

文章编号:1005-0523(2018)05-0094-05

# 激光沉积涂层裂纹控制的研究进展

赵龙志,王 怀,赵明娟,杨海超,刘德佳,唐廷川,胡 勇

(华东交通大学材料科学与工程学院,江西 南昌 330013)

**摘要:**本文对激光沉积技术过程中涂层开裂的控制方法研究现状进行了综合评述,分析了目前涂层裂纹控制方法的特点。根据涂层开裂原因,将裂纹控制方法分为应力调控法、涂层强化法、强度和应力双控法,提出了复合激光沉积法将是涂层开裂控制的有效途径。

**关键词:**激光沉积;涂层开裂;涂层强度;残余应力

**中图分类号:**TG665

**文献标志码:**A

激光沉积技术是利用高能密度激光束使不同成分的复合粉末瞬间熔化,并将熔融液滴沉积于基板表面,形成一层或多层涂层的表面强化技术(图1为激光沉积装置),该技术具有基材变形小、复合涂层稀释率低、涂层耐磨耐腐蚀、界面结合强等优点,是制备金属基复合涂层的理想方法<sup>[1-3]</sup>。但是,由于激光沉积具有急热快冷的特点,会导致涂层内的残余应力较高而易开裂,限制了该工艺的应用。

裂纹是采用激光沉积制备涂层时最常见及最具破坏性的一种缺陷。近年来,国内外学者对激光沉积过程中裂纹的产生进行了大量研究,研究发现:涂层裂纹主要取决于涂层残余应力和抗拉强度之间的关系,当残余拉应力超过涂层的抗拉强度时,涂层中将会产生裂纹<sup>[4-5]</sup>。因此控制涂层裂纹的关键是减小残余应力,提高涂层强度。目前降低涂层开裂倾向的方法,主要包括:残余应力调控法、涂层强化法、强度和应力双控法。

## 1 应力调控法

### 1.1 层状梯度过渡法

该方法是在激光沉积过程中逐层改变复合粉末的成分以实现梯度过渡<sup>[6]</sup>。李德英等<sup>[7]</sup>利用ANSYS有限元软件研究了激光沉积过程中SiCp/Cu梯度涂层的残余应力。结果表明:较大的残余应力主要分布于梯度涂层和基体间的界面处;当涂层层数为4,梯度分布因子为1,梯度层厚度为0.6 mm时,SiCp/Cu梯度涂层的残余应力缓和效果明显。根据优化结果,激光沉积法制备的SiCp/Cu不同梯度层间界面清晰,结合良好。但该方法仅适用于厚度较大的涂层,且对送粉器的精度和

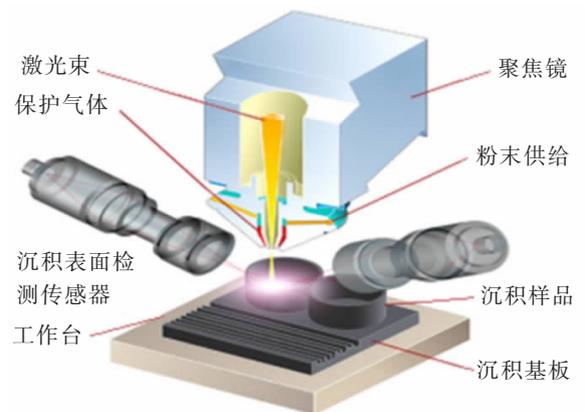


图1 激光沉积装置示意图

Fig.1 The diagram of a laser deposition device

收稿日期:2018-06-05

基金项目:国家自然科学基金(51465019,51761012);江西省科技厅科研项目(20142BDH80004,20153BCB23005);江西省教育厅科研项目(KJLD14040,GJJ150487)

作者简介:赵龙志(1977—),男,教授,博士,博士生导师,研究方向为金属及其复合材料,激光加工技术。

复合粉末的成分有特殊要求,工艺复杂,梯度不易控制,涂层稳定性难以保证。

## 1.2 预热法

预热法<sup>[8-9]</sup>是目前较为常用的一种方法,其原理在于激光沉积时采用辅助热源对基材进行加热,进而使沉积层与基材间的温度梯度缩小、涂层残余应力降低,裂纹的产生受到抑制;然而,这种方法具有较大的能量损耗,基材由于长时间的加热而易氧化,且该方法减缓了涂层的冷却速度,牺牲了激光沉积工艺“急热快冷”特点,舍弃了该工艺的快速凝固优点,降低了涂层性能。

## 1.3 膨胀控制法

涂层的残余应力由涂层的膨胀行为决定,涂层膨胀系数越小,残余应力越小,则涂层的开裂倾向越小,因此降低涂层的膨胀系数,是防止涂层开裂的有效方法。

## 1.4 因瓦效应法

在自然界中,某些由过渡组元素(如铁、镍、钴等)组成的合金具有“反常热膨胀行为”,能在较大的温度范围内使热膨胀系数接近零值甚至负值(这种现象被称为因瓦效应)<sup>[10-11]</sup>。所以,在激光沉积时,通过涂层成分的独特设计获得因瓦效应,可以降低涂层的残余应力。在Fe-Ni合金系中,当含镍量(重量比)为32%~36%时,会产生明显的因瓦效应,此时合金的线膨胀系数约为 $1.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ,因此Fe-Ni合金粉末用于激光沉积时将为涂层零开裂提供可能。张坚等<sup>[12-13]</sup>采用激光沉积法制备了 $\text{Fe}_{0.64}\text{Ni}_{0.36}$ 涂层,涂层保持 $\text{Fe}_{0.64}\text{Ni}_{0.36}$ 单相以及镍溶于 $\gamma\text{-Fe}$ 中形成的 $[\text{Fe},\text{Ni}]$ 奥氏体(图2),相组成符合因瓦效应产生条件,因此涂层具有因瓦合金的低膨胀特性,且涂层表面平整,没有裂纹,达到了裂纹控制效果。

## 1.5 负膨胀组元添加法

大自然中存在部分具有负膨胀效应的材料,即材料的体积随着温度的升高而逐渐收缩<sup>[14]</sup>。将负膨胀材料作为增强组元与正膨胀材料基体复合,可有效控制复合材料的热膨胀系数,甚至可以实现复合材料的零膨胀<sup>[15-16]</sup>。 $\text{ZrW}_2\text{O}_8$ 作为优良的负热膨胀化合物,受到人们的高度关注。 $\text{ZrW}_2\text{O}_8$ 具有较强的各向同性负热膨胀效应,其负热膨胀系数高达 $-9 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ,且 $\text{ZrW}_2\text{O}_8$ 的负热膨胀响应温度范围为 $-272.7 \sim 777^{\circ}\text{C}$ <sup>[17-19]</sup>。激光沉积复合涂层中添加 $\text{ZrW}_2\text{O}_8$ 负膨胀增强组元,可以实现复合涂层膨胀行为的可控性,降低复合涂层中残余应力。

## 2 涂层强化法

### 2.1 稀土添加法

稀土添加法<sup>[20]</sup>是在涂层粉料中添加稀土元素,利用稀土对涂层进行变质处理,达到细化涂层晶粒、提高涂层强度的效果;但该方法对涂层裂纹的改善作用不明显,且各类材料差异很大,涂层对稀土改性处理的裂纹敏感性没有规律,工艺无法控制。

### 2.2 结构复合法

结构复合法<sup>[21]</sup>是在涂层沉积之前预先引入具有高强韧性的连续二维或三维网络骨架(图3),待涂层沉积完成后,该骨架与凝固的涂层形成了结构复合涂层;这种结构复合涂层充分利用了连续骨架的强韧性,能有效提高涂层的抗拉强度、减少涂层裂纹,但该工艺流程复杂,且连续高强韧骨架的预制较为困难,涂层厚度和产品形状有一定局限性,不利于涂层的工业应用。

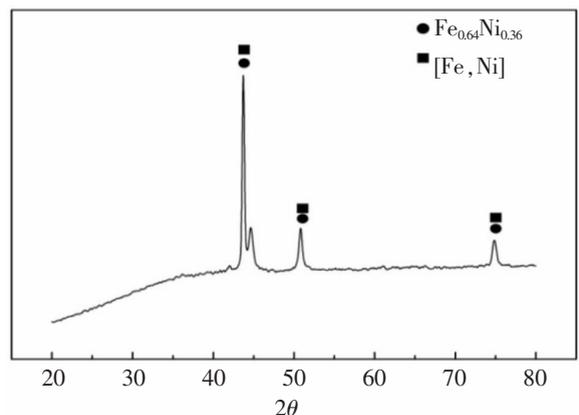
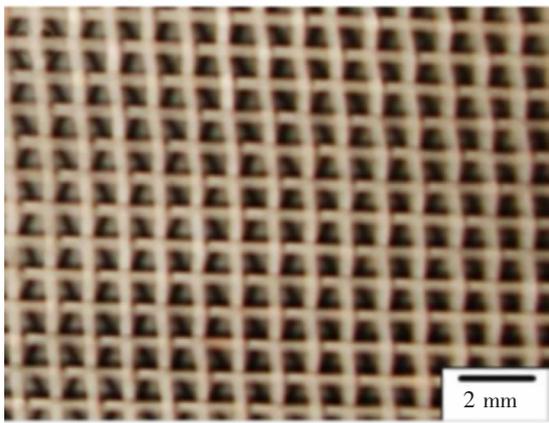
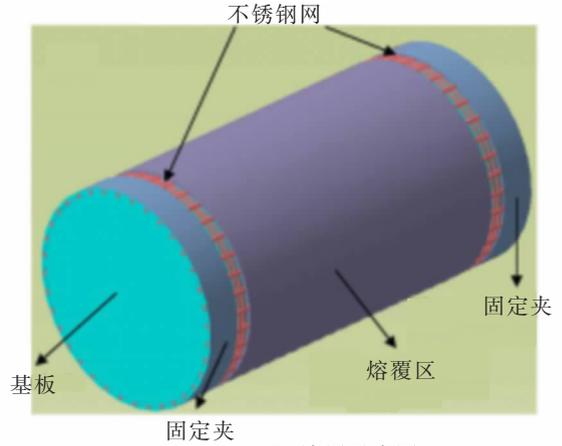


图2 激光沉积涂层的XRD衍射图谱  
Fig.2 The XRD diffraction pattern of laser deposited coating



(a) 预制网



(b) 涂层示意图

图3 结构复合涂层<sup>[21]</sup>

Fig.3 Structural composite coating

### 2.3 磁场辅助法

在磁场辅助激光沉积过程中,由于塞贝克效应,熔池中会产生几安培的电流,且磁场的存在改变了熔池的流动状态<sup>[22]</sup>。根据磁流体动力学原理,感应电流和磁场会产生具有驱动作用的电磁力,流体在电磁力的驱动下会对熔池产生电磁搅拌作用。这种电磁搅拌能够抑制柱状晶的产生,细化涂层晶粒。随着磁场转速的增加,磁场对液态熔池的搅拌作用变强,从而使涂层晶粒更细小、涂层组织更均匀,同时能显著改善加工过程中气孔和裂纹等缺陷。刘洪喜等<sup>[23]</sup>在激光熔覆中引入交变磁场,研究磁场强度对涂层组织的影响。研究发现熔池在交变磁场作用下会产生集肤效应,在交变磁场的作用下,熔池内部会产生电磁力使得熔池流动加剧,熔池中的树枝晶发生熔蚀和机械破碎,致使涂层组织由树枝晶转变为等轴晶。磁场电流的增加将扩大熔池等轴晶区域,使涂层组织更加均匀。

## 3 强度和应力双控法

### 3.1 超声振动辅助法

超声波振动技术作为一种改善涂层质量的高效方法,能达到细化晶粒、改善凝固组织、减少内部气孔夹杂、降低残余应力等效果,由于其具有超声效应瞬时化、设备简单、操作方便、工艺流程短且无污染等优点,因而受到众多研究者的青睐<sup>[24-26]</sup>。赵龙志等<sup>[27-29]</sup>采用超声辅助激光沉积法(图4)制备了SiC/316L复合涂层,研究发现涂层在凝固时组织中会出现枝晶交错封闭现象,组织中枝晶间隙得不到熔体的补充,产生了较大的拉应力。采用超声振动辅助后,超声振动的综合效应(如空化或机械效应)破坏了枝晶交错结晶网,使枝晶间隙得到了熔体填充,减小了枝晶间的拉应力。另外,超声振动对熔池温度场分布具有均匀作用,也有利于减小涂层的残余应力。施加超声振动后,涂层中沉积方向上的残余拉应力降低了78%,在垂直沉积方向的拉应力降低了32%。同时超声振动在打碎枝晶时,提高了涂层的形核率,抑制了晶粒长大,细化了晶粒,提高了涂层强度。

### 3.2 复合强化法

复合强化法<sup>[30-31]</sup>是利用复合材料的强化效应,向复合粉末中添加既可降低涂层应力又可提

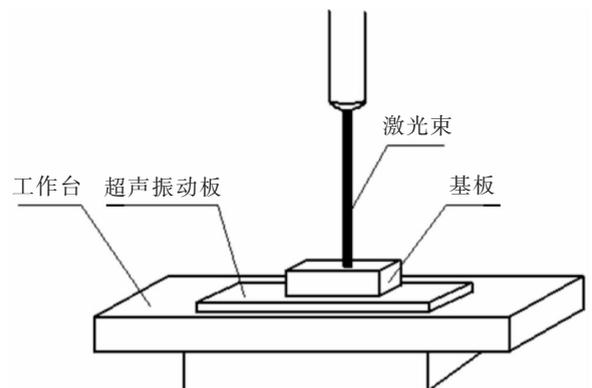


图4 超声振动辅助激光沉积示意图

Fig.4 The diagram of ultrasonic vibration assisted laser deposition

高涂层强度的增强体,从而降低涂层开裂的方法。研究人员把低膨胀高强韧的碳纳米管作为增强体引入到复合涂层中,充分利用增强体纳米强化效应和低膨胀特性分别提高复合涂层的抗拉强度和降低复合涂层的残余应力,达到了双向消除激光沉积复合涂层裂纹的良好效果。一方面,碳纳米管的低膨胀可以调控涂层的残余应力。另一方面,碳纳米管可以作为涂层的形核核心,细化涂层晶粒,提高涂层强度,同时碳纳米管自身的高强度也进一步提升了涂层强度,实现了涂层裂纹的多维调控。

#### 4 结束语

激光沉积技术作为材料智能制造技术的一种重要工艺,受到了表面工程界的极大关注,涂层的使用性能(如硬度、耐磨性、耐腐蚀性)和质量稳定性(如涂层组织均匀性、涂层开裂、表面形貌)一直是人们的研究焦点。目前,有关涂层使用性能和制备工艺方面的研究比较成熟,但对涂层质量稳定性的控制还缺乏有效的通用办法,尤其是涂层开裂的精确控制还有待提高。因此探索出一种能有效控制涂层开裂,确保涂层服役安全可靠,且适合于工业化应用的激光沉积方法是现阶段人们追求的目标,它对我国企业界实现组合式智能制造具有重要意义。由于激光沉积工艺本身具有“急热快冷”的基因,涂层中的残余应力较大,多元耦合式的复合激光沉积法将会对该基因进行有效编辑。通过对涂层粉末成分进行多元复合设计,同时通过对制备工艺和装置进行多元耦合,可以调整涂层的结晶行为、膨胀行为、温度场分布,实现涂层强度和残余应力可控性,所以复合激光沉积将会是提高涂层质量稳定性的一种有效方式。

#### 参考文献:

- [1] ZHANG J, WU W N, ZHAO L Z. Research of laser cladding with SiC-316L composite coating on AZ31 alloy[J]. *Applied Mechanics & Materials*, 2014, 487: 199-203.
- [2] ZHAO L Z, ZHAO M J, LI D Y, et al. Study on Fe-Al-Si situ composite coating fabricated by laser cladding[J]. *Applied Surface Science*, 2012, 258(8): 3368-3372.
- [3] VERWIMP J, ROMBOUTS M, GEERINCKX E, et al. Applications of laser clad WC-based wear resistant coatings[J]. *Physics Procedia*, 2011, 12A: 330-337.
- [4] CHEN Y, ZHANG K, HUANG J, et al. Characterization of heat affected zone liquation cracking in laser additive manufacturing of Inconel 718[J]. *Materials & Design*, 2016, 90: 586-594.
- [5] NIE P, O A OJO, LI Z. Modeling analysis of laser cladding of a nickel-based superalloy[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2014, 258: 1048-1059.
- [6] NAEBE M, SHIRVANIMOGHADDAM K. Functionally graded materials: a review of fabrication and properties[J]. *Applied Materials Today*, 2016, 5: 223-245.
- [7] 李德英, 张坚, 赵龙志, 等. 激光沉积制备 SiCp/Cu 梯度涂层残余应力分析[J]. *中国激光*, 2015, 42(12): 1206002-1-1206002-7.
- [8] 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.
- [9] FALLAH V, ALIMARDANI M, CORBIN S F, et al. Impact of localized surface preheating on the microstructure and crack formation in laser direct deposition of satellite 1 on AISI 4340 steel[J]. *Applied Surface Science*, 2010, 257(5): 1716-1723.
- [10] 刘江. 低膨胀合金的应用和发展[J]. *金属功能材料*, 2007, 14(5): 33-37.
- [11] NAKAMA K, TATSUTANI S, SUGITA K, et al. Strengthening of Fe-36mass%Ni low thermal expansion alloy by additions of C, V, Ti and Cr and the effect of reducing Ni on thermal expansion[J]. *Journal of the Japan Institute of Metals A*, 2014, 78: 37-44.
- [12] 张坚, 王震, 赵龙志, 等. 激光熔覆 Fe-36Ni 因瓦合金涂层的组织与耐磨性研究[J]. *热加工工艺*, 2017, 46(14): 173-176.
- [13] 张坚, 王震, 赵龙志, 等. 激光功率对激光熔覆 Fe-36Ni 因瓦合金涂层组织与耐磨性的影响[J]. *应用激光*, 2017, 37(1): 27-31.

- [14] 赵明娟,李深,赵龙志,等. 不同方法制备负膨胀特性 ZrV2O7 粉体[J]. 机械工程材料,2016,40(9):1-5.
- [15] NEELY L A,KOCHERGIN V,SEE E M,et al. Negative thermal expansion in a zirconium tungstate/epoxy composite at low temperatures[J]. Journal of Materials Science,2014,49(1):392-396.
- [16] SHENG J,WANG L D,LI D,et al. Thermal expansion behavior of copper matrix composite containing negative thermal expansion PbTiO<sub>3</sub> particles[J]. Materials and Design,2017,132:442-447.
- [17] 孙秀娟,杨娟,刘芹芹,等. 水热法制备负热膨胀性 ZrW<sub>2</sub>O<sub>8</sub> 粉体[J]. 硅酸盐学报,2008,36(1):35-39.
- [18] PRASHANTH B,ROGALSKI M K,KESSLER M R. Carbon fiber-reinforced cyanate ester/nano-ZrW<sub>2</sub>O<sub>8</sub> composites with tailored thermal expansion[J]. Applied Materials Interface,2012,4(2):510-517.
- [19] LIM T C. Negative thermal expansion structures constructed from positive thermal expansion trusses[J]. Journal of Materials Science,2012,47(1):368-373.
- [20] WU C F,MA M X,LIU W J,et al. Laser cladding in-situ carbide particle reinforced Fe-based composite coatings with rare earth oxide addition[J]. Journal of Rare Earths,2009,27(6):997-1002.
- [21] 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.
- [22] 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):0503005-1-8.
- [23] 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]. 摩擦学学报,2013,33(3):229-235.
- [24] 赵明娟,邓志成,赵龙志. 激光熔注中增强相颗粒对晶粒生长影响的 CA 模拟[J]. 功能材料,2015,46(1):01089-01094.
- [25] JIAN X,MEEK T T,HAN Q. Refinement of eutectic silicon phase of aluminum A356 alloy using high-intensity ultrasonic vibration[J]. Scripta Materialia,2006,54(5):893-896.
- [26] 赵龙志,李洋,张坚,等. 振动频率对间接超声辅助铸造 Al-24%合金的影响[J]. 中国有色金属学报,2016,26(6):1167-1174.
- [27] 赵明娟,邓志成,赵龙志,等. 超声振幅对激光熔注镁合金凝固组织的研究[J]. 功能材料,2015,46(21):21012-21017.
- [28] 李德英,张坚,赵龙志,等. 超声作用下激光熔覆 SiC/316L 复合涂层残余应力数值模拟[J]. 复合材料学报,2016,33(10):2270-2276.
- [29] 李德英,赵龙志,张坚. 超声振动对激光熔覆 TiC/FeAl 复合涂层温度场的影响[J]. 金属热处理,2015,40(3):190-194.
- [30] BAKSHI S R,LAHIRI D,AGARWAL A. Carbon nanotube reinforced metal matrix composites- a review[J]. International Materials Reviews,2010,55(1):41-64.
- [31] 赵龙志,蔡昕,刘武,等. CNTs 含量对激光熔覆制备 CNTs/SiC/Ni60A 复合涂层的组织和耐磨性影响[J]. 应用激光,2017,37(1):17-21.

## Research Progress of Coating Cracking Control in Laser Deposition

Zhao Longzhi, Wang Huai, Zhao Mingjuan, Yang Haichao, Liu Dejie, Tang Yanchuan, Hu Yong

(School of Materials Science and Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** The current researches of coating cracking control of laser deposition were reviewed in this paper. The characteristics of coating cracking control methods were analyzed in details. Based on the mechanism of coating crack, the cracking control methods can be divided into stress control, coating strengthening and double control on the strength and stress of coating. It maintains that the composite laser deposition method can be considered as an effective method for coating cracking control.

**Key words:** laser deposition; coating cracking; strength of coating; residual stress