层流等离子体材料表面改性工艺研究

马 维,李小存

(中国科学院力学研究所,北京 100080)

摘要:针对热物理性能明显不同的 3种金属,研究层流等离子体技术在材料表面改性工程应用的可行性。结果表 明,重熔工艺适用于热导率适中和微结构稀疏的铸铁类材料;熔覆工艺则适用于低热导率的不锈钢。两种处理工 艺均可以明显改变热影响区的材料微结构并提高材料表面硬度。研究表明改性层微结构的改善与材料热物理性 能和凝固过程瞬态特性密切相关。

关键词:层流等离子体技术;重熔;熔覆;微结构;热物理性能

中图分类号:TG143; TG156.99 文献标识码:A 文章编号:0254-6051(2007)02-0035-04

Material Surface Modification Processing with Laminar Plasma Technology

MA Wei, L I Xiao-cun

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: The possibilities of laminar plasma technology applied in surface modification were investigated on three typical metals with quite different the mo-physical properties. The tests demonstrate that this remelting process can evidently improve the microstructure and properties of the cast materials with moderate heat conductivity and loose microstructure such as cast iron. The cladding tests were carried out on stainless steel with low heat conductivity. The results show that all the remelting and cladding processes with laminar plasma technology can improve the microstructures and increase the hardness of the surface modified layers. These treatment effects are closely related to the the mo-physical properties of materials and the transient characteristics in rapid solidification.

Key words: laminar plasma technology; remelting; cladding; microstructures; the mo-physical property

激光束热能输出稳定,使得激光技术用于材料表 面改性获得良好效果,得到工程界普遍认可^[14]。但 是,与等离子体电弧相比激光束热能利用率较低^[5], 且设备研制和运行费较高。因此研发热效率高、性能 稳定和运行成本低的新型等离子体电弧材料表面改性 技术具有现实意义。层流等离子体射流的特点是^[67]: 产生功率低,射流和熔池中杂质搀混少,射流轴向温度 梯度小,运行费用低,环境污染明显改善。可见层流等 离子体射流有可能作为一种新型热源用于材料表面改 性工程领域。本文的主要目的是通过对该技术在材料 表面 改 性 工 艺 的 机 理 研 究,初 步 探 索 其 实 际 应用的可行性。为此对热物理性能明显不同的三种金 属材料——不锈钢、铸铁和 Al-Si合金进行了重熔和熔 覆对比性试验研究。结果表明该技术极具应用前景。

1 试验过程

三种试验用金属材料是 1Cr18N i9Ti不锈钢, HT100铸铁和 A1-Si合金。其化学成分和热物理性能 列于表 1中。三种试验材料样品的尺寸分别为:80 mm ×20 mm ×3 mm,120 mm ×80 mm ×20 mm 和 80 mm ×40 mm ×10 mm。用于熔覆处理的添加材料分别 为粒度 25~75 μm的 A1₂O₃和 20~40 μm的 SiC陶瓷 粉体。工艺参数为:等离子体弧功率 5~7 kW,加热距 离 10~15 mm,工作气体流量 3~6 L/min,基底平移速

表 1 试验材料化学成分 (质量分数,%)和热物理性能 Table 1 Chem ical composition (wt%) and therm or physical properties of the tested materials

				•		,								
****	C	Si	Mn	Cr	Ni	р	s	ті	Cu	Zn	Ma	7r	热导率 /	熔点
ባማ ተተ	C	51	WIII	CI	INI	I	5	11	Cu	ZII	wig	ZI	W (m \cdot K) ⁻¹	/
不锈钢	0.12	0.8	2	17~19	8~11	0.035	0.025	0.5 ~ 0.8					28	1400
HT100铸铁	3.43 ~3.68	2.12 ~ 3.2	0.5 ~ 0.57			0.77 ~ 0.1	$0.08 \sim 0.16$						41	1130
Al-Si合金		10 ~ 13	0.5						0.3	0.1	0.1	0.1	168	580

作者简介:马 维 (1960.03—),男,山西晋中人,副研究员,博 士,主要从事材料表面改性及热力学性能研究,已发表论文 20 余篇。联系电话:010-82622614 E-mail:watwm@inech_ac_cn 基金项目:国家自然科学基金 (10275085) 收稿日期:2006-10-06 度 3~5 mm/s。熔覆试验中基底预热温度为 350~ 420 ,供粉率为 3~5 g/m in。等离子体工作气体和 供粉气体均为氩气。试验前样品表面经 280号和 380 号砂纸打磨增加粗糙度。

试验包括两方面内容:没有添加粉体的重熔试验

《金属热处理》2007年第 32卷第 2期

和添加粉体的熔覆试验,目的是探究两种工艺对热物 理性能明显不同的金属和合金材料的适用性。用于微 观观察的金相样品按照标准制备程序完成。通过光学 显微镜和扫描电镜对样品横截面上热影响区和熔覆层 的微组织进行研究,并对熔池中 Al Si元素进行能谱 分析确定其浓度变化及检验熔覆处理效果。沿热影响 区厚度方向测试了维氏硬度变化,相应的载荷为 2 N, 作用时间为 10 s

2 试验结果与讨论

2.1 重熔试验

重熔试验表明在合适工艺条件下层流等离子体射 流可以在不锈钢、铸铁和 Al-Si合金表面产生明显的 处理效果 (图 1a~c)。不同材料熔痕外观形貌特征也 明显不同。不锈钢表面熔痕呈槽沟形,中间深凹两边 上凸 (图 1a),铸铁熔痕表面均匀细腻 (图 1b),Al-Si 合金熔痕较宽,且表面有"酒窝 形成 (图 1c)。显然, 熔痕特征与材料热物理性能和工艺条件相关。



图 1 不同材料经熔凝处理 (a ~ c)和熔覆处理 (d ~ e) 后的表面形貌

(a, d)不锈钢
(b)铸铁
(c, e) Al-Si合金
Fig. 1 Appearance of the remelting tracks(a ~ c) and cladding tracks(d ~ e) on different materials

(a,d) stainless steel (b) cast iron (c,e) AI-Si alloy 金属重熔材料经过急冷急热过程,凝固期间材料 相变引起材料微结构变化。与激光工艺^[1]相比,等离 子体工艺涉及的热力学现象较为复杂。原因是等离子 体工作气体对熔池高温流体产生的压力促进了不同相 物质间热和质量交换。相关理论分析和数值模拟研究 报道很少,是有待开展研究的新课题。文献 [8]的研 究表明激光表面处理时熔池高温流体凝固过程中流 / 固界面最大移动速度接近但小于基底移动速度。所 以,本试验铸铁凝固速度 <4 mm/s,不锈钢和 AI-Si合 金凝固速度 <3 mm/s,试验观察到不锈钢和铸铁材 料的熔池直径为 4 mm,AI-Si合金为 7 mm。所以凝固 时间约为 1~2 s, 重熔过程中等离子气体在熔池或熔 痕表面产生一个高温气体边界层。该边界层在熔池和 大气间形成一个隔热屏障,有效阻碍了熔池流体与大气 间的热量对流,所以熔池流体主要是通过基底固相材料 的热传导机制散发热量;又因为凝固时间较短,基底热 传导机制产生的温度梯度差别不大,忽略其对熔池流体 热耗散现象的影响。按照 Fourier热传导定律,凝固过 程中控制热扩散机制的主要因素是材料的热导率。

不锈钢材料熔点高、导热性较差。加热过程中等 离子体射流可使材料表面温度超过 6000 .所以不锈 钢材料极易融化。另一方面,低热导性使热量积累在 熔池物质中,使其温度不断上升,导致熔池流体粘性明 显下降。在等离子体气体压力作用下高温低粘性流体 运动到熔痕两边,温度骤降导致快速凝固形成凸边。 中部残留下凹槽形成图 2a 所示外观形貌。铸铁熔点 为 1130 . 重熔时等离子体射流传输给熔池物质的热 量与不锈钢情形相当。但是铸铁热导性较好 ,以热传 导机制传输到基底固相材料中的热量明显增加,使其 维持相变点以上的高温状态,冷却过程中急速冷凝机 制引起材料相变,形成图 2b中的热影响区。另一方 面、熔池热量的快速耗散使熔池流体温度维持在熔点 附近,保持较大粘性和张力,以致有限的等离子体气体 压力无法破坏熔覆表面外观,使其保持平整外观。热 影响区微观观察表明熔池内已形成马氏体相和片状石 墨组织。在熔痕表面有渗碳体、莱氏体形成和离散石 墨相析出。Al-Si合金熔点较低,融化所需热量约为不 锈钢的 1/3。相同热流密度加热条件下形成较宽的熔 痕。另外,Al-Si合金导热性能较好,热导率为 168 W / m·K。通过基底固相材料的热耗散率约为不锈钢的 5倍、大部分等离子体射流输入的热量通过基底固相 材料以热传导机制被耗散。仅有射流直接加热 面附近区域材料能够获得足够热量引起物态变化,形



图 2 各样品重熔处理熔痕的横截面微观形貌 (a)不锈钢 (b)铸铁 (c) Al-Si合金 Fig 2 Microscopic observations of the remelting tracks on cross-section of the samples under SEM

(a) stainless steel (b) cast iron (c) Al-Si alloy

《金属热处理》2007年第 32卷第 2期

-7

成很薄的热影响区,而且熔池和基底间没有明显界面 形成 (图 2c)。等离子体气体压力的影响,增加了熔池 流体的不规则流动,促使熔覆层表面形成"酒窝"外貌 特征。

图 3中给出铸铁样品熔凝处理层的显微硬度分 布。热影响区硬度值增加近 3倍,达到 900 HV0.2。 说明层流等离子体射流熔凝工艺可以使铸铁材料表面 性能发生显著变化,形成没有稀释的表面硬化层。但 对不锈钢和 Al-Si合金材料,经熔凝处理后其表面的 硬度值没有明显变化,原因是这些材料不存在相变温 度。所有温度的急变不能引起材料相变发生。





2.2 熔覆试验

图 1d是不锈钢 Alo, 陶瓷粉体熔覆处理的熔痕 外表形貌,与重熔熔痕对比 (图 1a)其表面特征发生了 明显变化。原因是熔覆过程中相当一部分等离子体热 量用于加热 Alo, 陶瓷粉体,明显减少了用于加热基 底材料热量。同时大量陶瓷粉体输送到熔池中使混合 流体温度维持在熔点附近,导致流体粘性增大。陶瓷 粉体的输入减小了等离子体气流流速和对流体作用的 压强,也改变了等离子体气体流动规律,使熔池流体流 动速度明显减小。冷凝过程中熔池流体可在原位附近 凝固形成外凸表面特征。

Al-Si合金熔覆 SiC陶瓷粉体时,其良好的导热性 能使大量等离子体热量以热传导机制快速耗散。致使 大量未熔 SiC陶瓷粉体只能在到达熔池表层时就发生 凝固,形成厚度不足 150 μm熔覆层。事实上熔覆层 表面特征细化,且重熔层表面出现的"酒窝 外貌特征 的消逝 (图 1e)正是加入 SiC陶瓷粉体改变了熔池温 度分布和热耗散机制的结果。

图 4a是不锈钢材料熔覆层横截面扫描电镜微观 形貌。可见熔覆层与基底间形成了良好的冶金结合。 熔覆区内几乎没有出现空洞等缺陷,界面结合处也没 有观察到界面裂纹。说明层流等离子体熔覆工艺可以 在不锈钢表面产生微结构均匀和界面性能良好的陶瓷 熔覆层。高倍扫描电镜观察 (图 5)表明熔覆层内沿晶 界和在晶界交汇处分别形成连续线形和面积分布 Alo,陶瓷强化相,晶胞内有离散 Alo,陶瓷强化相析 出。沿熔覆层厚度进行的铝元素线扫描能谱分析结果 (图 4b)也证实熔覆层中铝元素浓度明显提高。



图 4 不锈钢熔覆层的横截面形貌 (a)和熔覆层中 A l浓度 分布 (b)

Fig. 4 SEM observation on the cross-section of the clad track on stainless steel (a) and the result of the EDS line-scan analysis of element A1 in the clad layer (b)



图 5 不锈钢熔覆层横截面高倍 SEM 照片 Fig. 5 High magnification SEM metallograph of the cross-section in the clad layer of the stainless steel sample

图 6a是 Al-Si合金基底熔覆 SIC陶瓷粉体形成的 熔层横截面扫描电镜下的形貌,其中嵌有大量未熔 SiC陶瓷颗粒。因为 Al-Si合金熔点低、热导性好。熔 覆过程中等离子体射流加热 Al-Si合金和 SiC陶瓷粉 体时通过基底热传导机制耗散了大量热量,致使熔点

《金属热处理》2007年第 32卷第 2期

为 3400 的 SiC陶瓷颗粒温度无法达到熔点,只能以 原粉体形式存在于熔池中。由于等离子体气体高速流 动影响,固态 SiC陶瓷颗粒在等离子体射流中获得一定 动能,达到熔池中向熔池底部运动。但是,高粘性 Al-Si 合金流体较大的阻力作用缩短了其行程,最终只在熔池 表面约 100~150 µm 的厚度形成熔覆层。线扫描能谱 分析结果表明了熔覆层 Si元素浓度变化 (图 6b)。





Fig. 6 SEM cross-section image of the clad layer of the SiC powder on the Al-Si alloy substrate (a) and the result of the EDS line-scan analysis of Si element in the clad layer(b)

图 7给出不锈钢表面熔覆处理层的显微硬度分 布。均匀细化的陶瓷相导致熔覆层材料平均硬度达到 1100 HV0.2。由于不锈钢低热导性,固体基底中几乎 没有形成明显的热影响区,仅在界面处形成不足 100 μm厚的过渡区,所以熔池周边材料的硬度基本维持 不变。AI-S合金熔覆层的显微硬度测试结果表明覆



层硬度没变化,原因是未熔 SiC陶瓷颗粒与基底间只 能形成低韧性结合界面,致使熔覆层中 SiC陶瓷相不 能起强化效果。

3 结论

层流等离子体表面改性技术在合适工艺条件下明 显改善金属和合金表面性能。研究表明:重熔工艺适 用于热导率适中并可发生相变的铸铁类材料,使硬度 显著提高和微结构均匀细化。不适用于不发生相变的 热导率低的不锈钢和热导率高的 Al-Si合金材料;熔 覆工艺可以明显改善不锈钢表面性能。熔覆层 Al-O₃ 陶瓷强化相演化规律性明显,维氏硬度显著提高。Al-Si合金 SiC陶瓷熔覆层的微结构虽有明显变化,但维 氏硬度提高效果不明显,有待深入研究。

参考文献:

- Markwood A P and Crafer R C. Themal modeling of laser welding and related process: a literature review [J]. Optics & Laser Technology, 2005, 37: 99-115.
- [2] Shepeleva L, Medres B, Kaplan W D, et al Laser induced Cu/alumina bonding: Microstructure and bond mechanism
 [J]. Surface & Coatings Technology, 2000, 125: 40-44.
- [3] Sexton L, Lavin S, Byme G and Kennedy A. Laser cladding of aerospace materials [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 122: 63-68
- [4] Kathuria Y P. Some aspects of laser surface cladding in the turbine industry [J]. Surface & Coatings Technology, 2000, 132: 265-269.
- [5] Li L J and Mazumder K Laser cladding of Mg-A1 albys [A]. Mukherjee K and Mazumder J. Proceedings of Laser Processing of Materials [C]. Warrendale, PA: Metallurgical Society of American Institute of Metallurgical Engineers, 1985: 35-50.
- [6] Pan W X, Zhang W H, Ma W and Wu C K Characteristics of argon laminar DC plasma jet at atmospheric pressure [J].
 Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2001, 21 (1): 271-284.
- [7] Osaki K, Fukumasa O and Kobayashi A. High thermal efficiency-type laminar plasma jet generator for plasma processing[J]. Vacuum, 2000, 59: 47-54.
- [8] Krumbhaar H M, Kurz W and Brener E Solidification [A]. Kostorz G Phase Transformation in Materials [M]. Weinhein, Germmary: Wiley-VCH, 2001: 81-170.

德国杜塞尔多夫热加工展览会信息 2007年 6月 12~16日在德国杜塞尔多夫展览中心举办热加工 "四重奏 展览会,即国际铸造展览会暨技术 论坛 (GFA)、国际冶金技术展览会暨学术会议 (METEC)、国际热处理展览会暨技术论坛 (THERMPROCESS)及国际铸品展览会 (NEW CAST)。这 4 项展览会在整体上覆盖了铸造、铸品、冶金和热处理工程的技术领域,并在技术增值链和企业之间形成了一条关键的连接纽带。欢迎国内外热加工 业界同仁参加,有关展会详情可登陆杜塞尔多夫展览 (中国)有限公司网页:www.mdc com.cn。

《金属热处理》2007年第 32卷第 2期