

激光堆焊镍基碳化钨梯度焊层及耐磨机理分析

戚文军, 何艳兵, 刘斌, 况敏

(广州有色金属研究院, 广州 510651)

摘 要: 首次提出用同轴同步送粉的激光堆焊方法在 Q235 钢基体表面制备工程厚度的 WC 梯度焊层。研制出可连续进行梯度焊层堆焊的激光枪, 并分析了梯度焊层组织的特点、硬度的变化、基材熔深的控制。结果表明, 精细控制送粉过程可以实现对熔深的控制, 调整界面的成分。粉末成分的梯度变化使焊层的硬度、耐磨性、WC 颗粒的分布呈梯度变化, 获得以原始态 WC 颗粒为主的焊层。

关键词: 激光堆焊; 梯度焊层; 同轴同步送粉

中图分类号: TG456.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2002)01-57-04



戚文军

0 序 言

现代工业的发展对机械产品零件表面的性能要求越来越高, 不但要具备高的硬度和耐磨性, 而且能在高速、高温、高压、重载以及腐蚀介质工况下可靠而持续地工作。目前, 机械产品的表面制备技术多采用热喷涂、气体保护堆焊、埋弧堆焊、等离子堆焊等方法, 但都有其局限性^[1]。最近 10 年来发展的激光熔敷技术已在许多产品中得到应用, 熔敷的焊层达到一定的工程厚度 (0.1 ~ 0.8 mm), 但在重要的工程机械产品 (燃气轮机) 的制造、维修中仍不能满足要求。为此, 国际上提出了激光堆焊的概念, 以解决许多关键部件的表面制造及维修。

激光堆焊通常是指表面焊层的厚度可达到 0.8 ~ 3.0 mm 的激光熔敷过程。这种焊层用预置粉末或喷涂后重熔的方法很难获得, 原因是此类方法一次熔敷的焊层薄, 多层熔敷工艺复杂, 易出现裂纹、气孔。激光堆焊技术理论上可以获得任意的焊层厚度, 而且焊层的质量容易控制, 也可以方便地制备出各种类型的梯度复合焊层, 其应用前景十分诱人。

1 激光送粉枪的设计

激光堆焊的关键是解决堆焊材料连续输送的方法。激光枪采用目前最先进的激光同步送粉技术。粉末在气流和重力的作用下进入枪体, 与激光束同轴输出, 被送入工件表面激光辐照区, 经光束加热到

红热状态后进入熔池。由于粉末的加热和熔化都是在保护气氛下进行, 而且在载气的控制下连续地送入到束流中形成激光堆焊层, 因此, 大大提高了熔敷质量和熔敷效率, 降低覆层的稀释率和基材的热影响。激光送粉枪的结构如图 1 所示。

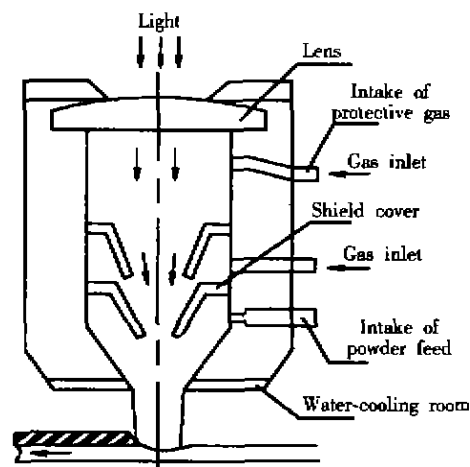


图 1 激光送粉枪结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of laser powder feed gun

同轴送粉激光堆焊的特点是: (1) 粉末在载气的作用下是连续可控的, 由此可以控制堆焊层的熔深、厚度以及稀释率; (2) 采用双通道送粉可以调整焊层的成分和组织结构, 获得满足特殊功能要求的梯度复合焊层; (3) 枪体采用水冷结构, 粉末不会粘接, 堵死枪口, 送粉量大; (4) 在枪体内设置双层气体屏蔽罩, 避免了粉末对激光透镜的污染。

试验证明, 这种结构的激光枪可以连续地在工件上进行激光堆焊, 适合工程化应用。

2 试验材料及方法

试验所用的基体材料为热轧状态的 Q235 钢,堆焊材料为镍基合金粉(粒度 $\leq 60\text{ }\mu\text{m}$)和纯碳化钨(粒度 $10\sim 20\text{ }\mu\text{m}$),化学成分见表 1。

表 1 堆焊材料的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of overlaying material

	C	Cr	B	Si	Fe	Ni
C112	0.5~1.0	15~18	3.5	3.0	14~17	Bal.

表 2 激光堆焊工艺参数

Table 2 Parameters of laser overlaying process

Sample number No.	Layer	Powder mass fraction (%)	Thickness H/mm	Laser power P/kW	Scanning rate $v_s/(\text{mm}\cdot\text{min}^{-1})$	Shield gas flux $Q/(\text{L}\cdot\text{min}^{-1})$	Size of facula D/mm	Powder feed rate $v_p/(\text{g}\cdot\text{min}^{-1})$
1	1	25WC	0.6	1.5	800	8	4.5	15
	2	50WC	0.45					
2	1	25WC	0.65	1.5	600	8	4.5	15
	2	75WC	0.4					

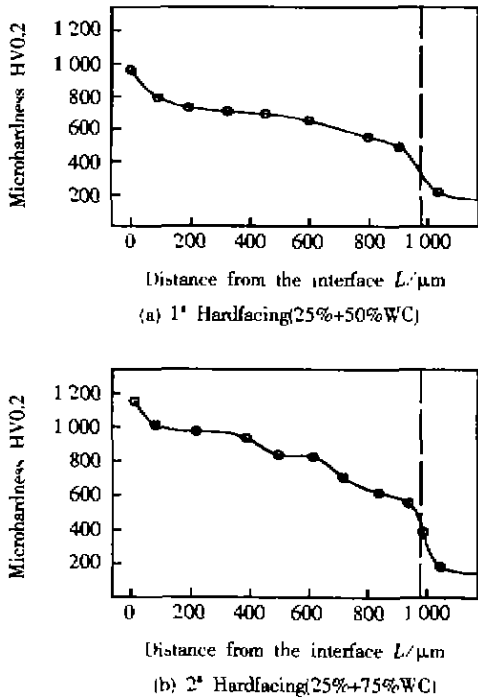


图 2 梯度焊层的硬度曲线

Fig. 2 Hardness distribution of gradient hardfacing

从图中可以看出,随 WC 比例的提高,梯度焊层的硬度也是梯度变化。1 号焊层从母材硬度 200 HV 迅速提高,过渡段硬度变化较陡,反映出焊层界

把镍基合金粉与 WC 粉按质量百分比配成以下三种比例:(1) WC25%;(2) WC50%;(3) WC75%。

试验在 HJ-3 型 2 kW 横流 CO₂ 激光器上进行,堆焊工艺参数见表 2。在 ML-10 型磨粒磨损试验机上进行磨粒磨损试验(载荷 250 g)。

3 试验结果及分析

3.1 焊层的显微硬度

对梯度堆焊层进行显微硬度测试,测得的硬度分布曲线如图 2 所示。

面的稀释率低。与 1 号焊层不同的是,2 号焊层在梯度焊层的结合处出现硬度平台,而后呈缓慢升高趋势。说明在两层焊层的结合处,高比例 WC 被稀释,在交界处形成较均匀的过渡段,而后随 WC 比例升高硬度明显提高。

3.2 焊层的显微组织分析与界面

焊层(25%+50%WC)显微组织如图 3 所示,图中反映的靠近基体的显微组织具有几个特点:(1)析出相较多;(2)过渡区晶粒被细化;(3)焊层与基体间有明显的细亮带;(4)焊层不存在裂纹、气孔等缺陷;(5)WC 颗粒发生团聚。

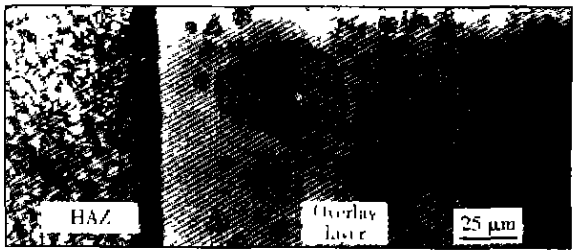


图 3 25%+50%WC 焊层显微组织

Fig. 3 25%+50%WC hardfacing microstructures

进一步的 EDAX(Energy dispersive analysis of X-ray)微区成分分析表明(见表 3),弥散分布的点状析出物相铬含量高,并有少量的铁、镍。结合 Ni-

Cr-B三元相图可知,由于 γ -Ni几乎不固溶B,激光堆焊的快速冷凝过程会析出B而形成硼的化合物。同时,由于底层WC大量溶解,形成含W和B的多元化合物相。焊层的相成分分析见图4,主要的相组成是镍基固溶体、硼化物和硬质相WC。 Cr_2B 析出相与WC硬质相共存于焊层,对提高焊层的硬度和耐磨性能是有利的。

表3 两种组织形态的EDAX成分(质量分数,%)

Table 3 EDAX composition of two structure configuration

	Cr	Ni	Fe	W	Si
Spot	78.852	9.639	8.541	—	1.375
Bright cincture	2.851	9.609	85.956	0.273	1.295

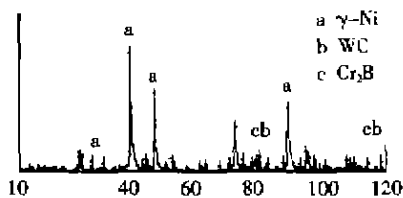


图4 25%WC焊层X射线衍射图谱

Fig. 4 X-diffraction drawing of 25% WC hardfacing

界面处是宽度为 $2 \sim 3 \mu\text{m}$ 的亮带,亮带的形成表明焊层与基体实现了冶金结合。从微区成分的面分布扫描可知,界面的元素扩散量少,原因是焊层中合金元素向基体的溶解-扩散受到基体熔化薄层的限制和快速冷却的作用。稀释率大大降低,其结果是提高了焊层与基体的结合强度,减小脆裂的倾向。

3.3 磨损试验及分析

取两种焊层进行磨损试验对比:(1)25%WC焊层;(2)25%+75%WC梯度焊层。测得的磨损结果如图5所示,该曲线反映的是单位时间内的磨损失重。对比可知,25%WC焊层的耐磨性虽然比母材有大幅度提高,但是磨损量较大,说明耐磨性能不好。梯度焊层的外层WC含量达到75%,耐磨性能最好,远远优于25%WC焊层。综合图6的SEM(Scanning electron microscope)图像组织分析可知,两种焊层耐磨性能的较大差异,并不仅在于WC含量的变化,更重要的是WC颗粒在焊层中的存在形式。25%WC焊层中已很少存在WC颗粒,却出现大量团聚态WC以及含W的化合物相。这是造成焊层耐磨性能降低的原因。而图6给出的2号75%WC的焊层中WC颗粒基本是以原始状态存在,溶解和团聚的现象较少,焊层有很高的硬度和耐磨性。

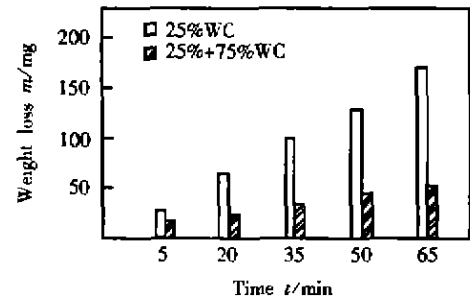


图5 磨损性能对比

Fig. 5 Contrast of abrasion properties



图6 75%WC堆焊焊层形貌

Fig. 6 Photograph of 75% WC hardfacing in layer

3.4 基材熔深的控制

激光堆焊影响基材表面熔深和界面成分的主要参数是激光功率、扫描速度和送粉速度,三者间的关系决定了输入的热能量以及能量在熔化基材和粉末间的分配比例。

图7和图8给出了送粉速度和扫描速度与基材熔深的关系。从图7看出,单位面积和单位时间内粉末沉积越多,则相应需要的熔化能量越多,在输入能量不变的条件下,传输到基材表面的能量减小,基材熔深则变浅。

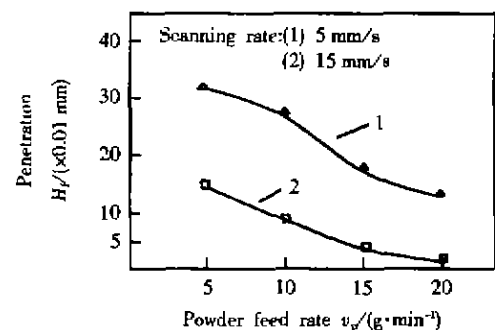


图7 送粉速度与熔深的关系

Fig. 7 Relation between feed rate and penetration

可以认为,足够的送粉率可以起“热屏蔽”作用,由于“热屏蔽”的作用,粉末吸收了激光的大部分能量,降低了表面的热输入。在一定的送粉速率

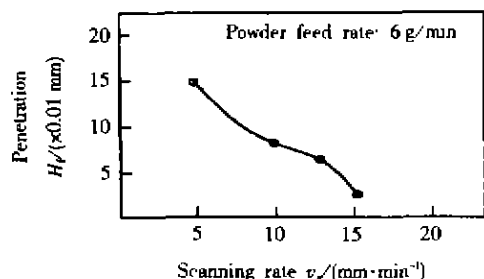


图 8 扫描速度与基体熔深的关系

Fig. 8 Relation between scanning rate and penetration

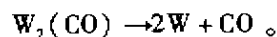
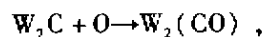
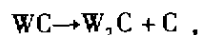
下,基材熔深随着扫描速度的增大而变浅。但是当送粉量增加到一定数值时,基材熔深的变化不明显。反之过大的送粉量或能量输入不足会在界面形成缺陷。显然,精细地控制送粉率,可以调节基材表面的热输入,控制基材的熔深,同时粉末在束流中被预热,使粉末堆敷在表面的过程加快,提高了堆焊的生产效率。

4 讨 论

从粉末的热物理性能看,镍基合金粉末的熔点是 1 100 °C, WC 颗粒的熔点是 2 715 °C, 在高温下会发生 α -WC 向 β -WC 的转变。并且在 1 340 °C 时开始溶解^[2]。这种特性使 WC 颗粒极易在镍基合金中分解,形成 Fe₄.5Ni₁₈.5B₆ 和 W₃.2Cr₂.8B₃ 等化合物相。虽然析出的化合物作为弥散相可以提高焊层的强度,但 WC 的溶解和熔化降低了焊层的硬度和耐磨性,使焊层失去了利用 WC 颗粒作为硬质相来提高硬度和耐磨性的目的,这在图 5 中 25% WC 的耐磨试验结果中得到反映。

从以上的结果还知,梯度焊层的硬度、耐磨性都与焊层中 WC 的梯度成分有关,并随 WC 含量的增多有显著提高。WC 的分布和形貌影响着焊层的硬度和耐磨性。从激光堆焊的热作用过程看, WC 颗粒在高温热源的作用下会发生以下几种过程:(1)以 Ni、Si 元素为主的液相与 WC 颗粒较好地润湿,并在颗粒中流动,使颗粒比表面能高的棱角处首先

发生溶解;(2)在高温作用下 WC 颗粒的边缘发生熔化分解,过程如下



部分分解的 W、C 元素向液相扩散^[3]。

在梯度焊层中,造成 WC 颗粒溶解少的原因是:(1)随着梯度焊层 WC 比例的增加,可溶解 WC 的液相合金减少,限制了 WC 的进一步溶解;(2)较快的冷却速度使难熔的 WC 颗粒与液相的共存时间减少,没有足够的时间和温度进行溶解。试验证明,大于 50% WC 的梯度焊层中 WC 颗粒的溶解明显减少。因此,大量原始态 WC 的存在是梯度焊层耐磨性提高的主要原因。

5 结 论

(1)送粉的激光堆焊可以精细地控制送粉量和焊层的梯度成分,获得结合牢固、硬度高、耐磨性能好的梯度焊层。

(2)精细地控制送粉率可以调节基材表面的热输入,控制基材的熔深以及调整界面的成分。

(3)焊层的硬度和耐磨性能呈梯度变化与 WC 的梯度成分有关,梯度焊层 WC 溶解少,且以原始态形式存在是焊层硬度和耐磨性能提高的关键。

参考文献:

- [1] 李金桂. 现代表面工程设计手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000. 755 ~ 800.
- [2] 关振中. 激光加工工艺手册[M]. 北京: 中国计量出版社, 1998. 246 ~ 294.
- [3] 曲仕尧, 王新洪, 邹增大, 等. WC 硬质合金颗粒堆焊烧损的机理[J]. 焊接学报, 2001, 22(2): 85 ~ 88.

作者简介: 戚文军, 男, 1956 年 4 月出生, 工学硕士, 教授级高工。主要研究方向为激光加工与特种焊接技术。获省(部)级科技进步奖 6 项, 获国家专利 1 项。发表论文 10 余篇。

Email: hybgz@263.net

(编辑: 董卫国)