

文章编号: 0258-7025(2010)10-2672-06

电磁搅拌对激光熔覆 WC-Co 基合金涂层的 组织结构和硬度的影响及机理研究

余本海 胡雪惠 吴玉娥 杨东升

(信阳师范学院物理电子工程学院, 河南 信阳 464000)

摘要 采用自制电磁搅拌装置研究了电磁搅拌对激光熔覆 WC-Co 基硬质合金组织的影响。实验与理论分析均表明,电磁搅拌能够使激光熔覆层的组织晶粒细化、分布更均匀,并能够消除熔覆层内的气孔和裂缝,提高熔覆层质量。还研究了不同强度的电磁搅拌对熔覆层显微硬度的影响,结果表明,随着电磁搅拌强度的增加,激光熔覆层显微硬度相应提高。

关键词 激光技术;激光熔覆;电磁搅拌;显微组织;裂纹;显微硬度

中图分类号 TN249;TG665 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103710.2672

Studies of the Effects and Mechanism of Electromagnetic Stirring on the Microstructures and Hardness of Laser Cladding WC-Co Based Alloy Coating

Yu Benhai Hu Xuehui Wu Yu'e Yang Dongsheng

(College of Physics & Electronics Engineering, Xinyang Normal University, Xinyang, Henan 464000, China)

Abstract Effects of electromagnetic stirring on the microstructures of the laser cladding WC-CO based layers are studied. Both experimental and theoretical analysis indicate that the microstructures of the laser cladding layers under electromagnetic stirring are much finer and more uniform than those without electromagnetic stirring. High qualitative layers which are free of porosity and cracks are obtained from the laser cladding with electromagnetic stirring. The influences of different electromagnetic stirring strengths on the hardness of the laser cladding layers are also investigated. The results show that the hardness increases correspondingly with the increase of the electromagnetic stirring strength.

Key words laser technique; laser cladding; electromagnetic stirring; microstructure; cracks; hardness

1 引 言

激光熔覆是零件表面强化的一种激光表面改性技术,通过对熔覆粉末(金属、合金及陶瓷粉末)的设计,显著改善基材表面的耐磨、耐蚀和抗氧化性能,在石油化工、航空航天、汽车和机械等行业具有广阔的应用前景^[1~8]。

在激光熔覆,尤其在激光熔覆 WC 硬质合金等陶瓷粉末中,熔覆层经常出现裂纹等缺陷,从而影响其质量。国内外学者对激光熔覆中裂纹的形成机理

及预防的问题做了不少的研究^[9~12],他们认为裂纹的产生主要与熔覆层内不同相的热膨胀系数差异及凝固后组织不均匀产生的应力有关,并在此基础上提出通过添加某些特殊合金元素或氧化物,或通过优化激光熔覆工艺及预热和后热等措施来减轻激光熔覆层开裂问题,但以上措施对消除激光熔覆层裂纹没有突破性进展。为了改善激光熔覆层裂纹状态,一个重要思路是设法使熔覆层内硬质相均匀分布,因此,本文采用电磁搅拌辅助激光熔覆,使熔覆

收稿日期: 2010-01-26; 收到修改稿日期: 2010-03-27

基金项目: 国家自然科学基金(60777012)和河南省 2008 科技计划项目(082300410050)资助课题。

作者简介: 余本海(1970—),男,博士,副教授,主要从事激光与物质相互作用等方面的研究。

E-mail: hnyubenhai@163.com

层晶粒细化、组织分布均匀,避免应力集中,以达到消除激光熔覆层的裂纹,提高质量的目的。

电磁搅拌技术在铸造、焊接中已得到较多的研究和应用^[13~16],例如电磁搅拌在连铸中能提高铸坯中的等轴晶比率,减少偏析及疏松,使夹杂物均匀,可改善铸坯质量,提高铸坯的机械性能。本文重点研究激光熔覆熔池在电磁搅拌作用下的凝固特征、组织结构及抑制裂纹的机理。

2 试验方法及条件

2.1 试验材料

选用 WC(质量分数 35%) + Co(质量分数 65%) 基硬质合金粉末材料作为熔覆粉末,粉末粒度为 0.05 mm(300 目),试样基体分别为 45# 钢和 55Si₂Mn 弹簧钢,尺寸分别为 80 mm × 20 mm × 10 mm 和 100 mm × 20 mm × 2 mm。试样经丙酮清洗去油污,在熔覆粉末中加入质量分数为 2% 左右的水玻璃粘结剂并混合均匀预涂在 45# 试样基体表

面,对弹簧钢试样采用专用压制夹具将粉末预压在基体表面。预置粉末厚度在 0.8~1.2 mm。

2.2 激光熔覆过程与工艺参数

激光熔覆所使用的激光器为 HGL-95 型 5 kW 横流 CO₂ 激光器,输出功率为 500~3000 W 可调,光斑直径在 2~4 mm,扫描速度在 1~20 mm/s 范围,采用自制的电磁搅拌装置(图 1),电磁搅拌强度在 10~80 mT 可调。根据以往 WC-Co 基硬质合金粉末的激光熔覆层易产生裂纹的缺点,采用辅加电磁搅拌和未加电磁搅拌进行对比试验,为了比较激光熔覆时辅加电磁搅拌的效果,试验中采用固定的激光工艺参数,功率为 2500 W,扫描速度为 2.67 mm/s,光斑直径 $D = 4.0$ mm。采用单道扫描,扫描带长度为 80~100 mm,电磁搅拌强度分别为 0, 20, 35, 45, 52 和 75 mT。选用氮气作为激光熔池的保护气体。每组工艺参数均采用三个试样,并进行了多轮试验。

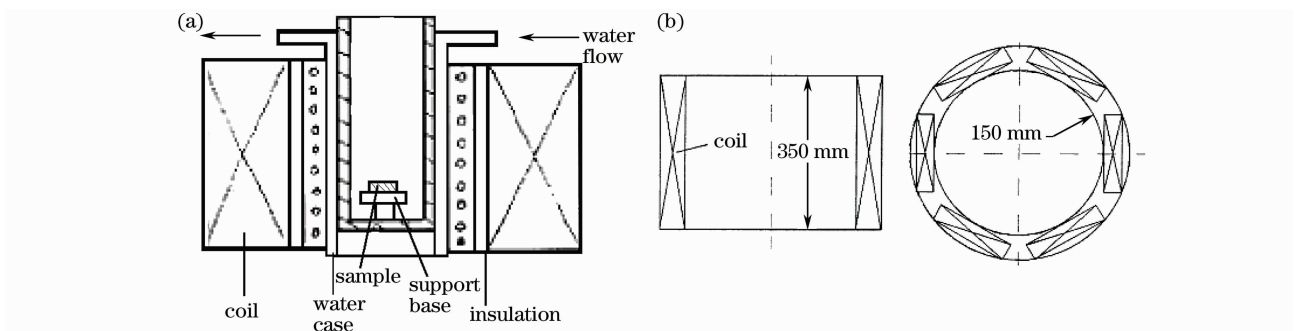


图 1 (a)电磁搅拌试验装置示意图,(b)电磁搅拌试验装置原理示意图

Fig. 1 (a) Schematic of electromagnetic stirring equipment, (b) theoretical schematic of electromagnetic stirring equipment

2.3 测试方法

采用质量分数 20% 的 NaOH 溶液和质量分数 20% 的 K₃Fe(CH)₆ 溶液混合试剂,腐蚀并抛好熔覆试样。在 OLYMPUS PMG3 金相显微镜和扫描电子显微镜下观测激光熔覆组织结构及形貌。对不同种类 WC-Co 基硬质合金粉末[如 WC(质量分数 35%) + Co(质量分数 65%); WC(质量分数 45%~60%), TiC(质量分数 20%~40%), TaC(质量分数 20%~40%), Co(质量分数 10%~20%) 和 YG20 等]的激光熔覆做了多次研究,每次试验后均对辅加和未加电磁搅拌的激光熔覆试样进行了显微组织和缺陷观察。实验中主要针对 WC(质量分数 35%) + Co(质量分数 65%) 基硬质合金粉末材料进行分析,并对电磁搅拌辅助激光熔覆层采用 HVA-10A 型显微硬度计检测了硬度。

3 试验结果分析及讨论

3.1 电磁搅拌对激光熔覆层晶粒尺寸的影响

通过对不同种类的 WC-Co 基粉末材料的激光熔覆(辅加和未加电磁搅拌)试样的显微观察表明,辅加电磁搅拌的激光熔覆试样(包括不同工艺参数)组织晶粒均得到细化,且在电磁搅拌强度大于 50 mT 时,绝大多数试样未发现裂纹;而不少未加电磁搅拌的激光熔覆试样则观察到裂纹,只有在工艺参数选取最佳或在硬质合金中添加适当辅助成分的情况下,裂纹问题才可得到部分缓解,但并未完全解决。

由于激光加热速率快,冷却速率高,使得在激光熔覆中呈现出非平衡凝固特征。激光在对 WC-Co 粉末材料加热时,由于 WC 和 Co 的热传导系数不同,粘结相 Co 首先熔化,随着温度升高,WC 也发生熔化,熔体凝固时部分析出形成某些非平衡相。

图 2(a)表示没有加电磁搅拌的激光熔覆层组织,图 2(b)是加入电磁搅拌的激光熔覆层组织。通过比较,可以看出这两类熔覆层组织均由 WC 硬质相

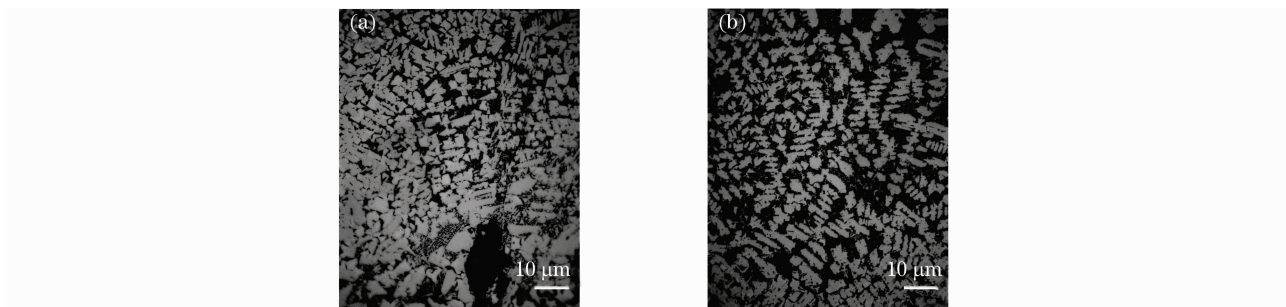


图 2 激光熔覆层显微组织(45# 钢基体)。(a)未加电磁搅拌的熔覆层,(b)电磁搅拌强度为 45 mT 的熔覆层

Fig. 2 Microstructures of WC-Co based laser cladding coated on the surfaces of 45# steel substrates.

(a) without electromagnetic stirring, (b) with electromagnetic stirring strength of 45 mT

1) 电磁搅拌使熔池内温度和成分趋向均匀

由旋转磁场所产生的电磁搅拌能使激光熔覆熔池产生强烈的混合对流,从而加速了熔池内物质的对流,使熔池温度场和熔质分布均匀。电磁搅拌使得熔池内液相中各处形核几率相等,在各处形成的晶核更加趋向于同时性,因此导致形核率大大增加,同时通过磁场对金属熔体的搅拌作用,加快了散热,使整个熔池熔体的过冷度加大。在熔池的上方,熔体与空气接触,散热速度加快,形核率加大,电磁搅拌引起的强烈对流,加速了液面下新形成的晶粒向熔体中的转移,当液相温度低于合金液相线温度时,液相中所析出的枝晶组织可在液流带动下不断的运动及自身的转动,再加上均匀的温度场及化学成分,使得这些枝晶组织很难连成一片,故可抑制晶粒长大。与此同时,在熔池的中底部开始析出 WC 晶粒时,由于电磁搅拌使熔池中底部过冷度增大,使熔覆层凝固时的临界晶粒半径减小,这样就细化了晶粒,改善了熔覆层偏析。

2) 电磁搅拌的机械作用

电磁搅拌引起的熔池内液态金属的旋转运动会对激光熔池液固界面前沿处产生较强的机械冲刷作用,冲刷力会打断初生枝晶臂而形成细小晶块,这些晶块进入熔池前半部后,形成新的晶核。电磁搅拌强度越大,被打断进入熔液的晶块越多。另一方面,由于在激光熔池内未熔化的部分块状 WC 颗粒和先析出的块状 WC 颗粒上存在许多孔洞和弱结合处,通过电磁搅拌作用,使熔池内合金液体形成紊流,有缺陷的残留 WC 颗粒以及先析出的 WC 颗粒与液相金属之间会发生剧烈的摩擦和碰撞,促使 WC 颗粒尖角钝化,同时强烈的液体对流促使成分

和粘结相 β 相组成,且可看到加电磁搅拌的激光熔覆层组织晶粒尺寸减小,晶粒细化且分布较均匀。这是因为电磁搅拌对激光熔池产生了如下作用:

均匀化。摩擦碰撞引起大块 WC 晶块的机械破碎也细化了 WC 颗粒。以上原因就使得激光熔覆在外加电磁搅拌后相对未加电磁搅拌的熔覆层,具有晶粒细化、分布均匀的凝固组织特征。图 3(a)~(c)显示出不同电磁搅拌强度的激光熔覆层组织,可以看到随着电磁搅拌强度逐渐加大,WC 硬质相枝晶变得越来越细小,并向球形和小颗粒状转变。结合图 3(a)~(c),可以看到 WC 硬质相在熔覆层底部均呈取向为垂直于熔覆层界面的枝晶状,首先这是因为在熔池底部液态金属与未熔基体的接触以及它与固态基体的附着阻力,阻止了其运动。即使加强电磁搅拌,这部分液态金属的流动也是很弱的。其次凝固过程主要是通过基体来散热,故枝晶取向同散热方向一致,枝晶成垂直于熔覆界面的方向生长。而在熔池的中、上方未加电磁搅拌的 WC 硬质相呈方块状,随着电磁搅拌强度加大到 35 mT 时,WC 硬质相变成枝晶状。当电磁搅拌强度继续增加到 45~75 mT 时,WC 硬质相逐渐由块状变成枝晶状,然后会变成小球状及小颗粒状[如图 3(c)所示]。

需要说明的是所加电磁搅拌强度并不是越高越好,因为从磁场的机械作用对细化晶粒的角度来考虑,电磁搅拌产生的最大磁感应强度越大,作用力越大,机械细化晶粒效果越好,但增加到一定值后,细化增势的效果就会放缓,这是问题的一个方面。另一方面在磁场强度增加的同时,将会产生涡流热效应,感应电流会成比例地增加,相应地会在凝固体系内增大热效应,从而使过冷度减小,继而使形核率下降。所以电磁搅拌强度过高时反而会造成晶粒粗化。根据该实验,采用 52~75 mT 的电磁搅拌强度较合适。

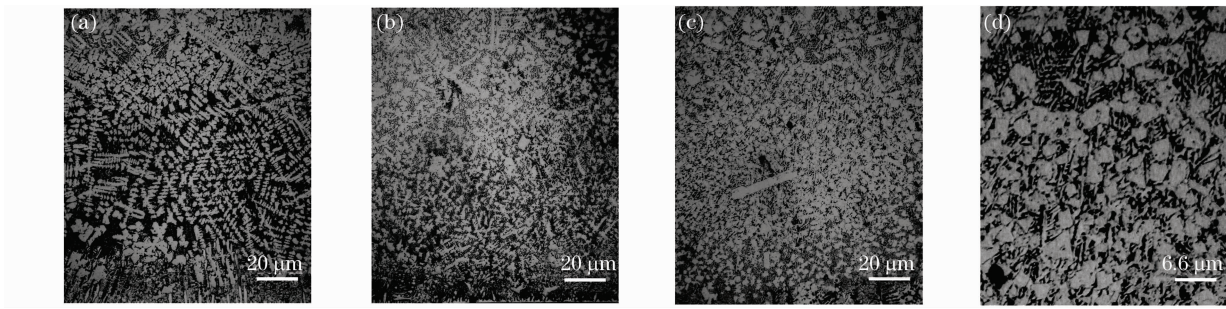
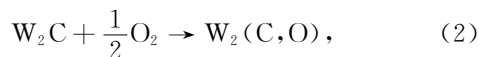


图3 激光熔覆层显微组织(55Si₂Mn 弹簧钢基体)。(a)电磁搅拌强度为 35 mT,(b)电磁搅拌强度为 52 mT,(c)电磁搅拌强度为 75 mT,(d)图(c)的局部放大

Fig. 3 Microstructures of WC-Co based laser clad ceramic-metal coated on the surfaces of 55Si₂Mn spring steel substrates under different electromagnetic stirring strengths. (a) 35 mT, (b) 52 mT, (c) 75 mT, (d) magnification of part zone of Fig. 3(c)

3.2 电磁搅拌对熔覆层内气孔的影响

气孔问题仍是激光熔覆硬质合金尚未很好解决的重要问题,气孔形成的主要原因被归结为熔池中的碳与氧反应形成的 CO 或 CO₂ 来不及逸出。碳可能来源于硬质合金中残留的游离碳,WC 在高温熔池中的分解或基材中含有的碳;氧则主要来源于熔覆过程中惰性气体保护不善或是硬质合金粉末中 Co 的氧化^[17]。在激光熔覆快速凝固过程中,未加电磁搅拌时产生气孔的情况见图 2(a),加电磁搅拌时产生气孔的情况见图 2(b)和图 3(a)~(c),从图 2(b)及图 3(a)~(c)可看出加入电磁搅拌的激光熔覆层均没有气孔产生,WC 硬质相分布均匀且晶粒细化。激光熔覆粉末中产生气孔的主要原因是 WC 的熔解和分解,这为气孔的形成提供了碳源,此外,粘结相 Co 极易氧化,使得较多的氧被引入到熔池,这样在熔池内引起剧烈的氧化反应。其反应式为



激光熔池内所形成的气体在融熔金属凝固时来不及逸出,从而在激光熔覆层内形成气孔。激光熔覆在加入电磁搅拌后,旋转磁场会对合金熔体产生洛仑兹力,加剧了熔体的运动,使熔池内的气体形成气泡往上浮,最终逸出熔池,达到了消除气孔的目的。

3.3 电磁搅拌对熔覆层裂纹的影响

从图 4(a)可以看出未加电磁搅拌的激光熔覆层的裂纹情况(55Si₂Mn 弹簧钢基体)。从图中可看到,裂纹起源于熔覆层界面并一直延伸到顶部。在激光熔覆中,一方面激光加热速度快,冷却速度高,

使熔覆层与基体之间产生很大的温度梯度。另一方面由于陶瓷层与基体的熔点、热膨胀系数、弹性模量及导热系数等热物理性能参数相差很大,故使熔覆层内产生很大的热应力。热应力可表示为

$$\sigma_{\text{th}} = E\nabla\alpha\nabla T(1-\mu), \quad (4)$$

式中 E, μ 分别为熔覆层的弹性模量与泊松比; $\nabla\alpha$ 表示熔覆层与基质间热膨胀系数之差; ∇T 为熔覆层温度与室温之差。

从(4)式可看到,温度梯度和热膨胀系数之差是产生热应力的主要原因,另外在激光熔化凝固过程中,伴随着液固界面处基材的固态相变还会产生组织应力,在熔池内材料的体积膨胀还受到周围基材的限制而产生拘束应力。上述三种应力以热应力为主,且表现为拉应力,当局部拉应力超过熔覆材料的抗拉强度极限时,就会使熔覆层内产生裂缝。因此,要防止裂缝必须从有效降低熔覆层内的热应力和提高熔覆结合处的强度入手。

图 4(b)和图 3 均是加入电磁搅拌后的熔覆层形貌,从图中可以看到熔覆层内没有裂纹。因此,采用合适的电磁搅拌强度,能有效抑制熔覆层内裂缝。其原因是一方面电磁搅拌能使熔池内的液态金属产生旋转,可以打碎由初生枝晶交错连接形成但仍具有一定方向性的固态结晶网,使继续结晶时熔体得到及时补充,消除了在枝晶间产生应力的根源;另一方面电磁搅拌引起的熔池混合对流,加速了物质的传热和传质,使熔池温度场和溶质均匀化,同时加速了熔体结晶过程中所产生的结晶潜热逸散,减小热应力,并使组织晶粒均匀分布,避免了应力集中,可形成较高韧性的结晶组织。这种高韧性结晶组织可以协调变形、缓解裂缝及尖端的应力集中,从而可抑制裂缝扩展。另外,有些裂缝也是因熔池内杂质无

法排除而在熔池底部形成夹杂引起的,电磁搅拌产生的离心旋转运动能使熔池内的杂质在很短时间内排出熔池表面,这样减小了因夹杂引起的裂缝。试验证明加入电磁搅拌后,裂缝的抑制程度与加入电

磁搅拌强度有关,在试验中,加入的电磁搅拌强度小于 16 mT 时,并不能有效地抑制裂缝,随着电磁搅拌强度加大抑制裂缝效果越明显,在电磁搅拌强度大于 52 mT 后,熔覆层裂缝可得到有效的抑制。

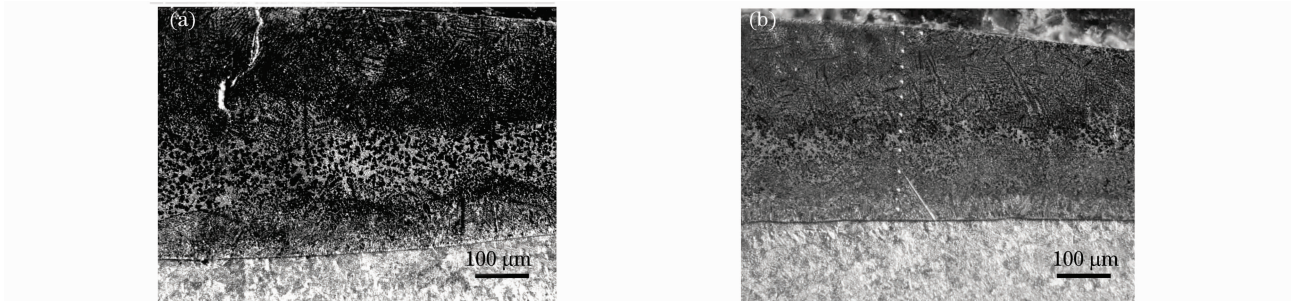


图 4 激光熔覆层截面组织形貌(55Si₂Mn 弹簧钢基体)。(a)未加电磁搅拌的熔覆层,(b)电磁搅拌强度为 52 mT 的熔覆层
Fig. 4 Microstructures of WC-Co based laser cladding ceramic-metal coated on the surfaces of 55Si₂Mn spring steel substrates. (a) without electromagnetic stirring, (b) with electromagnetic stirring strength of 52 mT

3.4 电磁搅拌对熔覆层组织显微硬度的影响

图 5 为电磁搅拌强度分别为 0, 35, 52, 75 mT 下的激光熔覆层的显微硬度曲线。从图中可看到,在未加入电磁搅拌时,显微硬度值是 800~900 HV_{0.2} 之间,基体硬度为 220 HV_{0.2} 左右;当电磁搅拌强度为 35 mT 时,熔覆层显微硬度在 940~1160 HV_{0.2} 之间;当电磁搅拌强度加大到 75 mT 时,熔覆层硬度达到 1210~1370 HV_{0.2}。熔覆层显微硬度曲线由表及里先升后降的现象,是因为在熔覆层表面获得的能量较多,温度较高,导致了 WC 的分解和烧损。硬度曲线的中部硬度值下降很快,这是因为该区域对应的是熔覆层底部,在熔池底部由于基体元素的熔入造成的稀释作用使硬度值下降较快。电磁搅拌对熔覆层的显微硬度提高可起到一定作用。激光熔覆辅加电磁搅拌后,由于电磁搅拌对熔池的搅拌作

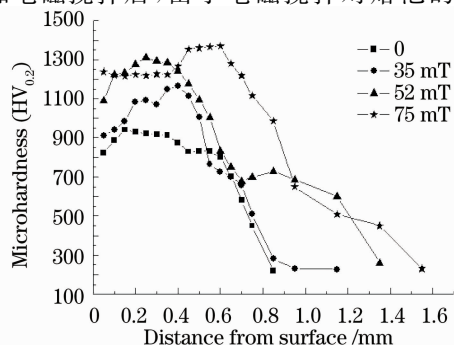


图 5 不同电磁搅拌强度下激光熔覆层显微硬度的对比
(55Si₂Mn 弹簧钢基体)

Fig. 5 Microhardnesses of WC-Co based laser cladding ceramic-metal coated on the surface of 55Si₂Mn spring steel with different electromagnetic stirring strengths

用,硬质相等分布均匀且晶粒得到细化,使熔覆层硬度值提高,且随着电磁搅拌强度的加大,硬度值呈上升的趋势。这是由于电磁搅拌强度的加大使电磁场的搅拌作用更强,晶粒细化程度更高,故硬度值有上升的趋势。硬度的提高主要与电磁搅拌使熔覆层组织细化有关。

4 结 论

1)电磁搅拌能明显细化激光熔覆层的晶粒组织,并使其均匀化。电磁搅拌使熔覆熔池产生的强烈混合对流加速了熔池的传热、传质和对流过程,大大增加了熔池的过冷度并提高了形核率,这是电磁搅拌能使熔覆层组织细化和均匀化的重要原因。

2)电磁搅拌辅助激光熔覆 WC 硬质合金粉末,能提高激光熔覆层质量,消除裂缝等缺陷。试验和理论分析证明,电磁搅拌是消除激光熔覆层裂缝的有效方法之一。

3)电磁搅拌对熔覆层显微硬度的提高可起到一定作用。随着电磁搅拌强度的加大,硬度值有上升的趋势。

4)电磁搅拌辅助激光熔覆有其局限性,主要受电磁搅拌装置的内腔体积的限制从而使激光熔覆面积受到限制。

参 考 文 献

- 1 Yang Jiaoxi, Wang Zhiyong, Zuo Tiechuan. High power diode laser cladding aggregate tungsten carbide-Ni based superhard composites[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(12): 3262~3266
杨胶溪,王智勇,左铁钊. 高功率半导体激光器熔覆絮状 WC-Ni 基超硬复合材料[J]. *中国激光*, 2009, **36**(12): 3262~3266
- 2 J. W. Sears. Developing new applications based on laser additive

- manufacturing of WC cermets and WC forming alloys[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(12): 3245~3250
- 3 Wang Dongsheng, Tian Zongjun, Shen Lida *et al.*. Research states of laser surface modification technology on titanium alloys [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(6): 24~32
王东升, 田宗军, 沈理达等. 钛合金激光表面改性技术研究现状 [J]. *激光与光电子学进展*, 2008, **45**(6): 24~32
- 4 Zhai Yufeng, Wang Xinhong, Huang Jian. Microstructure and properties of TiC-Mo₂C particles reinforced Fe-based composite coatings produced by laser cladding[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(12): 3287~3292
翟玉峰, 王新洪, 黄坚. 激光熔覆 TiC-Mo₂C 颗粒增强 Fe 基涂层的组织与性能[J]. *中国激光*, 2009, **36**(12): 3287~3292
- 5 F. Viejo, A. Pardo, J. Rams *et al.*. High power diode laser treatments for improving corrosion resistance of A380/SiCp aluminum composites[J]. *Surf. Coat. Tech.*, 2008, **202**(17): 4291~4301
- 6 Zhang Dawei, Lei Tingquan, Li Qiang. Recent development of research on surface modification of metals with laser cladding (I) [J]. *China Surface Engineering*, 1999, **12**(3): 22~26
张大伟, 雷庭权, 李强. 激光熔覆金属表面改性研究进展(上) [J]. *中国表面工程*, 1999, **12**(3): 22~26
- 7 Zhang Dawei, Lei Tingquan, Li Qiang. Recent development of research on surface modification of metals with laser cladding (II) [J]. *China Surface Engineering*, 1999, **12**(4): 11~15
张大伟, 雷庭权, 李强. 激光熔覆金属表面改性研究进展(下) [J]. *中国表面工程*, 1999, **12**(4): 11~15
- 8 Zheng Qiguang. *Laser Advanced Manufacture* [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2002
郑启光. *激光先进制造技术* [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002
- 9 Dong Changsheng, Zhong Minlin, Hao Qian *et al.*. High chromium coatings by laser deposition of inconel 690 for repairing nuclear power plant components [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(12): 3256~3261
董长胜, 钟敏霖, 郝倩等. 面向核设施晶间应力腐蚀的高 Cr 含量 Inconel 690 激光熔覆研究 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(12): 3256~3261
- 10 Zhao Yafan, Chen Chuangzhong. Mechanism of the deformation and preventive measures of the cracks in metal ceramics cladding layer [J]. *Laser Technology*, 2006, **30**(1): 16~22
赵亚凡, 陈传忠. 激光熔覆金属陶瓷层开裂机理及预防措施 [J]. *激光技术*, 2006, **30**(1): 16~22
- 11 Zhang Weiping, Liu Shuo. Cracking behavior of ceramic particles reinforced Ni-base alloys composite coating by laser cladding [J]. *Surf. Rev. Lett.*, 2005, **12**(1): 7~12
- 12 Song Wulin, Zhu Beidi, Zhang Jie *et al.*. The effects of expansion coefficient of laser cladding layer on cracking sensitivity [J]. *J. Huazhong University of Science and Technology*, 1999, **27**(S1): 42~44
宋武林, 朱蓓蒂, 张洁等. 激光熔覆层热膨胀系数对其形成敏感性的影响 [J]. *华中理工大学学报*, 1999, **27**(S1): 42~44
- 13 Mao Weimin, Li Qiang, Zhen Zisheng *et al.*. Microstructural formation of semi-solid AZ91D Mg alloy stirred by electromagnetic field [J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2005, **25**(3): 161~163
毛卫民, 李强, 甄子胜等. 电磁搅拌下半固态 AZ91D 镁合金的组织形成 [J]. *特种铸造及有色合金*, 2005, **25**(3): 161~163
- 14 Yin Xianqing, Li Haigang, Luo Jian. Study on the elimination of weld hot-cracking of LD10CS aluminum alloy with electromagnetic stirring [J]. *J. Xi'an Jiaotong University*, 1998, **32**(5): 91~95
殷咸青, 李海刚, 罗键. 用电磁搅拌抑制 LD10CS 铝合金焊缝热裂纹的研究 [J]. *西安交通大学学报*, 1998, **32**(5): 91~95
- 15 D. Y. Lee, K. B. Kim, D. H. Kim. Influence of the electromagnetic stirring on globularization of primary solid phase in solid-liquid region [J]. *Materials Science Forum*, 2005, **486-487**: 550~553
- 16 Wang Xinlin, Qi Haibin. Synthetic experiment study and theoretic analysis of crack control of thick laser cladding layer [J]. *J. Nanhua University (Science & Engineering Edition)*, 2001, **15**(3): 36~40
王新林, 漆海滨. 厚层激光熔覆层裂缝控制的综合实验及理论分析 [J]. *南华大学学报(理工版)*, 2001, **15**(3): 36~40
- 17 Chen Yanxia, Zhong Minlin, Liu Wenjin *et al.*. Porosity investigation in laser cladding WC/Co cemented carbide with powder feeding [J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2002, **23**(2): 49~53
陈艳霞, 钟敏霖, 刘文今等. 激光送粉熔覆 WC/CO 硬质合金的气孔问题 [J]. *材料热处理学报*, 2002, **23**(2): 49~53