

基于正交回归实验设计方法的 HVOF 喷涂 $\text{Cr}_3\text{C}_2-\text{NiCr}$ 涂层磨粒磨损性能的研究*

纪岗昌 王豫跃 李长久

圆田启嗣

(西安交通大学)

(日本石川岛播磨重工业株式会社)

摘 要: 基于正交实验设计方法, 系统试验研究了氧气流量、燃气流量和喷涂距离对超音速火焰喷涂 $\text{Cr}_3\text{C}_2-\text{NiCr}$ 涂层磨粒磨损性能的影响, 获得了喷涂工艺条件与涂层磨粒磨损失重量的定量关系和最佳的喷涂工艺参数, 并进行了实验验证。结果表明: 氧气流量、燃气流量和喷涂距离对涂层磨粒磨损性能具有交互影响。其中燃气流量和氧气流量的影响较为显著, 适中的燃气流量和氧气流量有利于获得耐磨性较好的涂层。

关键词: 正交回归试验设计; 超音速火焰喷涂; $\text{Cr}_3\text{C}_2-\text{NiCr}$ 涂层; 磨粒磨损

中图分类号: TG115.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-244X(2001)02-0012-04

超音速火焰喷涂(High Velocity Oxygen Fuel)是八十年代发展起来的一种高速火焰喷涂方法, 由于具有火焰速度高(2000m/s), 温度相对较低(3000℃), 在喷涂金属陶瓷材料过程中能有效地抑制碳化物等硬质相的分解, 可以获得结合强度高, 致密性好, 耐磨性能优越的涂层, 近年来在国际上受到广泛关注^[1]。以WC-Co、WC-CoCr、WC-Ni、 $\text{Cr}_3\text{C}_2-\text{NiCr}$ 、 $\text{Cr}_3\text{C}_2-\text{NiCr}$ 、 $\text{Cr}_3\text{C}_2-\text{NiCr}$ 等为代表的碳化物金属陶瓷, 已广泛应用于制造耐磨涂层以提高零部件的使用寿命^[2], 其中WC-Co主要应用于温度为550℃以下的磨粒磨损和冲蚀磨损的工况, 而 $\text{Cr}_3\text{C}_2-\text{NiCr}$ 则应用于530~900℃的磨损工况^[3,4]。金属陶瓷涂层的耐磨性与涂层中碳化物硬质相的体积分数、大小和分布, 涂层扁平粒子的厚度、层间结合状态等因素有关。除了喷涂方法和原始粉末外, 喷涂工艺参数是影响涂层结构和性能的主要工艺因素。在HVOF喷涂工艺中, 粒子撞击基体瞬间的状态如速度和熔化状态受氧气流量、燃气流量和喷涂距离等因素的影响, 且这三因素的影响存在交互作用^[5,6]。目前, 尽管有关工艺参数对HVOF喷涂 $\text{Cr}_3\text{C}_2-\text{NiCr}$ 涂层磨粒磨损性能影响的研究较多^[7], 但对此方面的系统研究报道甚少。因此, 采用科学的实验设计方法, 针对影响HVOF喷涂 $\text{Cr}_3\text{C}_2-\text{NiCr}$ 涂层磨粒磨损性能的主要工艺参数进行系统定量研究, 对探讨喷涂工艺条件对涂层磨粒磨损性能的影响规律, 优

化喷涂工艺条件具有一定的意义。

正交回归实验设计方法是按照正交回归实验方案, 通过少量实验, 对实验结果进行回归分析获得多因素系统影响规律的直接最优化实验方法。为此, 本研究以氧气流量、燃气流量和喷涂距离为工艺参数, 采用两水平正交回归实验方案, 对HVOF喷涂 $\text{Cr}_3\text{C}_2-\text{NiCr}$ 涂层磨粒磨损性能进行了实验, 通过对实验结果回归分析, 获得了氧气流量、燃气流量和喷涂距离与涂层磨粒磨损性能之间的定量关系和最佳的喷涂工艺条件, 并通过实验验证了其有效性。

1 实验材料、设备及方法

实验用粉末为商用 $\text{Cr}_3\text{C}_2-25\%\text{NiCr}$, 其制造工艺为烧结机械粉碎, 粒度为5~45μm, 粒形为多角形。基体材料为低碳钢。试样尺寸为45mm×22mm×5mm, 经喷砂粗化后, 在各实验条件下喷涂厚度约200μm的涂层。

喷涂设备为西安交通大学焊接研究所自行研制的CH-2000型超音速火焰喷涂系统。该系统以丙烷为燃气、氧气为助燃气、氮气为送粉气。喷涂过程中, 压力分别保持在0.4MPa、0.5MPa和0.35~0.4MPa。氧气和燃气的流量及喷涂距离按照表1所示的参数选择, 并按表2所示的正交组合确定实验参数组合制备涂层。磨粒磨损实验采用按ASTM-G65-91标准制造的干式橡胶轮磨损试验机进

* 收稿日期: 1999-08-30

作者简介: 纪岗昌, 男, 1961年4月生, 博士生。现为西北轻工业学院副教授, 西北工业大学博士后。李长久, 男, 教授, 博士生导师, 西安交通大学机械工程学院焊接研究所, 西安, 710049

行。图 1 为试验机原理示意图。实验时的载荷为 13N, 磨料为 120 目刚玉砂, 形态为多角形, 砂流量为 100g/m in, 橡胶轮直径为 250mm, 转速为 50r/m in, 磨损时间为 15m in。涂层的耐磨性能用磨损后试样的失重量来表示。为了减少涂层表面的粗糙度对磨损失重量的影响, 磨损前均用 200 目砂纸将试样表面进行磨制。

表 1 实验参数水平值

水平	- r	- 1	0	1	r
$\text{O}_2/(\text{L} \cdot \text{m in}^{-1})$	368	382	447	510	526
$\text{C}_3\text{H}_8/(\text{L} \cdot \text{m in}^{-1})$	28 1	29 6	37	44 3	45 8
S D./mm	161 4	170	210	250	258 6

S D: 喷涂距离

表 2 正交回归实验参数水平及实验结果

实验号	水平值			Y_{aw}/mg		
	O_2	C_3H_8	S D.	Obs	Cal	Er/%
1	1	1	1	26 1	26 3	0 8
2	1	1	- 1	25 1	26 9	6 7
3	1	- 1	1	34 9	34 4	1 5
4	1	- 1	- 1	28 4	27 8	3 2
5	- 1	1	1	24 6	24 6	0
6	- 1	1	- 1	25 9	25 9	0
7	- 1	- 1	1	32 5	30 2	7 6
8	- 1	- 1	- 1	25 0	24 3	2 8
9	R	0	0	30 9	29 2	5 8
10	- r	0	0	24 0	25 8	7
11	0	R	0	27 3	24 3	11 4
12	0	- r	0	26 0	28 5	8 8
13	0	0	R	23 1	24 2	4 5
14	0	0	- r	22 4	21 0	6 7
15	0	0	0	24 3	23 6	3

Y_{aw} : 磨粒磨损失重量; Obs: 实验值; Cal: 计算值;
Er: 相对误差(= |实验值—计算值|/实验值×100%)

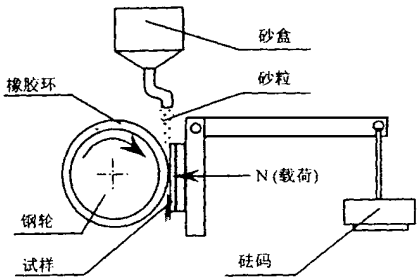


图 1 磨粒磨损试验机原理示意图

2 实验结果与讨论

2 1 氧气流量、燃气流量和喷涂距离对涂层磨粒磨损性能的影响规律

不同喷涂条件下制备涂层的磨损失重量如表 2 所示, 表中的磨损失重量为三个试样的平均值。经过正交回归分析, 可得到涂层磨损失重量与氧气流量、燃气流量和喷涂距离三个工艺参数的二次回归关系式:

$$\begin{aligned} Y_{aw} = & 120 8 - 0 486X_1 - 1 1X_2 + 0 258X_3 \\ & - 0 00136X_1X_2 - 0 00608X_2X_3 \\ & + 0 000625X_1^2 + 0 0374X_2^2 \end{aligned} \quad (1)$$

式中, X_1 、 X_2 分别为氧气流量(L/m in)和燃气流量(L/m in); X_3 为喷涂距离(mm)。经显著性检验: $F = 4 17 > F_{\alpha} = 0 05(7, 7) = 3 79$, 表明该关系式具有 95% 的可信度, 用其表征涂层磨粒磨损性能随氧气流量、燃气流量和喷涂距离的变化规律是可靠的。图 2 为喷涂距离和氧气流量一定的条件下, 涂层磨损失重量随着燃气流量和氧气流量的变化规律。可以看出: 在喷涂距离一定时, 磨损失重量随氧气流量和燃气流量的变化呈现上凹的曲面。涂层的磨粒磨损失重量在氧气流量为 400~ 450L/m in 的范围内取得最小值。图 3、图 4 分别为氧气流量为 430L/m in, 喷涂距离为 180mm 时, 涂层磨损失重量随着燃气流量的变化规律。可以看出: 获得较低磨损失重量的燃气流量范围与氧气流量和喷涂距离有关, 随着氧气流量和喷涂距离的增加, 获得最低磨粒磨损失重量的燃气流量有所增加。图 5 和图 6 分别为燃气流量为 37 L/m in、氧气流量为 430 L/m in 时, 涂层磨损失重量随着喷涂距离的变化规律。图中曲线表明, 不同的氧气流量和燃气流量条件下, 喷涂距离对涂层磨损失重量的影响规律有所不同。在燃气流量为 37 L/m in、氧气流量不同的条件下, 涂层磨损失重量随着喷涂距离的增加均呈现增加的变化趋势。而当氧气流量为 430 L/m in 时, 涂层磨损失重量随喷涂距离的变化规律受燃气流量的影响。燃气流量为 30 L/m in 时, 涂层的磨损失重量随着喷涂距离的增加而显著增加。当燃气流量超过 37 L/m in 后, 喷涂距离在 150~ 300 mm 范围内变化时, 涂层的磨损失重量变化不显著。表明燃气流量和喷涂距离对涂层的磨粒磨损性能具有显著的交互影响。

综合上述所展现的规律可以认为: 对于 HVOF

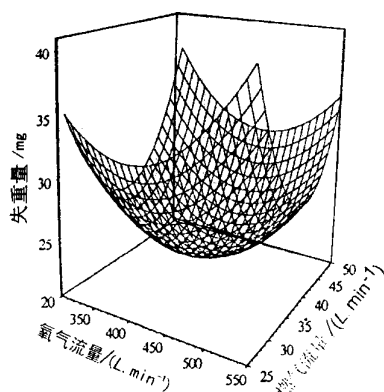


图 2 氧气流量、燃气流量对涂层磨损失重量的影响
(喷涂距离 180mm)

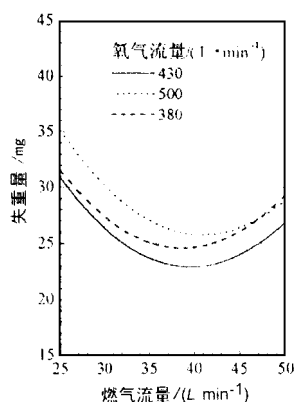


图 3 燃气流量对涂层磨损失重量的影响
(喷涂距离 180mm)

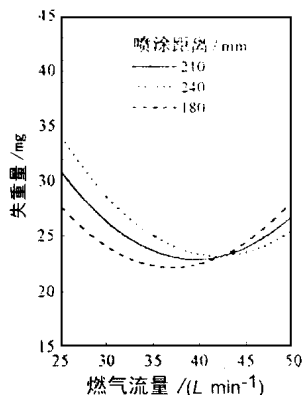


图 4 燃气流量对涂层磨损失重量的影响
(氧气流量 430L /m in)

喷涂 $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ 金属陶瓷涂层, 适中的氧气流量、燃气流量和较小的喷涂距离有利于制备耐磨粒磨损性能较好的涂层, 氧气流量、燃气流量和喷涂距离对涂层磨损失重量具有较显著的影响, 且存在一定的交互作用。由于在 HVOF 喷涂工艺中, 氧气流量和燃气流量是影响火焰速度与温度及化学特性的决定

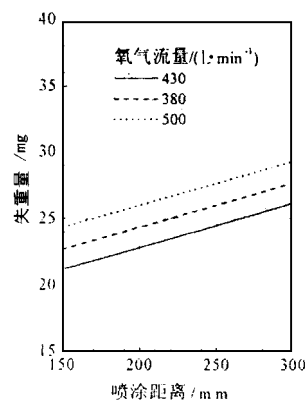


图 5 喷涂距离对涂层磨损失重量的影响
(燃气流量 37L /m in)

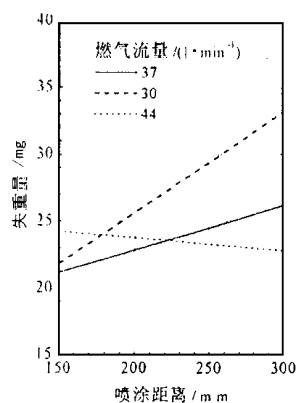


图 6 喷涂距离对涂层磨损失重量的影响
(氧气流量 430L /m in)

性因素^[6], 通常氧气与燃气流量比超过了完全燃烧的化学计量比, 理论上高的燃气流量会产生温度高、速度高和氧化性弱的火焰流, 有利于粒子的加热加速, 获得熔化程度好, 动能高的粒子。然而, 过高的氧气流量和喷涂距离会降低火焰的温度和速度, 进而影响粒子碰撞瞬间的速度和熔化状态。而粒子碰撞基体瞬间的速度和熔化状态对沉积涂层的结构具有较大的影响。对于 HVOF 喷涂金属陶瓷涂层, 沉积粒子呈现液—固两相状态, 一般金属(或合金)粘结相为熔化状态, 而碳化物大多为固态。与基体碰撞瞬间粒子中的碳化物颗粒大小、含量和分布不仅会影响扁平粒子的厚度^[8], 而且对扁平粒子层间结合以及扁平粒子内碳化物颗粒与基体粘结相之间的结合具有一定影响。具有良好耐磨粒磨损性能的金属陶瓷涂层应由层间结合良好的细小扁平粒子组成的层状结构, 且扁平粒子内均匀分布一定数量、颗粒细小与基体相结合良好的碳化物颗粒。而适中的燃气流量和氧气流量有利于在实现粘结相熔化的前提

下, 减少碳化物颗粒的分解, 获得碳化物颗粒细小分布均匀、层间结合状态较好的涂层结构。

2.2 最优喷涂工艺参数的确定与实验验证

根据式(1), 通过式(2)可推出涂层

$$\begin{aligned}\frac{\partial Y_{\text{av}}}{\partial X_1} &= 0 \\ \frac{\partial Y_{\text{av}}}{\partial X_2} &= 0 \\ \frac{\partial Y_{\text{av}}}{\partial X_3} &= 0\end{aligned}\quad (2)$$

磨粒磨损失重量最小的最佳喷涂工艺参数, 该三个参数的最佳值分别为: 氧气流量 $430\text{L}/\text{min}$, 燃气流量 $35.5\text{L}/\text{min}$, 喷涂距离 161mm 。考虑到如图5和图6所示的喷涂距离对磨损失重量的影响, 在对上述参数进行实验验证时, 在保持气体流量为计算值的条件下, 将喷涂距离调整到 150mm 制备了试样, 该涂层的实测磨粒磨损失重量为 21.0mg , 运用回归公式和式(2)计算的结果为 21.7mg , 二者的相对误差为 3.2% 。

此外, 对氧气流量为 $430\text{L}/\text{min}$, 燃气流量为 $30\text{L}/\text{min}$, $37\text{L}/\text{min}$, $46\text{L}/\text{min}$, 喷涂距离为 180mm 条件下制备涂层的磨粒磨损性能变化规律进行了验证实验, 并与利用回归公式(式(1))的计算结果进行了比较, 结果如图7所示。表明实验结果与回归结果所呈现的规律变化趋势相同, 且差别较小。这表明上述回归公式所描述的涂层磨粒磨损性能随氧气流量、燃气流量和喷涂距离的变化规律是有效和显著的。

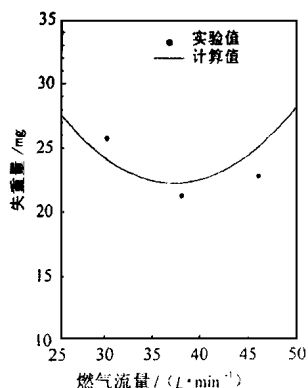


图7 燃气流量对涂层磨损失重量的影响
(氧气流量 $430\text{L}/\text{min}$, 180mm)

3 结论

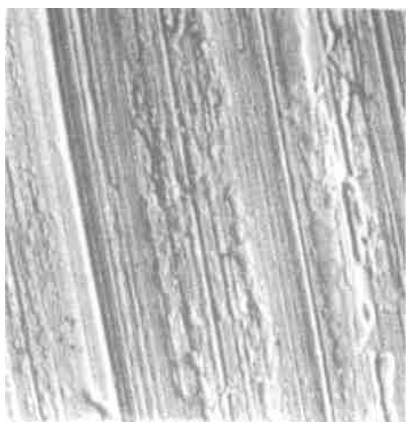
利用正交回归实验设计方法获得了HVOF喷

涂 $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ 涂层磨粒磨损性能与氧气流量、燃气流量和喷涂距离三个喷涂工艺参数之间的二次回归公式, 显著性检验和实验验证表明, 该公式能可靠地表征喷涂工艺参数对涂层磨粒磨损性能的影响规律。结果表明, 对于HVOF喷涂 $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ 涂层, 氧气流量、燃气流量和喷涂距离对涂层的磨粒磨损性能具有较大影响, 且燃气流量和喷涂距离对磨损失重量的影响具有一定的交互作用, 适中的氧气流量和燃气流量以及较小的喷涂距离有利于制备耐磨粒磨损性能良好的涂层。

参考文献:

- 1 徐滨士, 李长久. 热喷涂技术的应用与发展, 王守业, 王麟书. 第八届全国焊接会议论文集, 北京, 1997: 149 ~ 155
- 2 Beczkowiak J, Fischer J, Kellerer H etc. Advanced carbides and borides for wear resistant coatings properties. In: Ohmori A ed. Proceedings of ITSC'95. Kobe: May 1995: 1033~ 1057.
- 3 Hwang S Y, Seng B Q. Characterization of build-up resistant plasma sprayed coatings for hearth rolls. In: Ohmori A ed. Proceedings of ITSC'95. Kobe: May 1995: 59~ 63
- 4 Sasaki M, Kawakami F, Komaki C. Characterization of HVOF sprayed $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ coating. In: Berndt C C ed. Proceedings of the International Thermal Spray Conference and Exposition. Orlando Florida, USA: 28 May ~ 5 June 1992: 165 ~ 170
- 5 李长久等. 超音速火焰喷涂条件对 $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ 涂层性能的影响, 王守业, 王麟书. 第八届全国焊接会议论文集, 北京 1997: 417~ 422
- 6 Srinibasa Rao D, Sen D, Somaraju K R C, etc. Influence of powder particle velocity and temperature on the properties of $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ coating obtained by detonation gun. In: Berndt C C ed. Proceedings of ITSC'98. Nice France: 25~ 29 May 1998. 385~ 393
- 7 Vuoristo P, Niemik M, Makela A etc. Abrasion and erosion wear resistance of $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ coatings prepared by detonation and high velocity oxy-fuel spraying. In: Berndt C C and Sampath S, Proceedings of the 7th National Thermal Spray Conference. Boston, Massachusetts: 20~ 24 June 1994: 124~ 126
- 8 李长久, 大森明, 园田良夫. 碳化物颗粒尺寸对超音速火焰喷涂涂层形成的影响. 表面工程, 1997, (2): 22~ 27.

(下转第29页)



滑环材料的磨痕照片

图4 材料的磨痕照片

电刷-滑环材料表面仅有细的划痕, 但无深的划痕和粘着点, 也无电弧坑。说明 $\text{Ag-Ta-MoS}_2\text{-G}$ 电刷材料, 除了有优异的电性能外, 还具有良好的摩擦磨损性能。

3 结论

1 研制的 $\text{Ag-Ta-MoS}_2\text{-G}$ 电刷材料, 具有优异的电性能和良好的摩擦磨损性能。

2 Ag 作为电刷的基体材料, 起着导电和支撑负荷的作用; Ta 均匀分布于银基体中, 作为耐磨相; MoS_2 和石墨起润滑作用, 而且石墨还具有灭弧作用。

3 经 100h 磨损试验, 电刷材料仍保持良好的电性能和低的磨损率。

4 电刷滑环材料材料表面有细的划痕, 无深的划痕和粘着点, 也无电弧坑。

参考文献

- 1 Robe E W. UKAEA, Risley, UK, 1983 12 ESA: 9
- 2 Behrens et al IEEE Tr CPM T, PartA, 1994, 17(1): 24
- 3 L Li, Member, IEEE, Tr CPM T, PartA, 1997, 20(1): 3
- 4 陈文革 机械工程材料, 1998, 22(5): 47

STUDY ON STRUCTURES AND PROPERTIES OF SILVER- BASED BRUSH MATERIALS

Zheng Ji, Gao Houxu, Li Baoyin

ABSTRACT The best brush material was selected from a series of silver- based brush materials by investigating the electric, frictional and wear properties of them, and the coupling material of the brush- coin- silver was analyzed. The testing results show that excellent electric, frictional and wear properties can be obtained when $\text{Ag-Ta-MoS}_2\text{-G}$ brush is coupled with coin- silver slip- ring. The relationship between the surface microstructures and the properties of these materials was studied, too.

KEYWORDS brush material, slip- ring, friction, wear

Correspondent: Zheng Ji, College of Material, Tianjin University, Tianjin 300072

(上接 15 页)

STUDY OF WEAR PERFORMANCE OF HVOF- SPRAYED $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ COATINGS BASED ON ORTHOGONAL REGRESSION EXPERIMENTAL DESIGN METHOD

Ji Gangchang, Wang Yuyue, Li Changjiu, K. Sonoya

ABSTRACT Based on the orthogonal regression experimental design method, the abrasive wear performance of the HVOF- sprayed $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ coatings deposited under different flows of both propane and oxygen and spray distances is systematically investigated. The optimum spraying parameters and the quantitative relations between abrasive wear weight loss and spraying parameters are obtained. It is shown that the flows of both propane and oxygen and spray distance have an interaction on the abrasive wear performance of the coatings. The influence of the flows of both propane and oxygen on the abrasive wear performance is comparatively significant and the moderate flows of both propane and oxygen are beneficial to depositing $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ coatings with good abrasive wear resistance.

KEYWORDS orthogonal regression experimental design method, high velocity oxygen fuel spray, $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ coating, abrasive wear

Correspondent: Ji Gangchang, Department of Material processing and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049