

稳恒磁场设计及电流强度对激光熔覆 Fe55 涂层微结构的影响

刘洪喜, 刘子峰, 张晓伟, 石 海, 蒋业华

(昆明理工大学 材料科学与工程学院, 云南 昆明 650093)

摘 要: 利用自行设计的稳恒磁场装置以辅助激光熔覆工艺, 通过调节电流强度获得相应的稳恒磁场作用于激光熔池, 在 45 钢基材表面制备了 Fe55 合金涂层。借助扫描电子显微镜(SEM)、能谱仪(EDS)和 X 射线衍射(XRD)等表征手段分析了稳恒磁场作用下 Fe55 合金涂层的微观形貌、化学组成和物相结构。结果表明, Fe55 合金涂层主要由 γ -(Fe, Cr) 和 (Fe, Ni) 固溶体、 $(\text{Cr, Fe})_{23}\text{C}_6$ 碳化物及少量 Cr9.1Si0.9 组成。与未施加磁场相比, 稳恒磁场作用下的激光熔覆 Fe55 涂层, 枝晶间 Cr 元素含量更高, 枝晶内 Fe 元素含量也有所增加。稳恒磁场在一定程度上促进了激光熔池中的传质过程, 有助于 Fe, Cr 元素扩散和 (Fe, Cr) 固溶体的形成。当电流强度为 4.0 A 时, 外加磁场大大降低了熔池内固-液界面前沿的温度梯度, 增加了液态金属熔池的形核率, 涂层中大量柱状枝晶和树枝晶转变为方向各异的等轴晶, 涂层组织得到了明显优化。

关键词: 激光熔覆; 稳恒磁场; 合金涂层; 微观组织

中图分类号: TG156.99 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0406001

Design of steady-state magnetic field and effect of current intensity on microstructure of Fe55 alloy coating by laser cladding

Liu Hongxi, Liu Zifeng, Zhang Xiaowei, Shi Hai, Jiang Yehua

(School of Materials Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: Using self-designed steady-state magnetic field device, combined with laser cladding process, by adjusting current intensity to obtain corresponding steady-state magnetic field and put the magnetic field on laser molten pool, Fe55 alloy coatings was fabricated on 45 substrate steel surface. The microstructure, chemical composition and phase characteristics of the cladding coatings were characterized by scanning electron microscope(SEM), energy disperse spectroscopy(EDS) and X-ray diffraction (XRD). The results show that Fe55 alloy coating is mainly composed of γ -(Fe, Cr) solid solution, (Fe, Ni) solid solution, $(\text{Cr, Fe})_{23}\text{C}_6$ carbide and a small amount of Cr9.1Si0.9. The interdendritic Cr element content in laser cladding Fe55 alloy coating with steady-state magnetic field is higher than that of the laser cladding without magnetic field, and dendrite internal Fe element content also increased. To a certain extent, the steady-state magnetic field can promote the mass transfer process in laser melten pool, which is beneficial to the diffusion of Fe, Cr elements and the formation of (Fe, Cr) solid solution. When the

收稿日期: 2016-08-06; 修订日期: 2016-09-10

基金项目: 国家自然科学基金(11674134, 61368003); 云南省应用基础研究计划重点项目((P0120150044); 云南省中青年学术和技术带头人后备人才资助项目(2014HB007)

作者简介: 刘洪喜(1972-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事激光增材制造和涂层优化设计与制备方面的研究。

Email: piiiliuhx@sina.com

current intensity is 4.0 A, steady-state magnetic field greatly reduces the temperature gradient of solid-liquid interface in laser molten pool, and increases the nucleation rate in liquid metal molten pool. A large number of columnar dendrites and dendritic crystals are changed into directions different equiaxed grains in coating, and the microstructure of Fe55 alloy coating has been significantly optimized.

Key words: laser cladding; steady-state magnetic field; alloy coating; microstructure

0 引言

激光熔覆是以激光作热源,用不同填料方式在被熔覆基材上放置所选择的涂层材料,经高能密度激光束辐照加热,使之和基材表面一薄层同时熔化,并快速凝固后形成稀释度极低且与基材呈良好冶金结合的表面涂层,从而显著改善原基材耐磨、耐蚀、耐热、抗氧化、抗疲劳性能或者使基材表面具有特殊光、声、电、磁性能的绿色增材制造表面改性技术^[1-2]。与传统制造方法和堆焊、喷涂、电镀、气相沉积等表面改性技术相比,激光熔覆所制备的涂层具有组织致密、与基材之间结合良好、适合熔覆材料多、节能环保等特点,故已成为近年来新材料制备、快速直接成型、失效金属零部件再制造或修复的必备手段之一,在航空航天、汽车制造、钢铁冶金、石油化工、军事机械和生物医学等领域都有着极其重要的应用前景^[3-5]。但因激光熔覆本身存在着非平衡凝固过程急热骤冷的特点,熔覆层中极易产生裂纹。裂纹的存在不仅会降低涂层综合性能,而且还会减缓涂层服役寿命,成为激光熔覆虽然在不同领域都显示出重要的应用前景但又难以大面积推广的主要原因。

概括起来,激光熔覆涂层产生裂纹的原因主要体现在两个方面,一是基体与涂覆材料的热膨胀系数存在较大差异;二是在激光熔池的快速非平衡凝固过程。基材和熔覆合金粉末一旦选定,熔覆层产生的开裂则主要集中于基体表面局部区域,激光束使基体表面局部区域快速加热和冷却,易导致熔覆层形成方向性很强的柱状晶,引起很大热应力。另外,液态金属凝固时先结晶的枝干熔质夹杂含量较低,枝晶间液体由于溶质夹杂含量高、熔点低,被周围连成一体发达柱状晶包围而形成液态薄膜。凝固过程中,随着温度降低,熔覆层发生收缩,处于晶界处的残余液态薄膜受到熔覆层中拉应力作用而导致液膜分离,使其无法得到周围液体补充而形成热裂纹^[6-8]。如果能使正在凝固的柱状晶或难以长大,或被折断、击

碎,就可抑制枝晶间的残留液膜分离,以致大大减小或消除熔覆层中的结晶裂纹,改善熔覆层的宏观质量,同时细化熔覆层组织,提高涂层性能。因此,改善激光熔池凝固特征进而改善熔覆层组织结构已成为目前激光熔覆领域亟待解决的关键问题。

近年来,外加交变磁场复合焊接技术由于具有附加装置简单、投入成本低、效益高、耗能少等特点而备受关注,是一种正在发展的现代焊接技术。大量研究表明^[9-11],外加磁场可在焊接熔池内产生一定程度的电磁搅拌,使液态金属出现周期性搅拌运动,改变熔池金属结晶过程中的传质和传热,从而改变晶粒的结晶方向,细化一次组织,减少偏析,降低对结晶裂纹和气孔的敏感性,提高焊缝的力学性能。激光熔覆熔池凝固和结晶特点与焊接过程类似,如果能将电磁作用与激光熔覆相结合,通过外加磁场来抑制熔覆层中柱状晶生长,细化凝固组织、消除气孔和裂纹缺陷将会是一个非常有意义且值得探讨的问题。

有关将磁控技术引入金属过程以改善凝固组织特征和提高材料综合性能的研究目前已有相关报道。刘洪喜等人^[12]探讨了交变/旋转磁场对激光熔覆涂层组织和性能的影响,结果表明,交变/旋转磁场对熔体的电磁搅拌作用促进了柱状晶向等轴晶转变,消除了涂层内的气孔和裂纹缺陷,提高了涂层综合性能。刘政军等人^[13]采用等离子堆焊方法在制备镍基堆焊层时加入直流横向磁场,发现施加磁场比未施加磁场的堆焊层硬度高、耐磨性好,堆焊层中硬质相数量增多且分布均匀,增强了堆焊层金属的综合力学性能。O.Velde等人^[14]通过数值模拟分析了静态磁场对镁合金晶体生长过程中对流的影响,发现静态磁场能在一定程度上抑制或削弱部分涡流,使由涡流引起不稳定对流所导致的温度和溶质不均匀分布得到控制,从而提高结晶质量。N.Shevchenko等人^[15]应用X射线成像检测仪对Ga-In合金在自然对流与强迫对流下的定向凝固进行了实时观察,并检测了不同对流状态下的合金液溶质浓度,发现强迫

对流能消除溶质雨流,抑制该区域的溶质浓度波动,促进二次枝晶臂生长并改变枝晶的倾斜方向和一次枝晶与二次枝晶的角度。可见,磁控技术辅助材料制备过程能实现无接触式外场作用于液态金属熔池,通过改变熔池熔体的对流状态和结晶特征,达到细化晶粒组织、减少偏析、降低或消除气孔和裂纹,优化涂层性能的目的。

基于此,文中根据激光熔覆熔池凝固结晶过程中的晶体生长特点,在课题组前期交变磁场研究基础上,专门设计了改善凝固组织结晶形态的稳恒磁场装置,运用稳恒磁场辅助激光熔覆复合改性工艺,在 45 中碳钢表面制备了 Fe55 合金涂层,分析了洛伦兹力对激光熔池对流和凝固结晶行为的影响,研究了外加稳恒磁场作用下激光熔覆 Fe55 合金涂层的组织形貌和微观结构变化与施加电流强度之间的关系,探讨了外加磁场辅助激光熔覆条件下复合涂层的形成机理,以为改善涂层质量和促进激光熔覆的工程应用提供一条新的技术途径。

1 稳恒磁场设计

在激光熔覆过程中,液态熔池既受到高能激光束快速加热和液态金属快速凝固而引起的强制对流作用,又受到温度梯度急剧变化而产生的组织应力和热应力作用。这些作用综合在一起会改变激光熔池内熔体的存在状态和结晶行为,在激光熔覆固有的急热骤冷条件下,最终导致熔覆层中气孔和裂纹的出现。如果能在激光熔覆过程中控制熔池凝固和结晶行为,迫使涂层制备时熔池内的部分柱状晶和树枝晶朝着细小的等轴晶转变,同时使晶粒沿着一定的方向选择性结晶生长,这样不仅会细化组织,减少偏析,降低结晶裂纹和气孔的敏感性,也自然会在一定程度上改善熔覆层的综合性能。正是基于这一思想,文中专门设计了一种辅助激光熔覆涂层制备的稳恒磁场装置。

图 1 是所设计的稳恒磁场辅助激光熔覆涂层制备示意图。电流强度范围 0.5~9.0 A,磁场强度范围 200~2 500 G。该设计实现了非接触式稳恒磁场辅助激光熔覆对基材进行表面改性的目的。具体过程如下:将熔覆基材 5 固定在试样夹具 4 上,调整试样夹具相对于磁场发生装置 6 的位置,让熔覆基材的待

熔覆区处于磁极中心,并使涂层长度方向与磁极中心轴向垂直,激光束聚焦后辐照于粉末表面,调节直流电源 7 的电流强度获得相应级别的稳恒磁场,该磁场作用于激光熔池两侧,磁场方向与激光熔覆涂层长度方向相互垂直。通入氩气保护,通过数控机床工作台移动工件,使激光熔覆在稳恒磁场作用下进行,从而实现稳恒磁场辅助作用下的激光熔覆复合涂层制备过程。

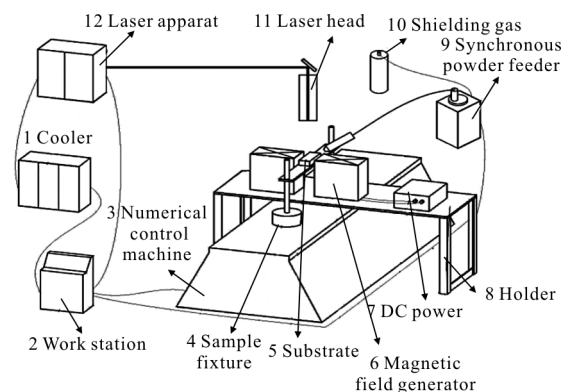


图 1 稳恒磁场辅助激光熔覆示意图
Fig.1 Schematic diagram of steady-state magnetic field assisted laser cladding process

2 实验

2.1 试样制备

实验用基材为 45 中碳钢,经线切割后制成 90 mm×15 mm×15 mm 的试样。用丙酮和酒精超声清洗试样表面,以去除表面残存的氧化物、杂质和油污等。熔覆材料选用 Fe55 合金粉末,粒度 50~100 μm,主要化学成分(质量分数,%)为:18.13 Cr,2.94 Si,0.80 C,0.69 Mn,0.43Ni,余量 Fe。激光熔覆实验前,将 Fe55 合金粉末置于真空干燥箱中 80 °C 干燥 24 h,取出待其冷却后与粘接剂按一定比例均匀混合于基材表面,预置层尺寸 80 mm×5 mm×1 mm,置于 80 °C 干燥箱中干燥 10 h 待用。

涂层制备在 GS-TFL-6000 型横流多模 CO₂ 激光器及其配套的五轴四联动 Siemens 数控机床上完成。固定激光工艺参数以便重点分析施加磁场前后激光熔覆涂层的微观结构差异以及电流强度大小对熔覆涂层微观组织演变的影响。具体工艺为:激光功率 4.0kW,扫描速度 400 mm·min⁻¹,圆形光斑尺寸 5 mm。氩保护气(纯度 99.99%)流量 16.9 L·min⁻¹。专门设计

的激光熔覆辅助稳恒磁场发生装置如图 1 所示。通过调节电流强度以获得相应级别的稳恒磁场, 磁场方向与熔覆基材长度方向(激光束扫面方向)垂直。稳恒磁场电流强度分为 3 组, 即 0 A、2.5 A 和 4.0 A。

2.2 涂层结构和性能表征

通过线切割将激光熔覆涂层试样沿垂直于激光扫描方向切取以制成金相试样, 打磨抛光后用王水(HCl:HNO₃=3:1) 腐蚀其截面 10~15 s, 再利用 LEICA DFC280 型光学显微镜观察熔覆层显微组织。依据荷兰飞利浦公司 XL30 ESEM-TMP 型扫描电子显微镜(SEM)及其所附的 Phoenix+OIM 能谱仪(EDS)分析熔覆层中不同区域的元素分布。借助 D/max-3BXJ 型 X 射线衍射仪(Cu K α 线波长 0.154 06 nm)分析激光熔覆层的物相组成, 管压 40 kV, 管流 20 mA, 连续扫描模式, 扫描速率 10°·min⁻¹, 衍射角范围 10°~100°。

3 结果与讨论

3.1 外加磁场对激光熔覆层组织的影响

图 2 是不同电流强度作用下激光熔覆 Fe55 合金涂层的微观形貌。其中, 图 2(a)是未加磁场时涂层的纵截面组织, 图 2(b)和图 2(c)分别是电流强度为 2.5 A 和 4.0 A 时熔覆层的纵截面组织。依图 2(a)可以看出, 熔覆层凝固组织从与基材结合处到顶部, 由平面晶逐渐向柱状晶、树枝状晶、等轴晶转变, 具有典型的激光熔覆凝固组织特征。激光熔覆层凝固组织生长形态主要由形状控制因子 G/R (G 表示温度梯度, R 表示凝固速度) 决定。在扫描速度一定的条件下, 熔覆层底部的熔融液态金属与温度较低的基体金属存在较大温度梯度, 底部金属液凝固速度很慢, 熔覆层与基体交界处 G/R 趋于 ∞ , 成分过冷很小, 其凝固组织以低速平界面方式生长, 最终形成平面晶(熔覆合金与基体金属的固溶结合层), 宏观上表现为细窄的“白亮带”组织。随着结晶过程的进行, 熔池温度不断下降, 基体温度逐渐升高, G/R 减小, 固-液界面前方产生一个窄的成分过冷区, 破坏了平界面的稳定性, 不稳定的平界面逐渐转变成稳定的胞状晶。随着 G/R 进一步减小, 开始出现树枝晶。熔覆层与基体交界处, 树枝晶生长主要受热流方向控制, 故胞状晶和树枝晶趋向平行于固-液界面法向外延生长。 G/R 继续减小, 熔覆层中部, 固-液界面前沿

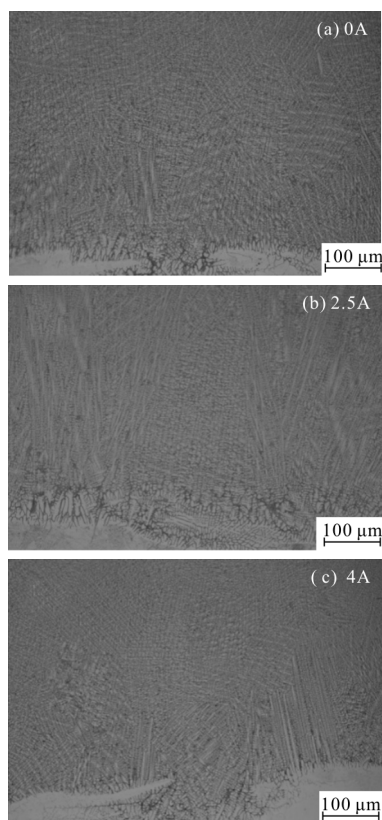


图 2 不同激磁电流作用下熔覆涂层的微观组织

Fig.2 Microstructure of the cladding coatings under different magnetic field current conditions

成分过冷度较大, 形成大量方向各异的树枝晶。熔覆层顶部, G/R 很小, 过冷度很大, 形成尺寸较小的树枝晶和等轴晶。从图 2(b)可见, 在较小磁场强度作用下, 涂层中出现了由大量各向异性树枝晶包围的等轴晶组织, 且在涂层底、中、顶部的等轴晶较为细小。此外, 施加磁场后, 在熔覆层和基体之间生长的白亮平面晶不再平坦, 且胞状晶不再是平行于界面法向, 而是与界面法向呈一定角度。随着磁场强度的增加(图 2(c)), 熔覆层中部及顶部较大部分区域出现方向各异的树枝晶。图 2(b)和图 2(c)中等轴晶的形成与凝固前沿温度梯度直接相关, 在此引入柱状晶向等轴晶转变的判据^[16]:

$$G_L \leq 0.617 N_0^{1/3} \left[1 - \frac{(\Delta T_N)^3}{(\Delta T_C)^3} \right] \Delta T_C \quad (1)$$

式中: G_L 为固-液界面前沿温度梯度; N_0 为非均质形核率; T_N 为非均质形核临界过冷度; T_C 为柱状晶前沿过冷度。

由公式(1)可知, 降低温度梯度和增加非均质形

核率,可实现柱状枝晶向等轴晶的转变。稳恒磁场辅助的激光熔覆,在激光束辐照作用下,熔体自身存在复杂的自然对流,磁通量的变化导致熔池内产生感生电流从而使液态金属成为带电导体,熔池内带电的液态金属必然受到洛伦兹力作用。实验证明,运动带电粒子在磁场中所受洛伦兹力 F 与粒子的电荷 q 、速度 v 、磁感应强度 B 之间存在如下关系^[17]:

$$\vec{F}=q\vec{v}\times\vec{B} \quad (2)$$

由公式(2)可知,若熔池中液态金属在复杂自然对流下的初速度与磁场方向呈任意夹角 θ ,则初速度 v 在平行于磁场 B 和垂直于 B 方向的分量分别为 $v_{//}=v\cos\theta$ 和 $v_{\perp}=v\sin\theta$,两分量同时作用,熔体中带电熔体将以一定螺距沿磁场方向螺旋前进,势必促进熔体内部液态金属的流动,从而降低熔池内部温度梯度。液态熔池由于存在表面张力梯度,使得熔融金属由熔池中心向熔池底部和尾部流动^[18],导致熔池内部存在很强的对流。在稳恒磁场辅助的激光熔覆涂层凝固过程中,先析出的相受到洛伦兹力作用在熔体中沿磁场方向以一定螺距做螺旋运动。带电熔体沿螺旋线或圆周运动必将带动熔体内部液态金属的运动,从而加速熔池内部的热量交换,致使液态金属温度趋于一致,固-液界面前沿温度梯度减小。此外,低激磁电流作用下,液态金属凝固时,凝固前沿温度梯度随磁泰勒数的增加而降低^[19-20]。随着电流强度的增加,磁场强度增强,磁泰勒数增大,凝固前沿温度梯度将减小,这样有利于等轴晶的形成。

因此,在激光熔覆过程中引入稳恒磁场,一方面可加速熔池内部的热量交换,降低固-液界面前沿温度梯度,使得结晶区域浓度过冷程度减小,结晶前沿的稳定性提高,熔池内大量晶核各向生长,促进了等轴晶形成。另一方面,结晶前沿液态金属在磁场作用下产生较强流动,流动的液体不断冲刷或熔断已形成晶粒,使之破碎,这些破碎的晶粒而后被高温金属流带入激光熔池中,作为新的形核质点,亦促进了等轴晶形成,细化了熔覆层组织。且随着磁场电流的增加,等轴晶的形成范围也增大,可获得更大范围的等轴晶激光熔覆涂层。稳恒磁场的引入除可获得较大范围的等轴晶激光熔覆涂层外,还可使这些等轴晶得到不同程度的细化,从而改善涂层的综合性能。图 3 是图 2(a)和图 2(c)在更高倍数下激光熔覆涂层

中上部的微观组织形貌。其中,图 3(a)和图 3(b)分别对应图 2(a)和图 2(c)。从图中可明显看出,涂层中上部均匀分布着致密的等轴晶,胞状晶与界面法向呈一定角度。在涂层底部,部分树枝晶的二次枝晶臂与磁场方向呈一定角度生长。而且,图 3(b)中的等轴晶比图 3(a)中更加均匀细小,表明随着磁场电流的增大,等轴晶可以得到一定程度的细化。

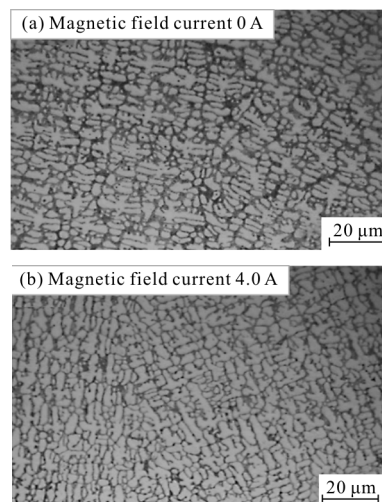


图 3 对应图 2(a)和图 2(c)激光熔覆涂层中上部的高倍微观组织形貌

Fig.3 High magnification morphology in upper and middle region of coating corresponding Fig.2(a) and Fig.2(c)

3.2 外加磁场对激光熔覆涂层物相的影响

图 4 是激光熔覆 Fe55 合金涂层的 XRD 图谱。其中,图 4(a)是未施加磁场时的熔覆涂层,图 4(b)是磁场电流为 4.0 A 的熔覆涂层。通过对比标准 PDF 卡片,并结合下文熔覆涂层横截面的 EDS 分析、Fe-C-Cr 相图和参考文献[20]可知,无论是否施加磁场,激

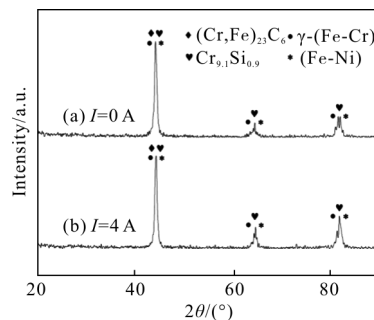


图 4 有、无磁场作用下激光熔覆 Fe55 合金涂层的 XRD 图谱

Fig.4 XRD patterns of laser cladding Fe55 alloy coating without (a) and with (b) magnetic field

光熔覆 Fe55 合金涂层结晶相都主要包括 γ -(Fe, Cr) 和 (Fe, Ni) 固溶体、(Cr, Fe)₂₃C₆ 合金碳化物及少量 Cr₉Si_{0.9}。由此表明, 稳恒磁场的引入并没有改变激光熔覆涂层的物相特征。但与未加磁场的熔覆涂层衍射峰相比, 外加稳恒磁场辅助下的熔覆涂层衍射峰在约 65° 和 83° 处的峰强有所增加, 说明稳恒磁场在一定程度上增加了 γ -(Fe, Cr) 固溶体含量, 改善了熔覆涂层的晶体结构完整性。

3.3 外加磁场对激光熔覆层成分的影响

图 5 是稳恒磁场作用下(电流 4.0 A)熔覆层横截面的 EDS 分析位置, 表 1 对应的是有、无磁场作用下熔覆层横截面不同位置处的元素组成。因为 EDS 对轻元素检测灵敏性的限制, 所以在此不讨论涂层中碳的含量。结合图 5 和表 1 可知, 枝晶内及枝晶间都包含有 Si、Cr、Mn、Fe、Ni 元素, 由于 Fe 和 Cr 原子半径相近, 故 Cr 易于进入 γ -Fe 基体而形成 γ -(Fe, Cr) 置换固溶体。由表 1 还可看出, 未施加磁场时, 涂层中 Cr 元素在枝晶间和枝晶内的含量相对较低, Fe 元素在枝晶间和枝晶内的含量相对较高。施加稳恒磁场后, 涂层中 Cr 在枝晶间和枝晶内的含量相对较

高, Fe 在枝晶间和枝晶内的含量则相对较低。这说明, 在稳恒磁场辅助激光熔覆的熔池凝固过程中, Cr 和 Fe 元素发生了迁移。由此可知, 稳恒磁场的辅助在一定程度上促进了激光熔覆熔池中的传质过程, 有益于 Fe, Cr 元素在凝固结晶过程中的扩散, 从而促进了 (Fe, Cr) 固溶体的形成。

4 结 论

利用自行设计的稳恒磁场装置, 采用稳恒磁场辅助激光熔覆技术, 在 45 钢基材表面制备了组织致密、无气孔和裂纹的 Fe55 合金涂层。涂层主要由 γ -(Fe, Cr) 固溶体、(Fe, Ni) 固溶体、(Cr, Fe)₂₃C₆ 合金碳化物及少量 Cr₉Si_{0.9} 组成。稳恒磁场辅助作用下的激光熔覆涂层, 枝晶间和枝晶内 Cr 元素含量较高, Fe 元素含量相对较低。稳恒磁场改善了熔覆涂层的晶体结构完整性, 促进了激光熔池中的传质过程, 易于 Fe, Cr 元素扩散和 (Fe, Cr) 固溶体形成。外加稳恒磁场能加快激光熔覆熔池内液态金属的流动, 冲刷或熔断凝固前沿已形成的晶粒, 利于柱状晶和树枝晶向等轴晶转变以及细小等轴晶形成, 有助于熔覆涂层综合性能提高。

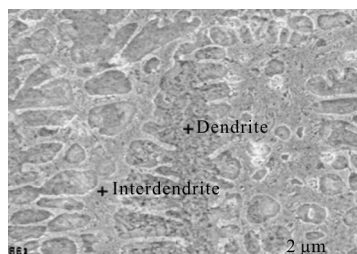


图 5 稳恒磁场作用下熔覆层横截面的 EDS 分析位置

Fig.5 EDS analysis positions of cross section of laser cladding coating with steady-state constant magnetic field

表 1 有、无稳恒磁场作用下熔覆层横截面不同位置处的 EDS 分析结果(at%)

Tab.1 EDS analysis result of cross section of cladding coatings at different positions with or without steady-state constant magnetic field

	Position	Si	Cr	Mn	Fe	Ni
Without magnetic field	Dendrite	7.03	13.10	0.42	79.04	0.41
	Interdendrite	5.91	14.76	0.62	78.24	0.47
With magnetic field	Dendrite	7.15	14.28	0.77	77.21	0.59
	Interdendrite	5.60	19.32	0.83	73.43	0.82

参考文献:

- [1] Weng F, Chen C, Yu H. Research status of laser cladding on titanium and its alloys: a review [J]. *Materials & Design*, 2014, 58(6): 412-425.
- [2] Li Fuquan, Wang Shuli, Chen Yanbin, et al. Investigation of bioceramic composite coatings fabricated by laser cladding on Ti6Al4V surface [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(6): 122-129. (in Chinese)
李福泉, 王树立, 陈彦宾, 等. Ti6Al4V 表面激光熔覆生物复合陶瓷涂层研究 [J]. *中国激光*, 2015, 42(6): 122-129.
- [3] Wang Y, Zhao S, Gao W, et al. Microstructure and properties of laser cladding FeCrBSi composite powder coatings with higher Cr content [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, 214(4): 899-905.
- [4] Li Jianzhong, Li Xiangfeng, Zuo Dunwen, et al. Influence of defocusing amount on the process of Al/Ti cladding above 7050 aluminum alloy based on numerical simulation study [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(4): 1126-1133. (in Chinese)
李建忠, 黎向锋, 左敦稳, 等. 模拟研究离焦量对 7050 铝合金 Al/Ti 熔覆过程的影响 [J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(4):

- 1126-1133.
- [5] Yan Shixing, Dong Shiyun, Xu Binshi, et al. Effect of molten pool convection on pores and elements distribution in the process of laser cladding [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(9): 2832-2839. (in Chinese)
闫世兴, 董世运, 徐滨士, 等. 激光熔覆过程中熔池对流运动对熔覆层气孔和元素分布的影响 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(9): 2832-2839.
- [6] Chen Jing, Lin Xin, Wang Tao, et al. The hot cracking mechanism of 316L stainless steel cladding in rapid laser forming process [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2003, 329(3): 183-186. (in Chinese)
陈静, 林鑫, 王涛, 等. 316L 不锈钢激光快速成形过程中熔覆层的热裂机理 [J]. 稀有金属材料与工程, 2003, 329(3): 183-186.
- [7] Liu Kun, Li Yajiang, Wang Juan, et al. Preparation, microstructural evolution and properties of Ni-Zr intermetallic/Zr-Si ceramic reinforced composite coatings on zirconium alloy by laser cladding [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, 647(10): 41-49.
- [8] Yao Q, Luo Z, Li Y, et al. Effect of electromagnetic stirring on the microstructures and mechanical properties of magnesium alloy resistance spot weld [J]. *Materials & Design*, 2014, 63(21): 200-207.
- [9] Luo Jian, Wang Xiangjie, Zhao Guoji, et al. Study on mechanical properties and microstructure of gradient functional layer prepared by CO₂ surfacing welding with electromagnetic stir [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2009, 45(12): 1487-1492 (in Chinese)
罗健, 王向杰, 赵国际, 等. CO₂+电磁搅拌复合堆焊梯度功能层的微观组织及性能研究 [J]. 金属学报, 2009, 45(12): 1487-1492.
- [10] Liu Changjun, Liu Zhengjun, Su Ming, et al. Microstructures and mechanical properties of Co-based surfacing alloys under DC transverse magnetic field [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2011, 32(3): 53-56. (in Chinese)
刘长军, 刘政军, 苏明, 等. 直流横向磁场作用下钴基合金的组织及性能 [J]. 焊接学报, 2011, 32(3): 53-56.
- [11] Xu W, Fang H Y, Yang J G, et al. New technique to control hot cracking with trailing impactive electromagnetic force during welding [J]. *Materials Science & Engineering A*, 2008, 488(1): 39-44.
- [12] Liu Hongxi, Cai Chuanxiong, Jiang Yehua, et al. Influence of alternative magnetic field on macro morphology and microstructure of laser cladding Fe-based composite coating [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(11): 2043-2048. (in Chinese)
刘洪喜, 蔡川雄, 蒋业华, 等. 交变磁场对激光熔覆铁基复合涂层宏观形貌的影响及其微观组织演变 [J]. 光学精密工程, 2012, 20(11): 2043-2048.
- [13] Liu Zhengjun, Li Lecheng, Zong Lin, et al. Microstructures and wear resistance of Ni-based PLA surfacing layer with introducing magnetic field [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2012, 33(2): 53-56. (in Chinese)
刘政军, 李乐成, 宗琳, 等. 磁场作用镍基等离子弧堆焊层的组织及耐磨性能 [J]. 焊接学报, 2012, 33(2): 53-56.
- [14] Velde O, Gritzki R. Numerical investigations of Lorentz force influenced Marangoni convection relevant to aluminum surface alloying [J]. *Heat and Mass Transfer*, 2001, 44(14): 2751-2762.
- [15] Shevchenko N, Roshchupkina O, Sokolova O, et al. The effect of natural and forced melt convection on dendritic solidification in Ga-In alloys [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2015, 417(1): 1-8.
- [16] Hoadley A F A, Rappaz M A. Thermal model of laser cladding by powder injection [J]. *Metallurgical Transactions B*, 1992, 23(5): 631-642.
- [17] Zhao Kaihua, Chen Ximou. Electromagnetics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2011: 281-286. (in Chinese)
赵凯华, 陈熙谋. 电磁学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2011: 281-286.
- [18] Pei Yinglei, Shan Jiguo, Ren Jialie. Effect of welding speed on melt flow behavior in high speed laser welding process [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(5): 56-61. (in Chinese)
裴莹蕾, 单际国, 任家烈. 焊接速度对高速激光熔池流动行为的影响 [J]. 中国激光, 2013, 40(5): 56-61.
- [19] Willers B, Eckert S, Michel U, et al. The columnar-to-equiaxed transition in Pb-Sn alloys affected by electromagnetically driven convection [J]. *Materials Science & Engineering A*, 2005, 402(1-2): 55-65
- [20] Liu Hongxi, Tao Xide, Zhang Xiaowei, et al. Microstructure and interface distribution of Fe-Cr-Si-B-C laser cladding alloy coatings assisted by mechanical vibration [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(8): 2192-2202. (in Chinese)
刘洪喜, 陶喜德, 张晓伟, 等. 机械振动辅助激光熔覆 Fe-Cr-Si-B-C 涂层的显微组织及界面分布形态 [J]. 光学精密工程, 2015, 23(8): 2192-2202.