

# 管道金属热喷涂涂层起泡分析

卫旭敏, 黄庆, 张剑明, 管秀婷

(中海福陆重工有限公司, 广东 珠海 519050)

**摘要:** 介绍金属热喷涂涂层表面起泡的现象, 分析原因并提出相应的预防措施和事后补救方案。

**关键词:** 管道; 金属热喷涂; 涂层孔隙率; 涂层起泡

中图分类号: TQ639

文献标志码: B

文章编号: 1007-9548(2025)01-0061-03

## Analysis of Blistering of Metal Thermal Spray Coating for Pipe

WEI Xu-min, HUANG Qing, ZHANG Jian-ming, GUAN Xiu-ting

(COOEC-Fluor Heavy Industries Co., Ltd., Zhuhai 519050, Guangdong, China)

**Abstract:** This paper introduces the phenomenon of blistering on the surface of metal thermal spray coating, analyzes the causes of it, and puts forward corresponding preventive measures and post-remediation schemes.

**Key words:** pipe; thermal spraying of metals; coating porosity; coating blisters

### 0 引言

金属热喷涂技术,是采用某种高温热源,将待涂敷的涂层材料熔化或至少软化后,用气体使之雾化成微细液滴或高温颗粒,高速喷射到经过表面处理的基材上面,使之形成涂层的技术。本文将通过某单位近期建造的管道热喷涂施工过程中发生的一些质量缺陷,对金属热喷涂特别是热喷涂铝进行一些探讨。

### 1 金属热喷涂技术的特点

目前防腐行业内的热喷涂技术从材料来说,通常采用铝丝、锌丝或锌铝合金丝,该管道采用的是铝丝。热喷涂涂层的多孔性对于它的实际保护性能是重要的,泼溅式的施工导致涂膜是不均匀的。根据施工工艺的不同,金属热喷涂的多孔性估计有3%~8%。电弧喷涂可以比火焰喷涂的涂层更为致密,可以控制在3%以下。当暴露于大气条件下,钢材上没有封闭的涂层会从孔隙处开始腐蚀,产生自我封闭功能。热喷涂涂层在这阶段看上去特别差劲,经常有明显的锈蚀痕

迹,有些热喷涂涂层会在此阶段会过早地失去保护寿命,涂层的孔隙越少,使用寿命越长。

根据行业经验,喷头与底材的距离对孔隙率的产生有严重影响。电弧喷涂距离超过150 mm时,涂层孔隙率就会造成巨大的差异,孔隙率会从2%~3%(距离<150 mm)增加到14%(距离>150 mm)。孔隙率的测量是很困难的。可以进行几种方法之一来估计。涂层的密度可以测量,而后比较其100%纯度的锌或铝样品。施工中由于氧化锌或氧化铝的形成,情况变得复杂了,因为这些成分的密度不同。因此涂膜的密度是不均匀的,并且不能在施工前进行适当精确的密度比较。传统的涂层横截面检测法被重新回顾,随意取样后用格栅法进行比较。在显微镜下的横截面,显现部分会显明代表孔隙度的空间。规格书参考可接受的孔隙度,以百分比来说明,比如取样区横截面观测少于12%。

当有实验室条件时,这种技术是有用的,代表样品能为测试目的而准备。对现场检测,它的缺点是结果出来得慢,有时要好几天才能产生。氰铁酸钾施工于被涂表面是一种检验技术,当溶液能进入钢铁表面,会有蓝色痕迹出现,因为溶液与钢铁底材相反应。测定点的密度是相当重要的,提供了多孔率的目测指示。

涂层多孔性对金属喷涂层的防护寿命带来不利影

收稿日期: 2023-12-15

作者简介: 卫旭敏(1984—),男,本科,高级工程师,主要从事深水导管架、海洋钻井平台、风电导管架、液化天然气模块等产品的设计和管理的工作。E-mail: xumin.wei@cooecfluor.com。

响,因为孔隙的存在会使得涂层内部的比表面积增加,当腐蚀性介质通过渗透、扩散或毛细血管现象等途径进入涂层内部后,涂层与腐蚀介质接触反应的面积也随之增加,从而加速涂层本身腐蚀的消耗,影响其防护寿命。

## 2 管道金属热喷涂要求

金属热喷涂主要用于高温管线的防腐,热喷涂采用的材料是金属铝,根据管道热喷涂要求,车间喷涂必须采用电弧喷涂,火焰喷涂不能用于车间施工,可作为现场涂层破损修补。项目需进行热喷涂的施工构件包括管线、部分设备等,其中在本场地施工的不包括设备。热喷铝管线分为保温和不保温管,需热喷涂的管线基材有碳钢和不锈钢,按照壳牌(DEP 30.48.40.31-Gen. February 2014 Thermal Spray Coatings of Aluminum)及项目规格书(L001-00000-RA-7754-1002 Technical Specification for Thermal Spray Coatings of Aluminum Sep.2020),保温管线不进行封闭漆的施工,不保温的管线需进行封闭漆施工,此项目热喷铝面积约1 000 m<sup>2</sup>。

### 2.1 施工相关技术要求

- 1)铝丝材料:采用99%铝丝(ISO 209)。
- 2)施工方法:电弧喷涂。
- 3)表面处理:打砂处理至Sa3表面清洁度(ISO 8501-1),表面粗糙度85 μm以上(ISO 8503-5),灰尘度最大1级(ISO 8502-3)。
- 4)表面盐分:最大25 mg/m<sup>2</sup>(ISO 8502-6/9)。
- 5)涂层膜厚:250~500 μm(依据SSPC PA2标准进行膜厚测量,最大不能超过1 000 μm,且超过500 μm的区域需进行附着力测试,通过后方可接受)。
- 6)封闭漆施工,要求热喷铝涂层检查合格后立即进行施工,膜厚不大于40 μm。
- 7)涂层附着力:大于8.4 MPa(ASTM D 4541)。
- 8)环境要求:电弧喷涂应在相对湿度小于85%环境下进行,喷砂后应在6 h内进行电弧喷涂工作。相对湿度增大时,应进一步减少喷砂和电弧喷涂的时间间隔。
- 9)此项目规格书要求进行盐雾试验、表面孔隙率检测、弯曲试验、附着力测试。
- 10)其他要求:依据规格书要求,热喷铝施工需由培训合格的工人进行,依据ISO标准,本项目开工前,对热喷铝工人进行了培训及考核(ISO 14918)。

### 2.2 涂层质量检查(ISO 14922)

1)外观:目视法,喷涂层外观应均匀一致,无漏喷和附着不牢的涂层,无大熔融颗粒黏附。用5~10倍放大镜检查,涂层均匀、致密,无起皮、鼓泡、大熔滴、

大颗粒、裂纹、掉块等缺陷。

2)厚度:碳钢底材可用一般的elcometre 456型测厚仪,不锈钢底材热喷铝涂层需采用相位测厚仪进行检查。

3)附着力测试,依据ASTM D 4541,要求大于8.4 MPa,在构件上面进行测试,达到附着力8.4 MPa后停止测试,避免破坏涂层。

4)封闭漆闭孔率检查,采用10倍放大镜检查。

注:本项目管道TSA涂层没有要求进行孔隙率及耐腐蚀性的检查,依据行业经验,电弧喷涂孔隙率可控制在3%以下,简便的孔隙率现场检查方法是清除喷镀层表面的油污、灰尘,并进行干燥,然后用10 g/L铁氰化钾或20 g/L氯化钠溶液的试纸覆盖在喷镀层上约10 min,试纸上出现的蓝色斑点不应多于3点/cm<sup>2</sup>。

### 2.3 管道热喷铝表面起泡描述

该管道大批量热喷铝施工是在2021年9月至2022年2月期间,喷涂800多根管线面积共达到6 000 m<sup>2</sup>。

项目前期,针对热喷铝涂层的防护,制定了专门的防护措施,其中针对涂层的多孔性特性,为了避免水汽进入涂层,涂层检查合格后,即用塑料薄膜及三防布进行防护,但是后期安装时打开后发现,涂层表面潮湿,涂层有很多可见的起泡开裂,由此可见此种方法忽略了一些现场不可避免的细节。

发现后立即组织了原因分析,并制定了新的防护措施,新的防护措施及行动包括:立即拆除热喷铝管线原有的保护,并采用透气的棉布进行防护,现场储存的热喷铝管线离地储存,上方盖上三防布,同时三防布不能全部密封覆盖在管线表面,需保证表面通风良好,成立防护专项小组,定时检查管线的防护状态。

2022年4月台风天气过后,对厂内的热喷铝管线进行了统一巡查,发现个别的热喷铝管线涂层起泡,此后至8月份现场检查,陆续发现很多涂层起泡现象(见图1)。



图1 TSA涂层表面典型起泡照片

## 2.4 热喷铝涂层起泡原因分析

起泡是因为涂层局部失去附着,受泡内气体或液体的压力离开底材使涂层呈现凸起变形,甚至突起部位开裂,起泡必须具备两个条件:一是涂层具有透气透水性,二是涂层与底材的附着力不足以抵挡水汽聚集形成的压力而离开底材。

遵循以上两个条件,我们针对热喷铝涂层的起泡进行了现场分析并总结,发现有以下一些现象:

1)热喷铝涂层起泡是在4~5月份发现的,南方当地城市的天气,从2月至5月为典型的阴雨潮湿天气。

2)热喷铝管线在厂房内喷涂完成后,运往总装场地,在场地内储存,通过检查施工记录发现,起泡泡管线的热喷铝涂层施工大部分是在2022年12月份之前,也就是说管线在现场存放的时间超过4个月

3)现场同时对比了已经施工封闭漆的热喷铝涂层,只发现个别管线很少涂层起泡。

4)与2月份之前已经安装在模块上面的热喷铝管线相比,长时间放置于地面的管线,特别是暴雨天气局部浸泡在水里面的部分,相对来说起泡更为严重。

5)涂层起泡具有隐蔽性及延时性,已经检查过没有起泡的部位,隔段时间检查,还可能发现起泡问题,特别是7月份气温较高的天气检查,发现比较多原先没有起泡的部位也起泡了。

综合以上现象,我们总结出热喷铝管线涂层起泡的原因主要为以下几点:

1)热喷铝涂层多孔的特性,未做封闭漆的热喷铝涂层,水汽容易渗透,并在涂层的气孔等部位聚集(其实所有涂层都有这个特性,只是TSA涂层相对更容易透水)。

2)受当地天气的条件的影响,涂层长时间处在高温潮湿的环境中,水汽渗透入未做封闭漆的涂层中。

3)当水汽聚集达到一定程度,涂层所受的应力大于其与底材的附着力时,涂层会与底材脱离,该部位就形成了起泡。

4)气温高低也会是涂层是否起泡的因素,水汽聚集在涂层内,温度较低时,可能不会引起起泡,但是当气温较高,水汽对涂层形成的应力大于涂层对底材的附着力时,将会发生起泡。

## 2.5 现场应对措施

1)对于已经起泡的涂层,按照项目规范进行相应的修补。

2)对于未起泡的管线,用透水的材料防护,同时放置部位保证通风,防止形成潮湿环境。

## 2.6 后续预防措施

从起泡的原因着手,可以采取以下措施:

1)优先采用封闭漆的施工工艺,从现场实践来看,施工封闭漆能很好地防止热喷铝涂层受水汽的渗透,从而避免涂层起泡。

2)优化热喷铝涂层施工工艺,减少涂层的孔隙率,对金属热喷涂工艺,已经有很多试验进行了相关测试,温度越高,涂层的孔隙率越低,等离子喷涂的涂层孔隙率是最低的,对于不进行封闭漆施工,而涂层又面临潮湿高温环境的情况,可以考虑此种措施。

3)改善已经施工热喷铝涂层的物件的储存环境,在正式安装前,尽量室内储存,保证通风干燥的环境,防止水汽接触涂层表面,现场安装过程中做好防护措施,避免形成高温潮湿的状态。安装完成后尽快做正式的防护措施(如需保温)。

## 3 结语

针对管道表面金属热喷涂涂层出现的起泡缺陷问题,喷涂后涂层的储存要求应严格按照以上预防措施执行,如有条件建议室内储存,保证通风干燥的环境,防止水汽浸泡涂层表面或者进行封闭漆处理,从而避免因涂层起泡问题影响项目工期和质量。

## 参考文献:

- [1] 黎樵燊.金属表面热喷涂技术[M].北京:化学工业出版社,2009.
- [2] 邓本金.锌(铝)以及有机涂料对钢铁底材的双重防腐保护[J].涂层与防护,2021,42(7):48-56.

欢迎免费阅读  
《现代涂料与涂装》电子版



电话:0931-8496343

邮箱:a8496343@foxmail.com

投稿 QQ:1056418548