喷涂角度( $65\sim 80^\circ$ ) [3]。表面铝喷涂层厚度为(160~200)  $\mu\text{m}$ 。图 2 为喷涂铝后的试样。热喷涂铝涂层表面均匀,没有起皮、鼓泡、大融滴、

裂纹、掉块以及影响涂层使用的缺陷。

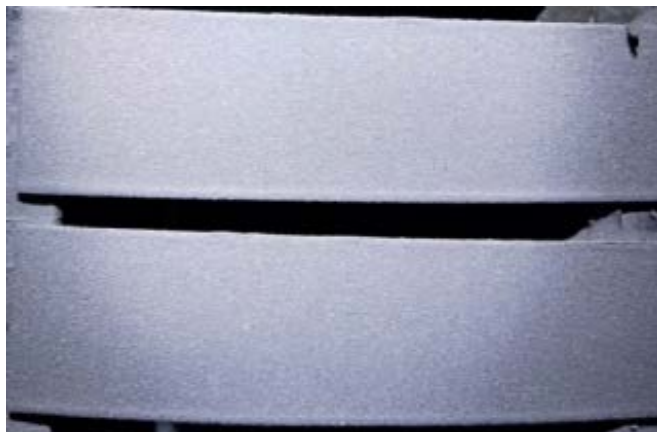
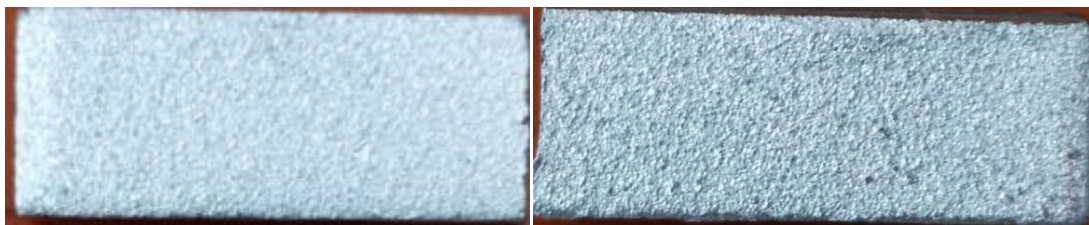


Figure 2. Morphology of coating sample after spraying  
图 2. 喷涂后的涂层试样形貌

### 5.3. 热处理

喷涂后的试样经过 10 小时的热扩散处理(600℃高温退火处理), 处理后试样表面目测发现试样外观仍保留铝镀层原色, 只是色泽上呈中灰色。图 3 为氧化和未氧化试样的宏观形貌。



热处理前 热处理后

Figure 3. Specimen after spraying aluminum  
图 3. 喷涂铝后的试样

## 6. 热喷涂铝涂层性能测试与分析

### 6.1. 结合强度测试

按照 GB 9796-88 5.2 拉力试验法进行定量测试, 试样采用直径 40 mm 的圆柱体。试样与万向接头相连进行拉伸试验。使用 Instron 3367 电子万能试验机, 以及根据标准要求自制的试验夹具。试验试样的典型荷载位移曲线见图 4 和图 5。测试结果如表 2 所示。

Table 2. Coating bond strength test results  
表 2. 涂层结合强度测试结果

试样编号	最大载荷(N)	拉伸应力(MPa)	备注
1	16667	13.26	未进行热处理
2	17028	13.55	未进行热处理
3	16714	13.30	进行退火热处理

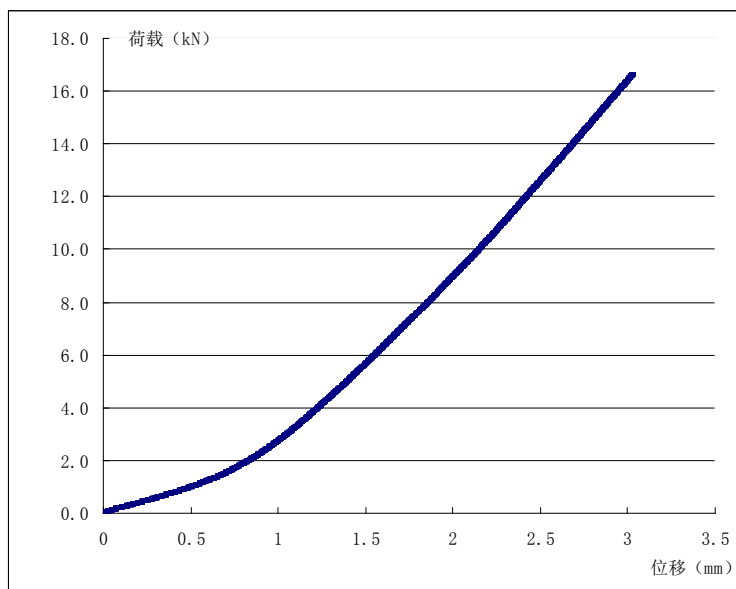


Figure 4. Pattern 1 load deformation curve

图 4. 式样 1 载荷变形曲线

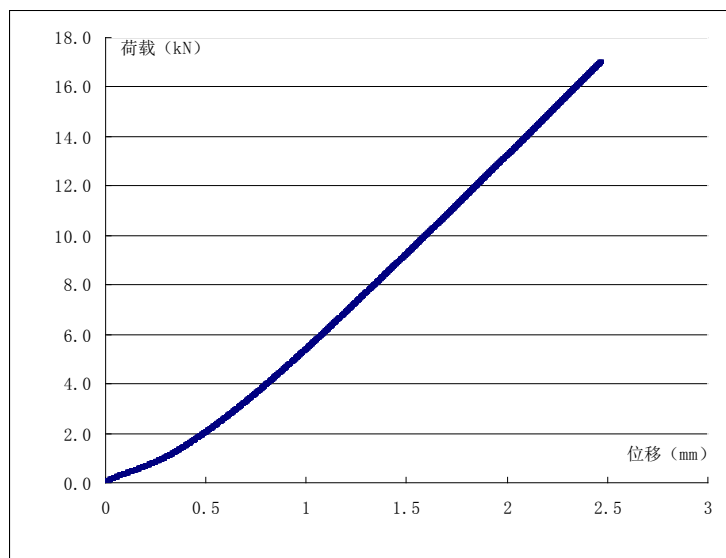


Figure 5. Pattern 2 load deformation curve

图 5. 试样 2 载荷变形曲线

结果显示, 3 次测试结果均达到标准要求, 平均强度为 13.37 MPa, 最小的强度大于 13 MPa。同时进行了热喷涂铝涂层附着力划格试验, 试样尺寸 500 mm × 5 mm, 试样厚度 8 mm, 涂层厚度 187 μm, 划格尺寸 25 mm × 25 mm, 划痕间距 5 mm, 测试结果试样涂层未产生剥离。

## 6.2. 弯曲测试

采用弯曲试验法, 即试样喷涂后, 用弯曲试验检测涂层开裂情况。试验设备采用 Instron 3367 电子万能试验机, 根据使用要求自制的弯曲试验夹具, 见图 6。测试试样分为两种, 其一为试样尺寸 500 mm × 5 mm, 试样厚度 4 mm, 涂层厚度 150 μm, 共 3 件, 测试结果见表 3~表 5, 测试曲线和涂层开裂状态见图

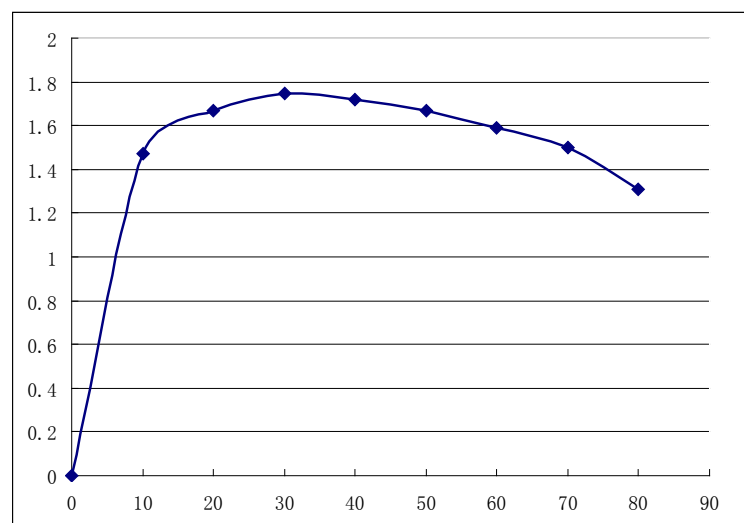
7~图 12。



**Figure 6.** Bending test device  
**图 6.** 弯曲试验装置

**Table 3.** Specimen 1 bending test results  
**表 3.** 试样 1 弯曲测试结果

挠度(mm)	荷载(kN)	弯曲角度(°)	表面裂纹
0	0	0	无
10	1.47	11	无
20	1.67	23	无
30	1.75	33	无
40	1.72	44	无
50	1.67	53	无
60	1.59	62	无
70	1.50	70	无
80	1.31	77	出现裂纹



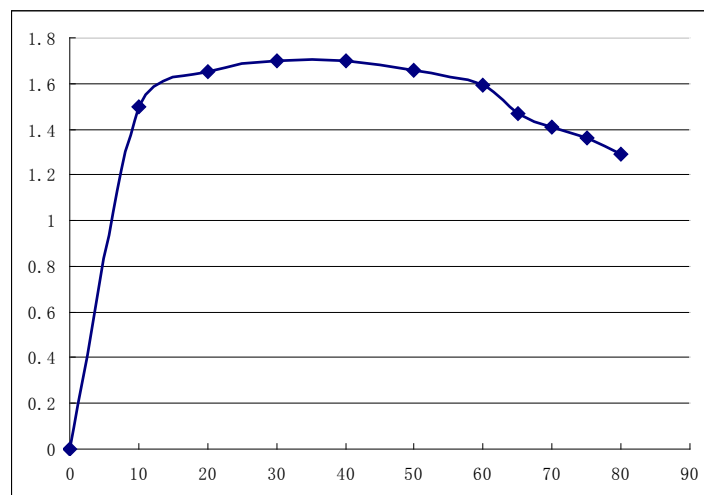
**Figure7.** Specimen 1 load-displacement curve of bending test  
**图 7.** 试样 1 弯曲试验荷载位移曲线



**Figure 8.** Bending specimen 1 cracking state  
**图 8.** 弯曲试样 1 开裂状态

**Table 4.** Test result of sample 2 bending  
**表 4.** 试样 2 弯曲测试结果

挠度(mm)	荷载(kN)	表面裂纹
0	0	无
10	1.50	无
20	1.65	无
30	1.70	无
40	1.70	无
50	1.66	无
60	1.59	无
65	1.47	无
70	1.41	无
75	1.36	无
80	1.29	出现裂纹



**Figure 9.** Specimen 2 load-displacement curve of bending test  
**图 9.** 试样 2 弯曲试验荷载位移曲线

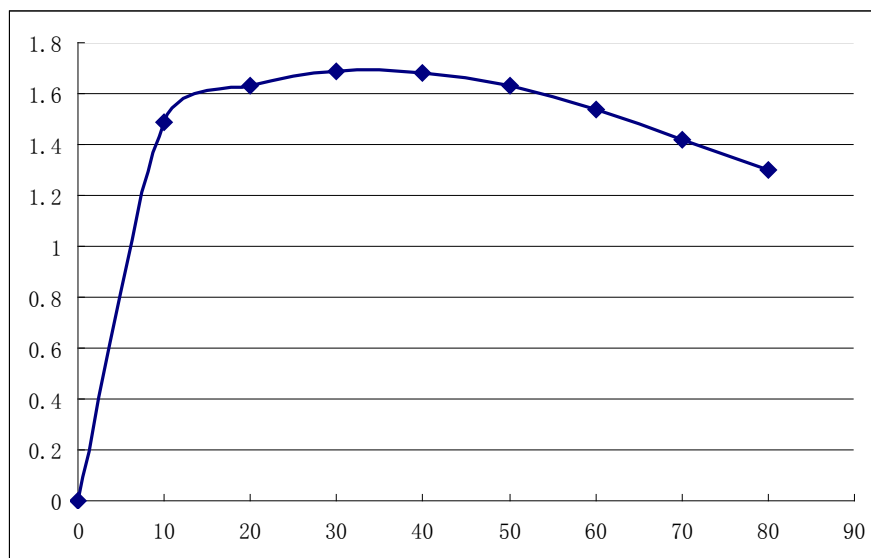




**Figure 10.** Bending specimen 2 cracking state  
**图 10.** 弯曲试样 2 开裂状态

**Table 5.** Test result of sample 3 bending  
**表 5.** 试样 3 弯曲测试结果

挠度(mm)	荷载(kN)	表面裂纹
0	0	无
10	1.49	无
20	1.63	无
30	1.69	无
40	1.68	无
50	1.63	无
60	1.54	无
70	1.42	无
80	1.30	出现裂纹



**Figure 11.** Specimen 3 load-displacement curve of bending test  
**图 11.** 试样 3 弯曲试验荷载位移曲线





**Figure 12.** Bending specimen 3 cracking state  
**图 12.** 弯曲试样 3 开裂状态

测试结果显示弯曲 70°时试样热喷涂铝涂层未发生开裂和脱落；弯曲 80°时试样涂层发生开裂，但未脱落。

### 6.3. 涂层耐腐蚀性能

在盐雾试验箱内人造气氛中进行盐雾试验。试验条件为盐水浓度 NaCl ( $50 \pm 5$ ) g/L，盐雾箱内温度为 ( $35 \pm 2$ )°C，雾嘴不直接将试验液喷向试样，喷雾室顶部聚集的溶液不直接滴落在试样上[4]。对于本实验中的 T 型试样(一侧热喷涂铝，一侧无喷涂铝)，要使每个测试表面能同时接受盐水的喷雾，盐雾试验的时间分别为 72 h 和 500 h。盐雾试验完成后，将被测试件从盐雾箱中取出，为了减少腐蚀产物脱落，试样在清洗前应在室内空气中自然干燥 0.5 h；然后用温度不超过 35°C 的干净流动水小心清洗被测试样，以去除试样表面残留的盐雾溶液，接着可用风机吹干。

通过分析发现未涂层试样侧盐雾试验 500 h 和 72 h 后，表面发生明显的腐蚀，而电弧喷涂铝层侧未见腐蚀现象(图 13 和图 14)，表明铝涂层具有较强的抗盐雾腐蚀性能。



**Figure 13.** Comparison of morphology of 72-hour salt spray test samples  
**图 13.** 72 h 盐雾试验试样形貌对比



**Figure 14.** Comparison of morphology of 500-hour salt spray test samples  
**图 14.** 500 h 盐雾试验试样形貌对比

## 7. 结论

对电弧喷涂的铝涂层进行了结合强度和耐腐蚀试验研究，主要结论如下：

1) 涂层的平均强度为 13.37 MPa，最小的强度大于 13 MPa，该电弧喷涂铝涂层结合强度可以达到国家的技术要求。同时进行了热喷涂铝涂层附着力(划格试验)，测试结果试样涂层未产生剥离。涂层现场实用结合强度检验(弯曲试验)，所有试样经过 600 弯曲试样涂层均未开裂，涂层具有较好的结合性能。

2) 未涂层试样侧盐雾试验 500 h 和 72 h 后，表面发生明显的腐蚀，而电弧喷涂铝层侧未见腐蚀现象，表明铝涂层具有较强的抗盐雾腐蚀性能。

## 参考文献

- [1] 李长久. 热喷涂技术应用及研究进展与挑战[J]. 热喷涂技术, 2018, 10(4): 1-22.
- [2] 徐金勇, 吴庆丹, 魏新龙, 肖金坤, 张超. 电弧喷涂耐海水腐蚀金属涂层的研究进展[J]. 材料导报, 2020, 34(10): 13155-13159.
- [3] 肖仁鑫, 陈小兵, 李沛森. 退火和激光冲击处理对 Q460 高强钢焊接接头残余应力及力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2016, 45(5): 214-216.
- [4] 靳子昂, 朱丽娜, 刘明, 王海斗, 康嘉杰, 马国政. 热喷涂技术制备铝涂层及其在 3.5%NaCl 溶液中耐腐蚀性的研究现状[J]. 表面技术, 2019, 48(10): 220-229.