

文章编号: 0258-7025(2004)09-1143-06

# Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 对激光熔覆钴基合金涂层组织 与性能的影响

何宜柱, 斯松华, 徐 锐, 袁晓敏

(安徽工业大学材料科学与工程学院, 安徽 马鞍山 243002)

**摘要** 采用 5 kW CO<sub>2</sub> 连续激光在低碳钢表面激光熔覆了钴基合金涂层(Co60)及添加 25% Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> (质量分数)的钴基合金复合涂层(Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>/Co), 对比研究了 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 对熔覆涂层的组织、显微硬度及耐腐蚀磨损性能的影响。结果表明, 在本试验条件下可得到熔覆质量良好的 Co60 及 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>/Co 涂层。Co60 涂层组织主要由大量初生枝晶  $\gamma$  固溶体及其间的共晶组织  $\gamma$  与 (Cr, Fe)<sub>7</sub>C<sub>3</sub> 组成。Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>/Co 涂层组织主要由未熔 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, 大量杆状和块状的富 Cr 碳化物及其间的非常细小的枝晶及其共晶体组成, 主要组成相为  $\gamma$ -Co, Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>, Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub> 和未熔 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 颗粒。添加的 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 改变了 Co60 涂层的凝固特征, 使 Co60 涂层的亚共晶结晶方式转变为 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>/Co 涂层的过共晶结晶方式。未熔 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 粒子起到了非自发形核作用, 在其周围形成了许多富 Cr 碳化物, 并细化了涂层枝晶组织。Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>/Co 涂层的显微硬度以及在不同腐蚀介质中的耐磨性比 Co60 涂层都有明显提高。

**关键词** 激光技术; 激光熔覆; 钴基合金; Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>; 耐磨性

**中图分类号** TG 142.33; TG 665 **文献标识码** A

## Effect of Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> Particles on Microstructure and Corrosion-Wear Resistance of Laser Cladding Co-based Alloy Coating

He Yi-zhu, Si Song-hua, XU Kun, YUAN Xiao-min

(School of Material Science and Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan, Anhui 243002, China)

**Abstract** Laser cladding Co-based alloy coating (Co60) and Co-based alloy composite coating with 25 (mass)% Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> particles (Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>/Co) on low carbon steel substrate were obtained by 5-kW CO<sub>2</sub> continuous wave laser. Effects of Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> particles on microstructure, micro hardness and corrosion-wear resistance of Co-based alloy coating were discussed. The results showed that the good laser cladding coatings were obtained in the test conditions. The Co60 coating is consisted of many  $\gamma$ -Co dendritic solid solution and eutectic structure ( $\gamma$ -Co and (Cr, Fe)<sub>7</sub>C<sub>3</sub>) between the dendrites. The Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>/Co coating is consisted of undissolved Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> particles, many different shape rich-chromium carbides (M<sub>7</sub>C<sub>3</sub>, M<sub>23</sub>C<sub>6</sub>) and very finer dendrite and eutectic structure between the carbides. Addition of Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> particles alters the solidification characteristic of the laser cladding coating Co60, transforming the hypo-eutectic crystal mode of Co60 to hyper-eutectic crystal mode of Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>/Co. Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> particles play a role of non-spontaneity nucleation, and many rich-chromium carbides are formed around Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> particles, fining the dendrite structure. Micro-hardness and corrosion-wear resistance in different corrosion media of the Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>/Co coatings are obviously higher than those of Co60 coatings.

**Key words** laser technique; laser cladding; Co-based alloy; Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>; wear resistance

收稿日期: 2003-11-03; 收到修改稿日期: 2004-03-08

基金项目: 安徽省科技厅重点科研项目(04022004)及安徽省教育厅自然科学研究项目(2003kj058)资助课题。

作者简介: 何宜柱(1962—), 男, 安徽合肥人, 安徽工业大学材料科学与工程学院教授, 工学博士, 主要从事钢铁材料以及材料表面改性的研究与应用。E-mail: heyizhu@ahut.edu.cn

## 1 引 言

激光熔覆是一种新型的金属材料表面改性技术,利用高功率激光的快速熔覆效应,可以在低成本基材表面获得多种高性能的涂层<sup>[1,2]</sup>。目前常用的熔覆材料有铁基、镍基和钴基合金粉末等。钴基合金具有良好的高温性能和较好的耐蚀耐磨性能,常被应用于石化、电力、冶金等工业领域的耐高温和耐蚀耐磨场合。钴基合金粉末的种类很多,有自熔性和非自熔性钴基合金粉末,前者熔覆特性较好但熔覆层的高温性能相对较低。后者熔覆特性相对较差(熔覆温度较高易引起变形与开裂)但熔覆层具有较好的高温性能;有较高硬度(碳铬成分较高)和较低硬度(碳铬成分较低)粉末,高碳铬成分的钴基合金熔覆层耐磨耐蚀性好,但由于激光熔覆钴基合金涂层的组织具有典型的柱状和树枝状枝晶生长特点,初生或共晶碳化物存在于大量初生 $\gamma$ 枝晶之间<sup>[3,4]</sup>,使涂层在硬度提高的同时熔覆特性变差,且在高应力磨损时因晶界存在网状的共晶碳化物而产生开裂反而影响其性能;低碳铬的钴基合金由于其硬度较低耐磨性又相对较差。因此为了改善钴基合金涂层的组织和性能,在钴基合金中加入不同添加物(尤其是陶瓷相粒子)的复合涂层的研究成为新的研究热点。已有研究表明在钴基合金中加入 WC, B<sub>4</sub>C 等陶瓷粒子的复合涂层,一方面改变了钴基合金的典型的较粗大柱状(或树枝状)枝晶组织,另一方面未熔陶瓷粒子以及陶瓷粒子溶解后重新形成的碳化物,在改善组织的同时也显著地提高涂层的磨损性能<sup>[5~8]</sup>。

一些石油、化工设备的许多金属零部件长期遭受腐蚀和磨损的共同作用,这就要求钴基合金复合涂层中具有良好的耐腐蚀磨损性能。Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 陶瓷具有高硬度、高熔点, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 涂层作为热喷涂材料已在发电、冶金和航空等领域广泛应用。Cr 是一个有效提高耐蚀性的元素及较强的碳化物形成元素,同时 C, Cr 也是固溶强化元素,用 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 来增强钴基合金熔覆层势必会显著影响钴基合金涂层的组织及其腐蚀磨损性能。用 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 作为陶瓷增强相的激光熔覆镍基复合涂层已有研究,研究表明,选择适当的激光工艺参数,可以得到熔覆质量良好的涂层,其显微硬度、耐冲蚀磨损性能都明显提高<sup>[9~12]</sup>。但到目前为止钴基合金中加入 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 的激光熔覆复合涂层的研究尚未见报道,研究 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 对钴基合金涂层组织及耐腐蚀磨损性能的影响具有一定的学术价值和应

价值。

本文利用 5 kW CO<sub>2</sub> 连续激光器在低碳钢表面激光熔覆了钴基合金涂层(Co60)及添加 25% Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>(质量分数)的钴基合金复合涂层(Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>/Co),并研究了 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 对熔覆层的组织、显微硬度及耐腐蚀磨损性能的影响。

## 2 试验方法

试验基材为低碳钢,尺寸为 200 mm×60 mm×10 mm,表面磨光。钴基合金粉末粒度为 53~120  $\mu\text{m}$ ,其平均化学成分(wt.-%)为 0.27 C, 5.4 Mo, 2.27 Ni, 0.5 Fe, 28.6 Cr, 0.9 Si, 余量为 Co。Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 陶瓷粉末采用 NiCrCr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 复合粉末(85% Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>(质量分数)),其粒度为 40~82  $\mu\text{m}$ 。将添加 25% Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 的钴基合金复合粉末充分研磨混合后,均匀地平铺在经过预热的低碳钢试块表面,厚度约为 1 mm。

用 5 kW CO<sub>2</sub> 激光器对预制的钴基合金粉末和添加 25% Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 的 Co 基合金复合粉末进行单层及双层(磨损试验用)多道熔覆处理,熔覆时用氩气保护熔池。本试验对 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>/Co 涂层的熔覆工艺参数进行了优化,功率过低,界面结合不好,熔覆层表面不平整;功率过高,则未熔 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 含量大大减少而影响性能(另文发表)。其优化工艺参数为:激光功率 2.4 kW,扫描速率 250 mm/min,搭接率 40%,光斑直径 4.5 mm。分别得到熔覆质量良好的钴基合金涂层(Co60 和(Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>/Co)涂层),单层熔覆层厚度为 0.5~0.6 mm。沿垂直于激光熔覆扫描方向的横截面切取金相试样;X 射线衍射(XRD)试样为 25 mm×25 mm×10 mm,涂层表面为 25 mm×25 mm,磨平后厚约 0.3~0.4 mm。

用 OLYPUMS-PEM3 光学显微镜(OM)及 JEM-35 型扫描电镜(SEM)进行组织形貌观察;用能谱仪(EDS)进行微区成分分析;用 Dmax-II 型 XRD 进行组成相分析;用 HV-1000 型显微硬度计测量涂层的显微硬度。

耐腐蚀磨损试验在自制磨损机上进行,其工作原理见图 1。转速为 40 r/min,载荷为 40 N。用较细的石英砂,分别加入 H<sub>2</sub>O, 5% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 及 5% NaOH 水溶液形成浆料,砂与水(或水溶液)的体积比约为 4:3。用感量为 0.1 mg 的 DT-100 型分析天平称重,每 10 min 称重一次,求得 4 次失重的平均值。磨损速率(W)用平均失重除以磨面面积及磨

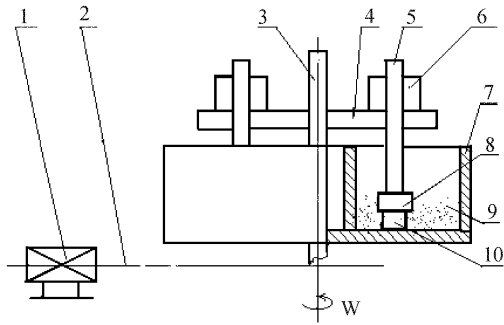


图 1 自制磨损试验机工作原理图

1: 电机; 2: 传动轴; 3: 主轴; 4: 旋转横臂; 5: 垂直臂; 6: 砝码; 7: 料盘; 8: 夹具; 9: 水砂混合物; 10: 磨损试样

Fig. 1 Schematic diagram of home-made wear tester  
1: motor; 2: transmission shaft; 3: spindle; 4: rotate crossbeam; 5: vertical arm; 6: poise; 7: materials tray; 8: clamping apparatus; 9: mixture; 10: wear sample

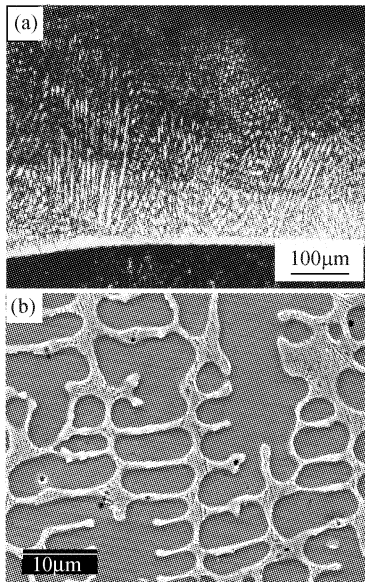


图 2 激光熔覆 Co60 涂层的剖面组织

(a) 光学显微照片; (b) 扫描电镜照片

Fig. 2 Microstructure of laser cladding Co60 coating

(a) OM; (b) SEM

损时间来表示,单位为  $\text{g} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。耐磨性用磨损速率的倒数 ( $W^{-1}$ ) 表示。

### 3 试验结果与分析

图 2 为激光熔覆 Co60 涂层(单层)沿垂直于激光扫描方向剖面的组织。图 2(a)中基材与涂层界面处存在一条白亮带(熔合区),显示出涂层与基材之间具有良好的冶金结合。Co60 涂层组织具有明显的枝晶生长特征。合金涂层的中下部为基本沿着

垂直于界面方向生长的较粗大柱状枝晶,这是因为在熔池底部以微熔基材为核心形核,且由于基材的传热作用,使靠近界面的液相一侧存在很大的温度梯度,形成大量沿热流方向生长的粗大柱状枝晶;在合金涂层中上部,基材的冷却作用减弱和表面冷速快的影响,由柱状枝晶过渡到树枝状晶,枝晶生长方向也相对紊乱<sup>[3,4]</sup>。

图 2(b)为 Co60 涂层的典型 SEM 组织形貌。可见 Co60 涂层主要以亚共晶方式结晶,在初生固溶体枝晶间存在大量的网状共晶组织,且初生固溶体占有较高比率。

图 3 为激光熔覆  $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{Co}$  涂层(单层)沿垂直于激光扫描方向剖面的组织。图 3(a)为低倍金相组织,基材与涂层界面处也存在一条白亮带,说明涂层与基材之间熔合良好,涂层中不存在气孔与裂纹。 $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{Co}$  涂层组织与 Co60 相比发生了明显变化,涂层没有明显的枝晶生长方向。涂层中分布着许多不同大小的白亮色颗粒,且以白亮色颗粒为中心,周边有大量呈放射状的杆状组织,在熔覆涂层的底部和靠近表面区域白亮色颗粒较少。另外涂层中存在大量的多边形块状组织。

因此  $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{Co}$  涂层实际上可分为三层:涂层下部区(靠近熔合区),其组织为细密的枝晶区,主要是基材对合金熔体的快速冷却所致(图 3(b))。图 3(c)是涂层中部区暗黑色颗粒及周围的组织。图 3(d)是涂层上部区的组织,均存在杆状组织和块状组织。

可见激光熔覆  $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{Co}$  涂层主要是由许多的较粗大颗粒(图 3 中标为 A)、杆状组织(标为 B)及块状组织(标为 C)以及其间的非常细小的枝晶(标为 D)及其共晶组织(标为 E)组成。其微区能谱成分分析结果见表 1。

表 1  $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{Co}$  涂层中微区成分能谱分析(wt.-%)

Table 1 EDS of the microzone of  $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{Co}$  coating (wt.-%)

|   | C     | Mo   | Cr    | Fe    | Co    |
|---|-------|------|-------|-------|-------|
| A | 20.65 | —    | 79.35 | —     | —     |
| B | 29.23 | 1.45 | 57.11 | 6.48  | 5.72  |
| C | 26.89 | 1.51 | 59.41 | 7.15  | 5.05  |
| D | 5.37  | 3.96 | 25.76 | 15.40 | 49.51 |
| E | 13.39 | 3.58 | 29.40 | 12.51 | 41.12 |

从表 1 可见,较粗大颗粒 A 由 C 及 Cr 两元素组成,应为未熔  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  粒子;杆状组织 B 及多边形块状组织 C 中 Cr 含量和 C 含量明显较高,均应为固

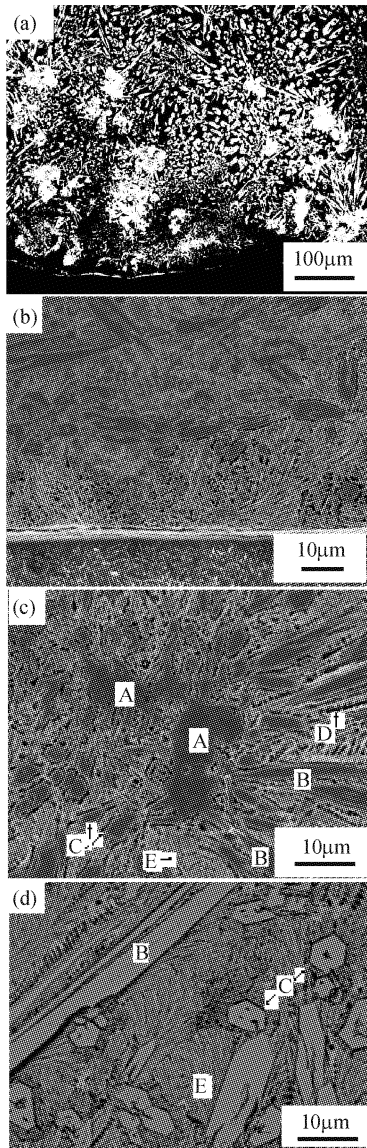


图3 激光熔覆  $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{Co}$  涂层的剖面组织  
(a) 涂层总貌; (b) 靠近熔合区;  
(c) 涂层中部区; (d) 涂层上部区

Fig. 3 Microstructure of laser cladding  $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{Co}$  coating  
(a) total of the coating; (b) near bonding zone;  
(c) intermediate zone; (d) upper zone

溶有 Mo, Co 等元素的 Cr 的碳化物。D 区及 E 区 Co 含量明显较高, 且固溶有较高的 Cr, 分别为固溶有 Cr 及其他元素的细小枝晶及共晶组织。

图 4 为 Co60 涂层和  $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{Co}$  涂层的 X 射线衍射图谱。结果表明, Co60 涂层的主要组成相为  $\gamma\text{-Co}$  及  $(\text{Cr, Fe})_7\text{C}_3$  (图 4a), 说明 Co60 涂层在快速凝固过程中先析出初生  $\gamma$  枝晶固溶体, 然后在随后的冷却过程中在枝晶间形成共晶组织 ( $\gamma + \text{M}_7\text{C}_3$  型碳化物)。  $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{Co}$  涂层主要组成相为  $\gamma\text{-Co}$ ,  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ ,

$\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  和  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  组成 (图 4(b)), 说明激光熔覆  $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{Co}$  涂层中存在未熔  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  粒子, 且由于加入的  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  粒子的部分溶解, 使合金熔体中 Cr 和 C 的含量大大增加, 在凝固过程中形成了大量的固溶有其他元素的富 Cr 碳化物  $\text{M}_7\text{C}_3$  及  $\text{M}_{23}\text{C}_6$ 。未熔碳化物的存在和大量初生碳化物的析出, 使涂层中的枝晶及其共晶组织非常细小。

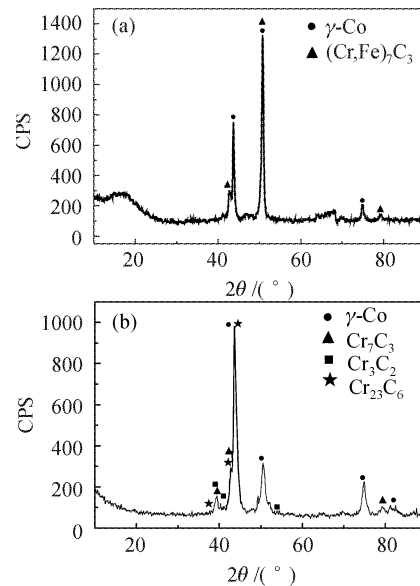
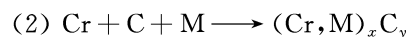
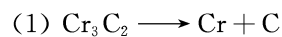


图 4 激光熔覆合金涂层 X 射线衍射图  
Fig. 4 XRD spectra of the laser clad coatings  
(a) Co60; (b)  $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{Co}$

在 Co 基合金中加入  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  后, 由于  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  的熔点高, 在激光熔覆过程中,  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  的存在显著地影响了钴基合金涂层的凝固特性。由于  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  的熔点高于钴基合金, 在激光熔覆时钴基合金先被熔解,  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  在合金熔体中表现为两种行为: 一是  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  完全熔解, 尤其是粒度较小的  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  或处于熔覆温度较高的涂层表面的  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ , 熔解后分解的 Cr 和 C 固溶于合金熔体中, 在随后的冷却时析出大量杆状和多边形块状的固溶有其他元素的 Cr 碳化物, 其变化过程如下:



式中 M 为其他元素, 如 Mo, Co, Fe 等;  $(\text{Cr, M})_x\text{C}_y$  为固溶有其他元素的 Cr 的  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  和  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  碳化物。二是  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  未完全熔解。图 3(a) 中的白亮色颗粒及图 3(c) 中的 A (SEM 中为暗黑色颗粒) 均为未熔  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ 。在激光束快速加热下, 尽管光束作用时间很短, 但熔体合金与  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  粒子的界面会

发生作用,熔池在温度场和浓度场的共同作用下熔体合金中的 Co, Fe, Mo 会向  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  粒子内层扩散,而  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  粒子表层的熔解使 Cr 和 C 向熔体合金内扩散,在  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  粒子周围形成一个 Cr, C 含量高的扩散带,在凝固过程中出现以未熔  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  为中心的初生的放射状杆状富铬碳化物。

分析认为,Co60 涂层的非平衡凝固是以亚共晶方式来结晶的,先析出大量  $\gamma$  初生固溶体,在随后的冷却中在  $\gamma$  枝晶间形成共晶组织;而  $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{Co}$  涂层的非平衡凝固实际上是以过共晶方式进行的。 $\text{Cr}_3\text{C}_2$  粒子熔解产生的 C 和 Cr 使熔池中的 Cr 和 C 含量显著升高,在凝固过程中一方面以未熔  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  为非自发形核核心形成了大量初生杆状的铬碳化物,也可在局部 Cr 和 C 含量高的区域形成杆状碳化物或块状的富铬碳化物。在随后的冷却过程中,在初生碳化物之间形成  $\gamma$  枝晶以及共晶组织。正是因为存在大量的未熔  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  以及凝固时析出的铬的  $\text{M}_7\text{C}_3$  型和  $\text{M}_{23}\text{C}_6$  型碳化物才使涂层的枝晶及其共晶组织相当细密(图 3 中的 E 区)。

图 5 为 Co60 涂层及  $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{Co}$  涂层的显微硬度沿层深的分布,Co60 涂层的平均硬度为 Hv447,  $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{Co}$  涂层的平均硬度为 Hv691,比 Co60 高出 50% 以上,因此  $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{Co}$  涂层的显微硬度比 Co60 涂层明显提高。

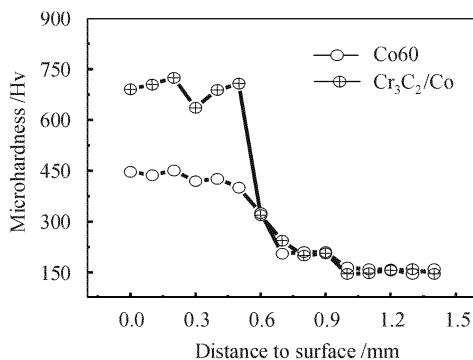


图 5 Co60 和  $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{Co}$  涂层的显微硬度沿层深的分布

Fig. 5 Micro hardness distribution of two coatings

图 6 为 Co60 及  $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{Co}$  涂层在不同介质中的耐腐蚀磨损性能的比较。可见激光熔覆  $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{Co}$  涂层在三种不同腐蚀介质中的耐腐蚀磨损性能均优于 Co60 涂层;在酸碱腐蚀介质中 Co60 及  $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{Co}$  涂层耐磨性相对于在水介质中较差。分析认为,Co60 涂层以  $\gamma\text{-Co}$  枝晶为主要组成相,枝晶间存在网状共晶体( $\gamma + \text{M}_7\text{C}_3$ ),耐磨性主要靠合金元素的固溶强化,快速冷却的细晶强化和网状共晶

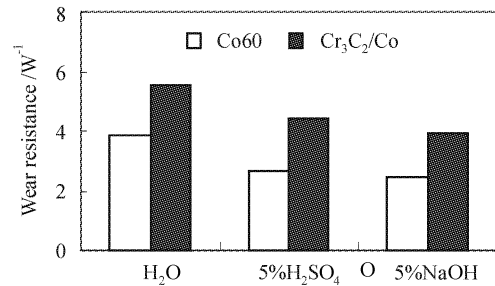


图 6 Co60 和  $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{Co}$  涂层的耐腐蚀磨损性能

Fig. 6 Corrosion wear resistance of the coatings

碳化物的骨架作用来体现,而  $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{Co}$  涂层以大量的未熔  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  和凝固时形成的铬的  $\text{M}_7\text{C}_3$  型和  $\text{M}_{23}\text{C}_6$  型碳化物以及其间非常细密的枝晶及共晶组织组成,且碳化物以  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  为核心的放射状碳化物的析出增强了涂层组织之间的结合力,并且大量多边形块状碳化物镶嵌在细小的共晶体中,从而大大地提高了其抗磨损能力。另外,由于  $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{Co}$  涂层比 Co60 中固溶有较高的 Cr 量,使得耐蚀性能提高,因此  $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{Co}$  涂层的耐腐蚀磨损性能优于 Co60 涂层。

## 4 结 论

在本试验条件下可得到熔覆质量良好的 Co60 及  $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{Co}$  涂层。Co60 涂层组织主要由大量初生枝晶  $\gamma$  固溶体及其间的共晶组织  $\gamma$  与  $(\text{Cr}, \text{Fe})_7\text{C}_3$  组成; $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{Co}$  涂层组织主要由未熔  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  颗粒、大量杆状和块状的富 Cr 碳化物及其间的非常细小的枝晶及其共晶体组成,主要组成相为  $\gamma\text{-Co}$ ,  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ ,  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  和未熔  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ 。添加的  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  改变了 Co60 涂层的凝固特征,使 Co60 涂层的亚共晶结晶方式转变为  $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{Co}$  涂层的过共晶结晶方式。未熔  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  起到了非自发形核作用,在其周围形成了大量杆状和块状的富 Cr 碳化物,并细化了涂层枝晶组织。 $\text{Cr}_3\text{C}_2/\text{Co}$  涂层的显微硬度以及在不同腐蚀介质中的耐腐蚀磨损性能比 Co60 涂层都明显提高。

## 参 考 文 献

- 1 Si Songhua, Yuan Xiaomin, He Yizhu *et al.*. Microstructures and properties of laser clad Ni-based metal-ceramics layers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(8):759~762  
斯松华,袁晓敏,何宜柱等. 激光熔覆镍基金属陶瓷涂层的组织性能研究[J]. 中国激光, 2002, **A29**(8):759~762
- 2 Chen Changjun, Wang Dongsheng, Wang Maocai. Laser multi-layer cladding on ZM6 magnesium base alloy [J]. *Chin. Opt.*

- Lett.*, 2003, **1**(3):160~161
- 3 J. Przyłowicz, J. Kusinski. Laser cladding and erosive wear of Co-Mo-Cr coating [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2000, **125**:13~18
  - 4 Zhang Song, Zhang Chunhua, Sun Taili *et al.*. Study on microstructure and resistance of laser cladding Co-based alloy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(9):860~864  
张 松,张春华,孙泰礼等. 激光熔覆钴基合金组织及其抗腐蚀性能[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(9):860~864
  - 5 Chen Chuanzhong, Yu Huijun, Hou Yong *et al.*. Laser cladding WC/Co metal ceramics on 45 steel [J]. *Journal of Ceramics*, 1998, **19**(3):137~143  
陈传忠,于慧君,侯 勇等. 45钢表面激光熔覆 WC/Co 金属陶瓷[J]. *陶瓷学报*, 1998, **19**(3):137~143
  - 6 J. Mateos, J. M. Cuetos, R. Vijande *et al.*. Tribological behavior of plasma-sprayed WC coatings with and without laser remelting [J]. *Wear*, 2000, **239**:274~281
  - 7 Li Yuhong, Zhang Siyu, Zheng Kequan. B<sub>4</sub>C-TiN-Co surface microstructure and performance of A<sub>3</sub> steel by laser cladding at different scanning speed [J]. *Laser Technology*, 1999, **23**(2):126~128  
李玉红,张思玉,郑克全. 不同扫描速度下 A<sub>3</sub> 钢表面 B<sub>4</sub>C-TiN-Co 激光组织和性能的研究[J]. *激光技术*, 1999, **23**(2):126~128
  - 8 Si Songhua, He Yizhu, Yuan Xiaomin *et al.*. Microstructure and wear-resistance of laser clad Co-based alloy coating with B<sub>4</sub>Cp, SiCp [J]. *The Chinese J. Nonferrous Metals*, 2003, **13**(2):454~459  
斯松华,袁晓敏,何宜柱等. 激光熔覆含 B<sub>4</sub>Cp, SiCp 钴基合金深层的组织与耐磨性能[J]. *中国有色金属学报*, 2003, **13**(2):454~458
  - 9 Da-wei Zhang, T. C. Lei. The microstructure and erosive-corrosive wear performance of laser-clad Ni-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> composite coating [J]. *Wear*, 2003, **255**:129~133
  - 10 Z. Dawei, T. Li, T. C. Lei. Laser cladding of Ni-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>/(Ni + Cr) composite coating [J]. *Surface and Coatings Technology*, 1998, **110**:81~85
  - 11 J. Mateos, J. M. Cuetos, R. Vijande *et al.*. Tribological properties of plasma sprayed and laser remelted 75/25 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>/NiCr coatings [J]. *Tribology International*, 2001, **34**:345~351
  - 12 Zhang Dawei, Lei Tingquan, Li Fujun *et al.*. Microstructure and hardness of laser-clad Ni + Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> composite coating with single and overlapping clad tracks [J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2001, **22**(3):23~27  
张大伟,雷廷权,李福军等. 激光单道与多道熔覆 Ni + Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 复合涂层的组织及硬度[J]. *材料热处理学报*, 2001, **32**(3):23~27

\*\*\*\*\*  
(上接封四)

**7. 图表** 图要设计美观,大小适中,尺寸一般为 8cm×10cm 以内,线条均匀,主辅线分明,粗线一般为 0.25~0.5mm,细线一般为粗线的 1/2,图中主线用粗线,如函数曲线等,辅线用细线,如坐标轴线、指示线等;照片要求对比度高,层次清晰。推荐使用三线表。**图表文字:**图题、表题须中英文对照,图面、表面一律用英文。

**8. 参考文献** 应引用公开出版物,并仔细核对;欢迎作者充分引用本刊上同行的文献。每条文献应作相应的文献类型标识(见方括号内)。参考文献的原文为英文,请用英文表示,如原文为其他文种,请译成英文,在该文献最后用括号注明,如原为日文,则用(in Japanese),如原文为中文,则给出中文和相应的英文译文。每条文献的顺序和标点如下:

专著[M]、学位论文[D]、报告[R]——著者(三名). 文献题名. 版本(专著用), 出版地: 出版者, 出版年. 起止页码;

期刊[J]——作者(三名). 论文题目[J]. 刊名, 出版年, 卷(期): 起止页码;

专利[P]——专利申请者. 专利题目[P]. 专利国别, 专利文献种类, 专利号, 出版日期;

文集[C]——作者(三名). 论文题目[C]. 编者, 论文集名, 出版地: 出版者, 年. 起止页码。

详细的论文排版格式请参见近期的《中国激光》。

**9. 基金资助** 论文如获省、部级以上的基金资助,须在首页的脚注位置注明基金资助单位全称及批准号。

**10. 版面费** 遵照中国科协和中国科学院有关文件精神,向录用稿作者收取适量版面费以聊补本刊的高额亏损。

**11. 版权** 录用稿件一经刊出,论文版权(含各种介质)均归编辑部所有。本刊向作者酌付稿酬及赠送该期期刊 1 册,抽印本 10 份。

**12. 本刊** 已入编《中国学术期刊(光盘版)》和万方数据库,著作权使用费在奉寄作者稿酬中一次性支付。如有不同意将文章编入上述数据库者,请事先声明,本刊将作适当处理。

**特别声明:**凡在国内外正式出版的刊物上登载过的稿件,本刊一律不予刊登。若发现一稿多投者,本刊三年内不接受其稿件,并追补对本刊造成的损失。

凡本刊投稿者,均视作接受上述各项规定,本刊不再另行声明。

《中国激光》编辑部

2004 年 9 月