

FeCrSiB 合金的激光熔敷

杨洗陈 阎毓禾

(天津纺织工学院激光加工研究室)

汪兴凯 顾洪武

(天津市热喷涂技术中心)

提要: 应用 5kW-CO₂ 激光器在 A₃ 钢板上进行 Fe 基合金熔敷处理。试验表明, 激光熔敷层组织微细, 成分均匀; 相组成为 α' -Fe + γ -Fe + M₇C₃ + M₂₃C₆ + Fe₂B; 产生多种强化效应, 其组织和性能比热喷涂层有明显提高, 在低成本钢材上可望获得与 18-8 不锈钢相当的高抗磨耐腐蚀表面。

Laser cladding of FeCrSiB alloy

Yang Xichen, Yan Yuhe

(Laser Processing Laboratory, Tianjin College of Textile Technology, Tianjin)

Wang Xiangkai, Gu Hongwu

(Tianjin Thermal Spraying Technology Centre, Tianjin)

Abstract: Laser cladding of FeCrSiB alloy coatings on A₃ steel plate has been performed with a 5 kW CO₂ laser. The microstructure and performance have been significantly improved. Laser cladding casing consist of α' -Fe + γ -Fe + M₂₃C₆ + M₇C₃ + Fe₂B. Excellent performances of surface alloy have been obtained on low priced steel plate. It is shown that laser cladding is viable for controllably modified materials surface.

一、引言

在低成本钢材上被复薄的高合金表面层, 以代替昂贵的块状合金是现代材料科学技术一个活跃的研究领域。热喷涂是一种应用广泛的表面强化技术, 但其热源功率低, 致使涂层内存在孔洞等缺陷; 涂层与基体结合不良, 难于适应较恶劣的工作环境。用高功率激光对涂层进行快速熔凝处理, 能解决电力设备中高抗磨耐蚀课题。我们开展了 A₃

钢表面激光熔敷 Fe 基合金涂层的研究, 获得了新的激冷组织, 显著地提高了涂层的性能。

二、试验方法

选用 FeCrSiB 合金粉末作喷涂材料, 其化学成份为: 46.9 Wt % Fe, 45 Wt % Cr, 4.8 Wt % C, 1.2 Wt % Si, 2.1 Wt % B。基材为 A₃ 钢板, 试件尺寸 50 × 30 × 10 mm。用

收稿日期: 1986 年 7 月 7 日。

火焰喷枪将粉末均匀喷涂到试件上, 厚度约 0.4 mm。

用 5 kW 横流 CO₂ 激光器进行熔敷处理。光束直径 4 mm, 功率密度 2.78×10^4 W/cm², 光束移动速度 13.5 mm/s。多道扫描, 每道搭接 0.5 mm。为防止氧化, 激光处理时, 吹氩气保护。

三、激光熔敷层的显微结构

1. 火焰喷涂层的组织形貌

图 1 是火焰喷涂层的金相照片, 层内粉末粒子熔化不充分, 个别的仍保持球粒状; 层内含有大量气孔及氧化物; 涂层与基体接合处有一黑色氧化物带。显然其强度不会很高。使用火焰喷焊将涂层熔化, 但其冷却速度低,

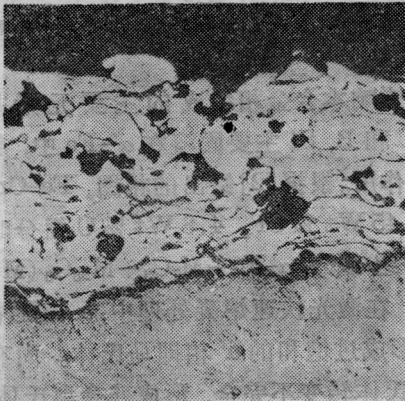


图 1 FeCrSiB 合金火焰喷涂层的低倍金相形貌 ($\times 150$)

浸蚀条件: HNO₃:HCl:甘油=1:3:5, 电解腐蚀

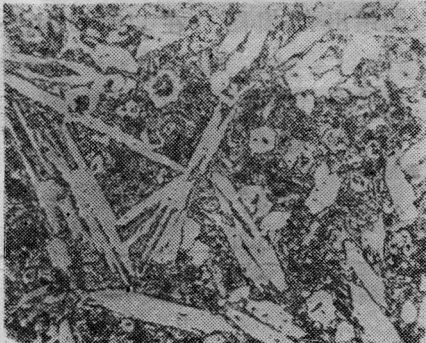


图 2 FeCrSiB 合金火焰喷焊层的形貌 ($\times 1000$)

浸蚀条件: HNO₃:HCl:甘油=1:3:5, 电解腐蚀

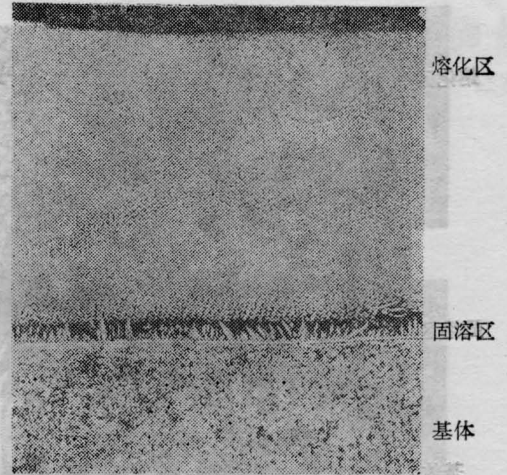


图 3 FeCrSiB 合金激光熔敷层的低倍金相形貌 ($\times 150$)

浸蚀条件: HNO₃:HCl:甘油=1:3:5, 电解腐蚀

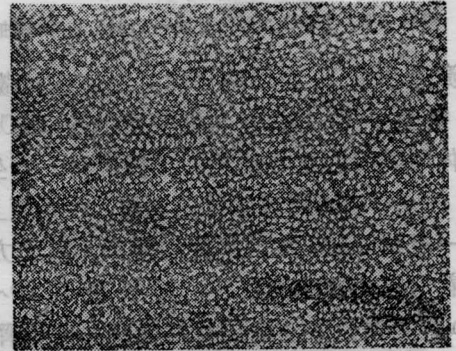


图 4 FeCrSiB 合金激光熔敷层的高倍金相组织 ($\times 1000$)

浸蚀条件: HNO₃:HCl:甘油=1:3:5, 电解腐蚀

热影响区达 4~5 mm。特别是高抗磨耐蚀相 (Cr, Fe)₇C₃ 严重偏析, 以粗大条块杂散分布在基体上, 其组织如图 2 所示。

2. 激光熔敷层组织形貌

图 3 是激光熔敷层的形貌照片, 它由熔化区、固溶区、热影响区(基体)组成。与火焰喷焊层相比, 组织发生显著的变化, 熔层致密均匀, 由沿着热流方向生长的微细枝晶组成, 火焰涂层中大块碳化物已熔凝成细小枝晶网络。图 4 是图 3 熔区高倍照片, 从中可见到尺寸 1~2 μm 微小胞状晶形貌, 与图 2 相比, 组织细化达 10~10³ 倍。在熔层和基体之间是固溶区, 图 5 是其高倍照片。在高功

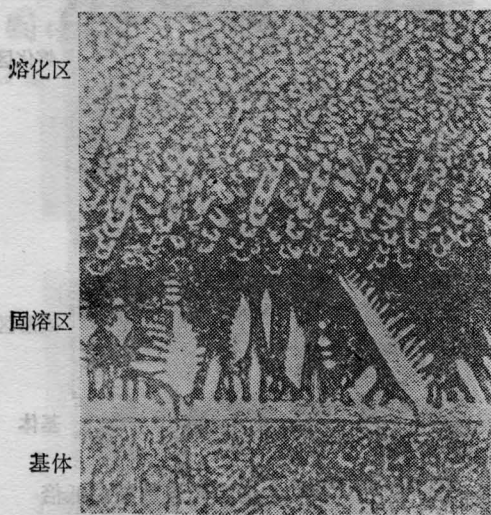


图5 FeCrSiB合金激光熔敷层固溶区的高倍金相照片($\times 1000$)

侵蚀条件: $\text{HNO}_3:\text{HCl}:\text{甘油}=1:3:5$, 电解腐蚀

率激光作用下, 涂层熔化同时也使基材微熔。 A_3 钢呈 $\gamma\text{-Fe}$ 相, 它与熔敷层中 $\gamma\text{-FeCr}$ 固溶体同属面心立方结构, 无限固溶, 产生富Cr的 $\gamma\text{-FeCr}$ 固溶体首先成核, 在界面上生长一条约 $4\mu\text{m}$ 宽的平直固溶线, 其上方生长着沿热流方向的枝晶, 其长度约 $20\sim 30\mu\text{m}$ 。基体微熔使涂层材料受到一定稀释^[1], 形成韧性良好的铁素体-马氏体基底。固溶区的存在, 是激光熔敷层中涂层与基体冶金结合的标志。靠近白亮层的基体是热影响区, 由于扩散和快冷, 组织也发生明显细化。

3. 激光熔敷层的元素分布

图6、图7分别是火焰涂层和激光熔敷层电子探针Cr元素浓度分布曲线, 背底是



图6 FeCrSiB合金火焰喷涂层Cr元素浓度电子探针线扫描

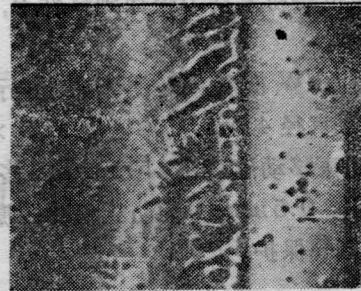


图7 FeCrSiB合金激光熔敷层的Cr元素浓度电子探针线扫描

吸收电子像。显然, 火焰涂层成分分布不均匀; 激光处理后改善了元素分布的均匀性, 而且Cr元素向基体有扩散。

4. 激光熔敷层相分析

图8是FeCrSiB合金激光熔敷层的X射线衍射图谱, 经鉴定分析, 其主要相为: $\alpha\text{-Fe}$ 、 $\gamma\text{-Fe}$ 、 $(\text{Cr}, \text{Fe})_7\text{C}_3$ 、 $(\text{Cr}, \text{Fe})_{23}\text{C}_6$ 及 Fe_2B 。

影响本合金相组成的主要元素是Fe、Cr、C和B, Si主要固溶在 $\alpha\text{-Fe}$ 中, 起固溶强化作用。根据[2]给出的相图, Fe-Cr-C系在有45Wt% Cr、4.8Wt% C组分时, 其平衡组织为 $\alpha\text{-Fe} + \text{M}_7\text{C}_3 + \text{M}_{23}\text{C}_6$ ($\text{M} = \text{Cr}, \text{Fe}$)。在激光快速熔凝处理中, α 相固溶线扩大, 形成过饱和的 α' 相即马氏体。尚有一部分奥氏体转变不完全, 形成残余奥氏体。由于奥氏体中C的溶解度有限, 合金中大量的碳以碳化物 M_7C_3 和 M_{23}C_6 形式析出, M_7C_3 是主量相, 它以一次晶形式直接从熔态析出。根据[3]给出的相图, 在 1161°C 时, $\gamma\text{-Fe}$

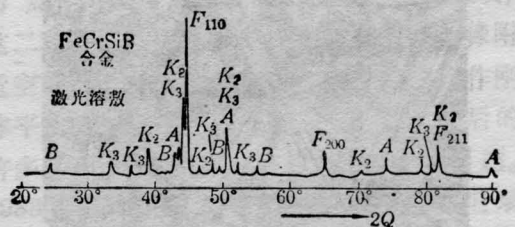


图8 FeCrSiB合金激光熔敷层的X射线衍射图谱

F: $\alpha'\text{-Fe}$; A: $\gamma\text{-Fe}$; K_2 : M_7C_3 ;
 K_3 : M_{23}C_6 ; B: Fe_2B

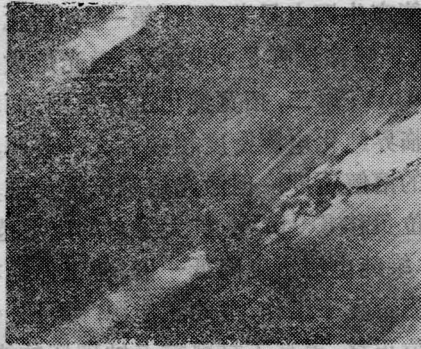


图9 FeCrSiB合金激光熔敷层的透射电镜照片,显示 α' -Fe+ M_7C_3 共晶形貌($\times 4000$)



图10 FeCrSiB合金激光熔敷层中的层错透射电镜形貌($\times 5000$)

与 Fe_2B 发生共晶反应。显然在快冷过程中,也会有 Fe_2B 以平衡相析出。 M_7C_3 、 $M_{23}C_6$ 和 Fe_2B 都是优良的硬质相,它们的存在,无疑会提高涂层的硬度和抗磨耐蚀性能。

图9是 α' -Fe与 M_7C_3 共晶高倍电镜照片,白条物为 M_7C_3 ,其内有位错亚结构;灰色基体是 α' -Fe,其内存在黑白相间片层衬度,反映了马氏体内存在孪晶或长周期结构^[4]。在 α' -Fe中还发现严重的层错,层错密度很高(图10)。由于激光快速熔凝,高温中溶于基体中的过剩的O、Si、B原子不能长程扩散,以至造成晶格畸变。层错的出现,无疑会提高激光熔敷层的强度和硬度。

四、激光熔敷层的性能

1. 硬度与磨损性能

图11是FeCrSiB合金激光熔敷层的显微硬度曲线。熔区硬度均匀,平均硬度1260,基体硬度350。图12是其磨粒磨损试验曲线。试样尺寸 $57 \times 25 \times 6$ mm。磨损试验机

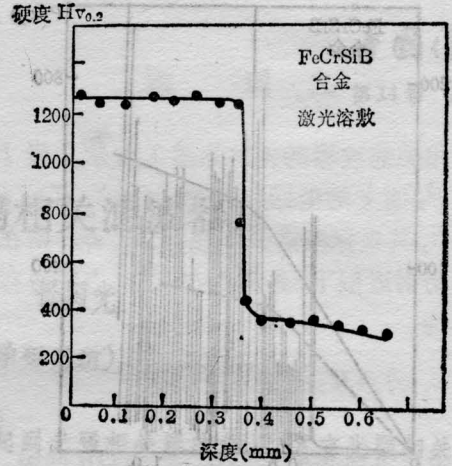


图11 FeCrSiB合金激光熔敷层的硬度分布曲线

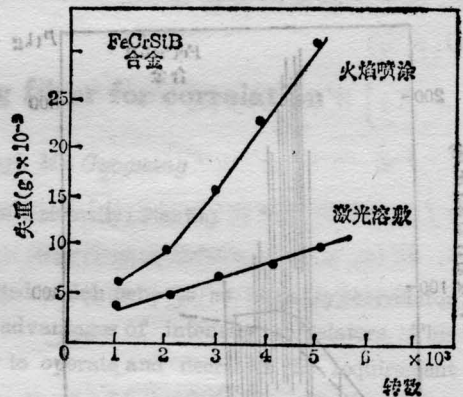


图12 FeCrSiB合金激光熔敷层的磨粒磨损曲线
转数240转/分,加载2.5kg,正压力7kg,磨损周期1000转。用精密天平测量每一周期失重。激光熔敷后磨粒磨损性能成倍提高。

2. 声发射试验

用声发射技术评价表面渗层的脆性已有报道^[5,6]。我们采用声发射结合三点弯曲试验,图13分别记录了激光熔敷试样(上)和火焰喷涂试样(下)在载荷 P 作用下缺陷的动态发展过程和应力-应变曲线。

火焰喷涂试样在很小的应变下即出现突发型声发射信号,说明涂层较早产生微裂纹;在屈服区间,出现了大幅度高频率连续型信号,之后载荷下降,试样失去弹性,声发射计数率大幅度降低,表明微裂纹增多增大导致脆断,其脆断强度 $\sigma_k = 32.1 \text{ kg/mm}^2$,吸收能量 $A_k = 0.81 \text{ kg} \cdot \text{mm/mm}^2$,可见脆性指标

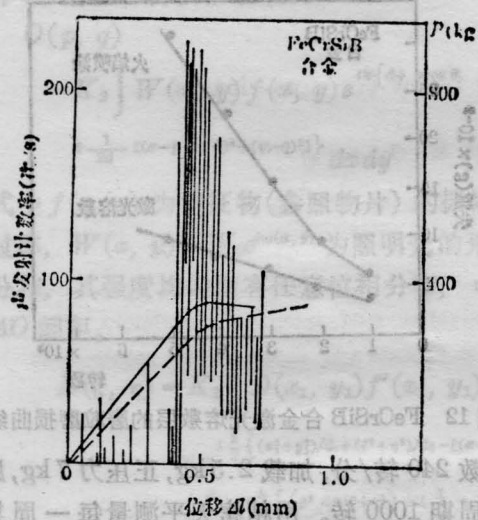
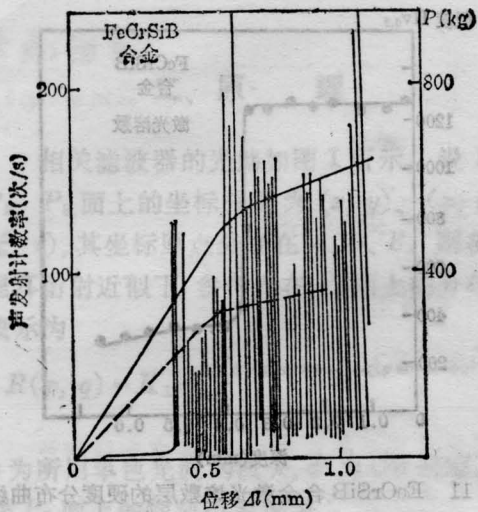


图 13 FeCrSiB 合金声发射曲线

很低。其屈服强度和断裂强度比 A_3 钢基体没有多大提高。而激光熔敷试样直到屈服前夕才出现声发射信号，在弹塑性阶段试样才脆断。与火焰喷涂试样比较， σ_k 提高7倍， A_k 提高30多倍。与两种 A_3 钢渗硼工艺相比^[6]，激光熔敷试样的脆性指标要好得多。激光熔敷显著地改善了脆性，提高了韧性。本工艺带来的另一效果是显著提高材料的强度，屈服强度和断裂强度比基材 A_3 钢提高一倍。

3. 电化学试验

我们采用动态电位法测量了激光熔敷层和火焰喷涂层的阳极极化曲线，示于图14。FeCrSiB合金涂层激光熔敷处理后，其电化

学性能产生四点显著变化：第一，使活化区窄化，火焰喷涂试样是600 mV，激光熔敷减小到180 mV；第二，拓宽纯化工作范围，两种试样的临界纯化电流密度相差不大，表明具有相近的溶解速度，但激光熔敷试样使临界纯化电位负移310 mV，扩大了它的应用范围；第三，维持电流密度降低一倍，使工件能在较低电流密度下工作，节约了能源；第四，使点蚀电位正移，提高了材料抗点蚀破坏的能力。试验表明，激光熔敷的FeCrSiB合金层其电化学性能已十分接近高级奥氏体不锈钢1Cr18Ni9Ti。

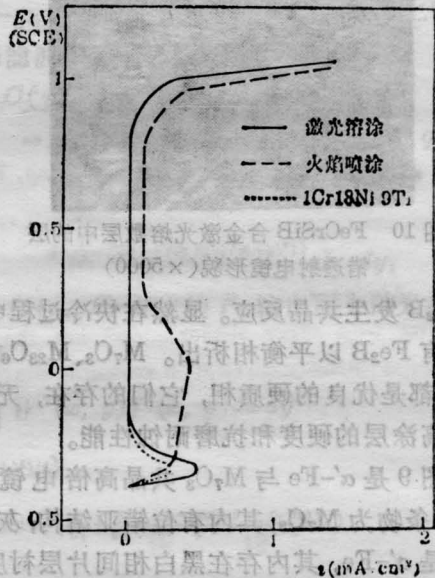


图 14 FeCrSiB 合金激光熔敷层的动态阳极极化曲线

(扫描速率=100 mV/分, 1NH₂SO₄)

参 考 文 献

- [1] C. A. Liu, M. J. Humphries; ICALCO '83 Proceedings, Laser Institute of American, 1983, 38, 108.
- [2] Bungardt et al.; Arch. Eisenhüttenwes., 1958, 29, 193~203.
- [3] A. S. M. Hand Book, 1973, 270.
- [4] 刘曼朗等;《钢铁研究总院学报》, 1984, 4, 423.
- [5] 北京钢铁学院金相热处理专业等;《金属学报》, 1977, 13, 1~2.
- [6] 马鹤庆, 孙希泰;《理化检验(物理分册)》, 1984, 23, No.1, 2~4.