

文章编号:1673-9981(2018)03-0205-05

# 采用超音速火焰喷涂制备抗高温氧化、 磨损涂层的研究及应用

高海青<sup>1,2</sup>, 乐有树<sup>3</sup>, 李运初<sup>1,2</sup>

1. 广东省新材料研究所, 广东 广州 510650; 2. 广州市天河区金棠表面工程技术有限公司, 广东 广州 501640;  
3. 广东开放大学, 广东 广州 510091

**摘要:**采用超音速火焰喷涂技术在 2Cr12NiMoWV 不锈钢基体表面制备了 NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 涂层, 并对涂层的微观结构、力学性能、摩擦磨损性能进行了研究. 结果表明: 所制备的涂层结构致密、孔隙率低, 与基体的结合强度大于 79 MPa, 显微硬度可达 860 Hv 以上; 高温韧性和抗高温耐磨性能好, 在高温下摩擦磨损性能相较于基体得到显著提高, 可应用于抗高温氧化与耐高温磨损的环境中. 经实践检验, 该涂层可解决高压主汽门卡涩问题.

**关键词:**超音速火焰喷涂; 高压主汽门; 火电厂; 卡涩

**中图分类号:** TG174.442

**文献标识码:** A

高压主汽门是火力发电厂的重要设备之一, 主汽门的功能是在需要时起到紧急阻断进汽的作用, 是汽轮机防止超速的最关键保护装置. 高压主汽门、调节门的卡涩事件屡见不鲜, 最常见的是高温产生的氧化皮造成阀杆与阀套间的卡涩, 以及高压主汽门、调节门阀套、阀杆同心度改变, 使动静间隙消失而造成的卡涩. 同时, 高温产生的氧化皮还能造成阀杆表面划伤磨损. 金属高温氧化现象是普遍存在的, 由于结构上的原因, 高压主汽门对蒸汽介质有节流调节作用, 这是加速金属氧化的一个重要因素<sup>[1]</sup>.

处理高压主汽门氧化皮卡涩的常规措施, 就是大修时将阀座少量的氧化皮用金相砂纸抛光并清理干净. 阀芯密封面上的灰白色鳞片状氧化皮用车床去除. 阀杆与阀杆套表面及接触面的灰色鳞片状氧化皮用砂纸打磨. 用车床或用砂纸打磨去除氧化皮的方法, 可使阀芯和阀芯套筒之间恢复正常间隙, 但这样处理只是临时性的解决了问题, 机组在运行过程中还会重新产生氧化皮, 往往一个大修期还没到就又会产生卡涩, 给机组的安全运行带来隐患, 而且打磨抛光的次数多了, 阀杆、阀套等尺寸会变小, 造

成他们之间的间隙变大, 从而使阀门失效并报废, 这也会造成较大的经济损失.

热喷涂技术是一种将涂层材料(粉末或丝材)送入某种热源(电弧、燃烧火焰、等离子体等)中熔化, 并利用高速气流将其喷射到基体材料表面而形成覆盖层的工艺<sup>[2]</sup>. 热喷涂工艺操作简便, 涂层材料种类多. 特别是高速热喷涂设备的相继问世, 如高能等离子喷涂、超音速火焰喷涂(HVOF, HVAF)设备的出现, 使得热喷涂涂层孔隙多、结合强度不高的弱点得以克服, 涂层质量有了质的飞跃. 特别是超音速火焰喷涂技术(HVOF 及 HVAF), 其制备的涂层孔隙率小于 1%, 结合强度大于 70 MPa, 涂层沉积率高<sup>[3]</sup>. 研究表明<sup>[4-5]</sup>, 热喷涂涂层不但能加工到像镀铬层一样的镜面光洁度, 而且在硬度及耐磨性能等方面还超过镀铬层, 在很多场合完全可以取代电镀硬铬.

广州市天河区金棠表面工程技术有限公司与粤电集团的多家电厂合作, 根据主汽门的使用工况开发了一种抗高温氧化磨损涂层. 该涂层采用超音速火焰喷涂工艺制备, 在 850 °C 下不产生氧化皮, 而且

收稿日期: 2018-05-31

作者简介: 高海青(1975-), 男, 山西省寿阳县人, 工程师, 本科.

硬度高、耐磨性能好,可以从根本上解决主汽门因高温氧化磨损产生的卡涩问题。

## 1 试验

### 1.1 试样制备

试样基体材料为与主汽门材质相同的 2Cr12NiMoWV 不锈钢,试样尺寸为标准的硬度试样及杯突试验试样和金相试样。选用自主研制的 NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 热喷涂粉末,其粒度为 15~45 μm,具体成分列于表 1。

表 1 NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 粉末组成成分  
Table 1 NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> powder composition

元素	Ni	C	Fe	Si	Cr
含量 w/%	19.5	8.7	1.1	0.6	余量

首先对基体表面进行除油清洗及喷砂粗化,然后用美国进口的 Jet-Kote Surface System II 型 HVOF 超音速火焰喷涂设备制备 NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 涂层,涂层厚度为 0.1~0.2 mm,喷涂工艺参数列于表 2。用于摩擦磨损试验的涂层表面需先用金刚石砂纸磨样,抛光至表面粗糙度 0.8 μm 以下。

表 2 喷涂工艺参数  
Table 2 The spraying processing parameter

氧气量 /(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	丙烯流量 /(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	送粉量 /(g·min <sup>-1</sup> )	喷距/mm
34.98	16.2	45	200

### 1.2 试验方法

用 LEICA DMIRM 型倒置式金相显微镜,对涂层表面及截面的微观结构进行观察;基于涂层截面金相照片,用 Q550 MW 图象分析仪测定涂层的孔隙率。在 GP-TS2000M 型万能试验机上进行杯突和结合强度的测试,用直径 20 mm 的钢球,以 6 mm/min 的速度向杯突板无涂层面压入 10 mm 的深度,观察突出部分的表面情况,按照标准 ASTM C633 进行结合强度的测试。用 MH-5D 型数字显微硬度计测试涂层横截面的显微硬度,加载载荷为 300 g,加载时间为 15 s。用 UMT-3 型摩擦磨损试验机对基体(2Cr12NiMoWV 不锈钢)和 NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 涂层的摩擦磨损性能进行测试,样品台

转速为 200 r/min,载荷为 5 kg,高温(570 °C)摩擦副为直径 4 mm 的 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 陶瓷球,时间为 20 min。

## 2 结果与讨论

### 2.1 涂层的微观结构

图 1 为 NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 涂层金相组织形貌。从图 1 可见,该涂层致密、均匀,无污染物涂层的孔洞、未熔颗粒等均满足要求。经测算,涂层的孔隙率为 0.6%~0.7%。

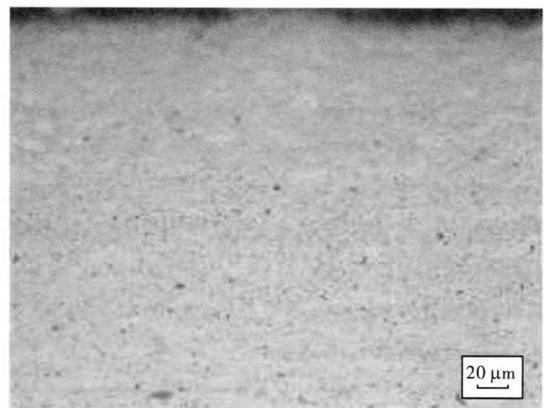


图 1 NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 涂层金相组织形貌

Fig. 1 NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> coating metallographic organization

### 2.2 力学性能

在 GP-TS2000M 型万能试验机上进行杯突和结合强度的测试,观察突出部分的表面情况,要求目视允许有可见的毛细裂纹,不允许出现涂层与基体分离的现象。图 2 为 NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 涂层杯突试验后的表面形貌。从图 2 可见,涂层表面整体连续均匀,只

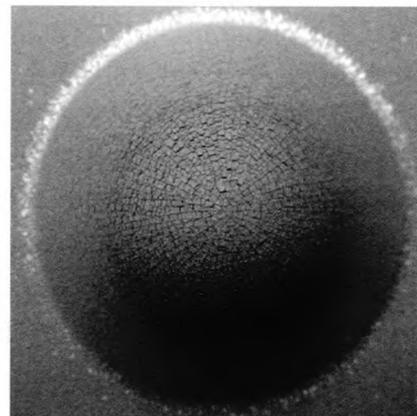


图 2 NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 涂层杯突表面形貌

Fig. 2 Erichsen test images of the NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> coating

有可见的毛细裂纹,无涂层剥离现象,这说明 NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 涂层韧性较好。

表3为 NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 涂层的结合强度及显微硬度

试验结果。由表3可知, NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 涂层结构致密,界面状态很好,与基体结合强度高,平均硬度值高达 860 Hv 以上。

表3 NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 涂层的结合强度及显微硬度 Hv(0.3,15)值

Table 3 The NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> coating binding strength and micro-hardness Hv(0.3,15)

涂层	涂层厚度/ mm	结合强度/MPa		显微硬度(Hv)	
		测定值	平均值	测定值	平均值
NiCr-Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	0.1~0.2	77.9,80.8,78.8	79.2(胶断)	817,894,908,818,824,924	864

### 2.3 涂层高温摩擦磨损性能

对基体和 NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 涂层进行高温摩擦磨损测试,结果列于表4。由表4可知,基体与涂层的摩擦系数相近,但是两者之间的磨损程度存在明显差异,基体磨损失重达到 14.4 mg,而涂层失重为 1.7 mg,仅为基体的 11.8%。表明,在主汽门零部件表面制备 NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 涂层,可以显著提高零件的耐磨性能。

表4 高温摩擦磨损测试结果

Table 4 High temperature friction and wear test

样品	摩擦系数	磨损失重/mg
基体(2Cr12NiMoWV 不锈钢)	0.60	-14.4
NiCr-Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> 涂层	0.57	-1.7

图3为高温下 NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 涂层的摩擦系数曲线。从图3可见, NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 涂层磨合磨损过程较长,这是由于涂层表面存在未熔融或半熔融微凸体而较为粗糙。当磨球与涂层表面刚接触时,实际接触面积远远小于名义接触面积,在微观应力的作用下微凸体的形变使得阻力增加。当磨球与涂层表面的接触面积随时间增加而逐渐变大时,摩擦系数亦趋于稳定,在测试后期摩擦系数有下降的趋势,说明该涂层具有较好的抗高温摩擦磨损性能。

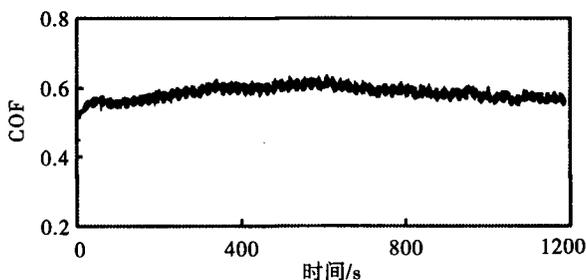


图3 高温下 NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 涂层的摩擦系数

Fig. 3 Friction coefficients of NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> coating

图4为高温摩擦磨损试样。从图4(a)可见,无 NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 涂层试样的磨损区域磨痕宽度较大,表面凹凸不平。这是由于在高温环境下, 2Cr12NiMoWV 不锈钢基体出现软化,使粘着趋势上升而抗高温断裂的抗力降低。在载荷的不断作用下基体发生塑性变形,在基体内部缺陷处萌生裂纹并扩展,进而在磨痕的中心部形成剥落蚀坑,在边缘可见材料因塑性变形而挤压的痕迹。从图4(b)可见,有 NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 涂层的试样表面比较平整且磨损区域磨痕较窄,磨损较少,表明有 NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 涂层试样表面摩擦磨损后的失重小,进一步说明该涂层具有较好的抗高温摩擦磨损性能。

从 NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 涂层的性能和高温磨损试验结果来看,说明采用超音速火焰喷涂制备 NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 防护涂层,可以有效的解决主汽门的卡涩、磨损及划伤问题。

### 3 工艺应用

广州市天河区金棠表面工程技术有限公司在 2010 年对粤电集团某电厂的主汽门阀帽进行表面强化,采用超音速火焰喷涂技术制备 NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 涂层。首先对主汽门阀帽磨损、卡涩的部位进行车削加工,去除表面氧化皮及其它杂质,再对阀帽的车削部位进行清洗及喷砂净化处理,然后采用热喷涂技术在阀帽车削部位表面制备 NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 涂层,最后对阀帽表面的 NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 涂层进行磨削加工及抛光处理,达到所要求的尺寸精度和表面粗糙度。采用上述工艺进行表面强化的阀帽,在火电厂使用一个大修周期后,拆开主汽门检查发现,主汽门阀帽表面的涂层完好,没有产生氧化皮,没有磨损、划伤(图5)。

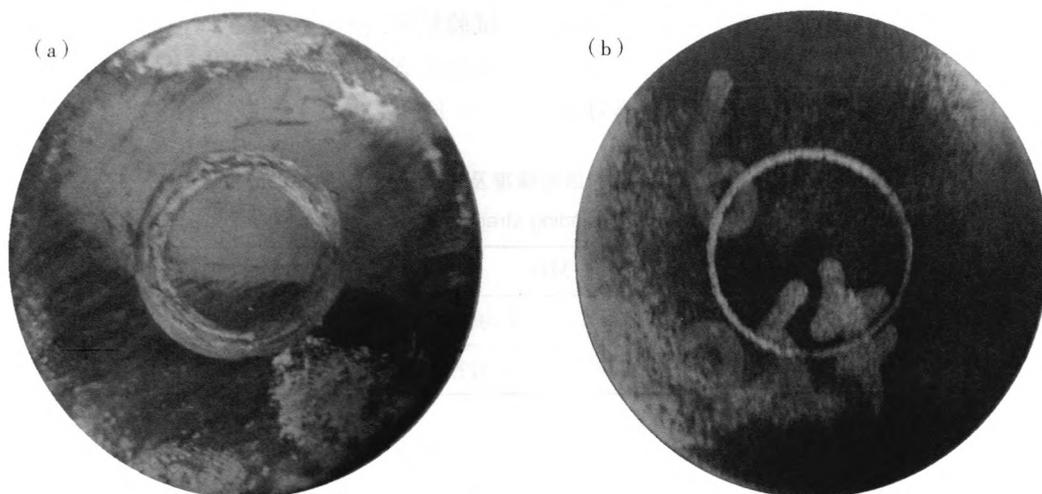


图4 高温摩擦磨损试样

Fig. 4 High temperature friction and wear sample

(a) 2Cr12NiMoWV 不锈钢试样; (b) NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 涂层试样

(a) 2Cr12NiMoWV stainless steel sample; (b) NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> coating sample

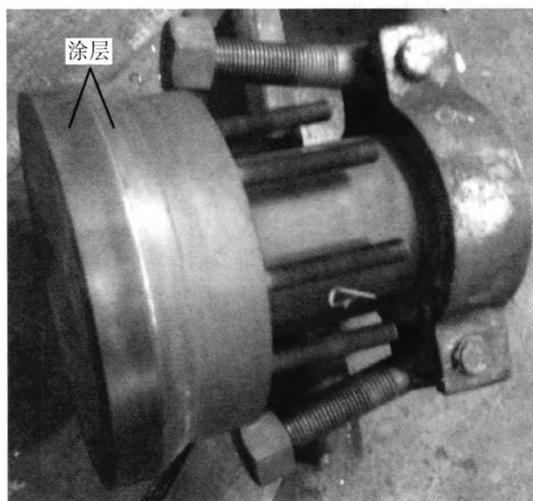


图5 使用一个大修周期后的主汽门阀帽(喷涂 NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 涂层)

Fig. 5 The main valve cap after using a major repair period (spraying NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> coating)

## 4 结论

采用超音速火焰喷涂制备的 NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 涂层致密性好、硬度高、与基体的结合强度高,高温韧性和抗高温氧化性能好。该涂层在高温下摩擦磨损性

能大大优于 2Cr12NiMoWV 不锈钢,表明该涂层可以应用于抗高温氧化与耐高温磨损的环境中。

采用超音速火焰喷涂技术在火电厂高压主汽门阀帽、阀芯等零部件表面制备一层 NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 涂层进行表面强化,解决了火电厂因高温氧化及摩擦磨损、划伤造成的主汽门失效问题,延长主汽门的使用寿命,为火电厂节约了成本、提高了生产效率。

### 参考文献:

- [1] 刘平,吕鹏飞. 高压主汽门及调门卡涩的原因分析与防范措施[J]. 华电技术, 2011, 33(7): 56-58.
- [2] 戴达煌,周克崧,袁镇海. 现代材料表面技术科学[M]. 北京:冶金工业出版社, 2004.
- [3] STARTWELL B D. Thermal spray coatings as alternative to hardchrome plating[J]. Welding, 2000, 79(7): 39-43.
- [4] SCHROEDER M, UNGER R. Thermal spray coatings replace hardchrome[J]. Advanced Materials Processes, 1997, 152(2): 19-21.
- [5] ERNING U, NESTLER D C, TAUCHERT G. HVOF coatings for hardchrome replacement: properties and applications [C]//Proceedings of the United Thermal Spray Conference'99. Dusseldorf: ASM International, 1999.

## Study and application of high temperature oxidation and wear resistant coatings prepared by supersonic flame spraying

GAO Haiqing<sup>1,2</sup>, YUE Youshu<sup>3</sup>, LI Yunchu<sup>1,2</sup>

1. *Guangdong Institute of New Materials, Guangzhou 510650, China*; 2. *Guangzhou Tianhe Jintang Surface Engineering Technology Company, Guangzhou 510650, China*; 3. *The Open University of Guangdong, Guangzhou 510091, China*

**Abstract:** In this study, the pre-mixed NiCr-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> powders were thermally sprayed onto 2Cr12NiMoWV stainless steel by the supersonic flame spraying technology. The coating microstructure, properties including mechanical, friction and wear properties were systematically investigated. The results shows that the coating structure is quite dense, low porosity, bonding strength is larger than 79 MPa, micro-hardness is higher than 860 Hv, high temperature toughness, high temperature wear resistance. The friction and wear properties are significantly improved compared with the substrate at high temperature. The coating can be used in environments that require high temperature oxidation resistance and high temperature wear resistance. It is proved by practice that the coating can solve the sticking problem of high pressure main valve.

**Key words:** supersonic flame spraying; high pressure main valve; heat-engine plant; sticking

---

(上接第 199 页)

## Solidified structure of ZL205A aluminum alloy thin-walled castings under vertical centrifugal casting process

XU Qin<sup>1</sup>, WANG Xing<sup>1</sup>, HE Shilei<sup>2</sup>, ZHANG Lanquan<sup>1</sup>

1. *School of Mechanic and Electrical Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China*;  
2. *CITIC Heavy Industries, Luoyang 471003, China*

**Abstract:** The solidified structure of the ZL205A aluminum alloy thin-walled castings under vertical centrifugal casting process were simulated by the CAFÉ method, and the solidified structure with different technological parameters are obtained. The results reveal that the solidified structures of thin-walled ZL205A aluminum alloy castings are mostly fine equiaxed grains with homogeneous crystal size and few coarse column grains. The solidified structures change with the variation of the technological parameters. The grain sizes of the solidified structures increase with the increment of mould rotational speed, and there is a slight increase when increasing the melt pouring temperature. Furthermore, the increase of the mould preheats temperature affect the grains not apparently.

**Key words:** ZL205A alloy; vertical centrifugal casting; thin-walled castings; solidified structure