

铁基自熔合金光束熔覆层的微观组织及强化机理

单际国, 建春, 任家烈
(清华大学 机械工程系, 北京 100084)



单际国

摘 要: 采用 SEM、EDS、X 射线衍射及显微硬度和洛氏硬度分析手段研究了铁基自熔合金粉末光束熔覆层的微观组织及其物相组成。结果表明, Fe-Ni-Cr-B-Si 系合金粉末的光束熔覆层微观组织由固溶了大量 Cr、及少量 B、Si、C 的 $\gamma(\text{Fe-Ni})$ 树枝晶、枝晶间 $(\text{Cr, Fe})_7(\text{C, B})_3 + \gamma(\text{Fe, Ni})$ 共晶所构成。光束熔覆层的宏观硬度达 HRC47.3, 高于同种材料喷涂层及 TIG 熔覆层的硬度。Cr、Si 元素在 γ 相中的固溶、枝晶间共晶 $(\text{Cr, Fe})_7(\text{C, B})_3$ 高硬度相的析出是光束熔覆层得以强化的主要原因。

关键词: 光束熔覆; 微观组织; 强化机制; 铁基自熔合金粉末

中图分类号: TG401 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2001)04-01-04

0 序 言

聚焦光束作为一种新型高能密度热源, 具有能源利用率高, 设备造价低等特点, 在表面强化领域具有重要的开发应用价值^[1]。90 年代初俄罗斯学者成功地将其应用于高强铸铁构件的表面强化领域, 显示出了聚焦光束加热在表面强化领域的良好应用前景^[2]。国外同行在光束熔覆技术领域曾做出了积极努力^[3~5], 但仅限于熔覆工艺和熔覆层宏观质量的研究, 而有关熔覆层微观组织尤其是熔覆层物相及其强化机制的研究尚未见报道。铁基合金价格低廉, 资源丰富, 抗磨性好, 在工作温度及耐蚀性要求不高的情况下, 使用铁基合金进行光束熔覆具有重要的经济意义。系统研究铁基合金光束熔覆层的微观组织及物相, 并揭示其强化机理, 将为铁基合金光束熔覆工艺的制定及在生产中推广应用提供重要的理论基础。本文采用自行研制开发的光束加热设备, 研究了 Fe-Ni-Cr-B-Si 系铁基合金光束熔覆层的微观组织及其物相组成, 并对其强化机制进行了探讨。

1 试 验

基体材料为退火态 45 号钢, 试样尺寸为 12.35 mm×12.35 mm×50 mm, 熔覆材料为喷涂用

Fe 01、Fe 07、Fe 84 自熔合金粉末, 粒度均为 -140~+320 目, 其化学成分见表 1。熔覆前用有机粘结剂和无水乙醇将粉末预涂在基材表面, 厚度为 1.5 mm, 宽度为 5 mm, 涂后烘干。

表 1 Fe01、Fe07 和 Fe84 粉末的化学成分(质量分数, %)
Table 1 Chemical compositions of Fe 01, Fe 07 and Fe 84 powders

Cadding powders	C	Si	B	Cr	Ni	V	Fe
Fe 01	0.1~	2.5~	1.8~	18~	21~	1.2~	—
	0.2	3.5	2.4	20	23	2.0	
Fe 07	0.75~	3.0~	2.8~	15~	6.0~	—	Bal.
	0.90	4.0	3.5	18	9.0		
Fe 84	0.35~	2.0~	1.2~	12~	36~	—	
	0.55	3.0	2.0	14	38		

熔覆试验采用了 SR-II 型聚焦光束加热专机, 最小光斑直径为 5 mm, 功率与扫描速度可分别在 600~5 000 W、0.2~11 mm/s 范围内连续调节^[6]。本熔覆试验采用的光源电功率为 5 000 W, 扫描速度为 1.0 mm/s, 熔覆过程中采用氩气保护熔池。为便于比较, 还采用与光束熔覆相同的热输入条件进行了 TIG 法熔覆试验, 电压和电流分别为 20 V 和 80 A, 熔覆速度为 1.0 mm/s, 其它工艺条件也与光束粉末熔覆相同。

在 CSM950 扫描电镜、JSM-6301F 场发射扫描电镜和能谱仪(EDS)上观察熔覆层微观组织、测定析出相成分, 熔覆层的宏观硬度及析出相的显微硬

收稿日期: 2001-03-26
基金项目: 国家自然科学基金(59905017) 国家机械行业“九五”攻关项目(JHG-15); 清华大学 985 基础研究基金及实验室开放基金

度分别用 AR-10 洛氏硬度计及苏 HMT-3 显微硬度计进行测定, 载荷分别为 150 kg 和 10 g, 并用 D/max-RB 型 X 射线衍射仪进行物相分析。

2 试验结果及分析

2.1 铁基自熔合金粉末材料的光束熔覆工艺性

试验研究发现, 在 45 号钢基材上熔覆 Fe 01、Fe 07、Fe 84 三种合金粉末, 熔覆过程中均无飞溅现象, 其中 Fe 01、Fe 07 熔覆层成形差, 为分散的颗粒状, 表面氧化严重。Fe 84 熔覆层成形良好, 表面光滑且连续性好, 无宏观气孔和裂纹(图 1)。三种喷涂粉末的熔覆工艺性出现较大差异的原因是熔覆层与基材的结合方式为冶金结合。因此, 合金粉末熔化后对基材的润湿能力将直接影响到熔覆层的成形质量。研究表明, 熔覆层与基材间的润湿角 θ 随合金中 Ni 含量的增加而减小, 熔覆材料对基材的润湿能力因此而得到改善^[7]。由表 1 可知, Fe 84 合金粉末的含 Ni 量明显高于 Fe 01 和 Fe 07 合金粉末, 这可能是其熔覆层成形优于 Fe 01 和 Fe 07 两种粉末的主要原因。

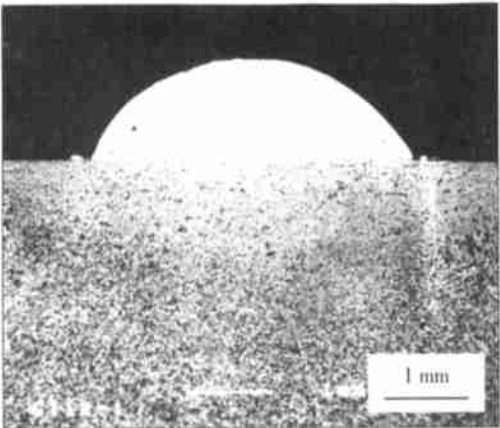


图 1 Fe 84 粉末光束熔覆层的横截面形貌
Fig. 1 Cross section morphology of light beam cladding layers with Fe84 powder(SEM, BEI)

2.2 Fe84 粉末熔覆层微观组织特点及其物相

熔覆层的微观组织由枝晶及枝晶间共晶形态的析出相组成, 其中枝晶逆热流方向垂直于熔合线向熔覆层内生长, 具有典型的联生结晶特征(图 2)。对枝晶间局部区域高倍观察发现, 枝晶 P1 间的共晶组织由白亮的网状 P2 和深色基底 P3 构成(图 3a)。该区域的背散射像表明, 析出相 P1 与 P3 的衬度较为接近(图 3b), 可以推测 P1 与 P3 在成分上应是相近或相同的。

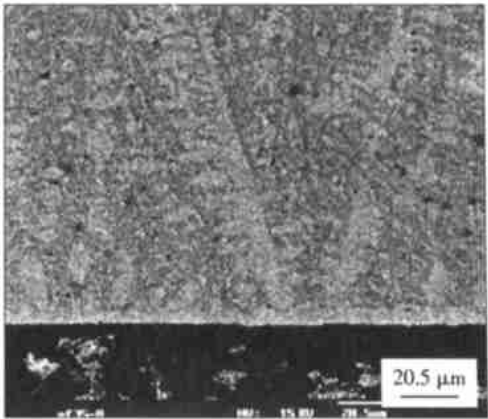


图 2 光束熔覆层的微观组织
Fig. 2 Microstructure of cladding layer(SEM, BEI)

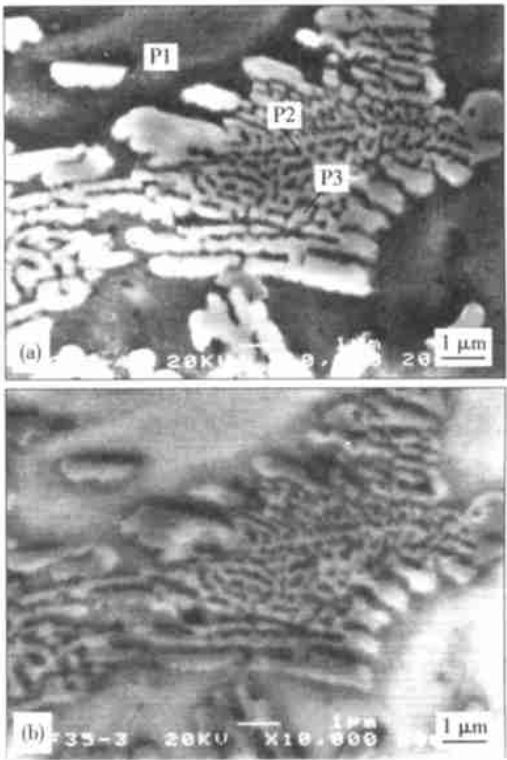


图 3 光束熔覆层中的析出相形态
Fig. 3 Precipitation of cladding layer
(SEM (a) SEL (b) BEI)

熔覆层内各析出相的能谱分析结果(表 2)表明, 树枝晶 P1 以 Fe、Ni 元素为主, 溶解了大量的 Cr 元素及少量的 C 和 Si 元素。树枝晶间的两相共晶平均成分与树枝晶相比 Ni 和 Si 含量有一定程度的减少, 但 Cr 和 C 的含量明显高于树枝晶以及原始粉末, 这充分说明与基底 P3 形成共晶的第二相 P2 中含有大量的 Cr 和 C 元素。为深入研究共晶组织的各物相中的元素分布特征, 对图 3 所示区域进行了元素面分布分析(图 4)。轻元素 C 和 B 由于原子序数较低, 其面分布标定结果仅能定性地反映它们在各析出相中的集中趋势。由图 4 可见, 合金元素

在熔覆层各析出相中的分布特征与能谱分析结果比较吻合, 树枝晶 $P1$ 相以 Fe 、 Ni 为基, 并溶解了大量的 Cr 及少量 Si 、 C 等元素, 综合其显微硬度值较低及析出形态等特征可推断为固溶体相。共晶组织中的 $P2$ 相富 Cr 而贫 Ni , 而 C 元素也基本集中在该物相中, 由其显微硬度值 ($HV_{0.01} 900\text{ kg/mm}^2$) 可推测其为一种铬的碳化物。 Fe 元素在 $P2$ 中的集中程度低于树枝晶 $P1$ 相, B 元素由于其原子序数低且其在原始粉末中的含量少, 在元素面分布图中未表现出明显的集中趋势, 但 Fe 和 B 仍有可能参与构成 $(Cr, Fe)_x(C, B)_y$ 型化合物。

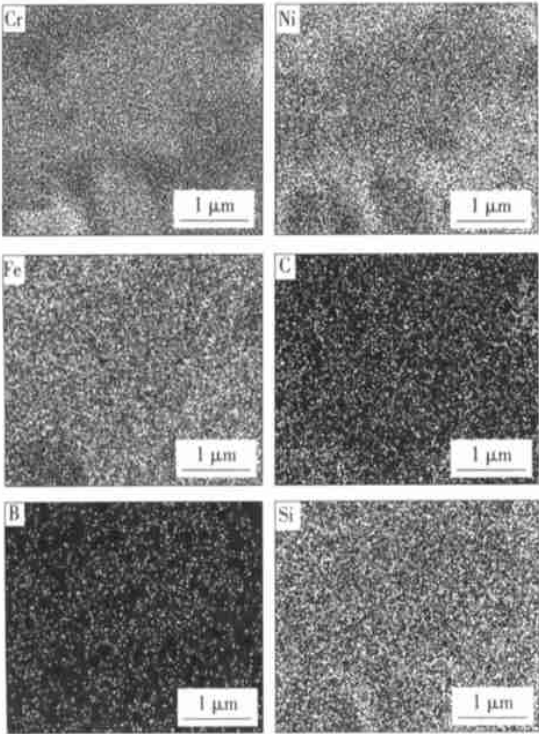


图 4 元素面分布图
Fig. 4 Alloy elements maps (SEM)

X 射线衍射结果(表 3)显示, 熔覆层中可能存在的物相的衍射数据与标准粉末衍射卡片中的 $\gamma(Fe, Ni)$ 、 Cr_7C_3 较为接近, 但熔覆层中实际存在物相的 d 值都存在一定的减小, 说明实际存在物相的晶格常数有变大的趋势, 综合能谱及元素面分布研究结果, Cr 、 C 、 B 、 Si 等元素在 $\gamma(Fe, Ni)$ 中的固溶以及 Fe 、 B 元素对 Cr_7C_3 部分 Cr 、 C 元素的替代都可能导致上述两物相的晶格畸变。因此, $Fe84$ 熔覆层的显微组织中的树枝晶实际应为固溶了 Cr 、 C 、 B 、 Si 的 $\gamma(Fe, Ni)$, 而枝晶间与 $\gamma(Fe, Ni)$ 形成共晶的物相应为 $(Cr, Fe)_7(C, B)_3$ (图 5)。熔覆层微观组织的形成机理可认为是: 在高温快冷条件下, 熔池中先析出 $\gamma(Fe, Ni)$, $\gamma(Fe, Ni)$ 的析出消耗了较多的 Cr 、 Si

元素, 剩余液相达到共晶成分时将发生共晶反应, 生成 $(Cr, Fe)_7(C, B)_3 + \gamma(Fe, Ni)$ 共晶。

表 2 Fe 84 粉末熔覆层中树枝晶和枝晶间析出共晶相 EDS 分析结果及显微硬度

Micro-structure	Alloy elements (mass fraction, %)					$HV_{0.01}$ / $kg\cdot mm^{-2}$
	C	Si	Cr	Fe	Ni	
Dendrite	0.18	2.10	11.61	46.90	39.20	515
Eutectic	0.68	1.56	25.08	45.58	27.09	916

表 3 熔覆层的 X 射线衍射结果及与其相吻合的物相
Table 3 XRD result and correspondent phases of cladding layer

XRD result		Correspondent phases	
d	I	$\gamma(Fe, Ni)$	Cr_7C_3
2.29	9		2.2969 ₃₃
2.12	10		2.1231 ₄₆
2.07	100	2.08 ₁₀₀	
2.04	21		2.0489 ₁₀₀
2.02	10		2.0256 ₁₃
1.84	9		1.8490 ₁₁
1.82	11		1.8162 ₂₄
1.80	26	1.80 ₈₀	
1.77	14		1.7546 ₁₆
1.27	22	1.270 ₅₀	
1.20	9		1.2107 ₁₂
1.18	8		1.1874 ₁₃
			1.1737 ₁₀
			1.1694 ₁₂
1.08	29	1.083 ₈₀	
1.03	10	1.037 ₅₀	

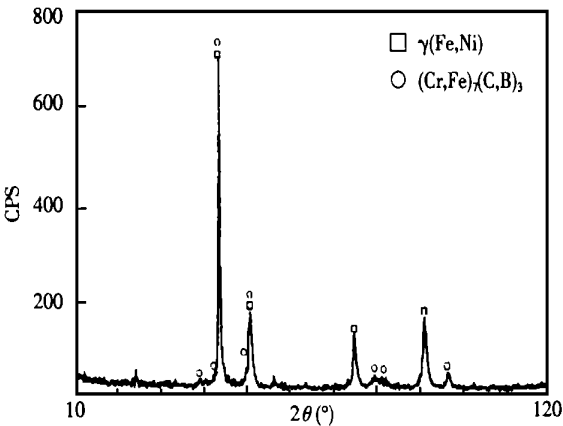


图 5 熔覆层的 X 射线衍射图
Fig. 5 X-ray diffraction spectra of cladding layer

2.3 Fe 84 粉末熔覆层的强化机理

对熔覆层的宏观硬度分析表明(图 6), Fe 84 合金粉末光束熔覆层的表面宏观硬度达 HRC47.3, 比 TIG 熔覆层宏观硬度值(HRC46.8)稍高, 而相对于喷涂层^[8](名义硬度 HRC38~42)而言, 硬度则提高约 15%。光束熔覆层析出相显微硬度测量结果表明, 熔覆层中除显微硬度达 900HV_{0.01} 以上的 (Cr, Fe)₇(C, B)₃ 在 γ (Fe, Ni)枝晶间析出外, γ (Fe, Ni)枝晶的显微硬度也达 500HV_{0.01} 以上。析出相的 EDS 分析结果显示, γ (Fe, Ni)中固溶了较多的 Cr、Si 元素。Cr、Si 元素在 γ 枝晶中的固溶必然导致 γ (Fe, Ni)晶格畸变, 这与熔覆层 XRD 结果所得 γ (Fe, Ni)的 d 值与理论值产生偏差是相吻合的。另外, 枝晶间析出的 (Cr, Fe)₇(C, B)₃ 高硬度物相成为韧性基体 γ (Fe, Ni)的支撑骨架。可见, γ (Fe, Ni)的固溶强化及作为骨架的高硬度相的析出在很大程度上决定了熔覆层硬度的提高。

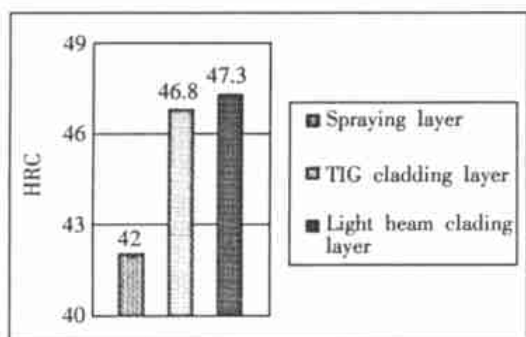


图 6 Fe 84 粉末喷涂层、TIG 及光束熔覆层的宏观硬度

Fig. 6 Macrohardness of Fe 84 powder spraying layer, TIG and light beam cladding layer

3 结 论

(1) Fe 84 合金粉末中因 Ni 元素含量较高, 对基材润湿能力得以改善, 故比 Fe 01、Fe 07 合金粉末光束熔覆层成形好。

(2) Fe 84 光束熔覆层的显微组织是由 γ (Fe,

Ni)枝晶, 枝晶间 (Cr, Fe)₇(C, B)₃ + γ (Fe, Ni)共晶所构成的亚共晶组织。

(3) Fe 84 光束熔覆层的宏观硬度值达 HRC 47.3, 高于同种材料 TIG 熔覆层的表面硬度及喷涂层的名义硬度。Cr、Si 元素在 γ 相中的固溶导致的晶格畸变以及枝晶间析出的共晶 (Cr, Fe)₇(C, B)₃ 高硬度相是光束熔覆层得以强化的主要原因。

参考文献:

- [1] 单际国. 聚焦光束钎焊及表面改性技术[M]. 北京: 清华大学博士后研究报告, 1998.
- [2] Arkhipov, Ablav, Krasnov, *et al.* Structure and hardness of high-strength Vch500 cast iron with hardening with light beam [J]. Metal Science and Heat Treatment, 1991, 32(7): 511 ~ 513.
- [3] Hesse Peter. Leistungssteigerung beim Lichtstrahlverfahren[J]. Schweissen und Schneiden, 1974, 26(3): 94 ~ 96.
- [4] Ogino K, Kinoshita H. Hardcladding by use of light beam welding[J]. Journal of High Temperature Society of Japan, 1980, 6(4): 163 ~ 169.
- [5] Suleimanov S, Baizakov B, Bugakov A, *et al.* Cladding of stainless steel on carbon steel[J]. Journal De Physique, 1999, 9(3): Part 3 ~ 447 ~ 451.
- [6] 单际国, 吴爱萍, 任家烈, 等. 复合聚焦高能密度光束熔覆设备及熔覆方法[P]. 中国专利: 011094176, 2001.
- [7] 宋武林, 朱蓓蒂, 曾晓雁. Ni 含量对 Fe-Cr-Ni 合金激光熔覆层性能及开裂敏感性的影响[J]. 金属热处理学报, 1996, (17) 1: 62 ~ 64.
- [8] 鲍明远. 氧乙炔火焰粉末喷涂和喷焊技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1993. 131 ~ 135.

作者简介: 单际国, 男, 1965 年 10 月出生, 副教授。1988 年上海交通大学焊接专业毕业后分配到哈尔滨焊接研究所从事科研工作。1996 年 6 月在乌克兰科学院巴顿焊接研究所获工学博士学位。1998 年 6 月在清华大学材料科学与工程博士后流动站, 出站后留校任教。曾参加了国家“七五”攻关项目, 主持并完成了中国博士后科学基金、国家留学回国人员启动基金、国家机械行业“九五”攻关等项目。目前负责国家自然科学基金“高能密度光束粉末堆焊机理及工艺”的研究开发工作。研究方向为高能束表面改性及新材料连接。发表论文 30 余篇。

(编辑: 王 亚)

书讯: 本刊编辑部现有 1998 年度和 1999 年度《焊接学报》增刊, 每本定价 20 元(含邮费)。另外, 没有预订 2001 年度《焊接学报》的读者可直接与本刊编辑部联系, 每期定价 15 元(含邮费)。如有需要的读者, 可通过邮局将书款汇至《焊接学报》编辑部。

联系人: 闫秀荣 地 址: 哈尔滨市和兴路 111 号《焊接学报》编辑部 邮编: 150080