

Co/介孔 WC 激光复合涂层的显微结构与高温 磨损性能研究

张群莉¹ 徐卫仙¹ 姚建华^{1*} 陈赵扬² 马淳安²

(¹ 浙江工业大学激光加工技术工程研究中心, 浙江 杭州 310014)
² 浙江工业大学化学工程学院, 浙江 杭州 310014)

摘要 以 H13 钢为基体材料,以 Co 基合金和同粒径范围介孔 WC 的混合粉末为合金材料,采用半导体激光器在基体表面进行激光熔覆,通过介孔 WC 的特殊结构,获得均匀的高性能覆层。采用扫描电镜、能谱仪、X-射线衍射分析仪和显微硬度计研究熔覆层的显微组织、元素分布、相组成和显微硬度。利用高温磨损试验机对熔覆层在常温和高温下的磨损性能进行对比分析。结果表明,熔覆层主要由 γ -Co 以及碳化物硬质相 WC、 Cr_3C_2 、 $(\text{Cr},\text{Co})_{23}\text{C}_6$ 和 Cr_7C_3 组成。由于介孔 WC 颗粒对熔覆层的弥散强化和固溶强化的作用,激光熔覆层显微硬度比基体提高了 2 倍左右。在 600 °C 高温下,由于碳化物硬质相的作用,熔覆层的高温耐磨性相比 H13 基体提高了 3 倍左右,熔覆层的高温磨损形式主要以氧化磨损为主。由于温度的升高,熔覆层表面形成氧化膜,从而对熔覆层进行有效保护,因此熔覆层的耐磨性随着温度的增加而提高。

关键词 激光技术;激光熔覆;介孔 WC;显微结构;高温耐磨性

中图分类号 TG146.1; TG174.44 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0503002

Microstructure and High Temperature Wear Resistance Performance of Co/Mesoporous WC Laser Composite Coating

Zhang Qunli¹ Xu Weixian¹ Yao Jianhua¹ Chen Zhaoyang² Ma Chunan²

¹ *Research Center of Laser Processing Technology and Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310014, China*
² *College of Chemical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310014, China*

Abstract Diode laser is adopted to clad Co-based powder mixed with meso-porous WC with the same size range on H13 steel. High-performance coating is obtained with the help of meso-porous WC. Scanning electron microscopy, energy dispersive spectroscopy, X-ray diffraction analyzer and micro-hardness tester are used to study the microstructure, element distribution, phase composition and microhardness of the coating, respectively. The high-temperature wear testing machine is used to test the wear resistance of the clad layer at room temperature and high temperature for a comparative analysis. The results show that the clad layer is mainly composed of γ -Co and carbide hard phases WC, Cr_3C_2 , $(\text{Cr},\text{Co})_{23}\text{C}_6$ and Cr_7C_3 . Due to the dispersion strengthening and solid solution strengthening effects of meso-porous WC particles on the cladding layer, the hardness of laser cladding layer increases by 2 times approximately when compared to that of the matrix. Because of the effect of carbide hard phases, the wear resistance of the clad layer at 600 °C increases by 3 times related to that of the matrix H13. Oxidative wear is the predominant high temperature wearing mechanism of the coating. With the temperature rising, the oxide film forms on the surface of the clad layer to protect the coating from high temperature erosion effectively. So the wear resistance of the clad layer improves with the increase of temperature.

Key words laser technique; laser cladding; mesoporous WC; microstructure; high temperature wear resistance

OCIS codes 160.3900; 180.7460; 350.3390; 350.3850

收稿日期: 2013-09-16; 收到修改稿日期: 2013-12-13

基金项目: 浙江省重点科技创新团队项目(2010R50002), 浙江省自然科学基金青年基金项目(LQ13E050012)

作者简介: 张群莉(1979—), 女, 博士, 讲师, 主要从事激光加工技术方面的研究。E-mail: zql@zjut.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: laser@zjut.edu.cn

1 引 言

锻造产品与铸造产品相比具有显著的优势,已广泛应用于国民经济发展中的各个重要领域。锻造的零件不仅可以适应各种形状,而且具有更好的内部组织、力学性能和物理性能^[1]。而生产锻造产品的模具在长期承受重载、反复交变力的作用下,容易变形、开裂、热磨损等以致失效,其中磨损失效所占比例最大,有关文献指出在高温锻造生产中模具使用寿命因磨损而失效的情况超过 70%^[2],这给生产的成本控制和连续性造成影响。而现有的均质热锻模具钢难以满足热锻模腔表面及近表面层的使用性能要求。

为了提高热锻模具的使用寿命,国内外的专家学者做了大量的工作。Navinsek 等^[3]通过物理气相沉积(PVD)技术和脉冲等离子渗氮技术对 H11 钢表面进行双重处理,制得了双层涂层,优化了 H11 钢表面的机械性能,从而提高了热锻模的耐磨性;同样应用了传统方法的还有 Rodriguez-Baracaldo 等^[4]采用 PVD 技术在 H13 钢表面获得(TiAl)N 陶瓷涂层,比较经过气体氮化的涂层和未经处理的涂层的高温耐磨性,得到经气体氮化的涂层表现出良好的高温耐磨性。传统的渗碳、渗氮及 PVD 工艺提高了热锻模具的表面磨损性能。随着科技的进步,先进的工艺也在日新月异,宋仁国等^[5]采用等离子喷涂技术在 H13 钢表面喷涂 Al₂O₃、Al₂O₃/TiO₂ 陶瓷涂层,涂层中存在由微米片层状组织和未熔或半熔态微粒组成的双重组织,涂层的耐磨性较 H13 钢有明显的提高;兰箭等^[6]尝试了利

表 1 H13 基体的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of H13 substrate (mass fraction, %)

| C | Si | Mn | Cr | Mo | V | P | S | Fe |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------|-------|------|
| 0.32~0.45 | 0.80~1.20 | 0.20~0.50 | 4.75~5.50 | 1.10~1.75 | 0.80~1.20 | ≤0.03 | ≤0.03 | Bal. |

实验所用合金材料选用自制的 Co 基激光熔覆专用合金粉末^[8]和介孔 WC 粉末,以 6:4 的质量比例混合。Co 基合金粉末的粒度范围为 45~109 μm,主要元素是 Co、C、Si、Cr、Ni、W、Mo 等。WC 作为一种耐高温材料被广泛应用于提高材料的高温耐磨性,但商购的实心结构 WC 粉末往往与 Co 基材料的溶合程度有限,在高功率激光作用下容易分解、氧化,最后得到的熔覆层中 W、C 元素大多以别的形式存在。此外,WC 的脆性一直是降低 WC 颗粒耐磨性的主要原因,如何在材料结构、粉末混合方式上体现 WC 的高硬度并抑制其脆性是提升

用超音速火焰喷涂法在热锻模具钢 H13 表面制备 WC-12Co 和 Ni60 涂层,在高温条件下,WC-12Co 涂层表现出了优良的稳定性和耐磨性。以上的工作不管是采用传统的渗碳、渗氮及 PVD 工艺,抑或是先进的等离子喷涂、超音速喷涂技术,为热锻模具表面寿命提供了众多可以参考的数据,在一定程度上提高热锻模具表面的高温耐磨性,然而获得的涂层厚度仅为微米级,因此具有一定的局限性^[7]。

激光熔覆作为先进的表面工程技术,可以在瞬间产生高能量,作用在材料表面,对材料的热变形小,且得到的涂层厚度可以达到毫米级,被广泛应用于提高模具的硬度、强度和高温耐磨性。很多学者利用热喷涂所使用的镍基自熔合金或钴基自熔合金粉末,用激光束加热的方法将其熔覆在基材表面,虽然克服了热喷涂涂层的一些缺点,但激光覆层易于产生气孔、裂纹等缺陷,因而不能很好的发挥作用。

本文将自制 Co 基合金和介孔 WC 混合粉末涂覆于 H13 钢基体上,用激光熔覆技术制备无裂纹的高性能熔覆层,在基体和涂层之间形成冶金结合,提高基体的高温耐磨性,并通过涂层的显微组织的研究,分析涂层的磨损机理。

2 实验材料与方法

2.1 实验材料

以锻态 H13 钢作为基体材料,退火处理后硬度为 240~280 HV_{0.2},其试样尺寸为 100 mm×100 mm×30 mm。实验前将 H13 基体表面打磨并用丙酮清洗。基体 H13 的化学组成如表 1 所示。

Co/WC 熔覆层的主要研究方向。

本文对熔覆材料中的 WC 原料进行了认真的设计和筛选,制备出介孔结构的 WC^[9],粒径范围为 70~80 μm,宏观形貌如图 1(a)所示,WC 颗粒呈长条形,方框内结构的形貌如图 1(b)所示,WC 颗粒含有大量 1~2 μm 大小的介孔孔隙。经进一步放大观察,1~2 μm 的孔隙又由 100 nm 左右的颗粒组成,其微观组织如图 1(c)、(d)所示。所以在激光熔覆过程中 Co 基合金进入孔隙,可填满孔隙,增强 WC 颗粒的韧性,可望获得无裂纹的高性能覆层。

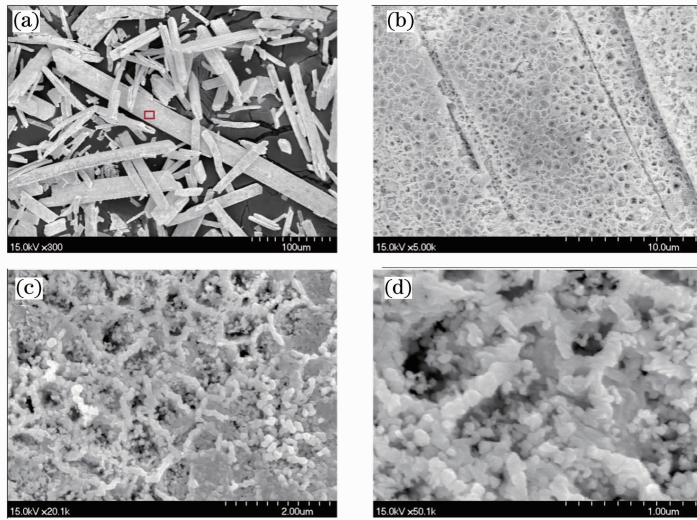


图 1 不同放大倍数下的介孔 WC 形貌图

Fig. 1 Morphologies of mesoporous WC under different magnifications

2.2 实验方法

采用 LDF400-2000 型光纤耦合大功率半导体激光器,其输出波长为 900~1030 nm,最大输出功率 2 kW;运动装置采用 IRB2400/16 型 6 自由度机器人;送粉装置采用具有闭环反馈流量控制的同轴送粉装置。优化后的工艺参数为:激光功率密度为 $1.0 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$,扫描速度为 7 mm/s,采用圆形光斑,光斑直径为 4 mm,采用多道搭接,搭接率为 40%,实验过程用氩气保护。

激光熔覆后的试样经过线切割、镶嵌、打磨、抛光后,采用 X'Pert PRO 型 X 射线衍射仪(XRD)分析熔覆层的相组成;利用 JSM-5610LV 型扫描电镜(SEM)及能谱仪(EDS)观察和分析熔覆层的横截面组织形貌及成分;采用 HDX-1000 数字式显微硬度计在载荷

200 g、加载时间 10 s 的条件下测试熔覆层的显微硬度;采用 HT-600 ℃型高温摩擦磨损试验机测试熔覆层在常温、300 ℃和 600 ℃下的磨损性能,对磨材料为调质态 GCr15 钢,硬度为 500~540 $\text{HV}_{0.2}$,磨损实验以平面-曲面的接触形式,转速为 448 r/min,磨损时间为 1 h,可自动检测试验即时温度、摩擦系数等数据并进行即时图形显示和数据存储。

3 实验结果与分析

3.1 熔覆层的显微组织

熔覆层的显微组织与激光扫描速度、激光功率有着密切的联系,且从显微组织可以分析材料的性能。图 2 为激光熔覆后熔覆层的截面形貌图。从图 2(a)可以看出,熔覆层从上到下可分为熔覆层

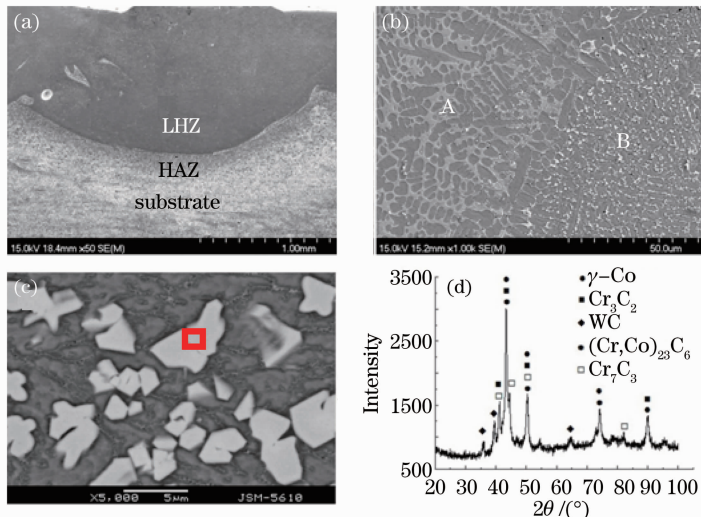


图 2 熔覆层横截面组织。(a) 整体形貌;(b) 中部;(c) 底部;(d) X 射线衍射分析

Fig. 2 Microstructure of cladded layer. (a) Overall morphology ; (b) central; (c) bottom; (d) XRD analysis

(LHZ)、热影响区(HAZ)和基体。熔覆层致密性好,没有裂纹、气孔、夹杂物等缺陷,熔覆层与基体结合良好。

由于激光熔覆的搭接率是40%,观察到中间20%非搭接区域的组织与两边80%搭接区域的组织不一样,从图2(b)可以看出,A为搭接区,B为非搭接区,非搭接区枝晶上有颗粒状的组织,而搭接区组织是均匀的枝晶组织。图2(c)为熔覆层底部非搭接区组织。为了获得熔覆层的相组成,对熔覆层表面进行了XRD测试,其结果如图2(d)所示,熔覆层表面的相组成主要有Co固溶体、WC、Cr₃C₂、(Cr,Co)₂₃C₆和Cr₇C₃。对熔覆层中部搭接区的白

色块状组织进行了EDS分析,如表2所示,可见W和C元素的原子比接近1:1,且结合XRD测试结果,可以确定图2(c)中的白色块状组织是WC颗粒^[10]。EDS数据显示,熔覆层中的Fe元素,是由于在高能量激光的作用下,部分H13基体与合金材料同时熔化,基体发生了一定程度的稀释。激光第一道扫描时,WC来不及完全熔化,而Co基合金的熔点低,熔化后进入WC的孔隙中,得到Co固溶体。搭接区激光的二次作用,使得该区域的WC溶解,W、C元素与Cr、Co等元素形成了碳化物硬质相Cr₃C₂、(Cr,Co)₂₃C₆和Cr₇C₃、细小WC。

表2 块状颗粒EDS分析数据

Table 2 EDS results of massive particle

| Element | C | O | Cr | Fe | Co | Ni | W |
|--------------------|-------|------|-------|-------|-------|------|-------|
| Mass fraction /% | 5.02 | 1.49 | 9.51 | 9.73 | 15.02 | 2.20 | 57.05 |
| Atomic fraction /% | 28.40 | 6.33 | 12.44 | 11.85 | 17.34 | 2.54 | 21.10 |

3.2 熔覆层的显微硬度

采用HDX-1000型数字显微硬度计对激光熔覆层进行显微硬度测试,硬度曲线如图3所示。从图3可以看出,20%非搭接区域从表面及以下1000 μm处为熔覆层,往下为热影响区和基体。在熔覆层上半部分显微硬度曲线趋于平缓,虽有起伏,但变化不大,这主要是由于上半部分组织均匀,且W、C与合金元素形成的硬质相分布均匀。在800 μm处显微硬度达到了最大值,其原因在于WC在熔池中有沉底的趋势,WC颗粒主要集聚在该部分,而这些高硬WC颗粒对熔覆层有弥散强化和固溶强化作用^[11]。在80%搭接区域,由于激光的二次作用,部分溶解的W、C元素与Cr、Co等元素形成了碳化物硬质相(Co,W)₆C、(Cr,Co)₂₃C₆和Cr₇C₃,组织均匀,所以熔覆层中80%搭接区域的硬度分布更趋均匀。

3.3 高温耐磨性分析

对激光熔覆层和H13基体在不同温度下(常温、300℃、600℃)进行干摩擦磨损,熔覆层在不同温度下的磨痕形貌图分别如图4(a)~(c)所示,图4(d)为H13基体在600℃的磨痕形貌图。

从图4(a)可以看出,熔覆层在常温下磨损后有明显的犁沟状,未发现明显的粘着痕迹,且在犁沟内出现了明显的裂纹,一方面由于熔覆层有WC硬质陶瓷相,常温下WC的脆性大^[12],所以在与对磨材料不断磨损过程中产生了裂纹;另一方面,干摩擦表面温度较高,产生很大的应力,造成裂纹扩展,所以熔覆层在常温下的磨损机理主要是以微切削为主^[13]。

熔覆层在300℃下的磨痕形貌图如图4(b)所示,可以看出磨痕有明显的粘着和轻微的犁沟,熔覆层中的Cr、Co元素容易氧化,主要形成一些氧化物,氧化物在反复磨损过程中容易脱落,形成部分凹坑,脱落的氧化物与对磨材料作用,阻止了对磨材料与熔覆层的磨损作用^[14],所以300℃下熔覆层的磨损机理主要是粘着磨损和磨粒磨损。

熔覆层在600℃下的磨痕形貌图如图4(c)所示,观察到不同区域的磨痕形状不一样。在有WC的A区域磨损后的形貌是一些破碎的WC颗粒,EDS数据分析如表3所示。这表明在与对磨材料磨损时,WC颗粒发生分裂,最后形成WC颗粒骨架的形态。而剩下的区域是均匀的固溶体组织,且硬质WC均匀分布在固溶体组织中,所以在磨损过程中,整个熔覆层都与对磨材料磨损,未出现明显的犁

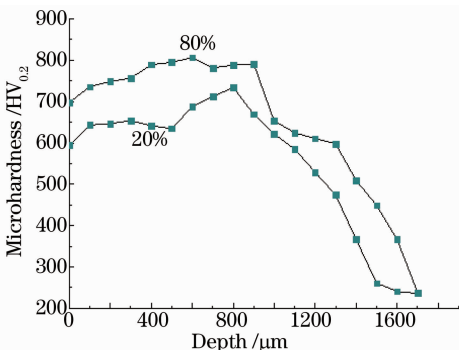


图3 熔覆层显微硬度曲线

Fig. 3 Micro-hardness curve of cladded layer

沟。由于在 600 °C 高温下, Co、Cr、W 元素容易氧化, 表面形成了氧化物, 氧化物与熔覆层结合良好, 阻止了对磨材料与熔覆层的磨损。所以 600 °C 下熔覆层的磨损机理主要以氧化磨损为主。

由图 4(d) H13 基体在 600 °C 的磨痕形貌可

见, 基体在高温条件下力学性能显著降低, 磨损表面发生严重的粘着剥落现象, 出现大量的凹坑; 因此, H13 基体在 600 °C 时的磨损机理主要为严重的氧化磨损和粘着磨损, 磨损率较大。

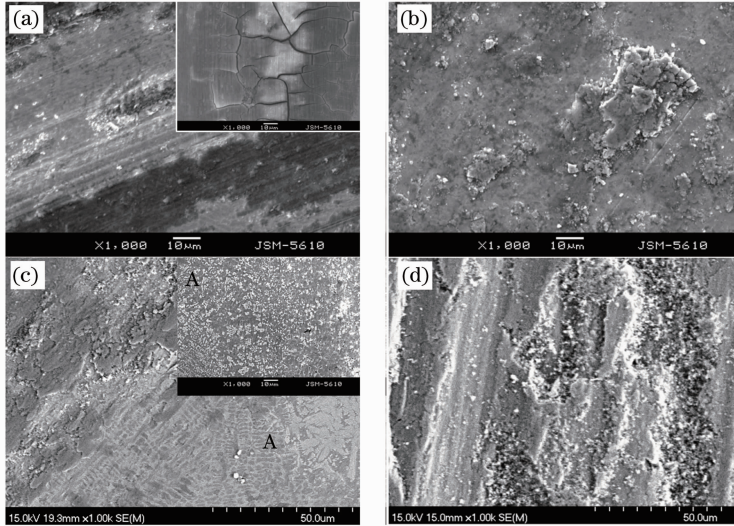


图 4 干滑动摩擦磨损后的磨痕形貌。(a) 熔覆层常温;(b) 熔覆层 300 °C;(c) 熔覆层 600 °C;(d) H13 基体 600 °C

Fig. 4 Morphologies of wear trace under dry friction conditions. (a) Cladded layer at room temperature;

(b) cladded layer at 300 °C; (c) cladded layer at 600 °C; (d) H13 substrate at 600 °C

表 3 区域 A 颗粒 EDS 分析结果

Table 3 EDS results of tiny particle in region A

| Element | C | O | Cr | Fe | Co | Ni | W |
|--------------------|-------|-------|------|-------|-------|------|-------|
| Mass fraction /% | 3.94 | 3.89 | 0.54 | 15.62 | 9.95 | 1.43 | 57.44 |
| Atomic fraction /% | 21.79 | 16.15 | 9.19 | 18.58 | 11.21 | 1.62 | 20.75 |

为了研究熔覆层的高温耐磨性, 对 H13 基体和熔覆层在 600 °C 下的摩擦系数进行了对比分析, 其摩擦系数随时间变化的曲线如图 5 所示。可以看出, 熔覆层的摩擦系数是基体的 1/4, 由于熔覆层中产生了碳化物硬质相 WC、Cr₃C₂、(Cr, Co)₂₃C₆ 和 Cr₇C₃, 可以有效地降低熔覆层与对磨材料的磨损作用。对磨损前后称重分析其磨损量, 数据如表 4 所示, 故熔覆层的磨损失重量是基体 H13 的 1/4, 结合摩擦系数数据, 得出熔覆层的高温耐磨性提高了 3 倍左右。由图可见, H13 基体的摩擦系数随着时间的变化逐渐升高, 这主要是由于随着磨损实验的进行, 实验产生的摩擦热逐渐增多, H13 基体表面温度升高、氧化严重, 粘着严重, 而 H13 基体支撑氧化物能力较差, 氧化膜易与对磨材料粘着、剥落, 导致表面氧化物疲劳剥落面积大, 对磨材料不仅与 H13 基体磨损, 而且还与剥落的氧化物磨损而导致摩擦系数增大。而熔覆层的摩擦系数在磨损前期趋于平稳, 而在后期摩擦系数降低, 其原因在于在磨损

初期, 对磨材料与熔覆层表面几乎没有粘着, 随着磨损的进行, 摩擦热不断产生, Co、Cr 等元素在高温摩擦过程中促进了具有润滑作用的氧化膜 CoO、CoO·Cr₂O₃ 的形成, 使摩擦系数降低, 从而提高了熔覆层的高温耐磨性。

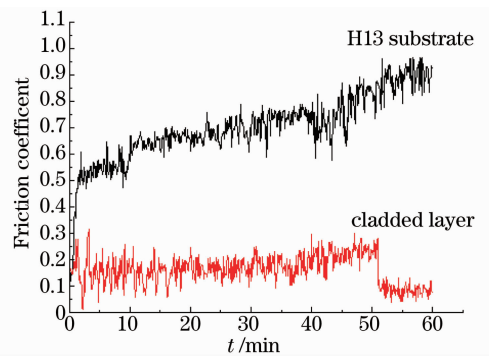


图 5 600 °C 下摩擦系数随时间的变化曲线

Fig. 5 Curves of fraction coefficients versus

time at 600 °C

表 4 600 ℃下 H13 基体与熔覆层的磨损失重量
Table 4 Wear weight loss of H13 substrate and cladded layer at 600 ℃

| Materials | Weight before | Weight after | Weight loss /g |
|---------------|---------------|--------------|----------------|
| | wear/g | wear /g | |
| H13 substrate | 4.9367 | 4.9358 | 0.0009 |
| Cladded layer | 4.8528 | 4.8526 | 0.0002 |

4 结 论

1) 采用自制的 Co 基专用合金粉和介孔 WC 的复合粉末,在 H13 基体表面进行激光熔覆,获得了与基体呈冶金结合的熔覆层,覆层致密性好,没有裂纹、气孔、夹杂等缺陷。

2) 由于介孔 WC 有大量的孔隙,在激光熔覆过程中,非搭接区的 Co 基合金熔化后,可填进孔隙,增强 WC 颗粒的韧性。WC 颗粒在熔覆层中起到了弥散强化和固溶强化作用,使熔覆层硬度提高了 2 倍。

3) 在激光搭接区域,经过激光的再次作用,WC 颗粒与 Co 基合金完全溶解与扩散,得到均匀的由硬质相 Cr_3C_2 、 $(\text{Cr},\text{Co})_{23}\text{C}_6$ 和 Cr_7C_3 、细小 WC 组成的熔覆层组织。

4) 在 600 ℃高温干摩擦条件下,熔覆层的高温耐磨性能比 H13 基体提高 3 倍左右。一方面是由于耐高温、耐磨损的碳化物硬质相 WC、 Cr_3C_2 、 $(\text{Cr},\text{Co})_{23}\text{C}_6$ 和 Cr_7C_3 的作用;另一方面高温下 Cr、Co 等元素形成具有润滑作用的 CoO 、 $\text{CoO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$ 等氧化物。600 ℃时熔覆层的磨损机理主要以氧化磨损为主。

参 考 文 献

- 1 Wang Shuqi, Cui Xianghong, Chen Kangmin, *et al.*. Alloying design and high-temperature wear property of cast hot-forging die steel[J]. Tribology, 2006, 26(4): 382-386.
王树奇,崔向红,陈康敏,等. 精铸热锻模具钢的合金成分设计及其高温磨损性能研究[J]. 摩擦学学报, 2006, 26(4): 382-386.
- 2 Chang Ming, Zhang Qingmao, Liao Jianhong, *et al.*. Processing parameters optimization of pulsed Nd: YAG laser cladding repairing plastic moulds[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18(9): 1443-1446.
常明,张庆茂,廖健宏,等. 脉冲 Nd:YAG 激光熔覆修复塑料模具工艺参数的优化[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(9): 1443-1446.

- 3 B Navinsek, P Panjan, F Gorenjak. Improvement of hot forging manufacturing with PVD and duplex coatings[J]. Surface & Coatings Technology, 2001, 137(2-3): 255-264.
- 4 R Rodriguez-Baracaldo, J A Benito, E S Puchi-Cabrera, *et al.*. High temperature wear resistance of (TiAl)N PVD coating on untreated and gas nitrided AISI H13 steel with different heat treatments[J]. Wear, 2007, 262(3-4): 380-389.
- 5 Lu Guo, Song Renguo, Xu Suzhen. Microstructure and high temperature wear resistance of plasma sprayed Al_2O_3 、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ coatings on H13 steel[J]. Materials Protection, 2008, 41(10): 43-45.
卢果,宋仁国,许素珍. H13 钢表面等离子喷涂 Al_2O_3 、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 陶瓷涂层的显微组织及耐磨性能研究[J]. 材料保护(增刊), 2008, 41(10): 43-45.
- 6 Lan Jian, Zhang Bing. Research on abrasion resistance of coating on H13 steel surface prepared by HVOF-sprayed[J]. Material & Heat Treatment, 2010, 39(20): 128-131.
兰箭,张冰. H13 钢表面超音速火焰喷涂制备耐磨涂层的研究[J]. 材料热处理技术, 2010, 39(20): 128-131.
- 7 Ye Liangwu, Zhang Qunli, Yao Jianhua, *et al.*. Research of superfine WC coating on the surface of hot die made by wide-band laser[J]. Applied Laser, 2007, 27(3): 164-168.
叶良武,张群莉,姚建华,等. 热锻模具表面宽带激光熔覆超细碳化钨试验研究[J]. 应用激光, 2007, 27(3): 164-168.
- 8 Wu Hanfeng, Lou Chenghua, Yao Jianhua, *et al.*. Design of atomizing nozzle for laser cladding alloy powder[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(10): 101404.
吴涵峰,楼程华,姚建华等. 激光熔覆专用合金粉末雾化喷嘴的设计[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(10): 101404.
- 9 Ma Chunan, Zhang Weiming, Li Guohua, *et al.*. Preparation of hollow global tungsten carbide (WC) catalysts with mesoporosity and its characterization[J]. Journal of Chemistry, 2005, 63(12): 1151-1154.
马淳安,张维民,李国华,等. 介孔结构空心球状 WC 粉体催化剂的制备与表征[J]. 化学学报, 2005, 63(12): 1151-1154.
- 10 D Kesavan, M Kamaraj. The microstructure and high temperature wear performance of a nickel base hardfaced coating[J]. Surface & Coatings Technology, 2010, 204(24): 4034-4043.
- 11 S Taktak, S Ulker, I Gunes. High temperature wear and friction properties of duplex surface treated bearing steels[J]. Surface & Coatings Technology, 2008, 202(14): 3367-3377.
- 12 Y Birol. High temperature sliding wear behaviour of Inconel 617 and Stellite 6 alloys[J]. Wear, 2010, 269(9-10): 664-671.
- 13 Wu Ping, Jiang Enyong, Zhou Changchi, *et al.*. Microstructure and properties of Ni/WC composite coating prepared by laser cladding[J]. Chinese J Lasers, 2003, (4): 357-360.
吴萍,姜恩永,周昌炽,等. 激光熔覆 Ni/WC 复合涂层的组织和性能[J]. 中国激光, 2003, (4): 357-360.
- 14 He Xiangming, Liu Xiubo, Yang Maosheng, *et al.*. Elevated temperature tribological behaviors of laser cladding nickel-based composite coating on austenitic stainless steel[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(9): 0903007.
何祥明,刘秀波,杨茂盛,等. 奥氏体不锈钢激光熔覆镍基复合涂层高温磨损行为[J]. 中国激光, 2011, 38(9): 0903007.

栏目编辑:宋梅梅