

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.09.10

管内壁丝电爆喷涂制备2Cr13涂层

彭凯^{1,2}, 朱亮^{1,2*}, 周辉^{1,2}, 陈伟鹏^{1,2}

1. 兰州理工大学 材料科学与工程学院, 甘肃 兰州 730050

2. 兰州理工大学 省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 甘肃 兰州 730050

摘要: 针对小口径管道内壁因输送物质引起的损害问题, 自主研发了一套管内壁丝电爆喷涂装置, 可在内径40 mm以上的管件内表面进行喷涂, 且可以实现爆炸槽的自动更换。在直径50 mm的油气田专用碳钢管内表面进行电爆喷涂试验, 制备2Cr13涂层。对制备的2Cr13涂层的特性进行检测分析, 发现涂层和基体之间形成冶金结合界面; 涂层为典型的纳米晶结构; 涂层硬度为320.5 HV; 涂层的摩擦系数相对基体而言更低, 涂层具有更好的耐磨性; 涂层的自腐蚀电位高于基体, 自腐蚀电流密度小于基体, 具备更好的耐腐蚀性能。

关键词: 丝电爆喷涂; 小口径管; 管内壁涂层; 2Cr13涂层

中图分类号: TG174.44 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)09-0102-06

Preparation of 2Cr13 Coatings by Electro-explosive Spraying of Filaments on the Inner Wall of Tubes

PENG Kai^{1,2}, ZHU Liang^{1,2*}, ZHOU Hui^{1,2}, CHEN Weipeng^{1,2}

1. School of Materials Science and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China

2. State Key Laboratory of Advanced Processing and Reuse of Non-ferrous Metals, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China

Abstract: In view of the damage caused by the inner wall of small diameter pipelines due to the transport of substances, independently developed a set of pipe wall wire electro-explosive spraying device, can be sprayed on the inner surface of the pipe fittings with an inner diameter of 40 mm or more, and can achieve automatic replacement of the explosive groove. In the diameter of 50 mm oil and gas field special carbon steel pipe inner surface electro-explosive spraying test, the preparation of 2Cr13 coating. The characteristics of the prepared 2Cr13 coating were tested and analysed, and it was found that the metallurgical bonding interface was formed between the coating and the substrate; the coating was a typical nano-crystalline structure; the hardness of the coating was 320.5 HV; the coefficient of friction of the coating was lower than the substrate, and the coating had a better abrasion resistance; the coating's self-corrosion potential was higher than the substrate, and the self-corrosion current density was lower than the substrate, and it had a better corrosion resistance performance.

Keywords: silk electroburst coating; small diameter tubes; tube inside coating; 2Cr13 coating

引用格式: 彭凯, 朱亮, 周辉, 等. 管内壁丝电爆喷涂制备2Cr13涂层[J]. 电焊机, 2025, 55(9): 102-107.

Citation: PENG Kai, ZHU Liang, ZHOU Hui, et al. Preparation of 2Cr13 Coatings by Electro-explosive Spraying of Filaments on the Inner Wall of Tubes[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(9): 102-107.

0 引言

在石油石化、消防、水利等行业中, 小口径输送

管道内壁经常受到输送物质的损害^[1], 而其中多数管道采用的是碳钢材料。为提高管道的耐磨耐腐蚀性, 主要采取两种策略: 涂层技术和内衬技术^[2]。

收稿日期: 2024-07-16 修回日期: 2024-12-11

基金项目: 国家自然科学基金(51765038); 甘肃省在站博士后专项(23JRRA762); 甘肃省教育厅高等学校产业支撑计划项目(2023CYZC-22)

作者简介: 彭凯(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事电爆喷涂沉积研究。

通讯作者: 朱亮(1964—), 男, 教授, 博导, 主要从事焊接技术、丝电爆方法和纳米材料研究。E-mail: zhul@lut.cn。

涂层技术以其施工简便、易于应用的优点,成为了一种广泛采用的防护措施,常见管内壁涂层制备技术有风送挤涂技术、电镀技术、溅射镀膜技术、传统热喷涂技术等。风送挤涂技术虽然操作简单且成本效益高,但其涂层质量较低;电沉积技术可以制备致密的涂层,但涂层厚度不均匀且废液难处理;溅射镀膜技术能够制备出高性能薄膜,但面临成本高、涂层厚度不够的问题;传统热喷涂技术提供了广泛的材料选择,适用于耐磨和耐腐蚀涂层的制备,但在小口径长管内的应用受到设备限制。

电爆喷涂方法作为一种创新的热喷涂方法,通过储能电容器放电产生高密度大电流导入喷涂材料,使之熔化、气化、膨胀失稳并最终爆炸,形成高速飞行的熔融粒子沉积在管件内壁形成涂层^[3],在制备小口径管道内壁高质量涂层方面展现出独特的优势。杜新武^[4]等人同样将单根钼丝或铁丝置于直径 53 mm 的 LY12 铝制圆筒中心进行交替喷涂试验,得到了管内壁复合涂层。这种单次电爆喷涂方法,需要频繁进行喷涂材料的更换,效率较低。针对这一问题,兰州理工大学的学者引入气体放电电流导入机制^[5],避免了电极直接接触发生烧蚀或造成喷涂材料在电极上形成积瘤等问题,为连续电

爆喷涂提供理论依据;设计约束爆炸槽^[6],并且采用具有消融效应的耐冲击绝缘材料来制作,如聚乙烯材料;提出带载丝送料方式^[7],即使用高密度聚乙烯(HDPE)载丝带作为输送喷涂材料的载体,将喷涂材料预装在载丝带上,实现在高电压条件下喷涂材料自动连续进给及喷涂。但现有装置存在约束爆炸槽寿命低、载丝带易拉断等问题,从而导致涂层质量不佳,且喷涂效率较低。

本文基于上述连续电爆喷涂的理论,自主研制了一套管内壁丝电爆喷涂装置,解决现有装置存在的问题,在直径 50 mm 的碳钢管内表面进行喷涂试验,制备管内壁 2Cr13 涂层,并对涂层的特性进行测试分析。

1 管内壁丝电爆喷涂装置组成

自主研制的管内壁丝电爆喷涂装置的工作原理如图 1 所示。装置主要由电爆喷枪(接地导体、高压导体、多段式爆炸腔、低压电极、高压电极等)、载丝带运动收集装置(送丝轮、拉带轮等)、枪头支撑结构(万向球等)、基管夹持与运动装置和高压充放电装置(储能电容器组、高压发生器 H.V.)等组成。

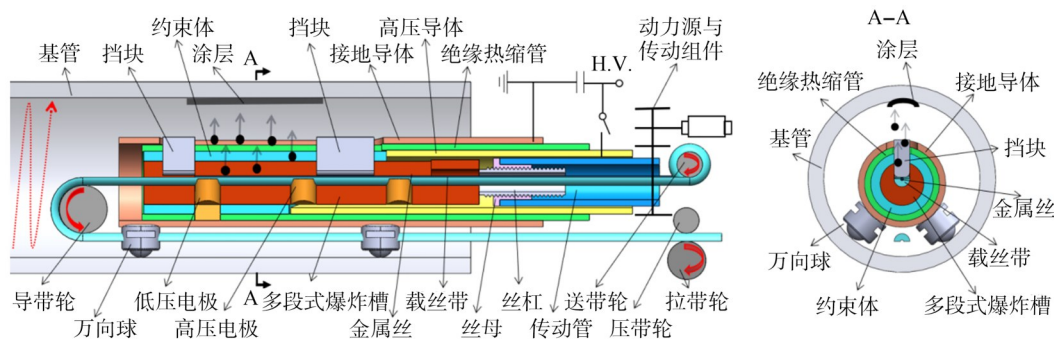


图1 管内壁丝电爆喷涂装置工作原理

Fig. 1 Pipe wall wire electro-explosion spraying device working principle diagram

具体工作原理为:电爆喷枪沿着两条导电铜管深入管道内部,接地导体与储能电容器的正极相连,高压导体与储能电容器的负极相连,接地导体与多段式爆炸槽中的接地电极接触,高压导体与高压电极接触,利用高压发生器(H.V.)为储能电容器充电,从而在两电极间形成高压电场;金属丝被装载至高密度聚乙烯(HDPE)载丝带上,随后通过载丝带传送收集机构送入高压导体,并持续输送至多

段式爆炸槽内;金属丝与接地电极和高压电极之间保持一定的气隙,当其与两电极间距离满足气体放电条件时,电极会向金属丝导入脉冲大电流,在焦耳热作用下,金属丝迅速熔化、气化、膨胀并最终爆炸,爆炸产物经喷射窗口,并通过多段式爆炸槽以及两个挡块的约束,定向喷涂到基管内表面,从而形成涂层。在喷涂过程中,多段式爆炸槽通过其运动机构,更换使用段对爆炸槽进行缓冲冷却;枪体

由万向球实现管内支撑与喷涂距离调节;载丝带运动收集机构保证了送带的精准与连续,且对使用后的载丝带进行有序收集;基体管道通过其运动机构进行旋转与水平运动,完成涂层搭接以及整管喷涂。

2 管内壁 2Cr13 涂层制备

2.1 工艺规范

试验管件选用经过喷砂处理的油田专用碳钢管,内径为 50 mm,壁厚 5.5 mm,长 0.5 m;试验喷涂材料选用丝径为 0.45 mm 的 2Cr13 马氏体不锈钢丝,每次电爆喷涂所消耗丝长为 80 mm。

由于管内壁涂层要具备相应的性能,必须有一定的厚度,所以涂层需要由多次喷涂来完成制备。首次丝电爆喷涂时,喷涂粒子与基体表面碰撞,对基体表面的氧化物等具有一定的清理作用,这对涂层结合强度的提升尤为重要,首层的清理作用配合喷涂前对基体表面的喷砂处理,能有效改善喷涂过程中的起皮、脱落现象。首次喷涂的清理作用要达到较好的效果,就要求喷涂粒子具备更高的能量,而后续喷涂则需要考虑沉积率、粗糙度等来保证涂层的性能,因此二者之间的工艺参数存在一定差别。并且单道多次喷涂层厚度呈现中间厚两边薄的趋势,为了保证管内涂层厚度的一致性,制备过程中需要进行搭接。

综合考虑上述因素,首次喷涂初始充电电压为 13.0 kV,喷涂距离为 20 mm,后续喷涂初始充电电压为 11.0 kV,喷涂距离为 24 mm,喷涂总次数 10 次;搭接方式为二段式搭接,基管运动为递进式运动,搭接方式如图 2 所示,可分为周向搭接和轴向搭接。

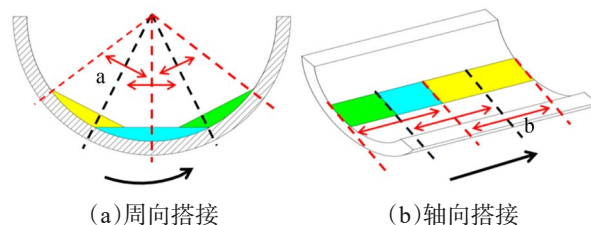


图2 搭接方式

Fig. 2 Schematic diagram of coating overlap method

2.2 喷涂试验

依据上述的工艺规范及搭接方式,对 DN50 碳钢管进行喷涂试验,试验后试件内表面宏观形貌见图 3a;涂层局部放大后见图 3b 可以发现,管内壁涂层较为完整,没有出现凹凸不平的现象,也没出现起皮、脱落现象。涂层表面 SEM 形貌见图 3c,涂层表面均匀致密,并且没有孔洞、裂纹等缺陷出现。使用 LSM-800 型激光共聚焦显微镜对涂层的三维表面形貌进行观察,通过对三维形貌进行降噪处理后得到涂层表面的粗糙度 R_a 。经多次测量后取平均值得到涂层粗糙度仅为 $2.78 \mu\text{m}$,表面粗糙度越小,则表面越光滑,耐磨性、耐蚀性越好。

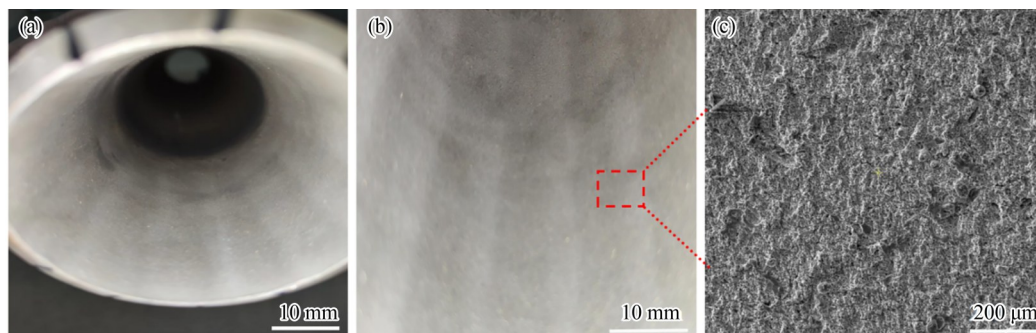


图3 电爆喷涂后内壁表面形貌

Fig. 3 Surface morphologies of inner wall after electric explosion spraying

3 管内壁 2Cr13 涂层特征及性能

3.1 结合强度

涂层与基体截面 SEM 形貌与 EDS 能谱线扫描

结果如图 4 所示,由图 4 可知,涂层厚度均匀,与基体的结合面呈波浪状,这表明在电爆喷涂过程中,产生的高速粒子流与基体表面撞击后,粒子完全扁平并镶嵌到基体中形成致密涂层。从基体到涂层,

Fe元素的含量逐渐降低,而Cr元素含量由基体向涂层逐渐增高,并且这两种元素在涂层与基体结合处并不是突变的,而是存在一定的过渡区,这一区域大约有6 μm ,这证实了电爆喷涂制备涂层过程中,涂层与基体具备冶金结合界面。

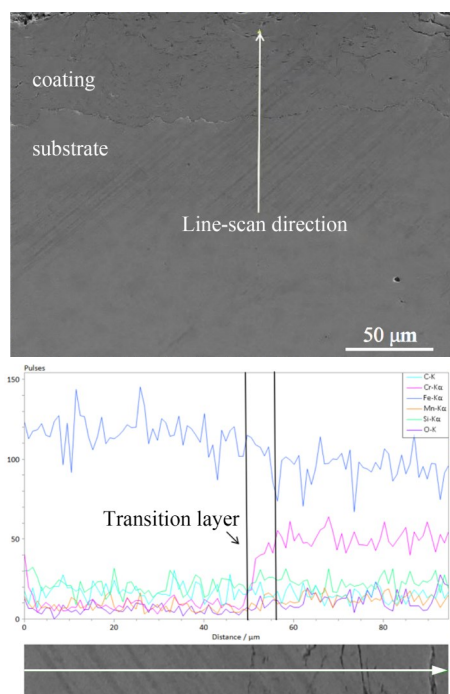


图4 涂层截面SEM形貌与EDS能谱线扫描结果

Fig. 4 The SEM morphology and EDS spectrum line scan results of the coating cross-section are

3.2 物相组成与微观组织

对管内壁 2Cr13 涂层进行 XRD 物相分析,结果如图 5 所示。从涂层衍射谱图中来看,主要有 α -Fe 相和 γ -Fe 相的特征峰。另外,涂层各衍射峰存在一定的小幅度宽化现象,说明使用电爆法制备的 2Cr13 不锈钢涂层在涂层形成过程中发生了晶粒细化现象。根据谢乐公式^[8],

$$D = \frac{k\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (1)$$

式中 d 为晶粒尺寸; λ 为入射 X 射线波长(0.15406 nm); θ 为衍射角; β 为衍射峰对应的半峰宽; k 为常数(一般取 0.89 或 0.94)。由式(1)可计算出内壁 2Cr13 涂层的平均晶粒尺寸约为 29 nm,涂层为典型的纳米晶结构。这是由于在电爆喷涂过程中,金属丝受到焦耳热影响而瞬间熔化,生成的高温、高速粒子在强大的冲击波作用下撞击到基体表面,这种撞击不

仅导致粒子迅速凝固,还在基体表面形成强烈的湍流运动,这种湍流限制了晶粒的生长,导致在撞击区域形成的涂层晶粒细化。另一方面,从 X 射线衍射(XRD)图谱中可以看出,并没有检测到氧化物的衍射峰,这表明在电爆喷涂制备过程中,2Cr13 涂层并未发生显著的氧化现象。

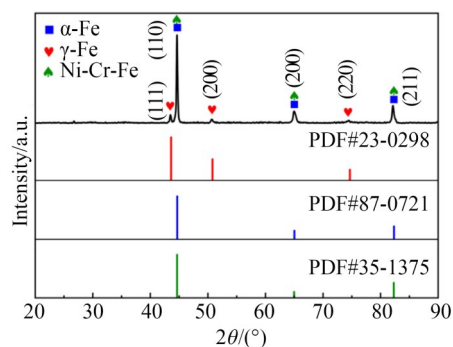


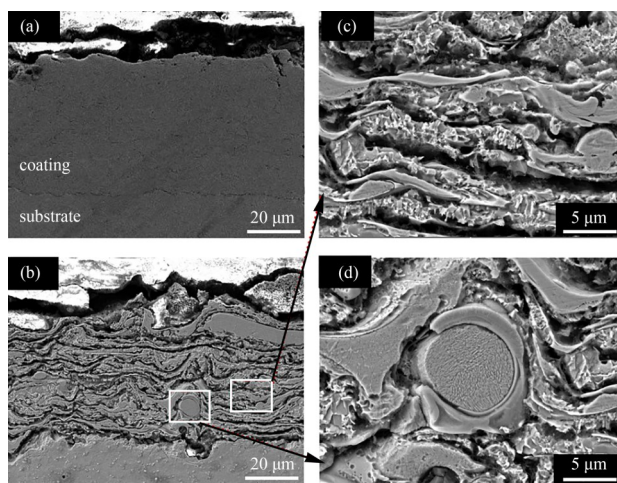
图5 涂层 XRD 衍射图谱

Fig. 5 XRD pattern of coating

使用氯化铁溶液(5g FeCl_3 +20 mL HCl +100 mL H_2O)擦拭 2Cr13 涂层截面 40 s,然后观察涂层截面的微观组织形貌,如图 6 所示。观察图 6b 可知,涂层微观组织基本呈现出“扁平状”,存在少量的“圆球状”组织。电爆喷涂过程中,金属丝在发生爆炸后形成熔滴状喷涂粒子,这些熔滴通过冲击波快速喷射到基体表面形成熔潭,其他熔滴持续撞击熔潭,使其凝聚在一起,聚集的较大熔滴凝固过程较缓慢,具有一定的流动性,可以在基体表面充分平铺,从而实现扁平化,形成“扁平状”组织,如图 6c 所示。而少量飞行速度较低的熔滴,在飞行过程中温度逐渐降低,喷射到基体表面后凝固过程较快,并未完全发生扁平化,与后续的熔滴聚集形成“圆球状”组织,如图 6d 所示。在熔滴与熔滴的交界处,存在许多微小熔滴以及纳米粉末,因为这些微小熔滴与纳米粉末的存在,降低了孔隙率,使得沉积层致密性提高,这使得涂层的耐磨性和耐腐蚀性有所提高。并且从涂层微观形貌中可以发现纳米晶粒,这与 XRD 测得的结果相符,再次证明了晶粒细化现象的存在。

3.3 性能测试

采用 HV-30 维氏显微硬度计对涂层截面和基体进行硬度测试,施加载荷为 2 N,静载时间为 10 s,测试采用等距离取点法,每点相距 1 mm,对选取的



(a)涂层截面组织;(b)涂层微观组织;(c,d)区域放大图

图6 涂层截面形貌与微观组织形貌

Fig. 6 The Morphology of coating cross-section and microstructure

5个点进行测量后求取平均值作为最终的实验结果如表1所示。由表可知,涂层的硬度为320.5 HV,相比于基体的105.9 HV明显高出许多。2Cr13材质的硬度本就超过了普通碳钢的硬度,而且采用电爆喷涂方法制备的涂层,相比传统热喷涂技术展现出其特有的益处。电爆喷涂方法在制备涂层时,主要通过高密度脉冲电流对喷涂材料施加焦耳热,使得材料熔化、膨胀并最终爆炸,产生大量高球形度、细小晶粒的喷涂粒子,这些细小的喷涂粒子在巨大的爆炸冲击波作用下撞击到基材上,在撞击冷却过程中,晶粒迅速细化,形成了微纳结构,晶粒的细化阻碍了位错的滑移,从而有效增加了涂层的硬度。

表1 涂层与基体的硬度(HV)

Table 1 Hardness of coating and substrate (HV)		
序号	涂层	基体
1	312.3	107.0
2	318.7	108.3
3	326.4	106.2
4	321.8	101.5
5	323.0	104.9
平均值	320.5	105.9

使用HT-1000摩擦磨损试验机在室温条件下分别对基体和涂层进行耐磨性测试,对磨材料为 Si_3N_4 ,载荷为500 g,摩擦半径为4 mm,旋转速度为350 r/min,时间为20 min。图7为2Cr13涂层和基体的摩擦系数曲线。由图可知,涂层的平均摩擦系数为0.224 9,而基体在比较稳定的阶段平均摩擦系数为

0.615 6。摩擦系数越小,表明材料在滑动过程中产生的摩擦阻力越小,对磨材料间相互作用力越弱,材料越不容易被破坏,材料的减摩作用越明显,耐磨性越好^[9]。从摩擦系数的变化趋势中发现,基体的摩擦系数随加载时间的进行而变大,在3 min后趋于稳定,维持在0.6左右,说明基体材料在磨球加载过程中产生了加工硬化,基体的强度和硬度提高,使得基体的摩擦系数趋于平稳。而涂层的摩擦系数在10 min前一直趋于平稳,没有较大波动,说明高硬度马氏体不锈钢涂层减摩效果明显;10 min后涂层摩擦系数有缓慢上升趋势,曲线波动变大,涂层与对磨材料接触中变薄,减摩效果减弱。总的来说,涂层的摩擦系数远低于基体摩擦系数曲线,说明涂层对基体有一定的保护作用,且效果明显。

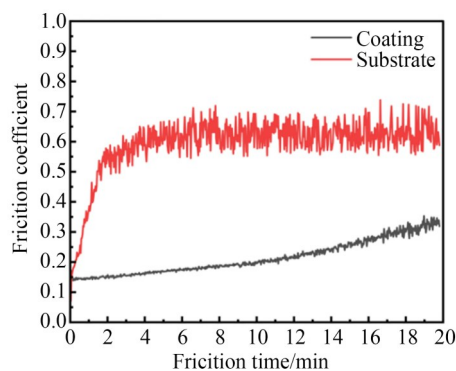


图7 涂层与基体的摩擦系数曲线

Fig. 7 Curves of friction coefficient of coating and substrate

采用上海辰华-CHI660e电化学工作站对管内壁2Cr13涂层耐腐蚀性进行测试。腐蚀环境为3.5 wt.% NaCl溶液,试验中只露出涂层面,铂电极为辅助电极,参比电极为饱和的KCl甘汞电极,图8为2Cr13涂层与基体在3.5%NaCl溶液中的极化曲线。碳钢基体自腐蚀电位为-0.807 V、自腐蚀电流密度为 $4.941 \times 10^{-5} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$,2Cr13马氏体不锈钢涂层的自腐蚀电位为-0.751 V、自腐蚀电流密度为 $5.134 \times 10^{-6} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。一般用自腐蚀电流密度的大小来表征材料腐蚀速度的快慢,当自腐蚀电流密度较小时,说明材料具有小的腐蚀速度,材料的耐腐蚀性能就越好;而用自腐蚀电位来表征材料被腐蚀的难易程度,当自腐蚀电位越高时,材料越不容易被腐蚀,反之材料在腐蚀环境中越容易被腐蚀^[10]。可见涂层相对基体材料更耐腐蚀,并且由于电爆法制备的涂层表面致

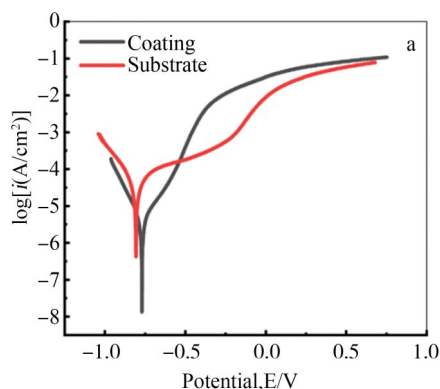


图8 涂层与基体在3.5wt.%NaCl溶液中的极化曲线

Fig. 8 Polarization curve of coating and substrate in 3.5wt% NaCl solution

密,无明显缺陷,隔离了基体与腐蚀介质的接触,能够很好的抵抗腐蚀液对基体的腐蚀。

4 结论

(1)基于连续电爆喷涂方法的理论基础,自主研制了一套管内壁丝电爆喷涂装置,解决了现有装置存在的爆炸槽寿命短、载丝带容易拉断的问题,该装置可实现直径40 mm以上管道内壁的喷涂。

(2)利用自主研制的管内壁丝电爆喷涂装置进行内径为50 mm的碳钢管内壁的整管喷涂试验,喷涂材料选用丝径为0.45 mm的2Cr13马氏体不锈钢丝,并利用电爆喷涂的首层清理作用来改善喷涂过程中出现的起皮、脱落现象。试验后发现涂层完整性和均匀性较好,搭接效果明显,没有任何起皮、脱落现象,且自主研制的管内壁带载丝电爆喷涂装置能够连续稳定地完成碳钢管内壁的整管喷涂。

(3)对管内壁2Cr13涂层的特性进行检测分析,涂层和基体之间形成冶金结合界面;涂层晶粒为典型的纳米晶结构,晶粒尺寸约为29 nm;涂层硬度为320.5 HV;涂层平均摩擦系数为0.2249,相比于基体具有更好的耐磨性;涂层的自腐蚀电位高于基体,自腐蚀电流密度小于基体,具备更好的耐腐蚀性能。

参考文献:

- [1] 林竹,韩文礼,郭继银,等.小口径管道内防腐蚀技术[J].石油工程建设,2017,43(4):76-80.
LIN Z, HAN W L, GUO J Y, et al. Internal anticorrosion technology of small diameter pipelines[J]. Petro-

leum Engineering Construction, 2017, 43(4): 76-80.

- [2] Curran E. Corrosion Control In Gas Pipelines Coating Protection Provides Lifetime of Prevention[J]. Pipeline & gas journal, 2007, 234(10): 50-54.
- [3] 魏世丞,徐滨士,王海斗,等.电热爆炸喷涂的发展及其关键技术分析[J].中国表面工程,2008,21(4):8-13.
WEI S C, XU B S, WANG H D, et al. The Development and Key Technology Analysis of Electro-thermal Explosion Spray[J]. China Surface Engineering, 2008, 21(4): 8-13.
- [4] 杜新武,宋遵志,王建中.铝合金内表面电爆炸喷涂不同比例钼-高碳钢的性能对比研究[J].材料导报,2009,23(14):12-14.
DU X W, SONG Q Z, WANG J Z. Contrast Research on Characteristics of Mo and High-carbon Steel with Different Ratio by Wire Explosion Spraying on Inner Face of Al Alloy[J]. Materials Reports, 2009, 23(14): 12-14.
- [5] 朱亮,毕学松.利用气体放电导入电流的金属丝电爆装置:CN201110054792.7[P].2011-08-17.
- [6] 韩峰.约束电爆喷涂方法及机理研究[D].甘肃:兰州理工大学,2019.
HAN F. Study on the Process and Mechanism of Constrained Electrical Explosion Spraying[D]. Gansu: Lanzhou University of Technology, 2019.
- [7] 张爱华,白洋伟,何超键,等.一种载丝带制备装置及制备方法:CN114750426A[P].2022-07-15.
- [8] Hsu C Y, Yeh J W, Chen S K, et al. Wear resistance and high-temperature compression strength of Fcc CuCoNi-CrAl 0.5 Fe alloy with boron addition[J]. Metallurgical & Materials Transactions A, 2004, 35(5): 1465-1469.
- [9] 李崇桂,田伟,杨勇,等.TC4钛合金表面等离子喷涂 Al_2O_3 -13wt% TiO_2 涂层及激光重熔研究[J].材料热处理学报,2007,28(B08):228-232.
LI C G, TIAN W, YANG Y, et al. Microstructure and properties of Al_2O_3 -13wt% TiO_2 coatings fabricated by plasma spraying and laser remelting on titanium alloy[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2007, 28(B08): 228-232.
- [10] 王子博.高压扭转纯Al和Al-Mg合金的微观结构、力学性能与热稳定性[D].江苏:江苏大学,2018.
WANG Z B. Microstructure, mechanical properties and thermal stability of pure Al and Al-Mg alloys processed by high pressure torsion[J]. Jiangsu: Jiangsu University, 2018.