

基于正交试验的圆柱电极参数对电火花沉积质量影响分析

王顺, 韩红彪, 李世康, 李梦楠

(河南科技大学, 洛阳, 471003)

摘要: 在圆柱电极与基体线接触情况下, 设计并进行了电火花沉积正交试验, 分析了电极直径、电极厚度和电极转速对质量转移效率、沉积效率和沉积层表面粗糙度的影响, 并优化了圆柱电极参数。结果表明, 在一定试验条件下, 采用圆柱电极能够获得较均匀致密的沉积层, 随着电极直径与电极转速的增大, 间隙放电数量增加, 火花和飞溅增多, 沉积层表面粗糙度增加, 质量转移效率和沉积效率减小; 随着电极厚度的增大, 短路放电次数增多, 空载数量减少, 质量转移效率和沉积效率增大。影响沉积层质量转移效率和沉积效率的主次因素按由大到小的顺序为电极直径、电极转速、电极厚度; 影响沉积层表面粗糙度的主次因素按由大到小的顺序为电极厚度、电极转速、电极直径。优化圆柱电极参数下获得的质量转移效率为 82.48%, 沉积效率为 0.336 mg/s, 表面粗糙度为 0.072 mm, 沉积层内部未出现裂纹和孔隙等缺陷, 且与基体呈良好的冶金结合。

创新点: 发现圆柱电极的直径、厚度和转速对质量转移效率、沉积效率和沉积层表面粗糙度的影响规律, 分析了圆柱电极线接触形式下的放电和沉积机理, 获得了优化的圆柱电极参数。

关键词: 电火花沉积; 圆柱电极; 线接触; 质量转移效率; 沉积效率

中图分类号: TG 456.9 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.20210131002

0 序言

现代工业的迅速发展对工件表面的耐磨性、耐蚀性、耐高温性等提出了更高要求, 而电火花沉积堆焊技术因其优异的表面强化及修复功效, 已成为表面工程及再制造工程领域中的一项重要技术。

近年来, 国内外学者在电火花沉积涂层性能方面研究较多。其中, Kuptsov 等人^[1]通过用脉冲电弧蒸发与电火花沉积相结合的方式, 发现制备的纳米复合 WC/a-C 涂层具有良好的力学性能。Hong 等人^[2]采用电火花沉积方式, 在钛合金表面制备了 TiN/Zr 基非晶-纳米晶体复合涂层, 发现该涂层具有良好的耐磨性。通过研究放电电压、氮气流量和比强化时间对电火花沉积 TiN 涂层的影响, 发现放电电压和氮通量对涂层厚度、摩擦系数和磨损量等

评价指标有显著影响^[3]。Yu 等人^[4]采用电火花沉积技术在 Cr12MoV 钢表面制备 Zr/WC 复合涂层。结果表明, 制备的涂层连续均匀, 且涂层表面显微硬度明显高于基体显微硬度。王建升等人^[5]在铸钢材料上电沉积 WC-4Co 陶瓷硬质合金, 研究发现制备出的微纳米非晶强化层具有高的熔点。王彦芳等人^[6-7]利用电火花沉积技术在 ZL101 铝合金表面制备锆基合金涂层以及在 45Mn2 钢表面制备 FeCoCrNiCu 高熵合金涂层, 研究发现制备的两种涂层表面都较致密均匀, 且具有良好的耐磨性和耐蚀性。黄奇胜等人^[8]和魏祥等人^[9]采用电火花沉积的方式制备了 Mo₂FeB₂ 基金属陶瓷涂层及 Fe-8B-Mo 非晶涂层。结果表明, 制备的涂层组织结构致密且缺陷少。Mazarbhuiya 等人^[10]研究不同加压载荷、峰值电流、脉冲时间对铝表面电火花沉积 WC 涂层的影响, 研究发现脉冲时间是综合影响材料质量转移效率、电极磨损率和表面粗糙度最大的工艺参数, 其次是峰值电流和加压载荷。

影响沉积层质量的工艺参数很多, 相较于其它学者对电火花沉积电源参数(电压、电流、电容、频

收稿日期: 2021-01-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51375146); 国家智能制造综合标准化项目(2018ZNZX01-02); 河南省高等学校重点科研项目(17A460012)。

率、气体流量、比沉积时间等)的研究^[11-12], 文中主要针对圆柱电极参数对电火花沉积质量的影响进行研究。在电火花自动沉积过程中, 圆锥状电极在接触线上由于直径不同而造成沉积层厚度不均匀的问题^[13], 而圆柱状电极能够弥补这个问题。文中通过改变圆柱电极的直径、厚度及转速, 发现不同因素对电火花沉积层质量的影响, 探索接触线形式下电火花沉积的放电机理。

1 试验方法

试验设备采用 9188H3 型电火花沉积电源, 电火花沉积电源的输出正极与旋转焊枪相接, 负极与基体试样相接。圆柱电极相对基体试样线接触形式下的电火花沉积示意如图 1 所示, 圆柱电极装夹在旋转焊枪上, 焊枪以一定的转速带动圆柱电极与工件进行线接触沉积试验。基体试样相对焊枪的运动轨迹如图 2 所示, 焊枪由 A 点沿轨迹移动到 B 点后, 再沿原轨迹返回到 A 点, 如此循环往复。沉积面积为 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$, 电极相对基体的移动速度为 1 mm/s , 焊道间隔为 0.5 mm 。

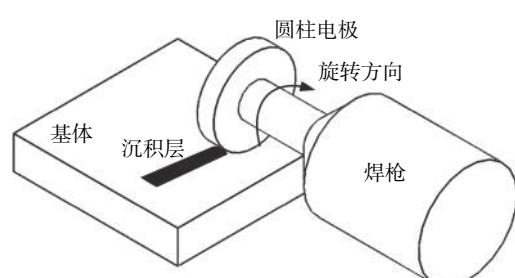


图 1 圆柱电极线接触沉积示意图

Fig. 1 Schematic diagram of cylindrical electrode line contact deposition

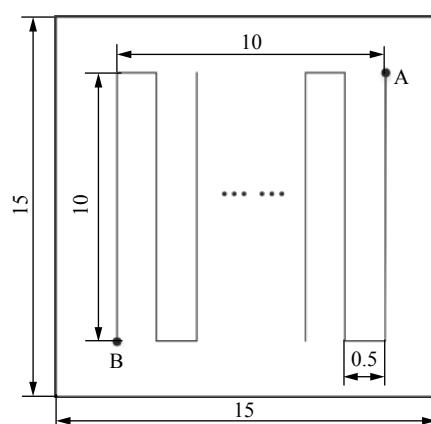


图 2 电火花沉积路径轨迹 (mm)

Fig. 2 Electro spark deposition path trajectory

文中选择电极直径、电极厚度、电极转速作为试验影响的 3 个因素, 以质量转移效率、沉积效率和表面粗糙度作为评价指标来设计正交试验, 不考虑因素之间的交互作用, 正交试验因素和水平如表 1 所示。

表 1 因素水平表
Table 1 Table of factors and levels

试验编号	电极直径 d/mm	电极厚度 δ/mm	电极转速 $n/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$
	A	B	C
1	10	1	1 000
2	10	2	1 200
3	10	3	1 400
4	20	1	1 200
5	20	2	1 400
6	20	3	1 000
7	30	1	1 400
8	30	2	1 000
9	30	3	1 200

沉积试验的工艺参数如表 2 所示, 圆柱电极与基体试样均选用 45 钢, 基体试样尺寸为 $15 \text{ mm} \times 15 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 。试验在室温下进行, 使用氩气作为保护气体。试验前分别对电极端部与基体试样表面依次用 400 号、800 号、1000 号砂纸进行打磨, 然后使用丙酮清洗电极端部与基体试样表面进行除油去污。

表 2 沉积试验的工艺参数
Table 2 Specification parameters of deposition test

脉冲电压 U/V	脉冲频率 f/Hz	脉冲宽度 $t_p/\mu\text{s}$	沉积时间 t/s	氩气流量 $Q/(\text{L}\cdot\text{min}^{-1})$
26	70	378	210	10

试验前后使用 Mettler Toledo AL104 型精密电子天平记录电极试样及基体试样的重量, 每次试验均进行 3 次, 分别计算出不同因素水平下质量转移效率 K 和沉积效率 η 的平均值进行对比分析。试验后使用 0918 型粗糙度仪测量沉积层的表面粗糙度 R_a , 以及采用 SRL-7045 型双目连续变倍体式显微镜观察沉积层的表面形貌及沉积层截面厚度。

2 试验结果及分析

2.1 正交试验结果及分析

正交试验获得的质量转移效率、沉积效率和表

面粗糙度结果如表3所示,为了进一步分析电极直径、电极厚度和电极转速对质量转移效率、沉积效率和表面粗糙度影响的主次关系,对正交试验获得的结果进行极差分析,极差分析的结果如表4所示。其中 K_{ij} 表示为 j 因素*i*水平($i,j=1,2,3$)对应试验结果和的算术平均值, R_j 为 j 因素对应试验结果的极差,极差 R_j 越大表示该因素的水平波动对试验结果影响越显著。根据表4正交试验的极差分析

结果知,电极直径是影响质量转移效率和沉积效率的主要因素,其次是电极转速,电极厚度对其影响最小,即影响主次关系按由大到小的顺序为电极直径-电极转速-电极厚度。而电极厚度是影响沉积层表面粗糙度的主要因素,电极直径对沉积层的表面粗糙度影响最小,这刚好与影响质量转移效率和沉积效率的主次因素相反,即影响表面粗糙度的主次关系依次为电极厚度-电极转速-电极直径。

表3 正交试验结果
Table 3 Results of orthogonal test

试验编号	因素			评价指标		
	电极直径 d/mm	电极厚度 δ/mm	电极转速 $n/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	质量转移效率 $K/(\%)$	沉积效率 $\eta/(\text{mg}\cdot\text{s}^{-1})$	表面粗糙度 R_a/mm
1	10	1	1 000	78.75	0.223	0.145
2	10	2	1 200	81.24	0.218	0.131
3	10	3	1 400	74.75	0.285	0.186
4	20	1	1 200	66.36	0.356	0.214
5	20	2	1 400	65.07	0.307	0.148
6	20	3	1 000	73.47	0.363	0.181
7	30	1	1 400	47.49	0.198	0.245
8	30	2	1 000	63.93	0.399	0.080
9	30	3	1 200	52.37	0.198	0.175

表4 正交试验极差分析结果
Table 4 Range analysis results of orthogonal test

极差	质量转移效率 $K/(\%)$			沉积效率 $\eta/(\text{mg}\cdot\text{s}^{-1})$			表面粗糙度 R_a/mm		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
\bar{K}_{1j}	78.247	64.200	72.050	0.242	0.259	0.328	0.154	0.201	0.135
\bar{K}_{2j}	68.300	70.080	66.657	0.342	0.308	0.257	0.181	0.120	0.173
\bar{K}_{3j}	54.597	66.863	62.437	62.437	0.265	0.263	0.167	0.181	0.193
R_j	23.650	5.880	9.613	0.100	0.049	0.071	0.027	0.081	0.058
优水平	A ₁	B ₂	C ₁	A ₂	B ₂	C ₁	A ₁	B ₂	C ₁
主次关系	A > C > B			A > C > B			B > C > A		

综合分析电极条件对电火花沉积堆焊质量转移效率、沉积效率和表面粗糙度的影响,发现质量转移效率和表面粗糙度的优水平相同,而与沉积效率的优水平相比,发现只在电极直径的选取水平上不同。为了获得表面粗糙度较好,质量转移效率和沉积效率较高的沉积层,选取电极条件为电极直径10 mm、电极厚度2 mm、电极转速1 000 r/min为影响电火花沉积层质量和效率的最佳电极参数。

通过试验验证发现,正交试验得到的最优组合水平下的质量转移效率为82.48%、沉积效率为0.336 mg/s、表面粗糙度为0.072 mm,均优于其它水平下的质量转移效率和表面粗糙度。

2.2 沉积层表面形貌和截面形貌

沉积210 s后,不同因素水平下的沉积层表面形貌如图3所示。沉积层均是由许多沉积点堆积、重叠形成,沉积层表面有许多溅射状的弧坑,如图3b、

图 3c、图 3e 和图 3f 所示。由图 3a、图 3d 和图 3g 可以看出, 随着电极直径和转速的增大, 沉积点增多而弧坑变小, 沉积层表面呈高低不平的山丘状, 在沉积过程中电火花和飞溅现象明显。由图 3g、图 3h 和图 3i 可以看出, 随着电极厚度的不断增大, 溅射

状弧坑变少, 沉积层表面由有规律的波纹状转变为比较均匀的橘子皮褶皱状, 在沉积过程中电火花和飞溅现象减弱。

沉积 210 s 后, 优化圆柱电极参数后的沉积层表面形貌和截面形貌如图 4 所示。从图 4a 可以看

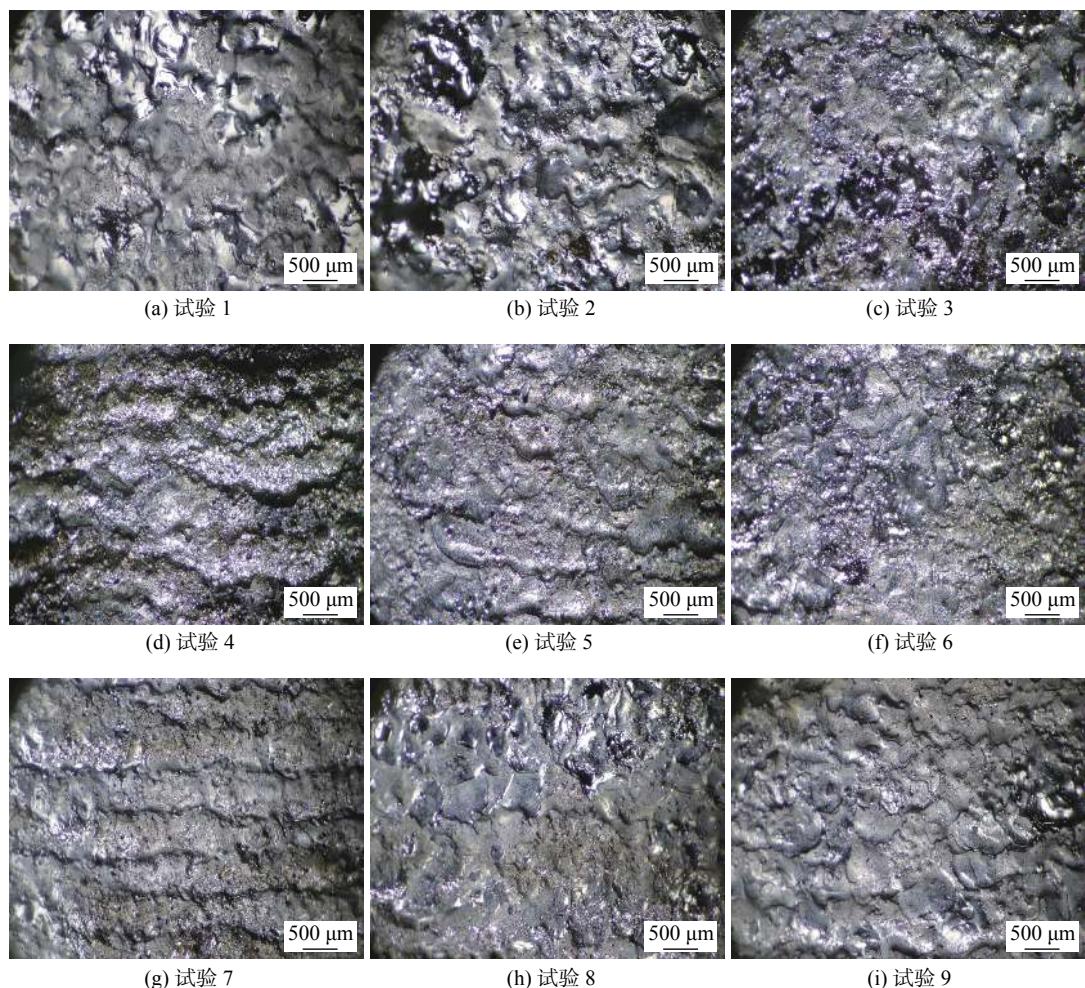


图 3 不同因素和水平下的沉积层表面形貌

Fig. 3 Surface morphology of the deposition layer under different factors and levels. (a) test 1; (b) test 2; (c) test 3; (d) test 4; (e) test 5; (f) test 6; (g) test 7; (h) test 8; (i) test 9

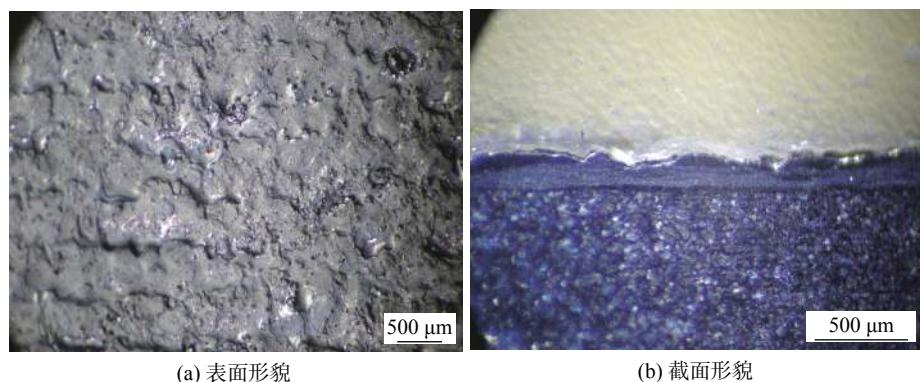


图 4 优化电极参数下的沉积层表面及截面形貌

Fig. 4 Surface and cross-sectional morphology of the deposited layer under optimized electrode parameters. (a) surface morphology; (b) cross-sectional morphology

出,沉积层表面平整且弧坑较少;从图4b可以发现,沉积层截面的平均厚度约为142 μm,沉积层未出现裂纹和孔隙等缺陷,且与基体试样呈良好的冶金结合,说明采用优化参数后的圆柱电极能够制备出形貌较好并具有一定厚度的沉积层。

3 电极参数对沉积质量和效率的影响

3.1 电极直径对沉积层质量和效率的影响

图5为电极直径对质量转移效率、沉积效率和表面粗糙度的影响。从图5可以发现,随着电极直径的增大,质量转移效率曲线呈不断下降趋势,沉积效率曲线呈先上升后下降变化趋势,表面粗糙度曲线呈先上升变化后趋于稳定。当电极直径为10 mm时,质量转移效率取得最大值为78.25%,沉积层表面粗糙度取得最小值为0.154 mm。沉积效率在电极直径为20 mm时取得最大值为0.342 mg/s。

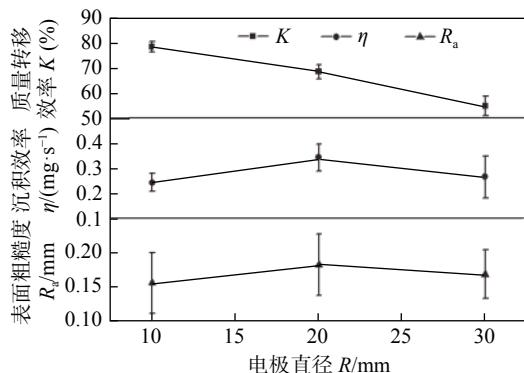


图5 电极直径对质量转移效率、沉积效率和表面粗糙度的影响

Fig. 5 Influence of electrode diameter on mass transfer efficiency, deposition efficiency and surface roughness

3.2 电极厚度对沉积层质量和效率的影响

图6为电极厚度对质量转移效率、沉积效率和表面粗糙度的影响。从图6可以发现,随着电极厚度的增大,质量转移效率和沉积效率曲线呈先上升后趋于稳定变化,表面粗糙度曲线呈先下降后上升变化。当电极厚度为2 mm时,质量转移效率和沉积效率取得最大值,分别为70.08%和0.308 mg/s,沉积层表面粗糙度取得最小值为0.120 mm。

3.3 电极转速对沉积层质量和效率的影响

图7为电极转速对质量转移效率、沉积效率和表面粗糙度的影响。从图7可以发现,随着电极转速的增大,质量转移效率曲线呈不断下降变化趋势,沉积效率曲线总体上呈下降变化,表面粗糙度

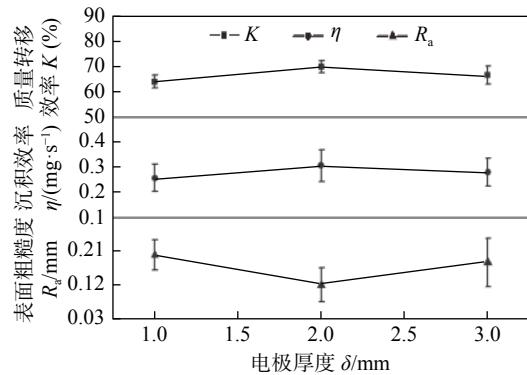


图6 电极厚度对质量转移效率、沉积效率和表面粗糙度的影响

Fig. 6 Influence of electrode thickness on mass transfer efficiency, deposition efficiency and surface roughness

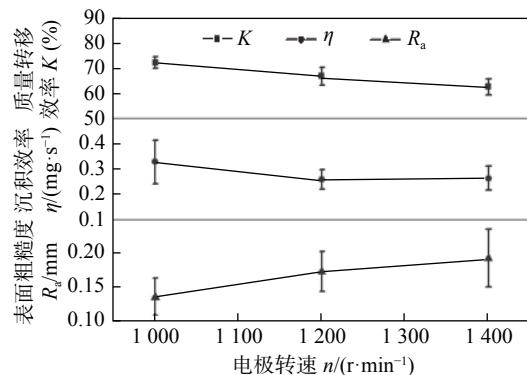


图7 电极转速对质量转移效率、沉积效率和表面粗糙度的影响

Fig. 7 Influence of electrode rotation speed on mass transfer efficiency, deposition efficiency and surface roughness

曲线呈不断上升变化趋势。质量转移效率和沉积效率在电极转速为1 000 r/min时取得最大值,分别为72.05%和0.328 mg/s,沉积层表面粗糙度在电极转速为1 000 r/min时取得最小值为0.135 mm。

4 圆柱电极线接触形式下的机理分析

根据文献[13]的研究可以发现,采用圆锥状电极进行电火花连续自动沉积试验,电极作水平匀速移动时(图8),由于电极与基体接触线上各点的回转半径R不同,造成接触线上不同电极位置相对基体运动的线速度不同,进而导致电火花放电状态和材料转移过渡形式的不同。电极回转一周时,电极接触线上各点与基体的接触长度不同,引起极间的放电次数不同,导致接触线上不同位置的材料转移过渡质量的不同,使得自动沉积获得的沉积层厚度

不均匀,沉积层形貌主要呈斜坡状,回转半径较大处的沉积层厚度较大,而回转半径较小处的沉积层厚度较小。

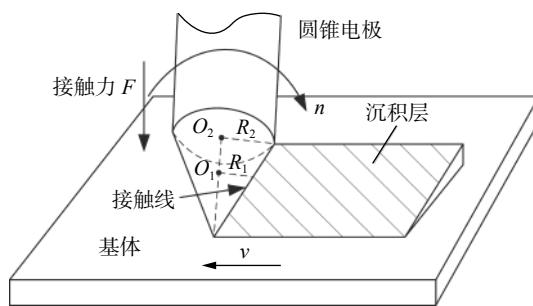


图 8 圆锥电极相对基体试样运动接触状态示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the movement and contact state of the cone electrode relative to the substrate sample

采用圆柱电极进行电火花连续自动沉积试验时(图 9),电极与基体接触线上各点的回转半径 R 相同,接触线上电极各点相对基体运动的线速度相同,电火花放电状态和材料过渡形式相似。圆柱电极回转一周时在接触线上各点与基体的接触长度相同,引起极间的放电次数大致相同,接触线上不同位置的材料转移过渡质量相近。所以,在电火花自动沉积过程中,相对于圆锥状电极,圆柱电极可获得厚度相对均匀的沉积层。

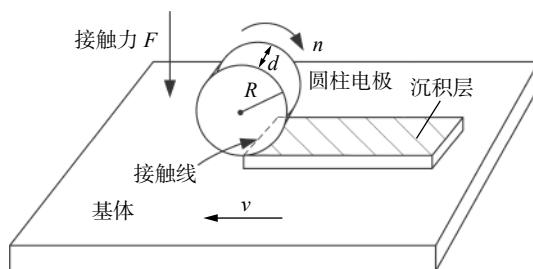


图 9 圆柱电极相对基体试样运动接触状态示意图

Fig. 9 Schematic diagram of the movement and contact state of the cylindrical electrode relative to the substrate sample

在实际应用时,圆柱电极的回转轴与工件表面平行,容易造成旋转焊枪与工件的干涉,没有圆锥状电极操作方便。也可将圆柱电极的回转轴与工件呈一定较小角度进行沉积,电极呈圆锥台状(近似圆柱状)。

根据文献 [12] 和 [14] 的研究,分析了圆柱电极线接触形式下的连续放电电压和电流波形,发现共有 6 种放电波形,分别为短路放电、间隙放电、空载、接触放电(短路+间隙)、空载+间隙、空载+短路+间隙(空载+接触放电)。

对不同因素水平下每组试验采集的 84 个放电波形进行统计与分析,各种放电波形的数量如表 5 所示。结合圆柱电极参数对沉积层质量和效率的影响分析,发现随着电极直径 R 和电极转速 n 的增大,电极线速度增加,间隙放电数量增加,放电间隙增大,火花和飞溅增多。

表 5 放电波形类型数量统计表

Table 5 Statistics table of the number of discharge waveform types

试验 编号	短路 $N_1(\text{个})$	间隙 $N_2(\text{个})$	空载 $N_3(\text{个})$	接触放电 $N_4(\text{个})$	空载+间隙 $N_5(\text{个})$	空载+短路+ 间隙 $N_6(\text{个})$
1	1	9	32	23	15	4
2	6	10	39	14	5	0
3	14	13	22	21	13	1
4	2	6	23	25	23	5
5	3	6	26	27	21	1
6	10	12	21	23	15	3
7	0	7	33	15	27	2
8	1	16	26	22	18	1
9	11	12	28	15	18	0

电极转速一定时,随着电极直径 R 的增加,单位时间内圆柱电极与基体试样的接触线变长,电极与基体间的振动增加,间隙放电和空载数量增多,接触放电减少,对质量转移效率和沉积效率影响较大。电极直径一定时,随着电极转速增加,接触线上各点的线速度增加,电极与基体间的振动较小,间隙放电和接触放电数量增多,空载数量减少,对质量转移效率和沉积效率影响次之。随着电极厚度 δ 增加,由于焊道间隔一定,焊道搭接面积增加,接触线上的接触点增多,短路放电增多,空载数量减少,由于电极与基体之间在微观上呈微凸峰接触,使得沉积层上的低凹点无法产生接触放电,进而造成沉积层的表面粗糙度较大,表面形貌较差。因此圆柱电极的直径、厚度和转速存在一个较佳值,可获得良好的沉积层表面质量及较好的沉积率。在该试验条件下,选取电极直径 10 mm、电极厚度 2 mm、电极转速 1 000 r/min 能够获得较高的表面质量、质量转移效率和沉积效率。

5 结论

(1) 随着电极直径和电极转速的增大,间隙放

电数量增加,放电间隙增大,火花和飞溅增多,沉积层表面粗糙度增大,质量转移效率和沉积效率减小;随着电极厚度的增大,短路放电增多,空载数量减少,质量转移效率和沉积效率增大。

(2) 影响质量转移效率和沉积效率的主次因素分别是电极直径、电极转速、电极厚度;影响表面粗糙度的主次因素分别是电极厚度、电极转速、电极直径。

(3) 在一定试验条件下,优化圆柱电极参数下获得的质量转移效率和表面粗糙度较好;获得的沉积层未出现裂纹和孔隙等缺陷,与基体试样呈良好的冶金结合。

参考文献

- [1] Kuptsov K A, Sheveyko A N, Zamulaeva E I, et al. Two-layer nanocomposite WC/a-C coatings produced by a combination of pulsed arc evaporation and electro-spark deposition in vacuum[J]. Materials & Design, 2019, 167: 107645.
- [2] Hong X, Tan Y, Wang X, et al. Microstructure and wear resistant performance of TiN/Zr-base amorphous-nanocrystalline composite coatings on titanium alloy by electrosparck deposition[J]. Surface & Coatings Technology, 2016, 305: 67 – 75.
- [3] Hong X, Feng K, Tan Y F, et al. Effects of process parameters on microstructure and wear resistance of TiN coatings deposited on TC11 titanium alloy by electrosparck deposition[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2017, 27(8): 1767 – 1776.
- [4] Yu H, Long W M, Zhong S J, et al. Wear resistance of Zr/WC composite coatings on Cr12MoV steel surface by electric spark deposition[J]. China Welding, 2019, 28(1): 35 – 41.
- [5] 王建升, 张占哲, 闫镇威, 等. 电火花沉积 WC-4Co 复合层界面行为 [J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(11): 2849 – 2855.
Wang Jiansheng, Zhang Zhanzhe, Yan Zhenwei, et al. Interface behavior of WC-4Co coating by electro-spark deposition[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 24(11): 2849 – 2855.
- [6] 王彦芳, 闫晗, 李娟, 等. 电火花沉积 FeCoCrNiCu 高熵合金涂层的组织结构与耐蚀性 [J]. 表面技术, 2019, 48(6): 144 – 149.
Wang Yanfang, Yan Han, Li Juan, et al. Microstructure and corrosion resistance of FeCoCrNiCu high-entropy alloy coating prepared by electro-spark deposition[J]. Surface Technology, 2019, 48(6): 144 – 149.
- [7] 王彦芳, 司爽爽, 宋增金, 等. 电火花沉积非晶涂层的组织结构与摩擦磨损性能 [J]. 焊接学报, 2018, 39(7): 121 – 124.
Wang Yanfang, Si Shuangshuang, Song Zengjin, et al. Microstructure and tribology behaviors of Zr-based amorphous coating on ZL101 by electro-spark deposition[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(7): 121 – 124.
- [8] 黄奇胜, 陈志国, 魏祥, 等. 脉冲能量对电火花沉积 Mo₂FeB₂ 基金属陶瓷涂层组织与性能的影响 [J]. 中国表面工程, 2017, 30(3): 89 – 96.
Huang Qisheng, Chen Zhiguo, Wei Xiang, et al. Effects of pulse energy on microstructure and properties of Mo₂FeB₂-based cermet coatings prepared by electro-spark deposition[J]. China Surface Engineering, 2017, 30(3): 89 – 96.
- [9] 魏祥, 陈志国, 钟掘, 等. 电火花沉积制备 Fe-8B-Mo 非晶涂层的可行性 [J]. 中国表面工程, 2016, 29(5): 16 – 23.
Wei Xiang, Chen Zhiguo, Zhong Jue, et al. Feasibility on preparation of Fe-8B-Mo amorphous coatings by electro-spark deposition[J]. China Surface Engineering, 2016, 29(5): 16 – 23.
- [10] Mazarbhuiya R M, Maneswar R. Surface modification of alaluminium and its parametric optimization using grey relational analysis[J]. Materials Today Proceedings, 2020, 26(2): 1594 – 1597.
- [11] Kudryashov A E, Potanin A Y, Lebedev D N, et al. Structure and properties of Cr-Al-Si-B coatings produced by pulsed electrosparck deposition on a nickel alloy[J]. Surface and Coatings Technology, 2016, 285: 278 – 288.
- [12] 韩红彪, 郭敬迪, 焦文清. 旋转电极电火花沉积/堆焊的放电机理 [J]. 焊接学报, 2019, 40(5): 67 – 72.
Han Hongbiao, Guo Jingdi, Jiao Wenqing. Discharge mechanism of electro-spark deposition with rotary electrode[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(5): 67 – 72.
- [13] 王顺, 童金钟, 韩红彪. 一种电火花沉积接触力自动控制装置和沉积试验 [J]. 焊接学报, 2021, 42(3): 42 – 47.
Wang Shun, Tong Jinzhong, Han Hongbiao. An automatic control device of contact force for electric spark deposition and deposition test[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2021, 42(3): 42 – 47.
- [14] 陈俊潮, 韩红彪, 王中豪, 等. 不同电极运动形式下电火花堆焊的放电机理分析 [J]. 表面技术, 2021, 50(6): 281 – 287.
Chen Junchao, Han Hongbiao, Wang Zhonghao, et al. Analysis of discharge mechanism of electric spark overlaying in different modes of electrode movement[J]. Surface Technology, 2021, 50(6): 281 – 287.

第一作者: 王顺, 硕士; 主要从事电火花沉积堆焊及表面工程的研究工作; Email: 18437962901@163.com.

通信作者: 韩红彪, 教授, 博士研究生导师; Email: lyhhb7157@163.com.