

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2024.11.12

高频聚能爆炸喷涂工艺研究

王 鑫, 廖芳芳, 杜建荣, 赵军军*, 杰米扬诺夫·伊万

浙江巴顿焊接技术研究院, 浙江 杭州 311200

摘要: 为研究高频聚能爆炸喷涂技术在制备 WC-12Co 耐磨涂层方面的应用, 并优化喷涂工艺参数, 以获得低孔隙率、高结合强度的涂层。采用高频聚能爆炸喷涂设备在 Q235 钢材上制备 WC-12Co 涂层, 并通过正交试验研究氧燃比、填枪比和送粉速度等工艺参数对涂层孔隙率和显微硬度的影响。正交试验结果表明, 氧燃比对涂层孔隙率和显微硬度的影响最为显著, 其次是送粉速度, 填枪比的影响最小。最佳工艺参数为氧燃比 5.1, 填枪比 0.6, 送粉速度 18.6 g/min, 在该工艺条件下制备的涂层孔隙率仅为 0.24%, 显微硬度达到 887 HV0.3。涂层结合强度测试结果显示, 结合强度超过 76.3 MPa, 远高于普通爆炸喷涂技术制备的涂层。高频聚能爆炸喷涂技术制备的 WC-12Co 涂层具有低孔隙率、高结合强度、高硬度和优异的综合性能, 具有广阔的工程应用价值。

关键词: 高频聚能爆炸喷涂; WC-12Co 涂层; 工艺参数; 结合强度; 孔隙率

中图分类号: TG174 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2024)11-0092-07

Research on High-frequency Cumulative Energy Denotation Spraying Process

WANG Xin, LIAO Fangfang, DU Jianrong, ZHAO Junjun*, Ivan Demyanov

Zhejiang E.O. Paton Welding Technology Research Institute, Hangzhou 311200, China

Abstract: The aim is to study the application of high-frequency detonation spray technology in the preparation of WC-12Co wear-resistant coatings, and to optimize the spray process parameters to obtain coatings with low porosity and high bonding strength. WC-12Co coatings were prepared on Q235 steel substrate using high-frequency detonation spray equipment, and the effects of process parameters such as oxygen-fuel ratio, filling gun ratio, and powder feeding speed on the porosity and microhardness of the coating were studied through orthogonal experiments. The results of the orthogonal experiment show that the oxygen-fuel ratio has the most significant effect on the porosity and microhardness of the coating, followed by the powder feeding speed, and the filling gun ratio has the least effect. The optimal process parameters are an oxygen-fuel ratio of 5.1, a filling gun ratio of 0.6, and a powder feeding speed of 18.6 g/min. Under these process conditions, the porosity of the prepared coating is only 0.24%, and the microhardness reaches 887 HV0.3. The results of the coating bonding strength test show that the bonding strength exceeds 76.3 MPa, which is much higher than that of coatings prepared by ordinary detonation spray technology. The WC-12Co coating prepared by high-frequency detonation spray technology has low porosity, high bonding strength, high hardness, and excellent comprehensive performance, and has broad engineering application value.

Keywords: high-frequency focused explosion spraying; WC-12Co coating; process parameters; bonding strength; porosity

引用格式: 王鑫, 廖芳芳, 杜建荣, 等. 高频聚能爆炸喷涂工艺研究[J]. 电焊机, 2024, 54(11): 92-98.

Citation: WANG Xin, LIAO Fangfang, DU Jianrong, et al. Research on High-frequency Cumulative Energy Denotation Spraying Process[J]. Electric Welding Machine, 2024, 54(11): 92-98.

收稿日期: 2024-09-18

作者简介: 王 鑫(1989—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事焊接及表面工程专业相关研究工作。

通讯作者: 赵军军(1974—), 男, 博士, 主要从事堆焊、表面工程、再制造工程专业相关研究工作。E-mail: zhjj@zjpaton.com。

0 引言

在中国工业技术持续进步的背景下,先进制造领域对材料性能指标的要求日益提高。热喷涂作为一种常用的表面工程技术,通过在零件表面制备涂层,能够显著提升零件表面性能并延长使用寿命,被广泛应用于航空航天、核能装备、交通运输、电工电子以及高端装备制造等领域^[1]。目前,主流的热喷涂技术包括电弧喷涂、超音速火焰喷涂、超音速等离子喷涂和爆炸喷涂等。其中,爆炸喷涂技术获得的涂层孔隙率低,结合强度高于其他热喷涂技术所获得的涂层。但由于国外一直对中国进行技术封锁和长期专利保护,且受限于爆炸喷涂技术的喷涂效率低、生产成本低,使得该技术并未在中国得到广泛推广和应用^[2]。

浙江巴顿焊接技术研究院从乌克兰国家科学院巴顿电焊所引进了高频聚能爆炸喷涂技术。高频聚能爆炸喷涂技术与普通爆炸喷涂技术相比,通过增加燃烧室的数量和提升爆炸的最大能量,以及提高爆炸频率,显著提升了喷涂效率。以碳化钨材料为例,采用高频聚能爆炸喷涂制备的涂层,孔隙率可降至1%以下,部分涂层结合强度超过100 MPa,具有广阔的应用前景。消化、吸收并推广高频聚能爆炸喷涂技术,不仅能够打破国外对中国有关爆炸喷涂的技术封锁,解决航空航天领域与爆炸喷涂相关的“卡脖子”问题,还能满足各行业对高质量涂层的迫切需求,对我国的工业技术发展有重要意义。

本研究对高频聚能爆炸喷涂的工艺参数进行研究,通过正交试验,研究了氧燃比、填枪比和送粉速度对高频聚能爆炸喷涂获得的WC-12Co涂层孔隙率和硬度的影响,并对优化的最佳工艺参数制备的WC-12Co涂层进行了结合强度测试,为后续研究并推广高频聚能爆炸喷涂技术提供依据和积累经验。

1 高频聚能爆炸喷涂设备结构及技术特点

1.1 高频聚能爆炸喷涂设备结构

高频聚能爆炸喷涂设备与普通爆炸喷涂设备

相比,最大的差异就是高频聚能爆炸喷涂有多个燃烧室,能够通过增大燃烧室的体积来获得更大的爆炸能量。为了使粉末颗粒在高频聚能爆炸喷涂设备内更好地加速,燃烧室的体积越大,设备配制的喷枪越长,高频聚能爆炸喷涂设备最常见的喷枪长度有325 mm和525 mm两种,可分别用于喷涂金属粉末和陶瓷粉末。

以浙江巴顿焊接技术研究院拥有的MCDS 16/325型高喷聚能爆炸喷涂设备为例,该设备枪管内径为16 mm,喷枪长度为325 mm,具有两个燃烧室,分别是柱形燃烧室和环形燃烧室。每个燃烧室内均会单独通入混合燃料气体,火花塞安装在与柱形燃烧室相通的预燃室上。高频聚能爆炸喷涂设备结构示意图及外形如图1所示。

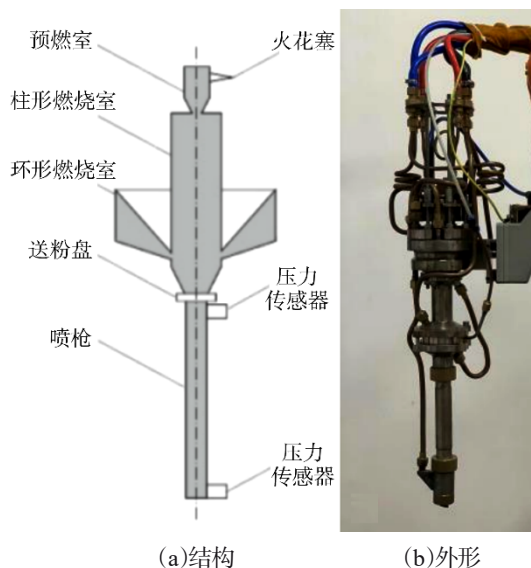


图1 高频聚能爆炸喷涂设备结构及外形^[3]

Fig. 1 High-frequency focused explosion spraying equipment structure and appearance^[3]

当设备启动后,火花塞优先点燃柱形燃烧室内的混合燃料气体,环形燃烧室内的混合燃料气体由柱形燃烧室传递过来的火焰点燃,爆炸顺序略滞后于柱形燃烧室,当环形燃烧室也发生爆炸后,其释放的爆炸能量将与柱形燃烧室的爆炸能量汇总在一起,增加总体爆炸能量,提高燃烧产物的速度和能量。

在两个燃烧室的下端,设置有环形送粉盘,粉末沿着环形送粉盘切线方向送入,在垂直于爆炸腔室的平面上以螺旋线的运动轨迹被送入爆炸枪中



心区域,在喷枪内被爆炸焰流加热和加速,形成高速粒子喷涂到工件表面,形成致密的涂层。

1.2 高频聚能爆炸喷涂设备技术特点

高频聚能爆炸喷涂技术保留有普通爆炸喷涂的全部技术特点,主要包括:基体仅在爆炸瞬间受热,喷涂过程中基体受热温升小,不会产生形状和性能的变化。能够在金属、陶瓷等多种类型的基体上进行喷涂。喷涂材料范围广,通过调整燃料气体流量和比例对输出能量进行控制,既能喷涂熔点相对较低的金属粉末,又能喷涂熔点相对较高的金属陶瓷粉末和陶瓷粉末。获得的涂层孔隙率低,结合强度高,且无明显化学成分偏析、均匀性好。

此外,高频聚能爆炸喷涂提高了爆炸的最大能量,增加爆炸频率,使喷涂效率大幅提高。目前 MCDS 16/325 型高喷聚能爆炸喷涂设备能在 20 Hz 的爆炸频率下实现稳定的喷涂,相较于爆炸频率为 2~4 Hz 的普通爆炸频率,喷涂效率增长了 5~10 倍。

2 试验材料及方法

2.1 试验材料

试验使用的基板材料为 Q235 碳素结构钢,基板尺寸为 50 mm×20 mm×6 mm。喷涂粉末为 WC-Co 合金,是一种常用的涂层材料,因其具有较高的耐磨性和耐蚀性,在航空航天、石油化工及冶金机械等行业广泛应用。粉末粒径为 20~45 μm ,经气雾化后呈球形,WC-12Co 粉末的形貌如图 2 所示,具有较好的流动性。

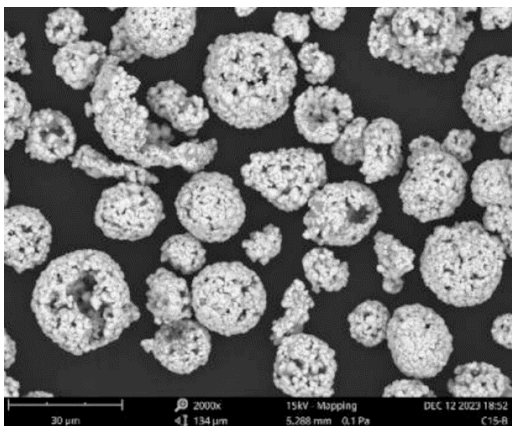


图2 WC-12Co粉末形貌

Fig. 2 Morphology of WC-12Co powder

2.2 试验方法

试验使用的设备为浙江巴顿焊接技术研究院的高频聚能爆炸喷涂设备,设备型号为 MCDS 16/325。使用丙烷作为燃料气体,氧气作为助燃气体,使用压缩空气作为粉末载气和清扫气体。

试验针对氧燃比、填枪比和送粉速度三个工艺参数进行优化。其中,填枪比是指在单次爆炸过程中,通入燃料气体的总体积与爆炸腔室体积的比值。由于爆炸腔室结构不同,不同类型的高频聚能爆炸喷涂设备对应的适宜的填枪比范围存在较大差异。

对于高频聚能爆炸喷涂技术来说,燃料气体的流量是决定爆炸能量的最主要因素。其影响规律为:在能够实现稳定爆炸的气体成分范围内,燃料气体流量越大,爆炸能量越多,粉末颗粒获得的速度也越大。为避免爆炸能量差异对试验结果的影响,本研究中所有试验均采用相同的燃料气体流量,仅通过调整氧气和空气的流量来改变氧燃比和填枪比数值。每个工艺参数选用 3 个水平,并根据三因素三水平设计正交表进行试验设计,如表 1 所示,试验中保持不变的其他工艺参数如表 2 所示。

表1 试验因素和水平

Table 1 Test factors and levels

水平	氧燃比 A(O/F)	填枪比 B	送粉速度 C($\text{g}\cdot\text{min}^{-1}$)
1	4.8	0.8	18.6
2	5.1	0.7	22.2
3	4.5	0.6	25.7

表2 试验中其他喷涂工艺参数

Table 2 Other spraying process parameters in the experiment

喷涂高度/mm	喷涂速度/($\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$)	喷涂频率/Hz
60	40	20

采用 Carl Zeiss Axio Imager M2m 型金相显微镜观察涂层组织,并使用 ImageJ 软件对涂层孔隙率进行测试。使用 Wilson VH1102 型维氏显微硬度计检测涂层硬度,试验载荷 0.3 kgf,加载时间 15 s。在每个涂层中部同一水平位置测量 10 次硬度值,去掉最高值和最低值,取剩余 8 个点的平均值作为涂层硬度的实测结果。使用 INSTRON 5982 型拉伸试验机,采用 E7 胶将试样与拉伸对偶件粘接在一起,按照 GB/T 8642—2002《热喷涂 抗拉结合强度的测定》规定,对涂层的结合强度进行检测。

3 试验结果与分析

3.1 涂层性能检测结果

根据正交试验,对氧燃比、填枪比和送粉速度对涂层孔隙率和硬度的影响因素进行研究,不同工

艺参数对应的涂层测试结果如表3所示。

3.2 各工艺参数对涂层孔隙率的影响

正交试验中各涂层的截面形貌如图3所示。根据涂层孔隙率检测结果,使用极差法对正交试验结果计算,具体计算结果如表4所示。

表3 喷涂试验工艺参数及涂层性能检测结果

Table 3 Process parameters in the experiment and the testing results of coating performance

序号	空气 ^① /(L·min ⁻¹)	丙烷 ^① /(L·min ⁻¹)	氧气 ^① /(L·min ⁻¹)	氧燃比 A (O/F)	填枪比 B	送粉速度 C /(g·min ⁻¹)	涂层孔隙率 /%	涂层硬度 /HV0.3
1	25/24	12/11	52/48	4.8	0.8	18.6	0.34	862
2	22/21	12/11	53/48	4.8	0.7	22.2	2.10	756
3	19/18	12/11	54/49	4.8	0.6	25.7	3.45	900
4	20/20	12/11	56/53	5.1	0.8	22.2	3.60	868
5	18/16	12/11	56/54	5.1	0.7	25.7	0.81	857
6	15/14	12/11	57/54	5.1	0.6	18.6	0.24	887
7	29/27	12/11	48/44	4.5	0.8	25.7	3.01	731
8	26/25	12/11	48/45	4.5	0.7	18.6	3.76	824
9	24/22	12/11	49/45	4.5	0.6	22.2	2.51	795

注:①两组数据中,前一个数据为柱形燃烧室气体流量,后一个数据为环形燃烧室气体流量。

由图3可知,在正交试验所选定的工艺条件下,利用高频聚能爆炸喷涂技术均能够获得均匀致密的WC-12Co涂层,涂层呈典型的波纹状结构,内部无裂纹与分层,与界面处呈锯齿形,结合良好。1#、5#和6#试样的涂层更加致密,孔隙率相对较低,其余试样的涂层受工艺参数影响,孔隙率略高。

正交试验中,R值越大,表示其影响程度越大。根据表4结果,三个工艺参数对涂层孔隙率的影响由大到小分别为:氧燃比A、送粉速度C、填枪比B。通过正交试验得出的最优工艺参数为A2B3C1,即氧燃比5.1,填枪比0.6,送粉速度18.6 g/min。对应正交表中的6#试样,在此工艺条件下涂层的孔隙率仅为0.24%。三组R值的计算结果均较低,说明在试验选定的燃料气体水平下,三个工艺参数对涂层的孔隙率影响均不大。氧燃比主要用来衡量燃料气体的爆炸充分程度,爆炸越充分,对应爆炸能量越大。丙烷在氧气中完全反应的化学式见式(1)



氧气与丙烷的摩尔比为5:1。当氧燃比小于5时,数值越低,爆炸越不充分。试验中设置的三个氧燃比水平分别代表了燃料气体不同的爆炸程度。当氧燃比在4.8和5.1时,丙烷充分爆炸,喷涂粒子能够获得更高的能量,可以获得孔隙率低于1%的

涂层;而氧燃比在4.5时,丙烷爆炸不充分,能量降低,获得的涂层孔隙率为2%~3%。这一结果表明,只要爆炸能量达到一定水平,高频聚能爆炸喷涂可以在一个相对宽泛的工艺窗口范围内获得孔隙率较低的涂层。

3.3 各因素对涂层硬度的影响

根据涂层硬度检测结果,使用极差法对正交试验结果计算,具体计算结果如表5所示。

根据表5的计算结果,三个工艺参数对涂层硬度的影响由大到小分别为:氧燃比A、送粉速度C和填枪比B。通过正交试验得出的最优工艺参数与孔隙率的影响结果一致,均为A2B3C1。不同因素对应的R值中,氧燃比A的R值最大,说明其对显微硬度的影响最大;填枪比B和送粉速度C的R值仅相差2,说明二者对硬度影响基本一致。

表3中的硬度测试结果要低于普通爆炸喷涂制备的WC-12Co涂层^[4-6]。WC-12Co涂层的硬度除了受到涂层致密度的影响外,还与涂层的相组成有关。当WC-12Co涂层发生脱碳,在涂层中形成硬质脆化相W₂C时,会使涂层硬度有所提高^[7-9]。试验选取的三个氧燃比水平除了5.1接近完全反应外,4.8和4.5均为不充分爆炸,对应还原性气氛,这种气氛能够有效抑制W₂C的形成,导致涂层硬度相



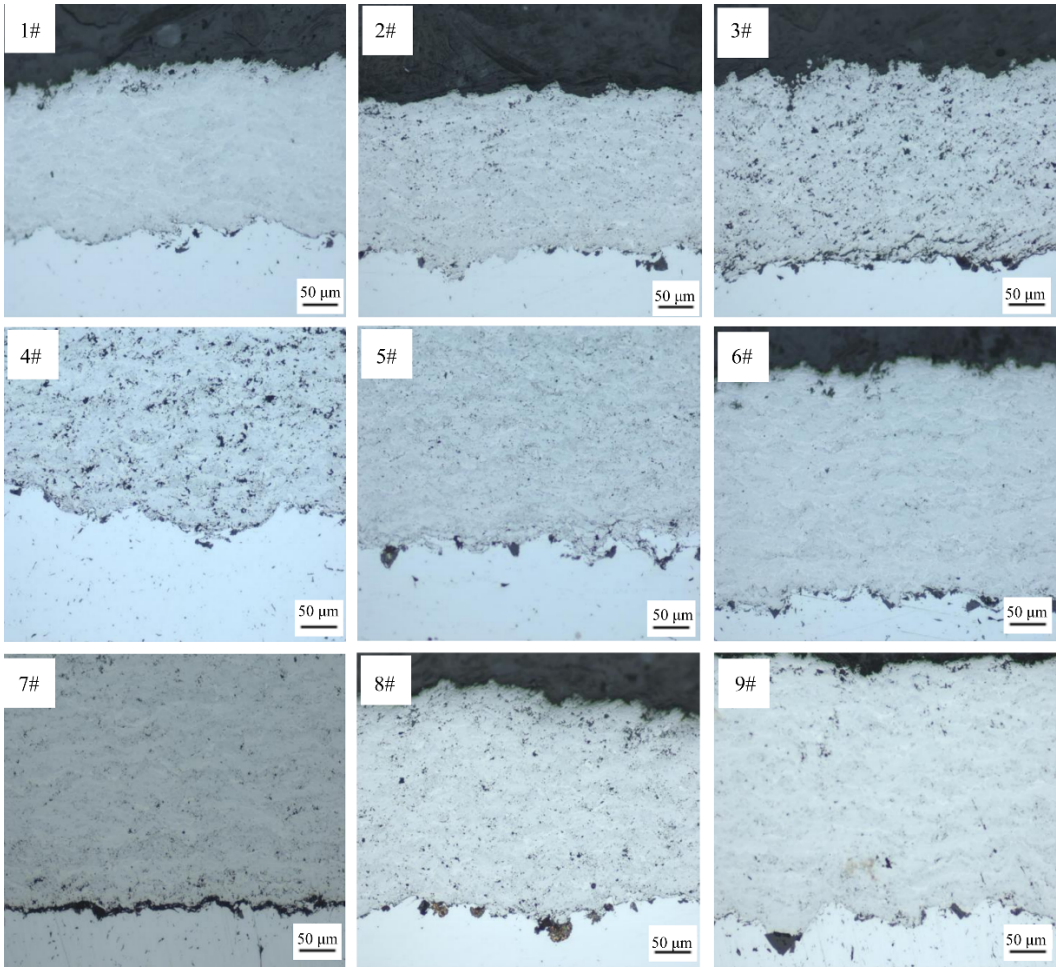


图3 不同工艺条件下WC-12Co涂层的截面形貌

Fig. 3 Section morphology of WC-12Co coatings in different process

表4 工艺参数对涂层孔隙率影响的正交试验计算结果
Table 4 Orthogonal experimental calculation results of the influence of process parameters on coating porosity

指标	氧燃比A	填枪比B	送粉速度C
K1	5.89%	6.95%	4.34%
K2	4.65%	6.67%	8.21%
K3	9.28%	6.20%	7.27%
k1	1.96%	2.32%	1.45%
k2	1.55%	2.22%	2.74%
k3	3.09%	2.07%	2.42%
R	1.54%	0.25%	1.29%
最佳工艺参数	5.1	0.6	18.6 g/min

对偏低。虽然 W_2C 能够提高涂层硬度,但作为涂层中的脆性相, W_2C 会降低涂层的耐磨性,影响涂层内聚强度,因此在制备涂层时,通常通过控制氧燃比来减小涂层的脱碳,以平衡涂层的硬度和韧性。

3.4 最优工艺参数对应的涂层结合强度

使用正交试验所得的最佳喷涂参数,制备了三

表5 工艺参数对涂层硬度影响的正交试验计算结果
Table 5 Orthogonal experimental calculation results of the influence of process parameters on coating hardness

指标	氧燃比A	填枪比B	送粉速度C
K1	2 518	2 461	2 573
K2	2 612	2 437	2 419
K3	2 350	2 582	2 488
k1	839	820	858
k2	871	812	806
k3	783	861	829
R	88	49	51
最佳工艺参数	5.1	0.6	18.6 g/min

组涂层结合强度试样。拉伸试验的结果见表6,结合强度测试曲线见图4。

三组结合强度试样的测试结果均高于 70 MPa,最高强度达到 76.3 MPa。由于试样断裂位置均为胶层,且涂层在该强度下未产生剥离、开裂和脱落,具体形貌如图5所示。浙江巴顿焊接研究所对E7

表 6 最佳工艺参数对应的涂层结合强度

Table 6 Bonding strength of the coating corresponding to the optimal process parameters

试样编号	结合强度/MPa	断裂位置
1	71.6	胶层
2	70.8	胶层
3	76.3	胶层

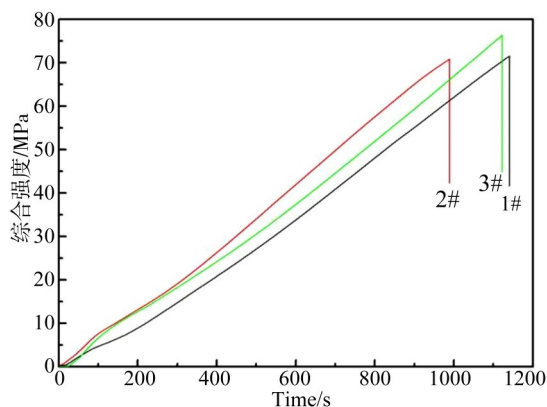


图 4 结合强度测试曲线

Fig. 4 Curve of the binding strength test

胶的成分和粘接工艺进行了改进,其固化后的抗拉强度上限从 50 MPa 提高到 70 MPa 以上。因此,当高频聚能爆炸喷涂制备的 WC-12Co 涂层的结合强度超过了改进后 E7 胶固化后的抗拉强度时,在涂层结合强度测试中,断裂会首先发生在胶层位置,导致无法准确测量涂层的实际结合强度,仅能根据结合强度试样断裂位置和断口形貌判定涂层结合强度要高于实际测试结果。

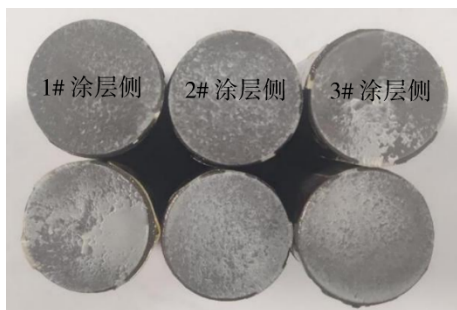


图 5 结合强度试样

Fig. 5 The bonding strength specimen

对于 WC-12Co 涂层,其结合强度超过 70 MPa,已超过了电弧喷涂、火焰喷涂和等离子喷涂等传统工艺制备涂层的结合强度,能够满足绝大多数工况对涂层结合强度的要求,具有非常广阔的工程应用价值^[10-11]。

4 结论

针对高频聚能爆炸喷涂技术制备 WC-12Co 耐磨涂层进行了工艺参数优化研究,主要结论如下:

(1)在燃料气体流量固定的条件下,各工艺参数对涂层孔隙率和涂层硬度的影响是一致的,影响程度由大到小分别为:氧燃比、送粉速度、填枪比。

(2)通过正交试验,获得的最佳工艺参数为氧燃比 5.1,送粉速度 18.6 g/min,填枪比 0.6。该参数下制备的涂层孔隙率仅为 0.24%,显微硬度 887 HV0.3。

(3)最佳工艺参数制备的 WC-12Co 涂层结合强度超过 76.3 MPa,超过了 E7 胶的粘接强度上限,表明涂层与基材的结合强度良好。

参考文献:

- [1] 李继锋,裴和中,王胜民,等.热喷涂技术制备耐液锌腐蚀涂层研究现状[J].热加工工艺,2015,44(14): 51-54.
LI J F, PEI H Z, WANG S M, et al. Research Status on Preparation of Molten Zinc Anticorrosion Coating by Thermal Spraying Technology [J]. Hot Working Technology, 2015, 44(14): 51-54.
- [2] 王超,王丽莲,姜卓.爆炸喷涂工艺研究进展[J].热处理,2015,30(2):9-13.
WANG C, WANG L L, JIANG Z. Progress of Research on Detonation Gun Spraying [J]. Heat Treatment, 2015, 30(2):9-13.
- [3] Kakimzhanov D, Rakhadilov B, Sulyubayeva L, et al. Influence of Pulse-Plasma Treatment Distance on Structure and Properties of Cr3C2-NiCr-Based Detonation Coatings[J]. Coatings, 2023, 13(11): 1824.
- [4] 李金宇,王全胜,张博康,等.爆炸喷涂 WC-14Co 涂层工艺优化[J].热喷涂技术,2017,9(4): 24-30.
LI J Y, WANG Q S, ZHANG B K, et al. Process Optimization of WC-14Co Coating by Detonation Spraying [J]. Thermal Spray Technology, 2017, 9(4): 24-30.
- [5] 王铁钢,宋丙红,华伟刚,等.工艺参数对爆炸喷涂 WC-Co 涂层性能均匀性的影响[J].金属学报,2011, 47(1):115-122.
WANG T G, SONG B H, HUA W G, et al. Influence of process parameters on the performance uniformity of detonation gun sprayed WC-Co coatings[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2011, 47(1): 115-122.
- [6] Kovaleva M, Tyurin Y, Vasilik N, et al. Effect of pro-



cessing parameters on the microstructure and properties of WC-10Co-4Cr coatings formed by a new multi-chamber gas-dynamic accelerator [J]. *Ceramics International*, 2015, 41(10): 15067-15074.

- [7] 赵立英, 刘平安. 氧燃比对爆炸喷涂碳化钨涂层结构和性能的影响[J]. *材料工程*, 2016, 44(06): 50-55.

ZHAO L Y, LIU P A. Effects of Oxygen-fuel Ratio on Structure and Property of Detonation Gun Sprayed WC Coating [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2016, 44(06): 50-55.

- [8] 殷亚康, 孙耀宁. 等离子喷涂陶瓷涂层的应用[J]. *电焊机*, 2015, 45(02): 132-136.

YIN Y K, SUN Y N. Application of plasma spraying for ceramic coating [J]. *Electric Welding Machine*, 2015, 45(02): 132-136.

- [9] 李学娇, 张骋, 张娜. 热障涂层研究进展[J]. *中国陶瓷*, 2013, 49(03): 1-4+12.

LI X J, ZHANG C, ZHANG N. Research development of thermal barrier coatings [J]. *China Ceramics*, 2013,

49(03): 1-4+12.

- [10] 田浩亮, 王长亮, 郭孟秋, 等. 爆炸喷涂 WC-12Co 自润滑耐磨涂层工艺及性能研究[J]. *稀有金属材料与工程*, 2020, 49(03): 1058-1067.

TIAN H L, WANG C L, GUO M Q, et al. Technology and Properties of WC-12Co Self-lubricating Wear-resistant Coating by Explosive Spraying [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2020, 49(03): 1058-1067.

- [11] 张锤, 柏洪武, 王群, 等. 氧燃比对爆炸喷涂 WC-17Co 涂层组织和性能的影响[J]. *热加工工艺*, 2013, 42(04): 145-148.

ZHANG C, BAI H W, WANG Q, et al. Effect of Ratio of Oxygen and Fuel on Microstructure Performance of WC-17Co Coating Deposition with Denotation Gun Spray process [J]. *Hot Working Technology*, 2013, 42(04): 145-148.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>

☞ 上接第 57 页

基双层涂层组织和残余应力的影响[J]. *中国机械工程*, 2022, 33(12): 1418-1427.

ZHOU J L, CHENG Y H, CHEN Y X, et al. Effects of Laser Cladding Process Parameters on Microstructure and Residual Stresses of Fe-based Double Layer Coatings [J]. *China Mechanical Engineering*, 2022, 33(12): 1418-1427.

- [17] 潘艳飞, 王琳, 许健, 等. 激光-电弧复合增材制造 Ti-6Al-4V 合金热处理组织及力学性能研究[J]. *电焊机*, 2024, 54(10): 1-9.

PAN Y F, WANG L, XU J, et al. Research on the Heat Treatment Microstructure and Mechanical Properties of Ti-6Al-4 Alloy Fabricated by Laser Arc Composite Additive Manufacturing [J]. *Electric Welding Machine*, 2024, 54(10): 1-9.

- [18] 杨瑞琛, 王进, 高波, 等. 转速对铝铜异种金属薄板搅拌摩擦焊接头组织与性能的影响[J]. *电焊机*, 2024, 54(7): 83-92.

YANG R C, WANG J, GAO B, et al. Effect of Rotation Speed on Microstructure and Properties of Friction Stir Welded Joint of Aluminum/Copper Dissimilar Metal Sheet [J]. *Electric Welding Machine*, 2024, 54(7): 83-92.

- [19] 阴明, 郭枝梁, 庞雅琪, 等. 激光熔覆铁铬梯度涂层界面调控与性能研究[J]. *电焊机*, 2024, 54(7): 20-25.

YIN M, GUO Z L, PANG Y Q, et al. Laser Cladding of Iron-Chromium Gradient Coatings: Interface Regulation and Performance Improvement [J]. *Electric Welding Machine*, 2024, 54(7): 20-25.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>

