

提高发动机气缸电喷镀沉积速度的工艺优化

王颖¹, 康敏^{1,2*}, 陈超¹, 杨勇¹, 傅秀清¹

(1. 南京农业大学工学院, 南京 210031; 2. 江苏省智能化农业装备重点实验室, 南京 210031)

摘要: 为提高镀层沉积速度, 该文对电喷镀气缸的沉积速度进行多变量工艺参数优化。采用 JMP 软件对电喷镀进行试验研究, 探讨了电压、镀液温度、两极间隙、镀液流速、两极相对运动速度对镀层沉积速度的影响, 通过响应面分析和逐步逼近法分析了各影响因子与响应的关系, 建立了二次回归数学模型。并利用二次曲面主轴梯度法进行了多变量函数优化, 确定了镀层沉积速度的最佳工艺参数: 电压 15 V, 镀液温度 72℃, 两极间隙 1 mm, 镀液流速 1.2 m/s, 两极相对运动速度 170 mm/min, 此工艺条件下得到的镀层沉积速度为 79.13 $\mu\text{m}/\text{min}$, 约是传统电沉积的 130 倍, 提高了生产效率, 并且优化后镀层致密光滑, 无气孔, 镀层质量优等。研究结果可为高速电镀的实现提供参考。

关键词: 发动机, 电喷镀, 优化, 数学模型, 响应面分析

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.19.006

中图分类号: S232

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2013)-19-0048-07

王颖, 康敏, 陈超, 等. 提高发动机气缸电喷镀沉积速度的工艺优化[J]. 农业工程学报, 2013, 29(19): 48-54.

Wang Ying, Kang Min, Chen Chao, et al. Process parameters optimization of increasing depositing rate for jet electrodeposition of engine cylinder[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(19): 48-54. (in Chinese with English abstract)

0 引言

气缸是拖拉机发动机极其重要的易磨损零件, 它的主要磨损形式为: 磨粒磨损、粘着磨损、腐蚀磨损和综合磨损^[1-2]。镍磷合金镀层不仅具有优异的耐磨、耐腐蚀性能, 还具有较高的硬度, 可明显提高气缸的使用寿命和可靠性, 改善拖拉机发动机的性能、质量。然而传统电沉积镍磷合金方法由于允许使用的极限电流密度低, 导致沉积速度慢, 生产效率低, 难以满足现代化生产的发展需要^[3-7]。这迫使人们探索提高沉积速率的新途径。近年来发展起来的电喷镀, 从加速电沉积物质传输过程出发, 增大了极限电流密度, 加快了沉积速度, 提高了生产效率^[8-9]。E. I. Sherik 等^[10]制造了高速喷射电沉积装置, 由一个浸没在电解液中旋转的阳极和一个高速喷出电解液的装置组成。C. Bocking 等^[11]采用喷射电沉积技术电镀 Au, 而且发现镀层的晶粒取向趋向于无规律性, 而传统电沉积获得的镀层的择优取

向是 (110) 晶面, 但作者未对产生上述现象的原因作出解释。荆天辅等^[12]研究了喷射电沉积纳米晶 Ni 的工艺, 获得了 20~30 nm 的 Ni 结晶沉积层。赵剑锋等^[13]研制了喷射电沉积快速成型系统并进行了基础实验研究, 实现了简单形状金属铜三维样件的沉积制备。王桂峰等^[14]将机械研磨引入到喷射电沉积中, 这种技术改变了电沉积的生长形态, 获得了平整的纳米晶沉积层, 但对电喷镀技术理论模型的建立与分析的研究还不足。目前研究体系仅仅局限于沉积纯镍、纯铜和纯金镀层, 电喷镀合金镀层的研究还较少。

文献[1]对发动机气缸无槽电镀铬的工艺进行研究, 设计了气缸网状无孔性镀铬工艺规范参数、工艺方案和单片机控制系统, 保证了无槽电镀铬层质量。但六价铬是致癌物, 对人体和环境有较大的危害性, 铬镀层可用性能相近的 Ni-P 合金替代, 大大减轻镀铬过程中对人体的危害和环境的污染。文献[15-16]研究了电喷镀 Ni-P 合金的工艺和性能, 试验设计均采用正交设计, 最终得到最优条件仅能是试验设计者预设的几个水平中的较优值, 而对水平的预设全靠设计者的经验, 很难做到准确; 并且在试验设计中没有考虑因子间的相互作用及高阶项对试验结果的影响。

JMP 软件是 SAS 公司开发的六西格玛统计软件, 是一种强大而易用的专业桌面统计分析工具^[17-18], 通

收稿日期: 2013-04-17 修订日期: 2013-08-06

基金项目: 南京农业大学工学院引进人才科研启动基金项目 (Rcqd11-05)

作者简介: 王颖 (1985—), 女, 博士生, 研究方向为 CAD/CAM 在特种加工中的应用。南京 南京农业大学工学院, 210031。

Email: wzhwangying@yahoo.com.cn

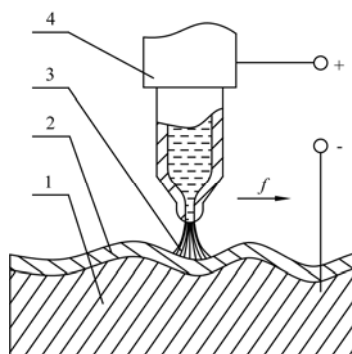
*通信作者: 康敏 (1965—), 男, 博士生导师, 教授, 主要从事 CAD/CAM 在特种加工中的应用、机电一体化技术、数控技术方面的研究。南京 南京农业大学工学院, 210031。Email: kangmin@njau.edu.cn

过计算可得出更准确的优化值，目前国内还没见到将其应用于电化学领域的报道。本文采用 JMP 的定制设计器对电喷镀镍磷合金进行试验设计并优化工艺参数，旨在探究提高气缸电喷镀沉积速度的最优工艺条件。

1 材料与方法

1.1 气缸电喷镀试验装置

气缸电喷镀的试验装置主要由恒温控制的电解液槽、电解液循环系统和直流稳压电源组成。电喷镀是镀液经由阳极喷嘴高速喷射于工件表面，在强电场作用下实现沉积的加工过程^[15]，加工原理见图 1。



1. 工件 2. 镀层 3. 镀液 4. 阳极喷嘴
1. Workpiece 2. Deposited layer 3. Electrolyte 4. Anode nozzle
注: f 为进给速度, mm/min.
Note: f is feed speed, mm/min.

图 1 电喷镀加工原理图

Fig.1 Principle diagram of jet electrodeposition process

镀液采用镍磷合金镀液^[19]，其主要成分见表 1。

表 1 镍磷合金镀液成分
Table 1 Electrolyte composition of Ni-P alloy

成分 Composition	质量浓度 Concentration/(g·L ⁻¹)
NiSO ₄ ·6H ₂ O	400
NiCl ₂ ·6H ₂ O	100
H ₃ PO ₃	50
H ₃ BO ₃	50
H ₃ PO ₄	50
乳酸 Lactic acid	40
十二烷基硫酸钠 Sodium dodecyl sulfate	0.08
硫脲 Thiourea	0.01

1.2 试验设计

根据文献[16]和单因素试验，选取电压 x_1 、镀液温度 x_2 、阴阳极之间的间隙 x_3 、镀液流速 x_4 及阴阳极之间的相对运动速度 x_5 为考察变量，因素水平和编码如表 2 所示。自变量的编码根据方程 $X_i = (x_i - x_{0i}) / \Delta x_i$ 所得，其中 X_i 为各变量的编

码值， x_i 为各变量的真实值， x_{0i} 为试验中心点各变量的真实值， Δx_i 为各变量的变化步长^[20]， X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 、 X_5 分别为电压、镀液温度、间隙、镀液流速、相对运动速度的编码值。镀层沉积速度 Y 为响应值， $\mu\text{m}/\text{min}$ ；并设定响应的目标为最大化。

表 2 试验因素水平
Table 2 Factors and levels of experimental

水平 Level	因素 Factor				
	电压 x_1 Voltage /V	镀液 温度 x_2 Electrolyte temperature /°C	间隙 x_3 Dipolar space /mm	镀液 流速 x_4 Electrolyte flow velocity /(m·s ⁻¹)	相对运 动速度 x_5 Dipolar relative velocity /(mm·min ⁻¹)
-1	10	60	1.0	0.5	50
0	16	70	1.5	1.0	150
1	22	80	2.0	1.5	250

1.3 测试方法

采用镀层厚度测量法计算镀层的沉积速度，沉积速度表征单位时间单位长度上沉积的镀层厚度^[21]，即 $V(V, \mu\text{m}/\text{min}) = hl/t$ ，其中，镀层厚度 h (μm) 采用 KLA Tencor P-16+探针式扫描台阶仪^[22]进行测量（量程 327 μm ，精度 0.0006 μm ），沉积时间 t (s) 用秒表测定；每个工件的喷镀时间为 20 min，镀层长度 l (mm) 由计算机控制。

1.4 数据处理

采用 JMP 软件对试验数据进行回归分析，利用逐步逼近法寻求预测模型的优化方程，对发动机气缸电喷镀镀层沉积速度的影响因素进行更深入的研究，绘制响应面图进行分析，并对最优条件进行预测。

2 试验结果及分析

2.1 二次回归试验

按照 JMP 定制设计器设计的方案，随机组合试验次序，所得试验结果如表 3 所示。由表 3 可知，最大沉积速度为 72.64 $\mu\text{m}/\text{min}$ ，对应的工艺条件为电压 16 V，镀液温度 70℃，阴阳极之间的间隙 1.5 mm，镀液流速 1.0 m/s，阴阳极之间的相对运动速度 150 mm/min。

2.2 回归分析

对试验结果采用回归分析中的逐步逼近法^[23]来寻求预测模型的回归方程，设置显著水平 $\alpha=0.05$ ，得到镀层沉积速度 Y 回归模型方程为

$$Y = 75.111 - 29.677X_1 + 5.271X_2 - 3.547X_3 + 1.354X_4 - 0.54X_1X_2 + 0.3X_1X_3 - 2.165X_2X_3 - 4.386X_3X_4 - 12.96X_1^2 - 18.5X_2^2 - 3.527X_4^2$$

表 3 试验结果
Table 3 Experimental results

组数	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	$Y/(\mu\text{m}\cdot\text{min}^{-1})$
1	1	-1	1	-1	-1	33.07
2	-1	-1	-1	1	-1	41.93
3	-1	1	1	1	-1	36.76
4	-1	-1	1	-1	1	37.21
5	1	1	1	1	1	33.21
6	-1	1	-1	-1	1	49.56
7	1	-1	-1	1	1	41.19
8	1	1	-1	-1	-1	40.56
9	-1	-1	-1	0	1	43.79
10	1	1	-1	0	1	52.37
11	0	1	-1	1	0	68.44
12	-1	-1	0	-1	-1	36.50
13	1	-1	-1	0	-1	37.24
14	1	1	0	1	-1	45.34
15	-1	1	-1	0	-1	58.87
16	1	-1	0	-1	0	30.91
17	0	1	1	-1	1	59.17
18	-1	0	1	-1	0	61.42
19	0	0	-1	-1	1	70.15
20	-1	0	0	1	1	66.04
21	0	-1	1	1	0	45.93
22	0	0	0	0	0	72.64

注：表中各自变量编码值与真实值之间的关系： $X_1=(x_1-16)/6$ ； $X_2=(x_2-70)/10$ ； $X_3=(x_3-1.5)/0.5$ ； $X_4=(x_4-1.0)/0.5$ ； $X_5=(x_5-150)/100$ ； Y 为镀层沉积速度， $\mu\text{m}/\text{min}$ 。

Note: In developing the regression equation, the five experimental variables were coded as: $X_1=(x_1-16)/6$; $X_2=(x_2-70)/10$; $X_3=(x_3-1.5)/0.5$; $X_4=(x_4-1.0)/0.5$; $X_5=(x_5-150)/100$. Y is deposition rate, $\mu\text{m}/\text{min}$.

对逐步逼近法得到的效应子集进行方差分析^[24]，结果如表 4 所示。由表 4 可知，一次项 X_1 对镀层沉积速度的线性效应为显著 ($P < 0.05$)，而 X_2 、 X_3 、 X_4 对镀层沉积速度的线性效应为极显著 ($P < 0.01$)，但一次项 X_5 对镀层沉积速度影响不显著；二次项 X_1^2 和 X_2^2 对镀层沉积速度的曲面效应极显著 ($P < 0.01$)，而 X_4^2 对镀层沉积速度的曲面效应为显著 ($P < 0.05$)；交互项 X_2X_3 交互效应显著 ($P < 0.05$)，而 X_3X_4 交互效应极显著 ($P < 0.01$)，但相互项 X_1X_2 、 X_1X_3 的相互作用不显著；表明各影响因素对镀层沉积速度的影响不是简单的线性关系。从表 4 的分析结果来看，整体模型的 P 值小于 0.0001，该二次方程模型达到极显著水平，表明在试验范围内，试验误差小，回归模型与实际情况拟合程度高。 R^2 为 0.98，调整 R^2 为 0.96，两者接近，表明回归方程的拟合程度好，模型的可信度较高，可应用于分析和预测气缸电喷镀试验沉积速度的最优工艺条件。

表 4 方差分析
Table 4 Variance analysis

项目 Term	平方和 SS	自由度 DF	均方 MS	F 比 F-ratio	P
x_1	36.322	1	36.322	5.914	0.0379
x_2	480.96	1	480.96	78.314	<0.0001
x_3	149.374	1	149.374	24.322	0.0008
x_4	71.779	1	71.779	11.688	0.0076
x_5	13.090	1	13.090	2.131	0.1783
x_1x_2	4.378	1	4.378	0.7129	0.4204
x_1x_3	1.051	1	1.051	0.1712	0.6888
x_2x_3	57.438	1	57.438	9.3525	0.0136
x_3x_4	218.081	1	218.081	35.510	0.0002
x_1^2	535.046	1	535.046	87.120	<0.0001
x_2^2	846.486	1	846.486	137.832	<0.0001
x_4^2	39.378	1	39.378	6.412	0.0321
模型 Model	3620.581	12	301.715	49.128	<0.0001
误差 Error	55.273	9	6.141		
校正 合计 Total	3675.854	21			

2.3 响应面分析

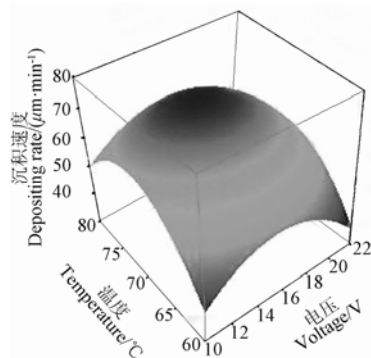
根据回归方程，绘制响应面图，考察拟合响应曲面的形状^[25-26]，分析各影响因子对镀层沉积速度的影响。

2.3.1 电压和温度对镀层沉积速度的交互影响

图 2 为其他因素取 0 水平时，电压和镀液温度对镀层沉积速度交互影响的三维曲面图。由图 2 可知，在试验范围内，镀层沉积速度随电压的升高而增大，但当电压达到一定值后沉积速度随电压的升高而减小；沉积速度随着温度的升高而增大，同样当温度超过一定值后沉积速度随温度的升高而减小。这是因为电压升高导致电流密度升高，使电化学极化增大，从而引起沉积速度增加，但当电压超过一定值后，浓差极化急速增加，导致电流效率下降从而使沉积速度减小；随着镀液温度升高，提高了金属离子的扩散和迁移速度，即增加了金属离子在阴极扩散层的浓度导致浓差极化降低，沉积速度增加，但当温度过高时，放电离子具有更大的活化能，从而降低了电化学极化导致沉积速度下降。电压和镀液温度的交互作用不显著，与方差分析中的结果一致。

2.3.2 电压和两极间隙对镀层沉积速度的交互影响

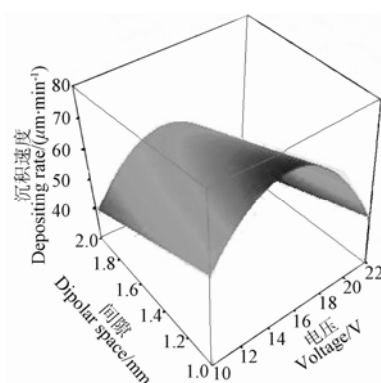
图 3 为其他因素取 0 水平时，电压和两极间隙对镀层沉积速度交互影响的三维曲面图。由图 3 可知，在试验范围内，镀层沉积速度随电压的升高先增大后减小，随两极间隙的增大而减小，并且两极间隙对镀层沉积速度的影响较小。电压对镀层沉积速度的影响前面已有说明，减小两极间隙可使喷射的镀液压强和流速增大，即增大了镀层的紊流程度，使扩散层厚度减小，浓差极化降低从而增大镀层的沉积速度。电压和两极间隙的交互作用不显著，与方差分析中结果一致。



注: 间隙 1.5 mm, 镀液流速 1.0 m/s, 相对运动速度 150 mm/min。
Note: Dipolar space is 1.5 mm, electrolyte flow velocity is 1.0 m/s, dipolar relative velocity is 150 mm/min.

图 2 电压和温度对镀层沉积速度的交互影响响应面图

Fig.2 Response surface of mutual-influence of voltage and electrolyte temperature on depositing rate



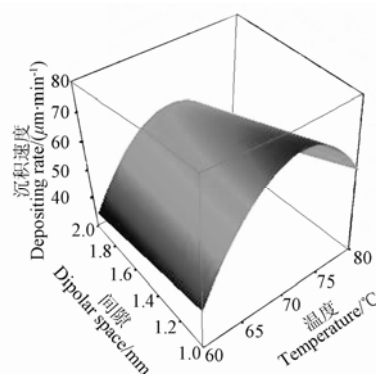
注: 镀液温度 70°C, 镀液流速 1.0 m/s, 相对运动速度 150 mm/min。
Note: Electrolyte temperature is 70°C, electrolyte flow velocity is 1.0 m/s, dipolar relative velocity is 150 mm/min.

图 3 电压和两极间隙对镀层沉积速度的交互影响响应面图

Fig.3 Response surface of mutual-influence of voltage and dipolar space on depositing rate

2.3.3 镀液温度和两极间隙对镀层沉积速度的交互影响

图 4 为其他因素取 0 水平时, 镀液温度和两极间隙对沉积速度交互影响的三维曲面图。由图 4 可知, 在试验范围内, 镀层沉积速度随镀液温度的升高先增大后减小, 随两极间隙的增大而减小, 但镀液温度较低时, 两极间隙对沉积速度的影响较小, 而在镀液温度较高时, 两极间隙对沉积速度有较大的影响。原因是镀液温度升高, 提高了金属离子的扩散和迁移速度, 即增加了金属离子在阴极扩散层的浓度导致浓差极化降低, 沉积速度增加, 但当温度过高时, 放电离子具有更大的活化能, 从而降低了电化学极化导致沉积速度下降; 两极间隙对沉积速度的影响程度随温度的变化而不同, 是因为两影响因子存在交互作用, 且交互作用中镀液温度起了更主要的作用。镀液温度和两极间隙的交互作用显著, 与方差分析中的结果一致。



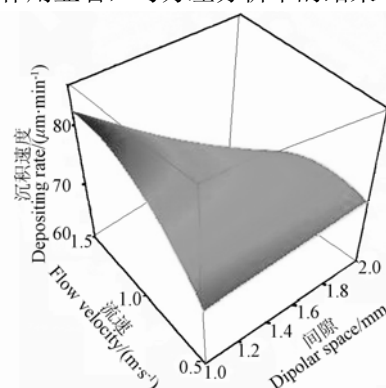
注: 电压 16 V, 镀液流速 1.0 m/s, 相对运动速度 150 mm/min。
Note: Voltage is 16 V, electrolyte flow velocity is 1.0 m/s, dipolar relative velocity is 150 mm/min.

图 4 镀液温度和两极间隙对镀层沉积速度的交互影响响应面图

Fig.4 Response surface of mutual-influence of electrolyte temperature and dipolar space on depositing rate

2.3.4 两极间隙和镀液流速对镀层沉积速度的交互影响

图 5 为其他因素取 0 水平时, 两极间隙和镀液流速对镀层沉积速度交互影响的三维曲面图。由图 5 可知, 在试验范围内, 小间隙时, 沉积速度随镀液流速的增大而增大, 并且镀液流速对沉积速度的影响较大; 两极间隙的不同导致镀液流速对沉积速度的影响发生变化, 且当间隙超过一定值后沉积速度随镀液流速的增大而减小。若不受两极间隙的影响, 沉积速度应随镀液流速的增大先增大后减小这是因为镀液流速增大即可增加镀液的紊流搅拌作用, 极大的降低扩散层厚度, 降低浓差极化, 增大沉积速度, 但当镀液流速过大时不但没有明显降低浓差极化作用, 反而因为镀液流速和压强太大使刚得到电子的金属原子没来得及结晶形成新相就与电极表面发成了脱附, 导致沉积速度降低。这是因为 2 影响因子存在交互作用, 并且两极间隙起了更主要的作用。两极间隙和镀液流速的交互作用显著, 与方差分析中的结果一致。



注: 电压 16 V, 镀液温度 70°C, 相对运动速度 150 mm/min。
Note: Voltage is 16 V, electrolyte temperature is 70°C, dipolar relative velocity is 150 mm/min.

图 5 两极间隙和镀液流速对镀层沉积速度的交互影响响应面图

Fig.5 Response surface of mutual-influence of dipolar space and flow velocity on depositing rate

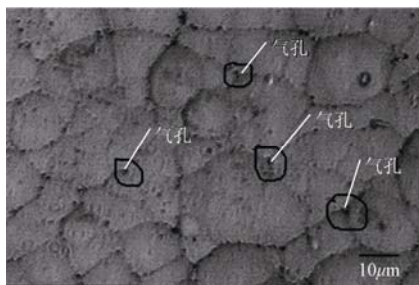
2.4 优化结果及试验验证

为了确定最佳工艺条件,使用二次曲面主轴梯度法^[27-28]确定电喷镀沉积速度的最优方案为:电压 15.286 V,镀液温度 72.029℃,两极间隙 1 mm,镀液流速 1.2773 m/s,两极相对运动速度 170.35 mm/min,在此工艺条件下镀层沉积速度的预测值为 82.110 μm/min。为验证模型的可靠性,采用上述优化工艺条件进行电喷镀试验,考虑到实际操作的便利,将工艺参数修正为:电压 15 V,镀液温度 72℃,两极间隙 1 mm,镀液流速 1.2 m/s,两极相对运动速度 170 mm/min。在此条件下进行 3 次试验,测得镀层平均沉积速度为 79.13 μm/min,如表 5 所示,沉积速度预测值与实际试验所测值相差仅 2.98 μm,相对误差为 3.7%,说明回归模型对电喷

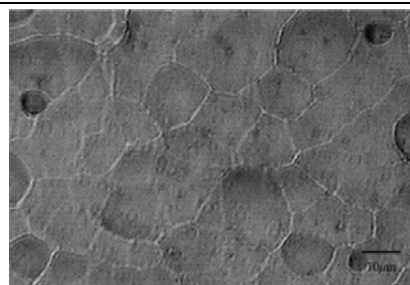
镀镀层沉积速度的分析和预测是可行的。用 6XB-PC 透反射显微镜观察镀层的表面形貌如图 6 所示。由图 6 可知,优化后镀层形貌比优化前更加光滑致密而且无气孔,说明优化后镀层质量优于优化前。由试验知电喷镀 Ni-P 的平均优化沉积速度为 79.13 μm/min,而采用传统电镀的方法所得 Ni-P 的沉积速度为 0.61 μm/min,电喷镀的沉积速度是传统电镀的 130 倍左右,大大提高了生产效益。

表 5 最优试验结果

Table 5 Result of the optimal examination design	
试验序号 Test No.	沉积速度 Depositing rate/(μm·min ⁻¹)
1	78.59
2	79.88
3	78.92



a. 优化前
a. Before optimization



b. 优化后
b. After optimization

图 6 最优工艺条件下镀层表面形貌

Fig.6 Under optimal process condition deposited layer surface morphology

3 机理分析

沉积速度 v 的表达式^[29] $v = \frac{q}{1000\rho} I \eta$, (式中,

q 为金属电化学当量, g/C; I 为电流密度, A/m²; ρ 为镀层金属密度, kg/m³; η 为电流效率), 由式可知, 要提高沉积速度, 就要设法提高阴极电流密度而又不致于降低阴极电流效率。随电流密度增加, 沉积速度加快, 但电流密度不能无限制的提高, 它受极限电流密度的限制, 当电流密度超过极限电流密度时, 电流效率急剧下降, 电化学极化不再增加, 而阴极浓差过电位剧增, 镀层产生针孔, 晶粒粗大等现象, 所以要提高沉积速度, 就要提高阴极极限电流密度。

由极限电流密度 I_d 的表达式^[30]

$$I_d = nFD \frac{C^0 - C^s}{\delta}$$

式中, n 为金属离子价数; F 为法拉第常数, C/mol; D 为金属离子扩散系数, cm²/s; C^0 为溶液本体金属离子浓度, mol/L; C^s 为电极表面金属离子浓度, mol/L; δ 为扩散层厚度, cm, 扩散层 δ 的表达式^[31] $\delta = D^{1/3} u^{1/6} x^{1/2} \sigma^{-1/2}$, (其中 u 为动力黏度系数, Pa·s; x 为阴极表面某点距冲击点的距离, cm; σ 为流体的

切向速度, m/s)。可见, 要提高极限电流密度可采取以下途径: 选择扩散系数大的盐类; 采用较高浓度的镀液; 进行强烈搅拌; 缩小阴阳极间间距等。在特定的加工条件下, 镀液的扩散系数和浓度不会有较大的选择余地, 故进行强烈搅拌或缩小阴阳极间间距便成为提高极限电流密度的主要方式。而电喷镀将强烈搅拌和缩小阴阳极间隙有效的结合起来, 实现较高的物质迁移速度, 减薄了扩散层厚度 δ , 从而大大提高了极限电流密度, 使得电化学反应能持续在较高的电流密度下进行, 大大提高了电沉积速度。

4 结 论

1) 采用 JMP 的定制设计器对电喷镀进行试验设计并对试验数据进行回归分析, 利用逐步逼近法得到了预测模型的优化方程, 该模型的 P 值小于 0.0001, 模型极显著, 并且此模型的 R^2 为 0.98, 调整 R^2 的值为 0.96, 回归方程的拟合程度好, 模型的可信度较高, 有一定的应用价值。

2) 根据拟合响应曲面的形状, 提出了各影响因子对镀层沉积速度的影响规律: 沉积速度随电压和温度的升高先增大后减小; 随两极间隙的增大而减小; 小间隙时, 沉积速度随镀液流速的增大而增大, 当间隙超过一定值后沉积速度随镀液流速的增

大而减小; 并且由等高线图可知温度和间隙、间隙和镀液流速的交互作用显著。

3) 采用二次曲面主轴梯度法确定电喷镀气缸沉积速度的最优工艺条件为: 电压 15 V, 镀液温度 72℃, 两极间隙 1 mm, 镀液流速 1.2 m/s, 两极相对运动速度 170 mm/min, 此工艺条件下得到的镀层平均沉积速度高达 79.13 $\mu\text{m}/\text{min}$, 是传统电沉积的 130 倍左右, 大大提高了生产效率。

[参 考 文 献]

- [1] 吕钊钦, 许斌, 丁其胜, 等. 发动机气缸无槽电镀工艺研究[J]. 农业机械学报, 2000, 31(5): 110—113.
- Lü Zhaoqin, Xu Bin, Ding Qisheng, et al. Study on non-trough electric-plating technique of cylinder liner abrasion[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2000, 31(5): 110—113. (in Chinese with English abstract)
- [2] 江炜, 朱华, 刘现实. 气缸套磨损及应对措施[J]. 小型内燃机与摩托车, 2008, 37(5): 93—96.
- Jiang Hui, Zhu Hua, Liu Xianshi. Cylinder wear and preventive measures[J]. Small Internal Combustion Engine and Motorcycle, 2008, 37(5): 93—96. (in Chinese with English abstract)
- [3] Akio Yonezu, Michihiro Niwa, Jiping Ye, et al. Contact fracture mechanism of electroplated Ni-P coating upon stainless steel substrate[J]. Materials Science and Engineering A-structural Materials Properties Microstructure and Processing, 2013, 563(2): 184—192.
- [4] Nayef M Alanazi, Haitham K Aljuhani, Abdelmounam M Sherik, et al. Wear performance of electroplated nanocrystalline Ni-P alloy coating[J]. Materials Performance, 2012, 51(10): 36—39.
- [5] El-Sherik M, Erb U, Page J. Microstructural evolution in pulse plated nickel electrodeposits[J]. Surf Coat Technol, 1997, 88(1/3): 70—78.
- [6] 刘润, 宫凯. 喷射电沉积纳米晶镍机理及工艺研究[J]. 机械科学与技术, 2010, 29(8): 997—1001.
- Liu Run, Gong Kai. Basic mechanism and technology of jet-electrodepositing nanocrystalline Ni[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2010, 29(8): 997—1001. (in Chinese with English abstract)
- [7] Peter T Tang. Pulse reversal plating of nickel and nickel alloys for microgalvanics[J]. Electrochimica Acta, 2001, 47(1/2): 61—66.
- [8] 宫凯. 喷射电沉积法制备多孔金属镍机理、工艺及应用研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
- Gong Kai. Study on the mechanism, Process and application of Porous Nickel Prepared by Jet Electrodeposition[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010. (in Chinese with English abstract)
- [9] 刘荣. 数控电喷镀工艺试验研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2011.
- Liu Rong. The Technology Research of CNC Electric Plating[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011. (in Chinese with English abstract)
- [10] Sherik E I, Erb U. Synthesis of bulk nanocrystalline nickel by pulsed electrodeposition[J]. Journal of Materials Science, 1995, 30(22): 5743—5749.
- [11] Bocking C, Cameron B. Use of high speed selective jet electrodeposition of gold for the plating of connectors[J]. Transactions of the Institute of Metal Finishing, 1994, 72(1): 33—40.
- [12] 荆天辅, 乔桂英, 熊毅, 等. 添加剂对喷射电沉积纳米晶镍的影响[J]. 材料保护, 2001, 34(7): 16—17.
- Jing Tianfu, Qiao Guiying, Xiong Yi, et al. Effects of additive on jet-electrodeposited nanocrystalline nickel[J]. Materials Protection, 2001, 34(7): 16—17. (in Chinese with English abstract)
- [13] 赵剑锋, 黄因慧, 吴安德. 射流电沉积快速成形技术基础试验研究[J]. 机械工程学报, 2003, 39(4): 75—78.
- Zhao Jianfeng, Huang Yinhui, Wu Ande. Fundamental experimental study on selective electrodeposition rapid prototyping with electrolyte jet[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(4): 75—78. (in Chinese with English abstract)
- [14] 王桂峰. 平整、多元、交织射流电沉积形态控制技术的基础研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.
- Wang Guifeng. Control Technologies in Jet Electrodeposition by Smoothing, Multicomponent-ion and Interlacing[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011. (in Chinese with English abstract)
- [15] 刘荣, 康敏, 杨勇, 等. 数控电喷镀镍磷合金工艺试验研究[J]. 电加工与模具, 2011, 46(5): 58—60.
- Liu Rong, Kang Min, Yang Yong, et al. Fundamental experimental study on Ni-P alloy NC flow plating[J]. Electromachining and Mould, 2011, 46(5): 58—60. (in Chinese with English abstract)
- [16] 王颖, 张金源, 康敏. 喷射电沉积镍磷合金沉积速度试验研究[J]. 电加工与模具, 2013, 48(1): 16—18.
- Wang Ying, Zhang Jinyuan, Kang Min. Experimental study on the depositing rate of jet-electrodeposition Ni-P alloy[J]. Electromachining and Mould, 2013, 48(1): 16—18. (in Chinese with English abstract)
- [17] 王亚娟. 简述六西格玛设计及其软件 JMP[J]. 经济管理者, 2011, 18(24): 321.
- Wang Yajuan. Sketch the six sigma design and the software of JMP[J]. Economic Management, 2011, 18(24): 321. (in Chinese with English abstract)
- [18] 周璋. JMP 与众不同的技术亮点[J]. CAD/CAM 与制造业信息化, 2007, 14(4): 43—46.
- Zhou Wei. The software of JMP highlight different technology[J]. CAD/CAM and Manufacturing Information, 2007, 14(4): 43—46. (in Chinese with English abstract)
- [19] 陈祝平. 特种电镀技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 81—103.
- [20] 易军鹏, 朱文学, 马海乐, 等. 牡丹籽油超声波辅助提取工艺的响应面法优化[J]. 农业机械学报, 2009, 40(6): 103—109.
- Yi Junpeng, Zhu Wenxue, Ma Haile, et al. Optimization on ultrasonic-assisted extraction technology of oil from paeonia suffruticosa Andr. seed with response surface analysis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural, 2009, 40(6): 103—109. (in Chinese with English abstract)
- [21] 邢芳芳, 程延海, 张世举, 等. 丁二酸及乌酸钠对化学镀 Ni-W-P 镀层沉积速度的影响[J]. 表面技术, 2012, 41(4): 7—9.
- Xing Fangfang, Cheng Yanhai, Zhang Shiju, et al. The effect of succinic acid and sodium tungsten on plating rate of electroless Ni-W-P alloy coating[J]. Surface Technology, 2012, 41(4): 7—9. (in Chinese with English abstract)
- [22] 张欣宇. 镀层厚度测试仪器及其检定、校准方法探讨[J]. 计量与测试技术, 2013, 40(1): 3—4.
- Zhang Xinyu. Instruments of measuring coating thickness and verification and calibration discussion[J]. Metrology and Measurement Technique, 2013, 40(1): 3—4. (in Chinese with English abstract)
- [23] 张黎骅, 徐中明, 夏磊, 等. 银杏热风干燥工艺参数响应面法优化[J]. 农业机械学报, 2012, 43(3): 140—145.
- Zhang Lihua, Xu Zhongming, Xia Lei, et al. Optimization of the hot-air drying technical parameters for ginkgo fruit based

- on response surface methodology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural, 2012, 43(3): 140—145. (in Chinese with English abstract)
- [24] 张玲. 单因素及双因素方差分析及检验的原理及统计应用[J]. 数学学习与研究, 2010, 31(7): 92—94. Zhang Ling. The principle and applicine of single factor and double factors variance analysis and test[J]. Mathematics Study and Research, 2010, 31(7): 92—94. (in Chinese with English abstract)
- [25] Lu Qing, Low Bak Kong. Probabilistic analysis of underground rock excavations using response surface method and SORM[J]. Computers and Geotechnics, 2011, 38(8): 1008—1021.
- [26] Siew-Teng Ong, Weng-Nam Lee, Pei-Sin Keng, et al. Application of response surface analysis for optimization of dyes sorption onto EDTA modified rice hull[J]. Research Journal of Chemistry and Environment, 2011, 15(2): 538—543.
- [27] 任露泉. 回归设计及其优化[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 206—209.
- [28] 王宏. 不锈钢焊条的混料回归分析与优化设计[J]. 山西机械, 2000, 29(1): 28—30. Wang Hong. The mixture regression and optimization design of the stainless steel coating formula[J]. Shanxi Machinery, 2000, 29(1): 28—30. (in Chinese with English abstract)
- [29] 吴安德. 数控喷射电铸技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2001. Wu Ande. Study on the Numerical Controlled Jet Electroforming[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2001. (in Chinese with English abstract)
- [30] 李荻. 电化学原理[M]. 北京: 航空航天大学出版社, 1999: 233—238.
- [31] 曾跃, 姚素薇. 电镀磁性镀层[M]. 天津: 天津大学出版社, 1999: 36—34.

Process parameters optimization of increasing depositing rate for jet electrodeposition of engine cylinder

Wang Ying¹, Kang Min^{1,2*}, Chen Chao¹, Yang Yong¹, Fu Xiuqing¹

(1. College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China;

2. Jiangsu Key Laboratory for Intelligent Agricultural Equipment, Nanjing 210031, China)

Abstract: The cylinder is an extremely important easily wearing part of a tractor engine, whose service life and production cost are directly affected by the wear resistance of the component. With excellent wear resistance, corrosion resistance, and greater hardness, a Ni-P alloy deposited layer can significantly enhance the service life and reliability of the cylinder, and the capability and quality of the tractor engine can be improved. The lower limiting current density of the traditional electrodeposited Ni-P alloy method leads to a lower depositing rate and lower production efficiency. Jet electrodeposition has been developed in recent years, which can significant increase the depositing rate because the jet electrolyte can accelerate the transfer process of the electrodeposition material and augment limiting current density. So jet electrodeposition is a type of high-velocity, selective electrodeposition technique with high deposition current density and high velocity. Furthermore, optimization of the process parameters of jet electrodeposition is the way to further increase the depositing rate. In this paper, technological experimentation is investigated by using a custom design of JMP to optimize process parameters of jet electrodeposition. The JMP software is Six Sigma statistical software developed by SAS, which is a professional statistical analysis tool. The JMP software can be used for processing data and designing of experiments. To the best of our knowledge, there is currently no report about applications of JMP in electrochemical use domestically. Voltage, electrolyte temperature, dipolar space, flow velocity of electrolyte, and dipolar relative velocity are the influence factors, and the depositing rate of deposited layers is the experimental index, and the relationships between the experimental index and the influence factors are analyzed through the response surface analysis method and sub-stepping method. The quadratic regression mathematical models that described the relations between the experimental index and the influence factors were established. The optimal technological parameters for depositing rate of a deposited layer were obtained through conducting a multivariable function optimization by the method of a quadric spindle gradient. The results suggest that JMP software can obtain more accurate optimal values by calculating than by orthogonal test. Voltage, electrolyte temperature, dipolar space, and dipolar relative velocity affect the depositing rate of a deposited layer markedly. The quadratic term of dipolar space have a high-impact on the surface effect of the depositing rate. And furthermore, voltage and flow velocity of the electrolyte, electrolyte temperature and flow velocity of electrolyte, flow velocity of electrolyte, and dipolar relative velocity have interactive effects on the changes of the depositing rate. The quadratic regression mathematical models reach a significant level and the equation has good fitting effects. So the models can be applied to predict the depositing rate of a deposited layer. The response surface methodology obtained the influences of voltage, electrolyte temperature, dipolar space, flow velocity of the electrolyte, and dipolar relative velocity on depositing rate of a deposited layer. And the optimal parameters are as follow: voltage of 15V, electrolyte temperature of 72℃, dipolar space of 1mm, flow velocity of electrolyte of 1.2 m/s, and dipolar relative velocity of 170 mm/min. Under these conditions, the depositing rate of a deposited layer is 79.13 $\mu\text{m}/\text{min}$ and the quality of the deposited layer is better. The depositing rate of jet electrodeposition is about 130 times that of a traditional electrodeposition, and use of jet electrodeposition improves production efficiency. It can help to promote the development of high-speed plating.

Key words: engines, electroless plation, optimization, mathematical model, response surface analysis

(责任编辑: 鲍洪杰)