

CO₂ 激光和等离子堆焊镍基合金粉末的性能

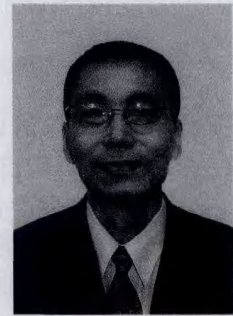
徐国建¹, 董士龙¹, 杭争翔¹, 张翼飞², 李永波², 沓名宗春³

(1. 沈阳工业大学 材料科学与工程学院, 沈阳 110870; 2. 沈阳新松机器人自动化股份有限公司, 沈阳 110168;
3. 最新激光技术研究中心, 日本 安城 446-0026)

摘 要: 为了提高核发电成套设备的阀体(材质为 SUS316LN 不锈钢)性能, 在 SUS316LN 不锈钢上采用 CO₂ 激光和等离子堆焊镍基合金粉末. 利用激光显微镜, 扫描电子显微镜(SEM)、X 射线衍射(XRD)、电子探针(EPMA)和能谱(EDS)等分析了堆焊层的组织形态和性能. 结果表明, 堆焊层属于过共晶组织; 初晶相由硼化物(CrB)和碳化物(Cr₇C₃)组成, 而共晶组织由富镍奥氏体(γ-Ni) + CrB 或富镍奥氏体(γ-Ni) + Cr₇C₃ 组成; 与等离子堆焊相比, CO₂ 激光堆焊层具有更高的耐磨性能、细小的晶粒组织、低的稀释率和高堆焊效率.

关键词: CO₂ 激光堆焊; 等离子堆焊; 过共晶组织; 共晶组织; 初晶相

中图分类号: TG456.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2013)12-0050-05



徐国建

0 序 言

SUS316LN 不锈钢具有优良的强韧性和耐蚀性, 使其被广泛用于核发电成套设备中, 但是 SUS316LN 不锈钢的耐磨性能较差^[1]. 为了改善 SUS316LN 不锈钢的耐磨性能, 往往利用电弧(等离子和 TIG)堆焊方法在其表面堆焊一层合金强化层, 但是很容易在热影响区产生液化裂纹; 另外容易使脆硬的堆焊层裂纹敏感性提高. 为了同时避免上述两种裂纹的产生, 激光堆焊可以说是一种理想的选择. 该研究中首先采用 CO₂ 激光堆焊方法在 SUS316L

不锈钢板材上确定最佳的激光堆焊工艺参数, 然后利用确定的最佳激光堆焊工艺参数在零部件(材质为 SUS316LN 不锈钢)上进行激光堆焊. 最后对 CO₂ 激光堆焊层和以往的等离子堆焊层的组织和性能进行了比较分析.

1 试验方法

1.1 材料选择

SUS316L 和 SUS316LN 不锈钢及镍基合金粉末(WELPC-6)的化学成分如表 1 所示.

表 1 SUS316L 和 SUS316LN 及 WELPC-6 的化学成分
Table 1 Chemical compositions of SUS316L, SUS316LN and WELPC-6

	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Co	B	Fe	N
母材-SUS316L	≤0.03	≤1.00	≤2.00	12.00~15.00	16.00~18.00	2.00~3.00	0	0	余量	0
零件-SUS316LN	≤0.03	≤1.00	≤2.00	10.50~14.50	16.50~18.50	2.00~3.00	0	0	余量	0.12~0.22
粉末-WELPC-6	0.70	4.28	0	余量	14.56	0	0.09	3.37	3.80	0

1.2 试验装置

CO₂ 激光试板堆焊系统示意图和阀体堆焊系统照片如图 1 所示. CO₂ 激光器的额定输出功率为 2.4 kW, 激光束的能量分布近似为高斯分布, 聚焦镜片的焦距为 200 mm.

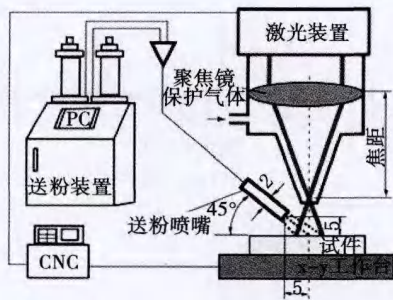
堆焊层耐磨性能试验采用了 MM200 型的磨损试验机, 磨损试验机的工作原理如图 2 所示. 摩擦盘尺寸为 φ50 mm × 10 mm、硬度为 HRC60~65 的 GCr15 轴承钢. 施加载荷为 98 N, 摩擦盘的旋转频率为 62.8 m/min, 摩擦时间为 30 min. 耐磨试验结果测得了堆焊层的摩擦系数(μ), 其大小为^[2]

$$\mu = M/RF \quad (1)$$

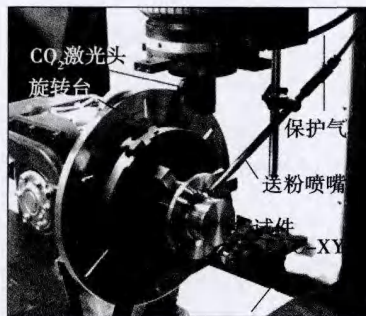
收稿日期: 2012-07-11

基金项目: 辽宁省自然科学基金资助项目(20092047)

式中: M 为摩擦力矩; R 为摩擦盘半径; F 为施加载荷.



(a) 板件的CO₂激光堆焊系统示意图(mm)



(b) 阀门的CO₂激光堆焊系统

图 1 板件和阀体的 CO₂ 激光堆焊系统

Fig. 1 Schematic drawing and photograph of CO₂ laser cladding setup for plate and power plant part

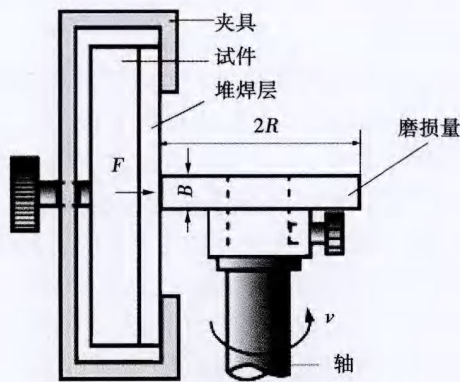


图 2 磨损试验装置示意图

Fig. 2 Schematic of wear test setup

1.3 堆焊工艺参数

核电成套装备中阀体的 CO₂ 激光堆焊最佳工艺参数,激光输出功率 2.1 kW,离焦量 +15 mm, CNC-XY 工作台行走(水平速度)3.58 mm/min,旋转工作台旋转频率 2.96 r/min,粉末牌号 WELPC-6,送粉速度 25 g/min,送粉气体流量(Ar)2.5 L/min,保护气体流量(Ar)为 20 L/min,母材材质 SUS316L

或 SUS316LN,预热温度 693 ~ 723 K,焊后热处理状态空冷.堆焊层是用螺旋状 10 道堆焊完成,堆焊层之间的搭接量为 30%.

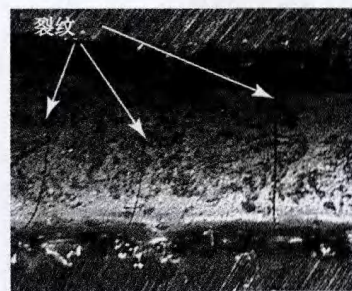
等离子堆焊的最佳工艺参数为焊接电流 56 ~ 68 A,电弧电压 26 V,旋转工作台旋转频率 0.35 r/min,粉末牌号 WELPEC-6,送粉速度 1.5 ~ 4.5 g/min,送粉气体流量(Ar)为 4 L/min,母材 SUS316LN,等离子气体流量(Ar)0.8 L/min,保护气体流量(Ar)15 L/min,钨极直径为 3.2 mm,焊后热处理状态为空冷,预热温度为 643 ~ 698 K.

2 试验结果和讨论

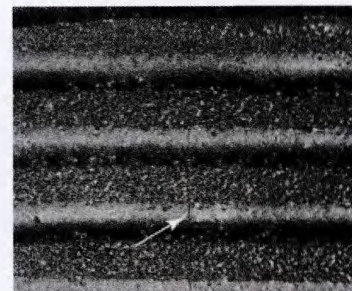
2.1 激光堆焊层的裂纹敏感性

利用 CO₂ 激光进行单道和多道堆焊试验过程中,焊道的长度均为 50 mm. 预热温度较低情况下单道堆焊层产生的裂纹如图 3a 所示^[3],由图 3a 可知,裂纹方向基本上是垂直于堆焊层长度方向,即产生了横向裂纹.当单道堆焊时的预热温度不低于 673 K 时,可有效防止该种横向裂纹的产生.通过试验结果可知,随着预热温度的提高,堆焊层的裂纹敏感性降低,因为预热能够降低焊接残余应力和焊接冷却速度的缘故^[4].

CO₂ 激光多道堆焊后的裂纹形态如图 3b 所示.由图 3b 可知,裂纹方向与堆焊层长度方向基本垂



(a) 单道堆焊层裂纹



(b) 多道堆焊层的裂纹形态(预热623 K)

图 3 单道堆焊层的裂纹(室温)和多道堆焊的裂纹形态
Fig. 3 Crack in single pass bead with room temperature and crack morphology in multi-passes bead

直. 当预热温度不低于 693 K 时, 可有效防止多道堆焊层产生裂纹^[5].

2.2 磨损试验

CO₂ 激光和等离子堆焊试件的耐磨性能试验结果如图 4 所示. 由试验结果可知, CO₂ 激光和等离子堆焊层的摩擦系数分别为 0.42 ~ 0.48 和 0.51 ~ 0.58; CO₂ 激光和等离子堆焊层的磨损失重分别为 7 mg 和 380 mg. 由上述结果可知, CO₂ 激光堆焊层的耐磨性能优于等离子堆焊层^[6].

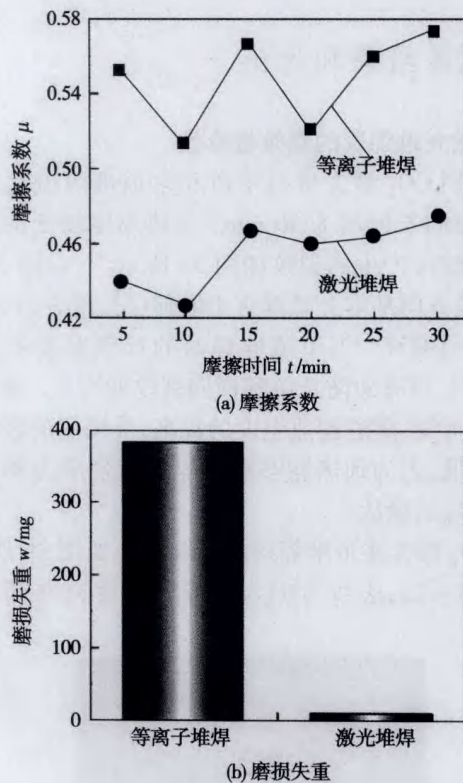


图 4 CO₂ 激光和等离子堆焊层的摩擦系数和磨损失重
Fig. 4 Friction coefficient and wear mass of multi-pass bead for power plant machinery part of laser cladding and plasma cladding

2.3 堆焊层的显微组织

2.3.1 等离子堆焊层的显微组织

CO₂ 激光和等离子堆焊层的 X 射线衍射分析结果如图 5 所示. 由分析结果可知, 堆焊层由富镍奥代体相 ($\gamma\text{-Ni}$)、硼化物相 (CrB) 和碳化物相 (Cr_7C_3) 组成.

等离子堆焊层的显微组织如图 6 所示. 由金相组织分析结果可知, 堆焊层上部的显微组织属于过共晶组织. 从熔合线到堆焊层表面依次可以观察到平面晶生长区, 共晶组织区和过共晶组织区. 过共晶组织中的初晶相形态有长条状 (图 6a)、星状

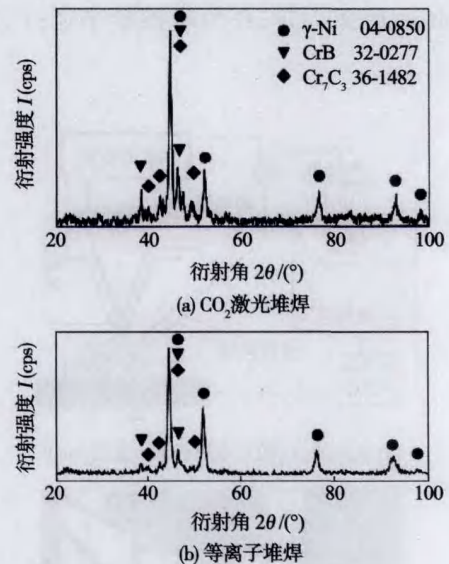


图 5 堆焊层的 X 射线衍射分析结果
Fig. 5 Results of X-ray diffraction analysis of clad layer

(图 6b)、针状 (图 6c) 和块状 (图 6d). 共晶组织的形态有普通状和菊花状, 分别如图 6e 和 6f.

由上述图 5 的 X 射线衍射分析结果及下述的电子探针和能谱微区成分分析结果可知初晶相由 CrB 和 Cr_7C_3 组成, 初晶相的最大尺寸约为 20 μm ^[7].

2.3.2 CO₂ 激光堆焊层的显微组织

CO₂ 激光堆焊层的显微组织如图 7 所示, 由金相组织分析结果可知, 堆焊层上部的组织也是由过共晶组织构成.

从熔合线到堆焊表面依次可以看到平面晶生长区 A、亚共晶组织区 B、共晶组织区 C 以及过共晶组织区 D 如图 7a 所示. 在过共晶组织中的初晶相形态有针状, 如图 7b 所示, 初晶相形态也有块状, 如图 7c 所示. 初晶相的最大尺寸约为 5 μm , 初晶相的最大尺寸远远小于等离子堆焊层的初晶相的尺寸, 这是由于激光堆焊过程中, 激光作为热源有快速加热和快速冷却的特点, 这样就抑制了晶粒的长大, 所以激光堆焊过程中, 初晶相的最大尺寸远远小于等离子堆焊层的初晶相的尺寸.

CO₂ 激光堆焊层的电子探针 (EPMA) 分析结果可知, 堆焊层的初晶相主要由 CrB 组成. CO₂ 激光堆焊层中的过共晶组织和松树枝状共晶组织的能谱成分分析 (EDS) 结果可知, 过共晶组织的初晶相中镍和铁含量低于的共晶组织, 而铬含量高于共晶组织, 所以, 初晶相是由 CrB 或 Cr_7C_3 构成, 而共晶组织是由 $\gamma\text{-Ni} + \text{Cr}$ 或 $\gamma\text{-Ni} + \text{Cr}_7\text{C}_3$ 构成^[8]. 松树枝状共晶组织的铬和碳含量高, 而镍含量低, 所以松树枝状共晶组织是由 $\gamma\text{-Ni} + \text{Cr}_7\text{C}_3$ 构成.

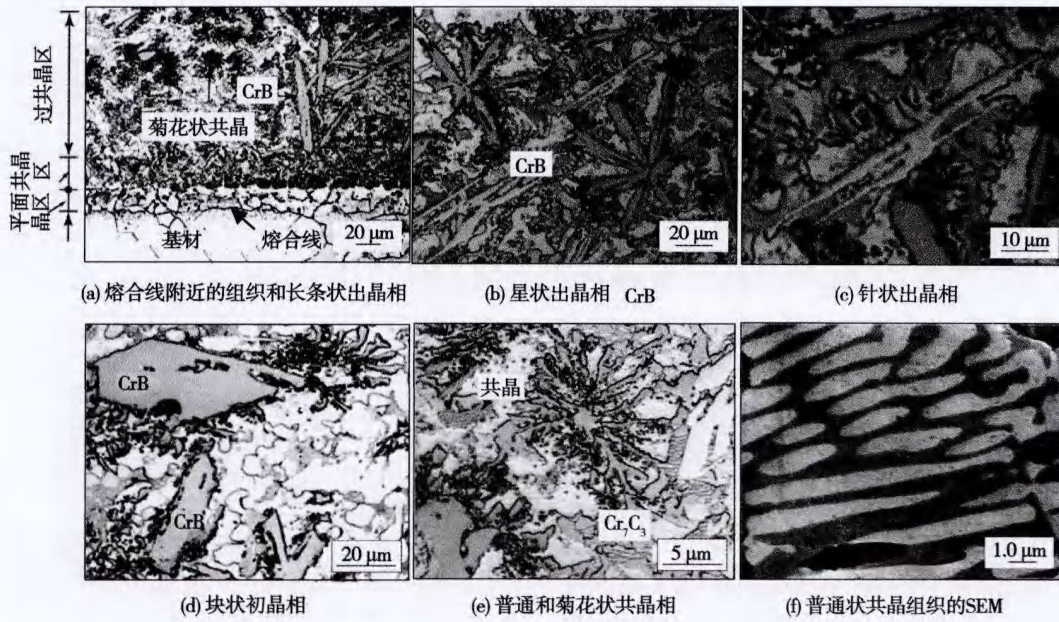


图 6 等离子堆焊层的显微组织
Fig. 6 Microstructure of plasma clad layer

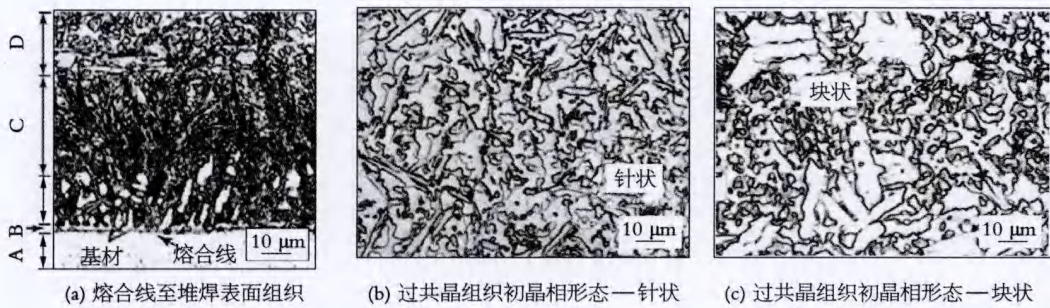


图 7 CO₂激光堆焊层的显微组织
Fig. 7 Microstructures of clad layer by CO₂ laser cladding

3 结 论

(1) 文中堆焊条件下,CO₂激光堆焊可以得到平整光滑和无缺陷堆焊层,其堆焊速度是等离子堆焊的 3 倍.

(2) 与等离子堆焊相比,CO₂激光堆焊层的耐磨性能大大提高.

(3) CO₂激光和等离子堆焊层上部显微组织属于过共晶组织;过共晶组织中初晶相由 CrB 和 Cr₇C₃ 组成、共晶组织由 γ -Ni 和 CrB 或 γ -Ni 和 Cr₇C₃ 组成;CO₂激光堆焊层中初晶相的最大宽度约为 5 μ m,而等离子堆焊层中其最大宽度约为 20 μ m.

(4) CO₂激光堆焊层中,过共晶组织的初晶相中的镍和铁含量低于共晶组织,而铬含量高于共晶组织.

参考文献:

[1] 徐国建,黄雪,杭争翔,等.激光堆焊 Stellite-6 + WC 混合粉末的堆焊层性能[J].东北大学学报,2012,33(2):112-116.
Xu Guojian, Huang Xue, Hang Zhengxiang, et al. Performance of clad layer using mixed powder of stellite-6 and WC[J]. Journal of Northeastern University, 2012, 33(2): 112-116.

[2] Kutsuna M. The basics of welding and joint engineering (in Japanese)[J]. Surface and Coating Technology, 1923, 22(8): 152-159.

[3] Kutsuna M, Watanabe M, Xu G, et al. Quarterly journal of the japan welding society (in Japanese)[J]. Laser Surface Processing, 1958, 35(9): 37-46.

[4] Kutsuna M, Yamada K, Ikeda T, et al. Reports on the 304th topical meeting of the laser society of japan[J]. Welding Technology, 2002, 15(10): 8-10.

- [5] Kou S. *Welding Metallurgy*[M]. Ann: industry press, 1987.
- [6] 徐国建, 殷德洋, 杭争翔, 等. 激光堆焊 Co 基合金与 VC 混合粉末组织和性能[J]. 沈阳工业大学学报, 2012, 34(1): 26-30.
Xu Guojian, Yin Deyang, Hang Zhengxiang, *et al.* Microstructure and property of laser overlaid layer of mixed Co-based alloy and VC powder[J]. *Journal of Shenyang University of Technology*, 2012, 34(1): 26-30.
- [7] 戚文军, 何艳兵, 刘 斌, 等. 激光堆焊镍基碳化钨梯度焊层及耐磨机理分析[J]. 焊接学报, 2002, 23(1): 57-60.

Qi Wenjun, He Yanbing, Liu Bin, *et al.* Gradient hardfacing on the laser overlay deposit tungsten carbide of the nickel matrix and wear mechanism analyze[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2002, 23(1): 57-60.

- [8] Savage W F. *Welding in the World*[J]. *Material Science and Engineering*, 1980, 18(5/6): 89-114.

作者简介: 徐国建, 男, 1959 年出生, 博士, 教授. 主要从事先进激光制造装备及加工工艺等方面的研究. 发表论文近 50 篇. xuguo-jian1959@hotmail.com.

[上接第 49 页]

- [4] 叶 雷, 李晓红, 毛 唯, 等. Hf 与 Zr 为降熔元素镍基钎料对 IC10 合金的钎焊[J]. 焊接学报, 2009, 30(2): 137-140.
Ye Lei, Li Xiaohong, Mao Wei, *et al.* Brazing of IC10 superalloy with Ni based brazing fillers using Hf and Zr as melting-point depressants[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2009, 30(2): 137-140.
- [5] 方洪渊, 冯吉才. 材料连接中的界面行为[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2005.

- [6] 高 峰. 铝热换热器复合钎料板钎焊接头成型机理研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2003.

- [7] Landau L, Lifscitz E. 理论物理学教程第六卷: 流体力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.

作者简介: 王 君, 男, 1988 年出生, 博士研究生. 主要从事材料连接机理方面的研究工作. 已发表论文 5 篇. Email: dtvir@126.com

通讯作者: 何 鹏, 男, 教授, 博士研究生导师. Email: hithepeng@hit.edu.cn