

# 激光与光电子学进展

## 激光熔覆裂纹研究现状

陈滋鑫, 周后明\*, 徐采星

湘潭大学机械工程学院, 湖南 湘潭 411105

**摘要** 激光熔覆是一种先进的表面改性技术,在航空航天、石油化工等领域应用广泛。本文综述了激光熔覆裂纹的研究进展,阐述了裂纹的分类、形成机理和检测方法,并从优化工艺参数、优化覆层设计、优化粉末组成、优化工艺方法等方面,总结了防控裂纹的应对措施,并提出了一些解决覆层开裂问题的建议以及今后的研究方向和思路。

**关键词** 激光技术; 激光熔覆; 裂纹机理; 电磁复合场; 裂纹防控

中图分类号 O436 文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0700006

### Cladding Crack in Laser Cladding: a Review

Chen Zixin, Zhou Houming\*, Xu Caixing

School of Mechanical Engineering, Xiangtan University, Xiangtan, Hunan 411105, China

**Abstract** Laser cladding, an advanced surface modification technique, is widely applied to aerospace, petrochemical, and other fields. Herein, the research progress with respect to cracks in laser cladding coating is reviewed. Furthermore, the classification, formation mechanism, and detection methods of cracks are described. In terms of the optimization of process parameters, cladding design, powder composition, and process methods, the countermeasures to prevent and control cracks are summarized; some suggestions to solve the problem of cladding cracks and future research directions and ideas are suggested.

**Key words** laser technique; laser cladding; crack mechanism; electric-magnetic compound field; crack prevention

**OCIS codes** 140.3460; 160.3900; 260.3910; 350.3850

## 1 引 言

激光熔覆是 20 世纪 80 年代兴起的一种先进的制造技术。该技术集快速制造技术与表面改性技术于一体,具有广阔的应用前景;但覆层极易产生裂纹,且其原因多元,难以控制。激光熔覆的大规模应用多受此制约,故而抑制熔覆裂纹的产生成为一个亟待解决的问题。本文从裂纹的分类、形成机理、应对措施等方面总结了目前激光熔覆裂纹的研究现状,以期能为激光熔覆技术的发展提供有益参考。

## 2 形成机理

激光熔覆加工过程温度梯度大、能量密度高且非平衡,故而分析激光熔覆裂纹的形成机理对于裂纹控制具有积极意义。目前,国内外对激光熔覆裂纹萌生与扩展的研究,多从以下三方面展开:1)对金属材料裂纹萌生与扩展的微观理论进行研究,并提出了微裂纹描述方法;2)对材料的微观组织进行观察,分析裂纹产生的机理;3)对材料的组织结构进行仿真,模拟裂纹的产生和扩展<sup>[1]</sup>。特别是关于

收稿日期: 2020-07-21; 修回日期: 2020-08-19; 录用日期: 2020-09-03

基金项目: 湖南省自然科学基金(2020JJ4585)、国家自然科学基金(51775469,51775470)、长株潭标志性工程计划重大标志性创新示范工程项目(2019XK2303)、湘潭市科技计划项目(ZD-ZD20191007)

\*E-mail: zhouhouming@xtu.edu.cn

热裂纹的研究,诸多学者皆争鸣般地提出了许多理论、假设、判据,如凝固裂纹理论就有强度理论、回流愈合理论、液膜理论、空穴理论、综合作用理论等等。此外,裂纹的萌生判据有 Pellini 提出的应变判据、Prokhorov 提出的应变率判据等。但可以肯定的是,从其萌生原因来看,覆层裂纹都是力学、冶金两种因素共同作用的产物<sup>[2]</sup>,无论是热裂纹还是冷裂纹,其萌生和扩展也都与成形过程中的应力密不可分<sup>[3]</sup>。下面本文就裂纹形成的机理进行进一步梳理。

### 2.1 从凝固过程上看

冷凝刚开始进行时,覆层的组成多为液相,因此晶体可以无束缚地生长,故而应变难以集中。但随着时间的推移,当固相占比积累到某一值时,封闭的结构便在固相间形成了,晶间开始出现不连续且不能自由流动的液膜。当冷凝收缩时,固液两相区晶间断断的液膜处易引起应变集中,继而致使裂纹萌生。由于熔覆的冷凝过程极为迅速,裂纹萌生后又无新的液相来使之弥合,微裂纹进一步生长便会形成凝固裂纹。可以说,晶间液膜是裂纹产生的条件,而局部应变集中则是裂纹萌生发展的前提<sup>[3]</sup>。与此同时,快凝、快冷作用在不均匀或偏析的组织中引起了较大的热应力,随后产生残余拉应力。这种力极易沿晶萌生,而后快速沿脆性晶面生长,从而导致了裂纹的产生<sup>[4]</sup>。

### 2.2 从晶体结构上看

熔覆成形时的急冷急热易导致覆层萌生众多位错,这些位错沿一定的方向滑移,当其碰到晶界中硬质相颗粒的阻碍时,将于滑移带末端造成位错塞积,并致使应力在塞积端集中。这种应力一旦超过了材料的断裂强度,就会出现开裂,裂纹开始形核。当覆层拉应力大于裂纹扩展临界应力时,解理裂纹便产生了<sup>[3]</sup>。有时,过高的激光功率、过小的扫描速度或过长的保温时间虽然会大大减缓熔池的冷却速率,但却会使覆层晶粒尺寸过大,应力过于集中,继而增大了易开裂性<sup>[4]</sup>。此外,晶粒取向在一定程度上也影响着裂纹的萌生与扩展,研究发现,裂纹扩展速率与晶粒取向差呈负相关<sup>[5]</sup>。

### 2.3 从组织缺陷上看

覆层中的气孔、夹杂等都可使覆层组织向着高裂纹敏感性的组织转变,从而形成显微缺陷或裂纹源。可以肯定的是,在应力应变条件下,只有当裂纹源的尺寸超过临界缺陷尺寸时,裂纹才开始萌生

和扩展<sup>[3]</sup>。有时共晶组织也充当着裂纹萌生扩展的“催化剂”。柱状晶界是最迟凝固的部位,此处各种偏析元素高度集中。相较于晶内而言,晶界金属的熔点低,裂纹敏感性高。当柱状晶界上的液态金属呈分散液膜状时,在拉应力的作用下,覆层极易因微应变集中而发生沿晶开裂。对于含有脆性相的覆层,由于拉伸残余应力的累积,其易在凝固后的缺陷处引发裂缝。共晶组织可以起到引发位点,为脆性断裂提供简便的裂缝通道的作用,使裂纹沿着位于晶界处的树枝状脆性共晶相传播<sup>[6]</sup>。此外,气孔有时也扮演着裂纹萌生扩展的“导火索”,它可使覆层组织松散,甚至使覆层与基体剥离。同时,气孔也是引起应力集中、增大覆层裂纹敏感性的主因<sup>[7]</sup>。

### 2.4 从材料属性上看

由于覆层与基材之间存在热膨胀系数上的差异,故极易产生热残余应力。该应力表现为残余拉应力,并且在覆层与基材结合处最大,致使裂纹优先从界面起裂。较大的温差也极易导致约束热应力的产生。较大的温差使覆层不同部位的冷却速度不同,快冷的部位受相邻组织的约束而产生拉应力,该应力会导致冷却最快的涂层表面优先起裂。此外,熔覆时局部的急热急冷极易引起热应变极度不均。在之后的快速凝固过程中,因熔池缩小,同时受到基体和已凝固熔池的约束,覆层中会产生拉应力,其值可达数百兆帕。当覆层组织所受拉应力高于其塑性形变极限应力时,裂纹就会产生。

## 3 应对措施

### 3.1 优化工艺参数

工艺参数的选择与覆层的表面质量、组织、性能等密切相关,对其进行优化可有效减小覆层内应力,提高覆层的力学性能。在光斑大小一定的情况下,对熔覆裂纹影响最大的工艺参数有激光功率 $P$ 、扫描速度 $v$ 和送粉速率 $v_{mp}$ 等<sup>[8]</sup>。下面本文对工艺参数与裂纹的关系进行进一步梳理。

#### 3.1.1 激光功率对裂纹的影响

覆层单位面积内的裂纹数目通常与激光功率 $P$ 呈正相关<sup>[8-10]</sup>。上官绪超等<sup>[11]</sup>在多种激光功率(600, 800, 1000 W)下对 45 钢表面进行激光重熔处理后发现,当激光功率为 800 W 时,铁基复合陶瓷的裂纹率最小。Yi 等<sup>[12]</sup>在其他条件一定的情况下,通过

改变激光功率,在灰铸铁表面进行激光熔覆,最终在激光功率为 3500 W 的条件下得到了无裂纹覆层。朱刚贤等<sup>[13]</sup>认为,提高激光功率和降低进给量可以减少裂纹。李嘉宁<sup>[14]</sup>在研究了激光功率与包层裂纹之间的关系后认为,利用凸点可以减少和控制裂纹。这是因为当激光功率过低时,覆层结合区易产生组织疏松和气孔等缺陷,提高了裂纹敏感性;随着激光功率提高,覆层中的组织缺陷逐渐减少<sup>[10]</sup>。同时,在激光功率较大的情况下,覆层晶体自由生长,组织虽略为粗大,但塑性、韧性得以提高,晶间硬质相和低熔点晶体减少,有利于降低覆层的开裂敏感性。因此,裂纹数目随着激光功率的增大而减少,但过高的激光功率会使覆层输入的比能变多,熔池变大,极端时甚至会发生覆层塌陷、熔池外流现象。

### 3.1.2 激光扫描速度对裂纹的影响

扫描速度  $v$  与激光功率  $P$  具有相似的影响。诸多理论及实验结果表明,覆层的裂纹率与扫描速度呈负相关<sup>[4,12]</sup>。吴新伟等<sup>[15]</sup>选择 2 kW 的 CO<sub>2</sub> 激光器在 A3 钢基体上熔覆了镍基 WC 复合涂层,试验结果显示,覆层宏观裂纹数目随激光扫描速度的增大而减少,在扫描速度为 11 mm/s 左右时效果最佳。此外,张磊等<sup>[16]</sup>、Fu 等<sup>[17]</sup>、Zhou 等<sup>[18]</sup>也通过适当调节扫描速度成功降低了裂纹敏感性。这是因为随着扫描速度增大,固液两相结合处的凝固加快,温度梯度增大,从而导致覆层中的残余应力增大,裂纹率升高。而且,激光功率愈低,扫描速度对熔覆裂纹的影响就愈显著。但是,李嘉宁<sup>[14]</sup>却认为减小扫描速度引起的温度梯度的增大量与熔池变大导致的温度梯度的减小量部分抵消,故而扫描速度的变化对温度梯度的影响很小。

### 3.1.3 送粉速率对裂纹的影响

送粉速率  $v_{mp}$  与裂纹率的关系十分密切。随着送粉速率增大,单一覆层变厚,热应力难以扩散,致使裂纹率增加<sup>[19]</sup>。郝明仲<sup>[20]</sup>在试验中发现,在大扫描速度下的送粉体积越多,裂纹敏感性就越高。此外,快速扫描时,覆层上未完全熔化的粉粒也会增加覆层的孔隙率,这些粉粒也极易卷入覆层,继而萌生裂纹。此外,送粉量的增大还会导致覆层表面质量变差。宋光明等<sup>[21]</sup>采用 Ni60 合金粉末熔覆 45 钢时使用单向送粉双向扫描工艺,有效避免了覆层裂纹的发生,并使得覆层表面更加平整,提高了粉材的利用率。

### 3.1.4 工艺参数对裂纹的综合影响

熔覆工艺参数之间关系密切<sup>[17]</sup>,对此,王志坚等<sup>[22]</sup>、Yi 等<sup>[12]</sup>等都进行了大量且细致的研究。高霁等<sup>[23]</sup>在应用正交试验探究工艺参数对钛合金激光熔覆的影响时,根据极差分析得出了诸参数对裂纹影响的重要性从大到小的顺序为扫描速度、激光功率、预置层厚度、离焦量。这些研究皆证明,工艺参数的优化对于覆层裂纹的控制具有积极意义。但是由于不同材料的性能不同,组织和开裂机理不同,故所适用的工艺参数也必然有所区别。于是,采用数值模拟和试验相结合来优化工艺参数的方法开始进入研究人员的视野。王志坚等<sup>[22]</sup>建立了熔覆线宽与光斑直径、激光功率、扫描速度、送粉量之间关系的数学模型,并在此基础上研究了工艺参数对裂纹的综合影响。Yu 等<sup>[24]</sup>采用田口法设计了 25 组正交试验,通过方差及相关工艺参数信噪比的分析,得到了相关工艺参数对激光熔覆涂层几何特征的影响,继而提出田口法是优化多响应目标工艺参数的有效解决手段。这些数值模拟和试验相结合的方法在一定程度上适应了不同材料的特性,但是客观误差的存在,使得结果不尽人意。

## 3.2 优化覆层设计

搭接率、分层厚度增量和热胀系数是优化覆层设计中的几个要素,其数值的选择不仅关乎成形效率,更关乎覆层的表面形貌及裂纹数量。下面分别就这几个要素进行讨论。

### 3.2.1 搭接率对裂纹的影响

适当的搭接率会提高覆层的表面质量。倘若搭接得过密,则会适得其反,这样也极易使覆层表面倾斜,缺陷累积。Xu 等<sup>[25]</sup>通过研究发现,在不连续液膜中更易形成高角度晶界的共晶(如图 1 所示),这种组织易导致液化裂纹。宋建丽<sup>[2]</sup>在对 Ni60 熔覆 316L 不锈钢组织的多次试验中发现,搭接率低于 30% 时,覆层表面会出现明显凹陷,且其凹陷程度与搭接率呈负相关。张德强等<sup>[26]</sup>在 45 钢表面熔覆了自熔性镍基 WC 粉末,他借助逆向工程技术来确定多道搭接率,计算得到了激光熔覆涂层截面曲线的三维数字化模型,得出最佳搭接率约为 25.47%。覆层表面的凹陷极易导致覆层间形成气孔等缺陷,这对覆层的裂纹率及性能都是不利的。分层厚度增量  $\Delta Z$  一般与搭接率一起综合考虑,故而搭接率一般在 30%~50% 的较大区间内选取。



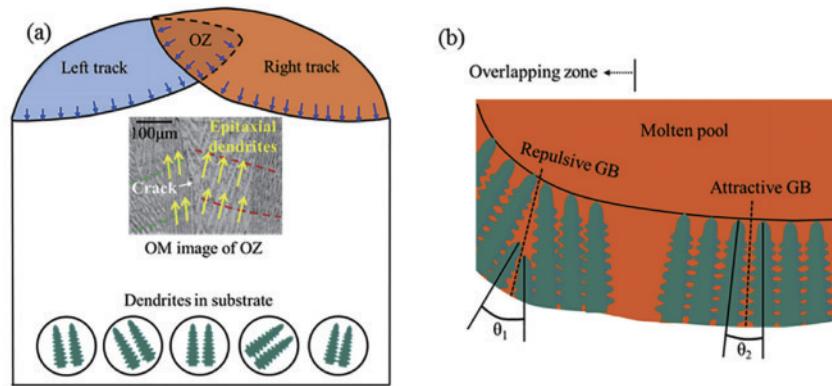


图1 枝晶生长示意图<sup>[25]</sup>。(a)搭接区枝晶生长示意图;(b)形成吸引和排斥的晶界

Fig. 1 Dendrite growth diagram<sup>[25]</sup>. (a) Dendrite growth diagram in the lap zone; (b) formation of attractive and repulsive grain boundaries

### 3.2.2 分层厚度增量和熔覆分层数对裂纹的影响

覆层的裂纹敏感性与分层厚度增量 $\Delta Z$ 紧密相关。在其余参数相同的情况下,分层厚度增量与覆道间凹陷的程度呈正相关。在多层激光熔覆成形中,倘若分层厚度增量适当,则熔覆中产生的杂质会在后续熔覆中上浮,降低了裂纹敏感性;反之,倘若分层厚度增量过大,则不仅会降低成形精度,还易导致杂质来不及上浮,滞留在覆层间,成为裂纹源,并且产生台阶效应。方金祥等<sup>[27]</sup>为了研究固态相变对马氏体钢激光熔覆成形过程中应力演化的影响,建立了考虑降温过程马氏体相变的热力耦合激光单道熔覆及多层多道堆积有限元模型,在实测材料物性参数的基础上,对单道熔覆及多层多道堆积应力演化进行了有限元分析。分析结果表明:马氏体相变对应力场演化具有显著影响;在相同的工艺参数下,熔覆成形层数越多,内部应力累积得越多,越易产生裂纹。故而,有时也可以根据实际情况,在基材与目标覆层间设置单种或多种材料(或过渡层),使覆层与基体实现高强度结合,同时也有利于减少覆层裂纹<sup>[3]</sup>。

### 3.2.3 热膨胀系数对裂纹的影响

熔覆材料一般要根据覆层的性能要求来选择,一般选取与基材湿润性好、热膨胀系数相差较小的材料,以减少熔覆过程中产生的裂纹<sup>[28-29]</sup>。张天刚等<sup>[30]</sup>利用 ANSYS 建立了 TC4 表面 Ni60 激光涂层的有限元模型,分析了涂层表面的残余热应力分布;结果表明,在涂层顶部区域以及边缘和底部结合区形成的应力集中比较严重,且与实际试验中涂层裂纹出现的位置一致。为了降低开裂倾向,选择基体材料的原则是其热膨胀系数稍大于熔覆粉末的热膨

胀系数<sup>[31]</sup>。但是热膨胀系数对裂纹的影响仅仅是降低裂纹敏感性,并不能通过其消除裂纹。余廷等<sup>[4]</sup>基于微观组织研究了 NiCrBSi 镍基熔覆涂层的裂纹形成机理,结果显示,纵然涂层与基体的热膨胀系数差异较小,但涂层也容易开裂。Wang 等<sup>[32]</sup>、Ma 等<sup>[33]</sup>、Dong 等<sup>[34]</sup>提出了在基体与涂层之间引入过渡层的方法,目的是使覆层内各成分的热膨胀系数实现梯度过渡,以减小覆层的热应力,降低裂纹率。

### 3.3 优化粉末组成

激光熔覆材料可分为粉末、丝棒和板条,其中粉末的应用最为广泛。激光熔覆粉末一般由自熔合金、复合合金、稀土和陶瓷颗粒组成。本节将分别介绍它们对裂纹的影响。

#### 3.3.1 增韧增塑元素对裂纹的影响

向粉末材料中加入 Ni、Cr、Mo、Ti 等有益元素能对抑制裂纹起到积极作用<sup>[29,35-36]</sup>。Co 元素可使合金组织由共晶转变为亚共晶,极大地降低了表面裂纹率。目前,钴基合金粉末通常是在 Stellite 合金的基础上进行一些元素的调整得到的<sup>[37-40]</sup>。叶宏等<sup>[41]</sup>在 H13 钢表面通过激光熔覆制备了钴基无裂纹涂层,对该涂层进行 1000 次热冷循环处理后进行裂纹检测,结果发现该覆层表面仍出现了明显的裂纹。在氩气保护下,Song 等<sup>[42]</sup>采用 CO<sub>2</sub> 激光发生器于中碳钢基体上进行了自熔 Fe-Cr-Ni 合金的激光熔覆,并研究了 Co 对覆层裂纹及微观组织的影响。Fu 等<sup>[8]</sup>将添加了不同比例 Co 粉的 Ni60 粉末熔覆于 40Cr 基体表面,然后通过光学显微镜观察裂纹的分布,结果发现,当 Co 的质量分数大于 15% 时,覆层无裂纹产生,而且添加 Co 不会降低覆层硬度。Ni 元素可以有效抑制裂纹的产生,这主要是因为 Ni 能

扩大奥氏体(A)相。随着Ni占比的增加,奥氏体相增多,覆层自身的塑韧性提高,因而裂纹敏感性降低<sup>[7]</sup>。余廷等<sup>[4]</sup>的研究表明:镍基自熔合金的开裂属于冷裂纹范畴,是覆材的低延性及热应力共同作用的结果;奥氏体不锈钢的开裂属于热裂纹范畴,这是凝固温度区间内晶界处的残余液相受覆层中热应力作用而产生的液膜分离的结果。Mo元素可以极大地提高材料的耐蚀性和耐高温能力,并具有良好的脱氧脱硫能力,可促进铁素体的形成<sup>[43]</sup>。陈菊芳等<sup>[44]</sup>在45钢表面熔覆了添加有Mo的Fe901合金,结果表明,Mo的加入可以增强钢的钝化作用,减少裂纹的尺寸与密度。Hf元素可以使铁基合金的结构变细并增强其强度和韧性。同时,Hf能够降低热裂倾向,但Hf很容易被氧化。Song等<sup>[45]</sup>通过试验证明,在良好的保护条件下,熔覆添加有Hf元素的Fe-Cr-Ni合金,可以有效防止开裂。Meng等<sup>[46]</sup>在Ti-6Al-4V表面熔覆NiCoCrAlY,制备了零裂纹、零气孔的覆层,覆层的硬度在800~1000HV之间。此外,B、Si元素可以降低合金的熔点,改善其湿润性和流动性,并具有自我脱氧和造渣功能,而且熔渣上浮的同时,还可将部分气体杂质等带出熔池<sup>[47]</sup>,这些对裂纹源的控制都是有益的;但是,B、Si元素过多时则易与Ni、Cr、Fe等元素形成在奥氏体晶界富集的硬脆低熔点共晶组织<sup>[48]</sup>,这类共晶组织的大量存在会使覆层的延展性降低,裂纹敏感性提高。刘洪喜等<sup>[49]</sup>通过对Ti-Al-Si覆层的测试,证实了加入适量Si元素可以获得连续致密的氧化层,从而使裂纹敏感性大大降低。宋建丽<sup>[2]</sup>通过对多种B、Si含量的覆层进行对比后认为,B、Si质量分数为0.7%的覆层具有较低的开裂倾向。

### 3.3.2 稀土元素对裂纹的影响

稀土元素的化学性质活泼,熔覆过程中易与其他元素反应生成化合物,实现脱氧、脱硫、细化晶粒、防止偏析和提高材料耐磨耐蚀性的作用<sup>[50]</sup>。晶界边缘存在纵横交织的数量众多的缺陷,稀土元素与这些缺陷彼此作用,消弭了缺陷,从而有效减少了裂纹,强化了基体<sup>[10]</sup>。比如Y原子,其原子半径大,表面活性高,熔覆时易与O、S、Si等元素反应生成稳定的化合物,这些化合物继而成为晶核,从而起到细化晶粒的作用。此外,一些小密度的化合物,在冷凝前从熔池中上浮,有效净化了覆层内部组织,继而减小了覆层的开裂倾向<sup>[7]</sup>。Freeney等<sup>[51]</sup>研究了搅拌摩擦加工(FSP)对EV31A镁稀土合金

微观结构和力学性能的影响,并发现FSP结合时效处理可使铸件晶粒从78.5 $\mu\text{m}$ 细化到3.4 $\mu\text{m}$ ,屈服强度达到275MPa。Wang等<sup>[52]</sup>研究了La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Y<sub>3</sub>O<sub>2</sub>和CeO<sub>2</sub>对覆层组织、硬度、摩擦磨损性能的影响,结果表明:普通覆层的枝晶结构粗大,局部存在大量的晶粒偏析,并伴随有大量的气孔和裂纹;而添加稀土的覆层组织为致密的枝晶,晶粒明显细化,覆层更加光滑。一般说来,稀土的质量分数在0.4%~1.0%之间时比较合适,过多的稀土会在晶间产生大量夹杂,这不仅使稀土完全丧失作为形核核心的功能,而且会使固溶强化效果受到削弱。

### 3.3.3 陶瓷颗粒对裂纹的影响

为了提高覆层的硬度和耐磨性,常常会加入较多的陶瓷颗粒,以形成覆层合金与陶瓷颗粒的混合物。但陶瓷材料与金属基体在界面处不易产生良好的结合。从材料的微观组织角度分析,金属与陶瓷材料的晶格类型不同,两者的微观结构与化学键相容性较差,且两者的结合键类型不同,金属为金属键,陶瓷为共价键或离子键<sup>[53]</sup>。此外,二者热力学性能相差也较大,熔覆过程中会产生大的热应力,导致覆层中产生气孔、裂纹等多种缺陷,从而对覆层的制备方法、工艺和材料提出了较高要求<sup>[54]</sup>。陶瓷颗粒大体分为三种,即氧化物陶瓷、碳化物陶瓷和生物陶瓷。Zhang等<sup>[55]</sup>对WC增强镍基和钴基合金覆层裂纹进行研究后认为:覆层裂纹主要为冷裂纹,产生的主要原因是硬质相降低了覆层的韧性;WC陶瓷相的加入比例会直接影响涂层的裂纹率,通过增加韧性相的占比可防止裂纹萌生。Zhang等<sup>[56]</sup>指出,覆材在熔覆中原位生成陶瓷相的工艺,可以减小覆层应力。Brånemark等<sup>[57]</sup>选取纳米级Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>粉末制备了覆层,对覆层进行研究后发现,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的加入可以显著细化晶粒,增强覆层与基体的结合性,降低裂纹敏感性。王迎春等<sup>[58]</sup>在Cr<sub>17</sub>Ni<sub>2</sub>钢表面熔覆了表层无裂纹的NiAl-SiC复合涂层,但通过扫描电镜(SEM)观察覆层横截面后发现,覆层内仍存在微裂纹。有研究者采用激光熔覆分别制备了含氟羟基磷灰石(FHA)<sup>[59]</sup>、硅-羟基磷灰石(Si-HA)<sup>[59]</sup>、碳纳米管-羟基磷灰石(CNTs-HA)<sup>[60]</sup>等复合生物陶瓷涂层,对涂层进行分析后发现,基体与覆层呈冶金结合,工件的耐磨性和生物活性明显提高,裂纹敏感性显著降低。

## 3.4 优化工艺方法

在其他条件不变的情况下,通过优化工艺方法



可以对熔覆裂纹进行有效抑制。常用的工艺方法有热处理、超声振动、电磁场辅助等。在这里,本文将这一系列工艺方法统称为“激光熔覆+”。“+”前是基本的加工手段,是“本”;“+”后是创新的工艺方法,是“枝”。本节对“+”后常见的诸如熔覆环境、超声波等进行说明。

#### 3.4.1 熔覆环境对裂纹的影响

改善熔覆环境可以有效防止覆层开裂。激光扫描过后,高温覆层必然与空气发生反应生成一些氧化物。若不清除空气,则极可能在后续熔覆中形成夹杂,继而在覆层中形成裂纹源,导致开裂敏感性增加<sup>[24,31]</sup>。徐家乐等<sup>[61]</sup>发现,金属材料在高温下工作时,其表面上的沉积盐在 O<sub>2</sub> 等气体的协同作用下会对金属产生加速腐蚀的现象,若在熔池上方营造惰性气氛,则覆层的表面质量将得到极大改善。Song 等<sup>[45]</sup>在熔覆粉末中添加了降低开裂敏感性的 Hf 元素,当未采取气体屏蔽时,粉末中的 Hf 元素几近完全烧损,其烧损氧化物悬浮在熔池表面,冷却后形成一层极薄的黑色层,但在真空保护的对照组中未发现这种黑色层。周阳<sup>[43]</sup>在铝合金的熔覆过程中发现:当在大气中开展试验时,熔池发出高亮白光,同时伴有大量飞溅,逸出轻微烟霾;当通入 5 L/min 的氩气时,熔池发出明黄色光,且夹杂有较少的飞溅;当氩气的通入量增加到 10 L/min 时,发光转为淡黄色,飞溅消失。这是因为通入氩气会降低熔覆环境中的氧含量,而 O<sub>2</sub> 会导致熔池及粉末烧损,并伴有剧烈反应,继而形成飞溅<sup>[3]</sup>。此外,稀有气体的通入可稳定熔池,减少其与外界的接触面,降低反应的可能,从而有效减少覆层内的气孔与夹杂。然而,这种熔覆环境仅在熔池周围存在,当移除激光头后,暴露在大的高温覆层仍有可能被氧化。

#### 3.4.2 机械振动对裂纹的影响

机械振动对细化覆层晶粒有着极为积极的作

用,能促进熔池内部流动,调和温度分布,促进等轴晶形成,减少覆层缺陷,而且设备构造简单、易调整,在工业领域已被广泛应用。Foroozmehr 等<sup>[62]</sup>在激光粉末沉积过程中施以机械振动,结果发现,振动作用下覆层的晶粒较未加振动时要小得多,且表面硬度更均匀。此外,铅直振动下覆层的气孔率比水平振动下的也要低。刘洪喜等<sup>[63]</sup>在机械振动辅助下于 45 钢表面熔覆了 Fe-Cr-Si-B-C 合金覆层,对覆层进行分析后发现,覆层组织的分布形态随着机械振动频率的增大由随机分布向网状分布转变;此外,他们还对比了有无机械振动下的覆层组织,如图 2 所示。Liu 等<sup>[64]</sup>在机械振动辅助下于 45 钢表面熔覆了 Ni60CuMoW 涂层,通过多组试验对比发现,当机械振动频率为 200 Hz、振幅为 140 μm 时,覆层裂纹率几近于零,覆层组织致密,且与基体实现了良好的冶金结合。机械振动之所以会产生这种积极作用,是因为振动能量会打断熔池中正在生长的枝晶,继而液流带动细晶粒重新形成非均匀形核,最后长大形成等轴晶。此外,外部振动能量可促进 Ni、Cr、Fe 元素的固溶强化以及原位合成的碳、硼化物颗粒的分散强化,同时也有利于熔池内气体、夹杂的上浮,降低涂层中气孔、夹杂的数量,这些都会在一定程度上使覆层的裂纹敏感性降低。机械振动虽然有诸多优点,但有时在熔池内部往往存在影响不到的“死区”。在上下振动场中,振动是通过基材从熔池底部向上传递的,由于液态金属强度不大,振动能量在向上传递时的损失较大,所以对熔池中上部位的影响甚微<sup>[65]</sup>。为了避免“死区”的出现,聂艳斌<sup>[66]</sup>从多维高频振动的角度对 316L 不锈钢覆层组织及其性能的调控进行了研究,研究结果表明:相较于普通情况,在一维、二维及三维振动作用下,涂层的平均抗拉强度分别提高了 11.8%、20.1% 和 27.2%,覆层气孔明显减少;在一维振动作用下,孔隙率降低了

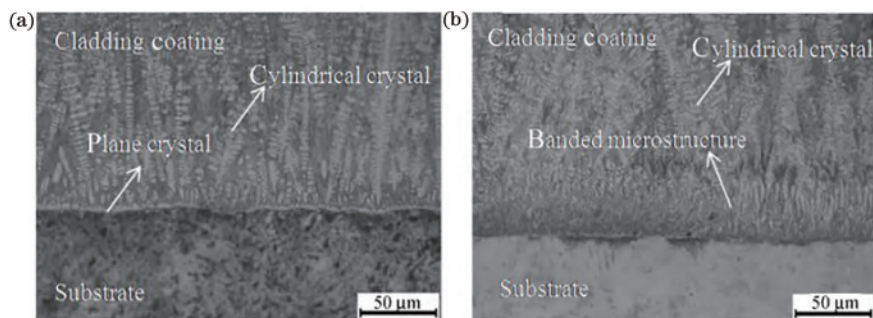


图 2 机械振动对覆层的影响<sup>[63]</sup>。(a)无机械振动;(b)有机械振动

Fig. 2 Effect of mechanical vibration on cladding<sup>[63]</sup>. (a) Without mechanical vibration; (b) with mechanical vibration

79.2%，最大缺陷尺寸减小了 59.6%；在三维振动作用下，孔隙率降低了 95.8%，最大缺陷尺寸减小了 65.6%。由此可见，随着振动维数的增多，“死区”面积逐渐缩小，覆层逐渐致密，不易开裂。

### 3.4.3 超声波对裂纹的影响

超声波具有功率密度高和穿透性强等特点，可在熔池中产生声空化、声流等效应，改变熔池的流动、应力及温度，继而改变覆层的形貌和结构。袁鹤然<sup>[48]</sup>、邓琦林等<sup>[67]</sup>、陈畅源等<sup>[68]</sup>研究了超声振动对液态金属结晶过程中晶粒形貌、化学成分和缺陷的作用机制，并一致认为，超声波可通过空化作用振动和搅拌熔池，提供形核能量，打破枝晶（如图 3 所示），增大形核率，故组织得到了明显的细化，达到了细晶强化的效果，覆层性能因此而提高。王东生等<sup>[69]</sup>在熔覆纳米团聚体  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -30%  $\text{TiO}_2$  过程中施以超声振

动，结果发现，各覆层间过渡自然，内部致密连续，基本无气孔、裂纹等缺陷。此外，超声波的空化及搅拌作用还能使熔池内的组织、元素分布及温度分布更加均匀，减少元素富集及凝固偏析，还可以提高熔池的流动性，增强熔池的排气能力，继而控制裂纹萌生。邵永录等<sup>[70]</sup>采用超声振动辅助在 30Cr 基材表面制备了 Ni60 覆层，结果发现，在超声振动作用下，热影响区中的 Fe、Ni 含量较高，该处易形成共晶组织，从而提高了覆层与基材的结合强度。超声振动搅拌还可以进一步弥合晶间空隙，减少缩孔和裂纹。另外，在超声作用下，原子的动能增加，易于稳定分布，进而减少了位错等缺陷。曹亚男等<sup>[71]</sup>通过多参数的超声振动在 45 钢表面熔覆了镍基合金覆层，结果发现，覆层裂纹虽有减少，但并未消除，这表明仅在工艺上进行改进并不能根治覆层开裂的难题。

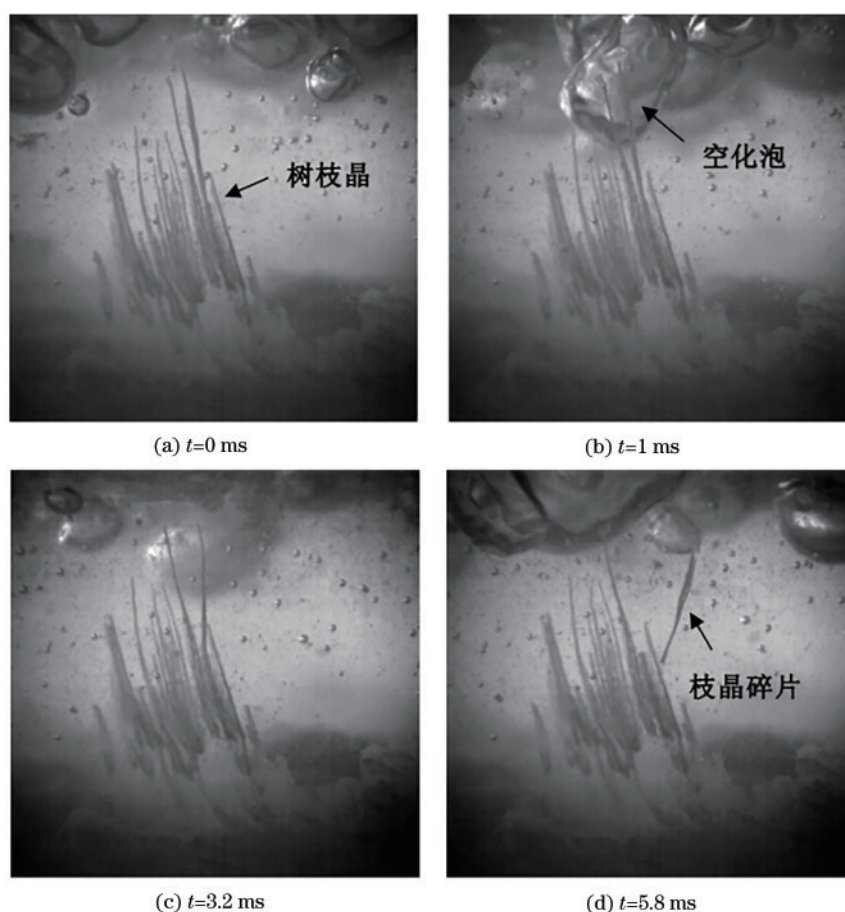


图 3 树枝晶断裂的过程<sup>[48]</sup>

Fig. 3 Process of fragmentation of dendrite<sup>[48]</sup>

### 3.4.4 电磁场对裂纹的影响

由于电磁场对导电流体的影响明显，因此其在改善熔覆质量方面得到了广泛的应用与研究。电

磁场主要由磁场和电场构成。电流按产生方式可分为外加电流和感应电流，或分为直流电流和交流电流。磁场可以分为稳态磁场和交变磁场。以不



同的方式来组合二者,可以得到多种电磁场辅助熔覆方法<sup>[72]</sup>,不同的组合方式对裂纹的作用和影响机理皆大相径庭。采用单电场辅助熔覆时,大多使用的是脉冲电流。该方法可通过脉冲电流的电磁力压缩熔池,从而降低覆层的孔隙率和裂纹敏感性。肖荣诗等<sup>[73]</sup>在铝合金的激光束焊接中向焊池施加电流,在磁流体动力学的作用下,焊接的穿透深度增加了 32%,焊缝宽度减小了 28%。西宇辰等<sup>[74]</sup>采用脉冲电流对激光熔覆 Ni-Cr-Mo 涂层进行热处理后发现,脉冲电流促进了涂层表面共析结构的沉淀,提高了涂层硬度,显著降低了裂纹率。采用单磁场辅助熔覆时,稳态磁场对熔池施加的洛伦兹力为垂直方向。Velde 等<sup>[75]</sup>采用数值模拟的方法探究了稳态磁场中洛伦兹力对铝合金表面晶体生长和熔池对流过程的影响,研究表明,洛伦兹力可在一定程度上限制对流速度,从而减小了温度梯度,使元素均匀分布,继而提高了覆层质量。宋诗英等<sup>[76]</sup>在稳态磁场作用下制备了梯度涂层,对涂层进行分析后发现,稳态磁场可以降低熔池的对流速度,从而使涂层中的 WC 颗粒趋于涂层表面,且这种趋势与磁场强度呈正相关。此外,他们还发现磁场基本只作用于晶体组织,对物相的影响不大。王梁等<sup>[77]</sup>利用最大磁感应强度为 2 T 的电磁铁为熔池区域提供稳态磁场辅助激光熔凝,在不改变其他工艺参数的条件下,成功抑制了覆层表面裂纹。分析显示,随着磁感应强度变大,熔池内部的整体流速缓慢降低,但温度场的变化不甚明显。当稳态磁场的磁感应强度大于 0.5 T 时,熔池形状发生变化,覆层表面的波纹高度明显降低,但显微组织基本不变。这说明稳态磁场可以抑制熔池内部的对流,但难以影响作为熔池运动主要驱动力的马兰戈尼对流。交变磁场对熔池的主要影响之一是会产生机械作用。在磁场作用下,熔池内部将产生两个方向

相反的旋转运动。这种运动不仅加剧了熔池内部物质的对流,还会“冲刷”已结晶界面。这种冲刷力的大小与磁场电流成正比。一方面,这种作用会击碎初生枝晶,碎片晶块成为新的晶核,细化了覆层组织,如图 4 所示;另一方面,碎片晶块进入液相区,使液相的平衡结晶温度更均匀,对等轴晶的形成和细化具有积极作用。交变磁场对熔池的主要作用之二是会促进传热。对流的加速能均匀熔池温度,使熔池内的晶核自由生长,有利于等轴晶的形成。同时,液相中凸出的枝晶可在液流带动下不断运动,难以相连,从而限制了柱状晶的尺寸。交变磁场对熔池的主要作用之三是改变传质。强劲的液流能极大地均匀熔池各处的成分,这使得枝晶尖端的浓度变大,继而发生溶解,促进了等轴晶的形成。El-Bassyouni 等<sup>[78]</sup>、蔡川雄等<sup>[79]</sup>皆通过试验验证了单交变磁场可以明显细化晶粒。刘洪喜等<sup>[80-81]</sup>和余本海等<sup>[82]</sup>探究了交变磁场对铁基和钴基合金覆层的作用,他们发现电磁搅拌可以改善覆层晶粒的结构,提高覆层的硬度和耐磨性,大大降低覆层的孔隙率和裂纹率。付宇明<sup>[83]</sup>在 Q235 钢表面熔覆高硬合金涂层时辅以正弦交变磁场,结果发现,加载 50 mT、20 Hz 的磁场,可使试样的抗拉强度和抗冲击性能更好,且试样的组织更细密,裂纹率几近于零。但是单个物理场的影响是有限的,因此,电磁耦合的复合场开始进入研究人员的视野。王梁等<sup>[84]</sup>通过电磁协同效应来控制凝固过程。Zhang 等<sup>[85]</sup>研究了电磁协同作用对覆层孔隙率的影响,结果表明,向下的电磁力可使孔隙率降低 64.71%,向上的电磁力使孔隙率增加 144%。Zhai 等<sup>[86]</sup>在纯铁上熔覆镍基涂层时辅以电磁场,结果发现,当电流为 1200 A、磁感应强度为 0.2 T 时,组织明显细化,裂纹率最低。许华等<sup>[87]</sup>通过改变磁感应强度和频率,在 Q235A 钢表面制备了高硬合

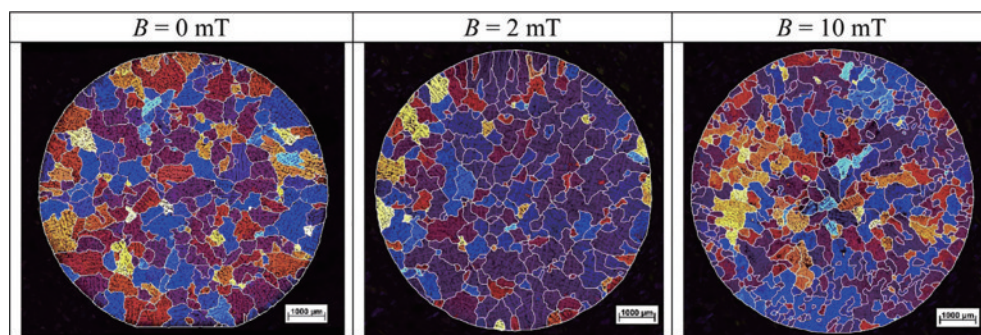


图 4 三种磁感应强度下的晶粒结构<sup>[3]</sup>

Fig. 4 Grain structure at three magnetic induction intensities<sup>[3]</sup>



金覆层,结果发现,稀释率基本不受磁场参数的影响,且在磁场的作用下,金属熔体与气泡间的电导差形成的“电磁浮力”,可使气泡上浮逸出。

当然,人们对电磁复合场的研究还远不止于此,还有许多人做了诸多富有新意的研究。李桂东等<sup>[88]</sup>研究了加载方波电流和正弦波电流对铸坯内部电磁力及流动场的影响,结果表明:加载方波电流相对于加载正弦波电流的电磁力更大,且产生的电磁力表现为震荡效果,可以在凝固过程中击碎体积较大的柱状晶和枝晶,使其变为等轴晶;加载方波电流时也可以在铸坯内部形成环形流场,使铸坯在凝固过程中的流动速度更大且具有震荡特性,从而增强了搅拌效率。贾华等<sup>[89]</sup>在制备 Fe-Cr-C-B 铁基覆层时辅以低频脉冲交流纵向磁场,磁场电流为双向脉冲方波电流,占空比为 50%,频率为 5 Hz,在 0~5 A 范围内每隔 1 A 改变一次磁场电流;测试结果表明:当电流从 0 增加到 3 A 时,覆层硬度从 46 HRC 增加到 56 HRC,磨损量从 0.9924 g 减少到 0.3895 g;随着电流继续增大,涂层晶粒开始粗化,涂层硬度、耐磨性和裂纹敏感性下降。刘政军等<sup>[90]</sup>研究了间歇磁场波形对覆层的作用,其研究显示,适当的交变磁场有助于电磁搅拌的效果。Cao 等<sup>[91]</sup>首次采用同步辐射 X 射线照相技术在行进磁场(TMf)下原位研究了 Sn-50%Pb 合金自下而上凝固过程中的溶质分布和枝晶生长。TMf 的作用是使熔体从左向右流动,从而导致溶质浓度的重新分布、枝晶形态的变化以及二次枝晶的重熔和碎片化。李少翔等<sup>[92]</sup>以特殊钢圆坯为研究对象,建立了凝固末端电磁搅拌作用下的三维耦合数值模型,研究结果表明:电流每增加 100 A,熔池中心磁场的磁感应强度增加 19.05 mT,电磁力亦随之增大。在 20~40 Hz 范围,随着电流频率的增加,熔池中心的磁场略微变弱,但电磁力仍有所增加。于群等<sup>[93]</sup>采用有限元和有限体积的间接耦合法,对交变磁场作用下激光增材制造 Ni45 合金的过程进行了磁-热-流耦合数值分析,并结合试验探讨了外加磁场作用下覆层组织的演化规律及外加磁场对覆层性能的影响。胡勇<sup>[94]</sup>研究了稳态磁场对激光熔注球形 W 颗粒分布的影响,建立了考虑固液相变、固液流动以及洛伦兹力的熔注熔池多物理场模型,分析了稳态磁场对流场、洛伦兹力分布以及等效黏度的影响。

#### 3.4.5 热处理对裂纹的影响

诸多研究皆表明,过大的温度梯度可显著加速覆层的冷却速率,继而导致裂纹萌生。研究人员常

采用预热与后热处理的措施来均匀温度分布。预热可以延长熔池的冷凝时间,是抑制覆层裂纹的有效手段。同理,后热处理亦可延长冷凝时间,使残余应力缓慢释放,在一定程度上减少了覆层裂纹的萌生。钟敏霖等<sup>[29]</sup>在熔覆 NiCrSiB 合金时发现,其微观组织多为较粗大的朵状硬质相,他们通过预热和后热处理,成功降低了覆层裂纹倾向。刘海青等<sup>[31]</sup>通过预热和退火、回火等措施成功降低了熔覆后的残余热应力,减少了裂纹萌生。但他们同时指出,因为裂纹常在快冷时就已萌生,故而后热处理往往没有预热对裂纹的防控作用显著。王东生等<sup>[69]</sup>在熔覆  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -30% $\text{TiO}_2$  粉末制备厚陶瓷涂层时,对基体进行了预热处理,保温温度虽仅有 400 °C,但保温时间长,近乎于在较低温度下的长时间烧结,此时表面扩散起主导作用,致使颗粒明显粗化,降低了覆层的表面质量。一些学者还对热处理方式进行了一些工艺上的改良,如刘海青等<sup>[95]</sup>通过“凸”字激光扫描法制备了无裂纹覆层。王东生等<sup>[35]</sup>对这种“凸”字激光扫描法进行了热力耦合有限元数值模拟,进一步证实了该方法的可靠性。细究其因,“凸”形激光起到了一定的预热、缓冷效果,其实质还是控制覆层与基体的温度差。

#### 3.4.6 其他方法对裂纹的影响

不可否认的是,“激光熔覆+”所涉及的工艺方法远不止于以上所列五点,还有其他学者探索出了让人眼前一亮的办法。Liu 等<sup>[96]</sup>通过优化工艺参数,采用激光 3D 打印辅助熔覆制备了  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$  复合涂层,涂层中的裂纹相比未采用激光 3D 打印辅助的涂层显著减少了。周圣丰等<sup>[97-98]</sup>通过激光-感应复合熔覆法制得了 Ni60A+20%WC 覆层,经检验该覆层中无裂纹。Lu 等<sup>[99]</sup>采用三次激光扫描方法制备了无裂纹的铁基非晶态镀层:第一次扫描加热基层,第二次扫描生成的非晶涂层,然后立即进行第三次扫描,释放非晶涂层内部形成的热应力,成功防止了非晶覆层在熔覆时萌生裂纹。毛怀东<sup>[100]</sup>、Wang<sup>[32]</sup>皆提出了在覆层中置入不锈钢网来消除裂纹的新工艺,结果表明,不锈钢网在高应力下的塑性变形可吸收裂纹生长的能量,限制其延伸,使贯穿裂纹变为封闭裂纹,极大地降低了覆层裂纹敏感性。姜磊等<sup>[101]</sup>在 AZ91 镁合金固溶处理后,先对其进行不同时间的深冷处理,然后进行相应的时效处理。结果发现,试件的伸长率得到了提高,晶粒细化,裂纹率降低。皮政清等<sup>[102]</sup>利用高频微锻造辅助

熔覆了 CoNiCrWC 复合涂层,结果发现,该方法可在覆层表面产生塑性变形,将合金层的表面残余拉应力改性为压应力,从而使部分裂纹得到愈合,覆层开裂行为得到明显控制。

## 4 检测方法

现有的激光熔覆裂纹检测手段主要以不损害、不影响覆层使用性能的无损检测(NDT)为主。与破坏性检测相比,无损检测具有以下特点:一是非

破坏性,它不会损害覆层的使用性能;二是全面性,它可对所有覆层进行逐一全面检测;三是全程性,它可对服役中的覆层进行检测。

无损检测方法众多,根据作用手段可将其分为射线检测、电学方法检测、磁学方法检测等。不可否认的是,这些检测方法都有其自身的局限,故而在很多情况下有可能需要采用多种方法来检查缺陷。表 1 列出了几种主要的无损检测方法及其原理、应用、优点与局限性。

表 1 几种主要的无损检测方法及其原理、应用、优点与局限性

Table 1 Several main nondestructive testing methods and their principles, applications, advantages and limitations

Method	Principle	Application	Advantage	Limitation
Visual testing	Using the light that reflected or transmitted from the measured object to image in the eye or photosensitive device	General cladding coating and macroscopic crack	Cheap, simple, and wide application	Only evaluate surface condition, need an effective light source and it must be accessible during detection
Penetrant testing	The liquid containing visible or fluorescent substances is applied to the surface of the workpiece, and the capillary phenomenon acts it into the crack	General cladding coating and macroscopic crack	Cheap, sensitive, general and easy to operate	Only evaluate surface condition. The surface condition must be relatively smooth and free of contaminants
Magnetic particle testing	After magnetizing the tested workpiece, fine magnetic powder is applied to the coating surface, and the magnetic powder is arranged at the crack	Magnetic material and medium crack	Fast, sensitive and general	Only evaluate magnetic material's surface condition
Radiographic testing	The film is exposed when the X-ray passes through the inspected object, and the crack has an effect on the exposure	General cladding coating and medium crack	Permanent recording, high sensitivity, and wide application	Detection range is related to the material density. Radiation pollution
Ultrasonic testing	When ultrasonic propagates in the workpiece, it will reflect when crack occurs	Simple shape and good surface roughness, and medium or micro crack	Fast, accurate, sensitivity. Obtainable location and defect properties	Limiting to shape. Coupling agent required
Eddy current testing	Local current field is produced in the coating under the action of electromagnetic induction	Conductive materials, and medium or micro crack	Fast, general, sensitive and non-contact, suitable for automatic inspection	Limiting to material
Infrared thermal imaging testing	Measure the temperature change of coating with temperature sensor, detector or camera	General cladding coating and macroscopic crack	Sensitive to micro temperature changes, permanent records provided	It can't effectively detect the cracks in thick parts, and the evaluation is difficult
Acoustic emission testing	When a crack occurs, the energy is released and propagates in the form of stress wave, which can be detected by sensors	General cladding coating and medium or micro crack	The ability to monitor the damage of large area and effectively predict the failure	The sensor must contact the surface to be detected. Defect location requires multiple sensors



## 5 结束语

本文对激光熔覆成形中裂纹的分类、形成机理、应对方法和检测手段进行了综述。本文抛开了诸多次生的、特殊的因素,因为导致覆层裂纹产生的主因仍是热应力、约束应力以及组织应力。目前,虽然已取得了诸多可喜的进展,但仍有许多问题需要进一步探究。例如中间层的问题,很多人通过在覆层中置入具有良好塑性的中间层来缓冲应力,从而降低裂纹率;但 Frenk 等<sup>[103]</sup>的实验结果却表明,该方法对覆层应力的状态、大小、位置无明显影响,无法解决覆层中残余应力的问题。此外,在工艺参数方面,人们已进行了大量有益的研究,但因熔覆材料、环境、基体等相异,研究结果缺乏普适性,这说明人们对现有激光熔覆成形技术深层次的基础和共性问题缺乏全面的掌握。当下,激光熔覆成形技术正趋于高效、移动化、普适化、大面积化方向发展,这也给裂纹控制带来了更大挑战。覆层裂纹的研究方向也应与之相适应,其趋势大体总结如下:一是多物理复合场下激光熔覆裂纹的研究;二是覆层裂纹萌生扩展机理的深入研究;三是工艺参数交互性影响的研究。

### 参 考 文 献

- [1] Zhao Y F, Chen C Z. Mechanism of the deformation and preventive measures of the cracks in metal ceramics cladding layer[J]. *Laser Technology*, 2006, 30(1): 16-19, 22.  
赵亚凡, 陈传忠. 激光熔覆金属陶瓷涂层开裂的机理及防止措施[J]. *激光技术*, 2006, 30(1): 16-19, 22.
- [2] Song J L. Microstructure characteristics and crack control technology of laser cladding[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2006.  
宋建丽. 激光熔覆成形组织特征及裂纹控制技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2006.
- [3] Zimmermann G, Pickmann C, Schaberger-Zimmermann E, et al. Do rotating magnetic fields unconditionally lead to grain refinement? A case study for directionally solidified Al-10wt% Cu alloys [J]. *Materialia*, 2018, 3: 326-337.
- [4] Yu T, Deng Q L, Zhang W, et al. Study on cracking mechanism of laser clad NiCrBSi coating [J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2012, 46(7): 1043-1048.  
余廷, 邓琦林, 张伟, 等. 激光熔覆 NiCrBSi 合金涂层的裂纹形成机理[J]. *上海交通大学学报*, 2012,

46(7): 1043-1048.

- [5] Meng L, Zhao W F, Hou K L, et al. A comparison of microstructure and mechanical properties of laser cladding and laser-induction hybrid cladding coatings on full-scale rail[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2019, 748: 1-15.
- [6] Lee C, Park H, Yoo J, et al. Residual stress and crack initiation in laser clad composite layer with Co-based alloy and WC + NiCr [J]. *Applied Surface Science*, 2015, 345: 286-294.
- [7] Smurov I. Laser cladding and laser assisted direct manufacturing [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2008, 202(18): 4496-4502.
- [8] Fu F X, Zhang Y L, Chang G R, et al. Analysis on the physical mechanism of laser cladding crack and its influence factors [J]. *Optik*, 2016, 127(1): 200-202.
- [9] Ocelik V, Eekma M, Hemmati I, et al. Elimination of Start/Stop defects in laser cladding [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2012, 206(8/9): 2403-2409.
- [10] Zhang D D. Study on the generating mechanism and control methods of high hardness laser cladding coating cracks [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2014.  
张栋栋. 高硬度激光熔覆层裂纹的产生机理及控制方法研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2014.
- [11] Shangguan X C, Zhao Y C, Xu Y, et al. Effect of laser power on tribological properties of WC particles reinforced iron-based composite coating [J]. *Heat Treatment of Metals*, 2018, 43(3): 56-61.  
上官绪超, 赵运才, 徐颖, 等. 激光功率对 WC 颗粒增强铁基复合涂层摩擦学性能的影响 [J]. *金属热处理*, 2018, 43(3): 56-61.
- [12] Yi P, Zhan X H, He Q K, et al. Influence of laser parameters on graphite morphology in the bonding zone and process optimization in gray cast iron laser cladding [J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 109: 480-487.
- [13] Zhu G X, Zhang A F, Li D C. Effect of process parameters on surface smoothness in laser cladding [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(1): 296-301.  
朱刚贤, 张安峰, 李涤尘. 激光熔覆工艺参数对熔覆层表面平整度的影响 [J]. *中国激光*, 2010, 37(1): 296-301.
- [14] Li J N. Laser cladding technology and its application [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2015: 11.  
李嘉宁. 激光熔覆技术及应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2015: 11.

- [15] Wu X W, Zeng X Y, Zhu B D, et al. Cracking tendency of laser cladding Ni based WC composite coatings [J]. Chinese Journal of Lasers, 1997, 24 (6): 570-576.  
吴新伟, 曾晓雁, 朱蓓蒂, 等. 镍基碳化钨金属陶瓷激光熔覆层开裂性的研究[J]. 中国激光, 1997, 24 (6): 570-576.
- [16] Zhang L, Chen X M, Liu W, et al. Formation mechanism and sensitivity of cracks in laser-cladded Ni-based-alloy coatings [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(11): 111401.  
张磊, 陈小明, 刘伟, 等. 激光熔覆 Ni 基合金裂纹的形成机理及敏感性[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(11): 111401.
- [17] Fu F X, Zhang Y L, Chang G R, et al. Analysis on the physical mechanism of laser cladding crack and its influence factors [J]. Optik, 2016, 127 (1) : 200-202.
- [18] Zhou S F, Zeng X Y, Hu Q W, et al. Analysis of crack behavior for Ni-based WC composite coatings by laser cladding and crack-free realization [J]. Applied Surface Science, 2008, 255(5) : 1646-1653.
- [19] Shao Z L. Research and development of powder conveying system for crack laser repair experimental device [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018.  
邵志龙. 裂纹激光修复实验装置粉末输送系统研发 [D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
- [20] Hao M Z. The optimization of laser cladding process parameters and adaptive finite element analysis [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012: 4-10.  
郝明仲. 激光熔覆工艺参数优化及其自适应有限元分析 [D]. 大连: 大连理工大学, 2012: 4-10.
- [21] Song G M, Wu G, Huang W J. Cracking control in laser cladding process with unidirectional powder feeding and double scanning [J]. Heat Treatment of Metals, 2005, 30(5): 26-28.  
宋光明, 吴钢, 黄婉娟. 单向送粉双向扫描激光熔覆工艺防止裂纹的试验研究 [J]. 金属热处理, 2005, 30(5): 26-28.
- [22] Wang Z J, Dong S Y, Xu B S, et al. Effect of laser cladding processing parameters on metal forming efficiency and geometry [J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(2): 315-319.  
王志坚, 董世运, 徐滨士, 等. 激光熔覆工艺参数对金属成形效率和形状的影响 [J]. 红外与激光工程, 2010, 39(2): 315-319.
- [23] Gao J, Song D Y, Feng J W. Influence of processing parameters on geometrical features of CBN coatings by laser cladding on titanium alloy surface [J]. Surface Technology, 2015, 44(1) : 77-80,87.  
高霖, 宋德阳, 冯俊文. 工艺参数对钛合金激光熔覆 CBN 涂层几何形貌的影响 [J]. 表面技术, 2015, 44(1): 77-80,87.
- [24] Yu T B, Yang L, Zhao Y, et al. Experimental research and multi-response multi-parameter optimization of laser cladding Fe313 [J]. Optics & Laser Technology, 2018, 108: 321-332.
- [25] Xu J J, Lin X, Guo P F, et al. The initiation and propagation mechanism of the overlapping zone cracking during laser solid forming of IN-738LC superalloy [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 749: 859-870.
- [26] Zhang D Q, Zhang J Q, Ma D, et al. Determining overlapping ratio of laser cladding based on reverse engineering [J]. Machinery Design & Manufacture, 2016(8): 118-120.  
张德强, 张吉庆, 马丹, 等. 基于逆向工程的激光熔覆搭接率的确定 [J]. 机械设计与制造, 2016(8): 118-120.
- [27] Fang J X, Dong S Y, Xu B S, et al. Study of stresses of laser metal deposition using FEM considering phase transformation effects [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(5): 0503009.  
方金祥, 董世运, 徐滨士, 等. 考虑固态相变的激光熔覆成形应力场有限元分析 [J]. 中国激光, 2015, 42(5): 0503009.
- [28] Wang C Q, Liu H X, Zhou R, et al. Characteristic behaviors of particle phases in NiCrBSi-TiC composite coating by laser cladding assisted by mechanical vibration [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2013, 49(2): 221-228.  
王传琦, 刘洪喜, 周荣, 等. 机械振动辅助激光熔覆 NiCrBSi-TiC 复合涂层中颗粒相行为特征 [J]. 金属学报, 2013, 49(2): 221-228.
- [29] Zhong M L, Liu W J. Comparative research on cracking tendency in powder feeding laser cladding Stellite and NiCrSiB alloys [J]. Chinese Journal of Lasers, 2002, 29(11): 1031-1036.  
钟敏霖, 刘文今. Stellite 和 NiCrSiB 合金激光送粉熔覆裂纹倾向的比较研究 [J]. 中国激光, 2002, 29 (11): 1031-1036.
- [30] Zhang T G, Sun R L. Finite element analysis of crack in laser clad Ni60 coating on TC4 surface [J].



- Heat Treatment of Metals, 2018, 43(3): 190-194.
- 张天刚, 孙荣禄. TC4 表面激光熔覆 Ni60 涂层裂纹有限元分析[J]. 金属热处理, 2018, 43(3): 190-194.
- [31] Liu H Q, Liu X B, Meng X J, et al. Crack formation mechanism and controlling methods of laser clad ceramic matrix composite coatings on metal substrate [J]. Materials Review, 2013, 27(11): 60-63.
- 刘海青, 刘秀波, 孟祥军, 等. 金属基体激光熔覆陶瓷基复合涂层的裂纹成因及控制方法[J]. 材料导报, 2013, 27(11): 60-63.
- [32] Wang F J, Mao H D, Zhang D W, et al. The crack control during laser cladding by adding the stainless steel net in the coating[J]. Applied Surface Science, 2009, 255(21): 8846-8854.
- [33] Ma N N, Chen J, Huang Z R, et al. Densification of C/SiC composite surface by the hybrid process of laser cladding and subsequent heat treatment[J]. Ceramics International, 2019, 45(6): 7703-7708.
- [34] Dong C S, Zhong M L, Hao Q, et al. High chromium coatings by laser deposition of Inconel 690 for repairing nuclear power plant components [J]. Chinese Journal of 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.
- [35] Wang D S, Tian Z J, Wang J W, et al. A method of crack control in laser cladding process with changing power density distribution of laser beam [J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(1): 0103004.
- 王东生, 田宗军, 王泾文, 等. 一种通过改变激光功率密度分布控制熔覆层裂纹的方法[J]. 中国激光, 2011, 38(1): 0103004.
- [36] Guo L Y, Chen Z, Long J, et al. Study on the effect of stress state and crystal orientation on micro-crack tip propagation behavior in phase field crystal method [J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(17): 384-392.
- 郭刘洋, 陈铮, 龙建, 等. 晶体相场法研究应力状态及晶体取向对微裂纹尖端扩展行为的影响[J]. 物理学报, 2015, 64(17): 384-392.
- [37] Wang P, Li Z X, Huang C L, et al. Application research on titanium alloy laser surface modification technology [J]. Laser Journal, 2014, 35(2): 4-6.
- 王培, 李争显, 黄春良, 等. 激光表面改性技术在钛合金上的应用研究[J]. 激光杂志, 2014, 35(2): 4-6.
- [38] Huang G, Su Y, Duan Z Y, et al. Microstructure of Fe powder on laser clad Ti6Al4V alloy [J]. Shanghai Metals, 2013, 35(2): 22-26.
- 黄果, 苏钰, 段志宇, 等. 钛合金表面激光熔覆纯铁涂层显微组织的研究[J]. 上海金属, 2013, 35(2): 22-26.
- [39] Sun R L, Yang X J. Microstructure and friction wear properties of TiC laser clad layer [J]. Optical Technique, 2006, 32(2): 287-289.
- [40] Bao R L. Laser cladding Co-based alloy and its composite coating [D]. Jinan: Shandong University, 2007.
- 鲍瑞良. 激光熔覆钴基合金及其复合涂层 [D]. 济南: 山东大学, 2007.
- [41] Ye H, Lei L P, Yu W X, et al. Microstructure and thermal fatigue resistance of Co-based alloy coating on H13 steel by laser cladding [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2017, 29(2): 140-144.
- 叶宏, 雷临苹, 喻文新, 等. H13 钢激光熔覆 Co 基涂层组织及热疲劳性能 [J]. 强激光与粒子束, 2017, 29(2): 140-144.
- [42] Song W L, Echigoya J, Zhu B D, et al. Effects of Co on the cracking susceptibility and the microstructure of Fe-Cr-Ni laser-clad layer [J]. Surface and Coatings Technology, 2001, 138(2/3): 291-295.
- [43] Zhou Y. Study on the clad quality and the impact factors in aluminum alloy laser cladding [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017.
- 周阳. 铝合金激光熔覆层质量及影响因素研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
- [44] Chen J F, Li X P, Xue Y P. Friction and wear properties of laser cladding Fe901 alloy coating on 45 steel surface [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(5): 0502001.
- 陈菊芳, 李小平, 薛亚平. 45 钢表面激光熔覆 Fe901 合金的摩擦磨损性能 [J]. 中国激光, 2019, 46(5): 0502001.
- [45] Song W L, Echigoya J, Zhu B D, et al. Vacuum laser cladding and effect of Hf on the cracking susceptibility and the microstructure of Fe-Cr-Ni laser-clad layer [J]. Surface and Coatings Technology, 2000, 126(1): 76-80.
- [46] Meng Q W, Geng L, Ni D R. Laser cladding NiCoCrAlY coating on Ti-6Al-4V [J]. Materials Letters, 2005, 59(22): 2774-2777.
- [47] Lin Y H, Yuan Y, Wang L, et al. Effect of electric-magnetic compound field on the microstructure and crack in solidified Ni60 alloy [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2018, 54(10): 1442-1450.

- 林英华, 袁莹, 王梁, 等. 电磁复合场对 Ni60 合金凝固过程中显微组织和裂纹的影响[J]. 金属学报, 2018, 54(10): 1442-1450.
- [48] Yuan H R. Research on arc behaviors and joint microstructure & properties in ultrasonic assisted AC TIG welding of aluminum alloy [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.  
袁鹤然. 铝合金超声-交流 TIG 复合焊电弧行为与接头组织性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [49] Liu H X, Zhao Y S, Zhang X W, et al. Microstructure and high-temperature oxidation resistance of laser cladding *in situ* synthesis Ti-Al-Si composite coatings [J]. Optics and Precision Engineering, 2019, 27(2): 316-325.  
刘洪喜, 赵艳爽, 张晓伟, 等. 激光熔覆原位自生 Ti-Al-Si 复合涂层的微观组织和高温抗氧化性能[J]. 光学精密工程, 2019, 27(2): 316-325.
- [50] Liu H X, Cai C X, Jiang Y H, 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): 2402-2410.  
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): 2402-2410.
- [51] Freney T A, Mishra R S. Effect of friction stir processing on microstructure and mechanical properties of a cast-magnesium-rare earth alloy [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2009, 41(1): 73-84.
- [52] Wang C L, Gao Y, Zeng Z C, et al. Effect of rare-earth on friction and wear properties of laser cladding Ni-based coatings on 6063Al [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 727: 278-285.
- [53] Wu W P, Wang X J, Wang Z Y, et al. Laser cladding ceramic coating [J]. Journal of Ceramics, 2017, 38(1): 13-19.  
吴王平, 王晓杰, 王智尧, 等. 激光熔覆陶瓷涂层研究[J]. 陶瓷学报, 2017, 38(1): 13-19.
- [54] Brånemark P I, Breine U, Adell R, et al. Intraosseous anchorage of dental prostheses: I. experimental studies [J]. Scandinavian Journal of Plastic and Reconstructive Surgery, 1969, 3(2): 81-100.
- [55] Zhang J Q, Lei J B, Gu Z J, et al. Effect of WC-12Co content on wear and electrochemical corrosion properties of Ni-Cu/WC-<sup>12</sup>Co composite coatings deposited by laser cladding [J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 393: 125807.
- [56] Zhang Q M, He J J, Liu W J, et al. Microstructure characteristics of ZrC-reinforced composite coating produced by laser cladding [J]. Surface and Coatings Technology, 2003, 162(2/3): 140-146.
- [57] Brånemark P I, Hansson B O, Adell R, et al. Osseointegrated implants in the treatment of the edentulous jaw. Experience from a 10-year period [J]. Scandinavian Journal of Plastic and Reconstructive Surgery, 1977, 16: 1-4.
- [58] Wang Y C, Zhao S, Qi L X, et al. Laser cladding fabrication of hydroxyapatite bioceramic coatings on Ti alloy [J]. Surface Technology, 2018, 47(9): 21-27.  
王迎春, 赵素, 祁丽霞, 等. 钛合金表面激光熔覆制备羟基磷灰石生物陶瓷涂层的研究现状[J]. 表面技术, 2018, 47(9): 21-27.
- [59] Roy M, Bandyopadhyay A, Bose S. *In vitro* antimicrobial and biological properties of laser assisted tricalcium phosphate coating on titanium for load bearing implant [J]. Materials Science and Engineering C, 2009, 29(6): 1965-1968.
- [60] Roy M, Balla V K, Bandyopadhyay A, et al. Compositionally graded hydroxyapatite/tricalcium phosphate coating on Ti by laser and induction plasma [J]. Acta Biomaterialia, 2011, 7(2): 866-873.
- [61] Xu J L, Zhou J Z, Tan W S, et al. Thermal corrosion resistance of Co-based alloy coatings by laser cladding assisted by electromagnetic stirring [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(1): 0114002.  
徐家乐, 周建忠, 谭文胜, 等. 电磁搅拌辅助激光熔覆钴基合金涂层的抗热腐蚀性能[J]. 光学学报, 2019, 39(1): 0114002.
- [62] Foroozmehr E, Lin D C, Kovacevic R. Application of vibration in the laser powder deposition process [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2009, 11(1): 38-44.
- [63] Liu H X, Tao X D, Zhang X W, 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.  
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.
- [64] Liu H X, Xu Q, Wang C Q, et al. Corrosion and wear behavior of Ni60CuMoW coatings fabricated by



- combination of laser cladding and mechanical vibration processing[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, 621: 357-363.
- [65] Shi H. Microstructure and properties of Fe60 coating prepared by laser cladding with composite field[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2018.  
石海. 复合场辅助激光熔覆 Fe60 涂层的显微组织及性能研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2018.
- [66] Nie Y B. Regulation of microstructure and property of laser cladding by multi-dimensional high frequency vibration [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2019.  
聂艳斌. 多维高频振动对激光熔覆成形组织及其性能的调控研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2019.
- [67] Deng Q L, Xu L M, Hu D J, et al. Reducing and eliminating the micro-cracks in the metal components formed by laser cladding [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2002, 38(S1): 117-121.  
邓琦林, 许黎明, 胡德金, 等. 激光熔覆成形金属零件中微裂纹的减少和消除[J]. *机械工程学报*, 2002, 38(S1): 117-121.
- [68] Chen C Y, Deng Q L, Song J L. Influence of Ni content and ultrasonic vibration to cracks in process of laser cladding [J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2005, 37 (S1): 44-48.  
陈畅源, 邓琦林, 宋建丽. Ni 含量及超声振动对激光熔覆中裂纹的影响[J]. *南京航空航天大学学报*, 2005, 37(S1): 44-48.
- [69] Wang D S, Tian Z J, Wang J W, et al. Experimental on preparation of thick ceramic coating by laser multi-layer cladding [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2012, 33(5): 57-60, 116.  
王东生, 田宗军, 王泾文, 等. 激光多层熔覆制备厚陶瓷涂层[J]. *焊接学报*, 2012, 33(5): 57-60, 116.
- [70] Shao Y L, Chen X P, Fu D, et al. Effect of synchronous ultrasonic vibration on microstructure and properties of laser cladding [J]. *Hot Working Technology*, 2014, 43(10): 160-162, 165.  
邵永录, 陈秀萍, 符道, 等. 同步超声振动对激光熔覆层组织性能影响[J]. *热加工工艺*, 2014, 43(10): 160-162, 165.
- [71] Cao Y N, Zhang Y M, Jie X H, et al. Study on control of crack in laser cladding Ni-based coating on steel [J]. *Hot Working Technology*, 2012, 41(18): 133-136.  
曹亚男, 张艳梅, 揭晓华, 等. 钢表面激光熔覆镍基合金涂层裂纹控制的研究[J]. *热加工工艺*, 2012, 41(18): 133-136.
- [72] Guo Q T. Experiment research of electromagnetic purification of molten aluminum alloy with high frequency magnetic field [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2005.  
郭庆涛. 铝合金高频磁场电磁净化试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2005.
- [73] Xiao R S, Zuo T C, Ambrosy G, et al. Investigation on current enhanced CO<sub>2</sub> laser welding of aluminum [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, 31(3): 359-362.  
肖荣诗, 左铁钊, Ambrosy Günter, 等. 电流强化铝合金 CO<sub>2</sub> 激光焊接[J]. *中国激光*, 2004, 31(3): 359-362.
- [74] Xi Y C, Zhu J B, Liu S, et al. Effect of pulsed current on mechanical and anticorrosion properties of laser cladded coating [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(4): 043102.  
西宇辰, 朱建波, 刘双, 等. 脉冲电流对激光熔覆层力学及耐腐蚀性能的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(4): 043102.
- [75] Velde O, Gritzki R, Grundmann R. Numerical investigations of Lorentz force influenced Marangoni convection relevant to aluminum surface alloying [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2001, 44(14): 2751-2762.
- [76] Song S Y, Wang L, Hu Y, et al. Graded coating produced by laser melt injection under steady magnetic field [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(5): 0503005.  
宋诗英, 王梁, 胡勇, 等. 稳态磁场辅助激光熔注制备梯度涂层[J]. *中国激光*, 2016, 43(5): 0503005.
- [77] Wang L, Hu Y, Song S Y, et al. Suppression effect of a steady magnetic field on surface undulation during laser remelting [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(11): 1103005.  
王梁, 胡勇, 宋诗英, 等. 稳态磁场辅助对激光熔凝层表面波纹的抑制作用研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(11): 1103005.
- [78] El-Bassyouni T A, Badr A A, Abdel-Azim A N, et al. Effect of electromagnetic forces on aluminium cast structure [J]. *Journal of Japan Institute of Light Metals*, 1983, 33(12): 733-741.
- [79] Cai C X, Liu H X, Jiang Y H, et al. Influence of AC magnetic field on microstructure and wear behaviors of laser cladding Fe-based composite coating [J]. *Tribology*, 2013, 33(3): 229-235.

- 蔡川雄, 刘洪喜, 蒋业华, 等. 交变磁场对激光熔覆 Fe 基复合涂层组织结构及其耐磨性的影响[J]. 摩擦学报, 2013, 33(3): 229-235.
- [80] Liu H X, Liu Z F, Zhang X W, et al. Design of steady-state magnetic field and effect of current intensity on microstructure of Fe55 alloy coating by laser cladding[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(4): 0406001.
- 刘洪喜, 刘子峰, 张晓伟, 等. 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[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(4): 0406001.
- [81] Liu H X, Ji S W, Jiang Y H, et al. Microstructure and property of Fe60 composite coatings by rotating magnetic field auxiliary laser cladding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(1): 0103007.
- 刘洪喜, 纪升伟, 蒋业华, 等. 旋转磁场辅助激光熔覆 Fe60 复合涂层的显微组织与性能[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0103007.
- [82] Yu B H, Hu X H, Wu Y E, et al. Studies of the effects and mechanism of electromagnetic stirring on the microstructures and hardness of laser cladding WC-Co based alloy coating[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(10): 2672-2677.
- 余本海, 胡雪惠, 吴玉娥, 等. 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[J]. 中国激光, 2010, 37(10): 2672-2677.
- [83] Fu Y M, Qi T, Zong L, et al. Effects of alternating magnetic field on microstructures and mechanics properties of high hardness cladding layers[J]. China Mechanical Engineering, 2017, 28(19): 2378-2382.
- 付宇明, 齐童, 宗磊, 等. 交变磁场对高硬熔覆层组织与性能的影响[J]. 中国机械工程, 2017, 28(19): 2378-2382.
- [84] Wang L, Song S Y, Hu Y, et al. Regulation research on microstructure of laser cladding under electric-magnetic synergistic effect[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(z1): 0103005.
- 王梁, 宋诗英, 胡勇, 等. 电-磁复合场协同作用对激光熔覆层凝固组织的调控研究[J]. 中国激光, 2015, 42(z1): 0103005.
- [85] Zhang N, Liu W W, Deng D W, et al. Effect of electric-magnetic compound field on the pore distribution in laser cladding process[J]. Optics & Laser Technology, 2018, 108: 247-254.
- [86] Zhai L L, Ban C Y, Zhang J W. Investigation on laser cladding Ni-base coating assisted by electromagnetic field[J]. Optics & Laser Technology, 2019, 114: 81-88.
- [87] Xu H, Zheng Q G, Ding Z H, et al. Study on laser cladding hard alloy with electromagnetic stirring[J]. Laser Technology, 2005, 29(5): 449-451.
- 许华, 郑启光, 丁周华, 等. 电磁搅拌辅助激光熔覆硬质合金的研究[J]. 激光技术, 2005, 29(5): 449-451.
- [88] Li G D, Ma Y L, Xing S Q, et al. Numerical simulation of electromagnetic field and flow field in square wave electromagnetic stirring of continuous casting mould[J]. Foundry Technology, 2019, 40(3): 276-282.
- 李桂东, 麻永林, 邢淑清, 等. 连铸结晶器方波电流电磁搅拌电磁场-流场数值模拟[J]. 铸造技术, 2019, 40(3): 276-282.
- [89] Jia H, Li M. Effect of electromagnetic stirring on microstructure and properties of Fe based hardfacing alloy[J]. Hot Working Technology, 2018, 47(21): 222-225.
- 贾华, 李萌. 电磁搅拌对铁基耐磨堆焊合金组织及性能的影响[J]. 热加工工艺, 2018, 47(21): 222-225.
- [90] Liu Z J, Sun J G. Influence of intermittent alternative magnetic field waveform on microstructure and properties of plasma arc surfacing layer[J]. Welding Technology, 2009, 38(4): 14-17, 6.
- 刘政军, 孙景刚. 间歇交变磁场波形对堆焊金属组织及性能的影响[J]. 焊接技术, 2009, 38(4): 14-17, 6.
- [91] Cao F, Yang F F, Kang H J, et al. Effect of traveling magnetic field on solute distribution and dendritic growth in unidirectionally solidifying Sn-50 wt% Pb alloy: an *in situ* observation[J]. Journal of Crystal Growth, 2016, 450: 91-95.
- [92] Li S X, Wang P, Lan P, et al. Melt flow and heat transfer at the crater end of round billet continuous casting using final electromagnetic stirring[J]. Chinese Journal of Engineering, 2019, 41(6): 748-756.
- 李少翔, 王璞, 兰鹏, 等. 圆坯凝固末端电磁搅拌作用下的流动与传热行为[J]. 工程科学学报, 2019, 41(6): 748-756.
- [93] Yu Q, Wang C S. Laser additive manufacturing of Ni45 alloys assisted by electromagnetic stirring[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(4): 0402003.
- 于群, 王存山. 电磁搅拌辅助 Ni45 合金的激光增材制造[J]. 中国激光, 2018, 45(4): 0402003.
- [94] Hu Y, Wang L, Lou F X, et al. Mechanism study of steady magnetic field effect on spherical WC particle distribution during laser melt injection[J]. Journal of



- Mechanical Engineering, 2021, 57(1): 240-248.  
胡勇, 王梁, 娄复兴, 等. 稳态磁场对激光熔注球形 WC 颗粒分布的影响机理研究[J]. 机械工程学报, 2021, 57(1): 240-248.
- [95] Liu H Q, Ge C, Wang Z W, et al. Research progress on crack control of laser clad composite coating [J]. Heat Treatment of Metals, 2018, 43(8): 228-232.  
刘海青, 葛超, 王志文, 等. 激光熔覆复合涂层裂纹控制研究进展[J]. 金属热处理, 2018, 43(8): 228-232.
- [96] Liu Z, Song K, Gao B, et al. Microstructure and mechanical properties of  $Al_2O_3/ZrO_2$  directionally solidified eutectic ceramic prepared by laser 3D printing [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2016, 32(4): 320-325.
- [97] Zhou S F, Zeng X Y, Hu Q W, et al. Process study of Ni-based WC composite coatings by means of laser-induction hybrid cladding[J]. Laser Technology, 2009, 33(2): 124-126, 137.  
周圣丰, 曾晓雁, 胡乾午, 等. 激光-感应复合熔覆 Ni 基 WC 复合层的工艺研究[J]. 激光技术, 2009, 33(2): 124-126, 137.
- [98] Zhou S F, Dai X Q. Microstructure evolution of Fe-based WC composite coating prepared by laser induction hybrid rapid cladding[J]. Applied Surface Science, 2010, 256(24): 7395-7399.
- [99] Lu Y Z, Huang G K, Wang Y Z, et al. Crack-free Fe-based amorphous coating synthesized by laser cladding[J]. Materials Letters, 2018, 210: 46-50.
- [100] Mao H D. The study of controlling cracks in laser clad layer[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007.  
毛怀东. 激光熔覆层裂纹控制方法与实践[D]. 天津: 天津大学, 2007.
- [101] Jiang L, Bian J C, Wei Z C, et al. Effects of thermal-cold cycling treatment on microstructures and properties of electromagnetic stirred AZ91 magnesium[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2019, 39(6): 681-684.  
姜磊, 卞健从, 魏子程, 等. 冷热循环处理对电磁搅拌 AZ91 镁合金组织与性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39(6): 681-684.
- [102] Pi Z Q, Qiu C J, Fan X F. Study of crack control for CoNiCrWC composite coating by laser cladding [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2011, 40(S2): 283-285.  
皮政清, 邱长军, 樊湘芳. 激光熔覆 CoNiCrWC 复合涂层裂纹的控制研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2011, 40(S2): 283-285.
- [103] Frenk A, Marsden C F, Wagnière J D, et al. Influence of an intermediate layer on the residual stress field in a laser clad[J]. Surface and Coatings Technology, 1991, 45(1/2/3): 435-441.