

DOI: 10.13957/j.cnki.tcxh.2017.01.003

激光熔覆陶瓷涂层研究

吴王平, 王晓杰, 王智尧, 吴涵, 赵文
(常州大学机械工程学院, 江苏 常州 213164)

摘要: 激光熔覆技术是一种新型的表面涂层技术, 在国内外已获得了广泛的应用。激光熔覆合金材料包括自熔性合金材料、复合材料、陶瓷材料等。激光熔覆技术以其操作便利、冷却速度快、便于实现自动化等优势易于在基材表面形成精度高、综合性能良好的涂层。文中主要针对激光熔覆陶瓷涂层, 概述了氧化物、碳化物以及生物陶瓷涂层的研究现状和发展趋势, 并讨论了目前激光熔覆陶瓷涂层所存在的问题。

关键词: 激光熔覆; 陶瓷涂层; 表面改性

中图分类号: TQ174.75 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-2278(2017)01-0013-07

Laser Cladding Ceramic Coating

WU Wangping, WANG Xiaojie, WANG Zhiyao, WU Han, ZHAO Wen
(School of Mechanical Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, Jiangsu, China)

Abstract: Laser cladding technology is a new technology for surface coating, which has been widely used at home and abroad. Laser cladding alloy materials include self-fluxing alloy materials, composite materials, ceramic materials, and so on. Laser cladding technology has some advantages, such as convenient operation, fast cooling speed, easy automation realization, and so on. It is easy to form a coating with high precision and good comprehensive performances on the surface of substrate. This study mainly focuses on the laser cladding ceramic coatings. The research status and development trend of oxides, carbides and bioceramic coating are addressed, and some problems about the laser cladding ceramic coating are discussed.

Key words: laser cladding; ceramic coating; surface modification

0 引言

表面工程是以各种表面技术为基础, 可分为表面改性技术、表面处理技术和表面涂覆技术^[1, 2]。激光熔覆技术是一种新型的涂层技术, 以不同的添加方法在基体上铺放所需的涂层粉末材料, 同时经过高能密度激光束辐照加热, 使其与基体表面熔化并快速凝固, 从而在基材表面形成与基体结合性良好的功能涂层^[3]。激光熔覆技术经过将近半个世纪的发展, 已从实验室进入到了实际工业应用, 在汽车工业、航空航天、石油行业、轧辊行业、机械动力行业和模具等诸多领域中都有着广泛的应用^[4]。

激光熔覆技术主要由计算机、粉末输送系统、激光器和数控工作台四部分组成, 其成型原理示意

如图1所示^[5], 激光熔覆成型时, 通过计算机来操控数控工作台和激光器的运动。利用加工过程中高能激光束在金属基体上形成熔池, 将通过送粉装

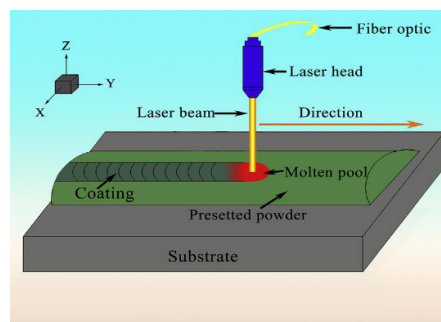


图1 激光熔覆成型原理示意图^[5]
Fig.1 Principle diagram of laser cladding

收稿日期: 2016-10-09。

修订日期: 2016-12-07。

基金项目: 常州大学科研启动基金资助项目(ZMF15020070)、2015江苏省大学生实践创新训练计划项目(201510292041Y)和2015年科技创新基金资助项目暨“挑战杯·卓越”计划项目(2015-03-A-19)。

通信联系人: 吴王平(1985-), 男, 博士, 讲师。

Received date: 2016-10-09.

Revised date: 2016-12-07.

Correspondent author: WU Wangping(1985-), male, Ph. D., Lecturer.

E-mail: wwp3.14@163.com

置和喷嘴输送来的金属粉末或预先置于基体上的粉末快速熔化,从而在基材表面形成良好的冶金结合层^[6]。激光熔覆后存在基体材料、熔覆层和热影响区。基体材料与熔覆涂层材料之间形成了良好的冶金结合,可显著提高基材表面硬度和耐磨耐腐蚀性等^[7]。激光熔覆技术不仅可以在低成本的金属基体上制备耐磨、耐蚀、耐高温氧化等特殊性能的熔覆涂层,而且还适用于局部有磨损、氧化及腐蚀等零件的修复^[8](见图2)。与电镀和气相沉积等其它表面技术相比,激光熔覆技术具有冷却速度快、热输入和畸变较小、涂层与基体结合强度高、熔覆表面区域的可精确选择、耗材少和易自动化控制等优点。随着激光熔覆技术的发展,以其操作便利,易得到小晶粒、且成分均匀的涂层优势,常用于极端条件下零部件的修复与再制造,激光的自动化操作使其加工的精度较高,在材料表面改性方面也发挥出巨大的潜力。纳米陶瓷粉末作为激光熔覆材料,由于其晶粒细化,存在较多晶界,可使基体材料强度、韧性得到提高,因而抗磨损、耐高温、耐腐蚀等性能更加优越,广泛地应用于工业各个领域。

随着激光熔覆技术的快速发展,增材制造技术(也称3D打印技术)也随之日趋发展成熟。图3为激光增材制造技术的原理图^[9]。由图可见,激光增材

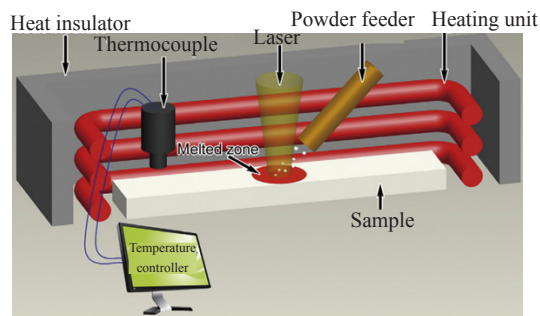


图3 激光3D打印原理图^[9]

Fig.3 Schematic diagram of 3D laser printing

制造技术的基本原理和激光熔覆过程基本类似,主要由激光器、四轴数控工作台和带有侧喷嘴的送粉器和预热系统等组成,利用计算机辅助设计通过电脑控制,在计算机上生成待加工零件的三维模型,然后对三维模型进行切片处理,将一个复杂的三维零件转变成一系列的二维平面图形,然后打印材料一层层叠加起来,将计算机中的设计模型变为实物。该制造技术被誉为是一种变革性的低成本、短周期、高性能、控形控性一体化绿色数字制造技术。目前,该技术主要应用在金属材料增材制造,而陶瓷材料增材制造的相关报道较少。本文将针对激光熔覆陶瓷涂层材料,以氧化物、碳化物以及生物陶瓷涂层的性能特点和研究现状进行综述,同时讨论目前激光熔覆陶瓷涂层所存在的问题。

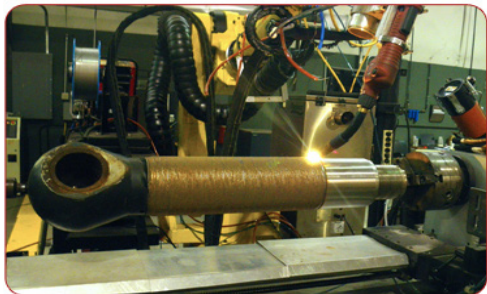
1 激光熔覆陶瓷涂层现状

1.1 氧化物涂层

氧化物陶瓷粉末常用的氧化物陶瓷粉末有 Al_2O_3 、 ZrO_2 、 TiO_2 ,它们具有优良的抗高温氧化能力、隔热、耐磨和耐蚀性能,是一类重要的激光熔覆材料^[10]。表1总结了不同氧化物粉末通过激光熔覆获得的涂层材料及其特性。采用激光熔覆技术在不锈钢和其它合金基材表面制备 $\text{Al}-\text{Al}_2\text{O}_3$ ^[11]、 $\text{Al}_2\text{O}_3-\text{TiO}_2$ ^[12-14]、 $\text{CaO}-\text{ZrO}_2-\text{SiO}_2$ ^[15]、 $\text{ZrO}_2-\text{Y}_2\text{O}_3$ ^[16]、 $\text{TiB}_2-\text{TiC}-\text{Al}_2\text{O}_3$ ^[17]等陶瓷涂层,可显著提高基体材料的耐磨性、耐蚀性和抗热冲击性,同时还可以提高其力学性能。然而,激光熔覆氧化物陶瓷涂层存在脆性高、结合强度低、易产生裂纹等缺陷。在激光烧结冷却过程中会产生收缩性,从而导致不同的部分开裂,这最有可能造成陶瓷颗粒在分散体中的数量不足从而形成缺陷^[18]。研究者^[19-21]采用纳米 Al_2O_3 粉末作为激光熔覆原材料制备纳米涂层,可以显著细化晶粒,增强陶瓷涂层的结合强度和降低



(a)轴杆表面陶瓷涂层脱离



(b)激光熔覆修复已去除的陶瓷涂层轴杆

图2 激光熔覆技术修复轴杆

Fig.2 Shaft repaired by laser cladding (a) Shaft with damaged ceramic coating and (b) Shaft repaired by laser cladding where the ceramic coating is removed

表1 不同氧化物粉末激光熔覆层的特性
Tab. 1 Properties of laser cladding layer with different oxide powders

Cladding material	Laser cladding process (LD)	Properties of cladding layer	References
Al ₂ O ₃ and its composite powders	LD with pre-forming of powders	Good wear and corrosion resistances, but low adhesive force	[11–12, 22]
	Synchronous LD	To suppress the formation of cracks by preheating substrates	[14]
ZrO ₂ and its composite powders	LD with pre-forming of powders	Significantly improving the microstructure, grain refinement, and enhanced thermal shock resistance, etc.	[15–16, 23]
TiO ₂ and its composite powders	LD with pre-forming of powders	Increasing the hardness of the coating, and improving high temperature resistance, but brittleness	[12–13]

微裂纹的形成。

Yao等^[24]利用粗铝颗粒具有良好的流动能力，采用3D打印技术制备多孔Al₂O₃材料，该材料具有良好的强度，但存在微孔隙缺陷。Shishkovsky等^[25]通过在Ti–6Al–4V基体表面采用3D激光熔覆技术在氮气环境中制备功能梯度Al₂O₃陶瓷涂层，制备出的涂层具有较高的显微硬度，然而存在大量的微裂纹。Liu等^[9]通过优化激光熔覆工艺参数，采用激光3D打印辅助技术制备Al₂O₃/ZrO₂复合涂层，有效的抑制了涂层微裂纹的形成。3D打印激光熔覆技术制备的陶瓷涂层，具有精度高、适用于一体化制造、减少工艺流程、便于计算机自动控制、利于新产品的开发制造等优势，但在制备过程中遇到的一些结合强度差，涂层表面有微裂纹等问题也亟待解决。

1.2 碳化物涂层

碳化物陶瓷涂层以优良的高温力学性能、高温抗氧化性能、耐蚀耐磨性能和特殊的电、热性能备受人们关注。TiC、SiC、WC、BC等碳化物材料

具有高熔点和硬度等优异特性，不仅能满足高温和高强度的要求，而且具有优异的耐蚀性。这些碳化物作为熔覆材料，可提高基材表面的耐磨性和硬度。目前，采用激光熔覆技术制备的碳化物陶瓷涂层主要有TiC^[26, 27]、SiC^[28]、SiC–SiO₂^[29]和SiC–Si^[29]复合陶瓷涂层等，以及Ni–TiC^[30, 31]、Ni–TiC–C^[32]、Fe–TiC^[33]、NiCrAl–TiC^[34]、TiC–CNTs^[35, 36]、Ni–WC^[37–41]和Co–B₄C^[42]等陶瓷颗粒掺杂在金属制备的复合陶瓷涂层^[43]，其中掺杂的碳化物颗粒起到增强相的作用，而且还可以细化晶粒尺寸，可提高其耐磨性、耐腐蚀性和力学性能。表2给出了不同基体材料上激光熔覆碳化物粉末制备的熔覆涂层及其特性。由表可见，激光熔覆碳化物陶瓷涂层，可提高基体材料的硬度，同时可以提升界面的相容性，但由于热性能的差异使得部分熔覆层出现较大残余应力，导致微裂纹的形成。

本文作者已采用预置粉末的方式在1Cr17Ni2合金钢表面采用激光熔覆技术制备了NiAl–SiC复合涂层，通过硬度测试发现添加SiC陶瓷颗粒可提高

表2 不同碳化物粉末激光熔覆层的特性
Tab.2 Properties of laser cladding layer with different carbide powders

Substrate	Cladding material	Properties of cladding layer	References
45# steel	TiC composite powder	Good wear resistance, microhardness decreased	[30, 33]
	WC composite powder	Increasing hardness, and good compatibility interface	[44]
	Co/B ₄ C composite powder	High hardness, but with a few cracks	[42]
A390 aluminum alloy	NiCrAl/TiC composite powder	Increased hardness	[34]
Si–SiC composite material	SiC composite powder	Uniform and continuous interface and no crack	[29]

表3 激光熔覆生物陶瓷涂层的特性
Tab.3 Properties of bio-ceramic coatings by laser cladding

Substrate	Cladding material	Properties of cladding layer	References
Ti alloy	HA	Improving wettability and wear resistance	[47]
	HA+CaF ₂	Increasing hardness, and forming some micropores	[53]
	HA+SiO ₂	Improving the biological activity and the adhesive force	[53]
	CaHPO ₄ · 2H ₂ O+CaCO ₃	Improving the hardness and the resistance to damage, the good adhesive force	[49,50]
	HA+Ti	Inhibiting high temperature decomposition of HA	[51,52]
Mg alloy	HA	Good cell compatibility and bone induction	[48]

其硬度,另外通过扫描电子显微镜观察涂层的横截面,发现熔覆层内仍存在微裂纹。图4为激光熔覆NiAl-SiC复合涂层的横截面SEM照片。裂纹的产生可能是由于激光熔覆冷却速率过快,在快速冷却过程中产生较大的热应力,导致基材和涂层材料收缩不一致,另外微裂纹还可能来自于激光熔覆后材料内存在较大的热应力和组织应力^[45]。

1.3 生物涂层

生物陶瓷涂层作为无机生物医学材料,没有毒副作用,且与基体有良好的生物相容性,按材料功能主要分为生物活性陶瓷涂层和惰性生物陶瓷涂层等,其中生物活性陶瓷涂层有羟基磷灰石材料(Hydroxyapatite, HA)和钙硅酸盐等材料组成,其中HA生物活性陶瓷涂层是应用最广泛,而常见的惰性生物陶瓷涂层材料有氧化铝和氧化锆等^[46]。国内外研究者已采用激光熔覆制备HA复合生物陶瓷涂层^[47-52]、含氟羟基磷灰石(FHA)生物陶瓷涂层^[53]、Si-HA生物陶瓷涂层^[53]和CNTs-HA复合生物陶瓷涂层^[54]等,并对实验结果进行分析发现基体与生物陶瓷涂层之间形成了良好的冶金结合,而且显著地提高涂层强度和寿命。另外,基体的耐磨性和生物

活性也有明显提高。表3总结了不同激光熔覆生物陶瓷涂层及其特性。

2 存在问题

激光熔覆陶瓷涂层过程中,激光束高能密度所产生的近似绝热的快速加热过程,使得激光熔覆对基材的热影响较小,引起的变形也小,通过控制激光的输入能量,可以保持原熔覆材料的优异性能^[10]。熔覆材料对熔覆层的性能有很大的影响,目前激光熔覆陶瓷涂层材料是氧化物和碳化物粉末,而复合粉末的熔覆性能还不够稳定^[55],关于激光熔覆陶瓷涂层技术主要存在的问题有以下几个方面^[56, 57]:

(1)虽然激光熔覆的材料广泛,但都不是专门为激光熔覆工艺开发的,在陶瓷材料的激光吸收性能和熔覆层结合强度等方面缺乏针对性,需要对激光熔覆专用材料进行研究开发;

(2)熔覆层质量的稳定性差。由于熔覆层和基体材料的温度梯度和热膨胀系数的差异,可能在熔覆层中产生气孔、裂纹、变形和表面不平等多种缺陷;

(3)激光熔覆热循环造成的残余应力会引起熔覆层裂纹;

(4)随着3D激光打印技术的日益发展,所遇到的一些问题如:陶瓷涂层与基材界面的结合性不好,易产生微裂纹和气孔缺陷等将随着原材料选材和工艺优化得以解决,有望实现产业化生产。

针对这些问题,首先应该加强设计和开发适于激光熔覆陶瓷材料,并对熔覆工艺参数进行优化研究,尤其是对抑制裂纹的方法深入探索,采用合理的预热以提高结合度,熔覆后及时进行热处理以消除残余应力,避免微裂纹的形成。

3 总结

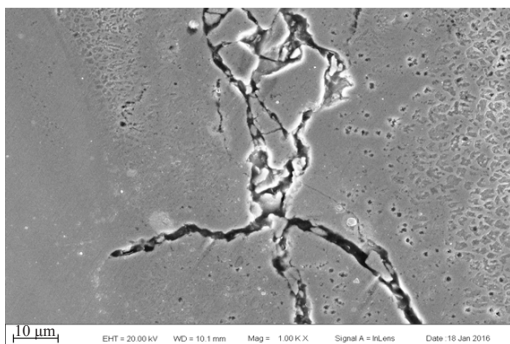


图4 激光熔覆NiAl-SiC复合涂层的横截面SEM照片

Fig.4 SEM image of cross-section of NiAl-SiC composite coating by laser cladding

随着近几十年激光加工技术的发展, 利用激光熔覆技术制备陶瓷涂层来进行材料表面改性越来越受到人们的重视和发展。激光熔覆技术以其操作便利、冷却速度快、便于实现自动化等优势在表面工程技术, 尤其是纳米表面工程技术获得了丰富的研究成果。纳米陶瓷涂层通过细化晶粒, 提高了涂层与基体的界面结合强度、耐蚀耐磨性和抗高温氧化性等受到研究者的广泛重视, 但纳米陶瓷涂层仍存在成分的均匀化和制备工艺等问题, 目前正在由实验室制备向工业化生产发展。氧化物和碳化物陶瓷粉末以其优良的耐磨性和耐蚀性、抗热冲击性等其在激光熔覆领域发展较早, 但仍面临由应力造成的裂纹、脆性高、结合性差等问题; 作为发展较晚的生物陶瓷涂层, 在近些年的研究开发中其表现出良好的生物相容性和生物活性, 被显著应用于医疗器械等临床方面。另外, 新兴的3D激光熔覆技术采用电脑自动控制一体化生产, 操作便利, 易于控制, 在激光熔覆的技术上具有广阔的前景。

参考文献:

- [1] 徐滨七, 马世宁, 刘世参, 等. 中国表面工程的发展[C]. 中国兵工学会焊接专业委员会第五届年会, 1999: 6-11.
- [2] 徐滨士, 刘世参, 等. 表面工程技术手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
- [3] 邱星武, 李刚, 邱玲. 激光熔覆技术发展现状及展望[J]. 稀有金属与硬质合金, 2008, 36(3): 54-57.
- QIU X W, LI G, QIU L. Rare Metals and Cemented Carbides, 2008, 36 (3): 54-57.
- [4] 杨宁, 杨帆. 激光熔覆工艺及熔覆材料进展[J]. 铜业工程, 2010, (3): 56-58.
- YANG N, YANG F. Copper Engineering, 2010 (3): 56-58.
- [5] LIU K, LI Y J, WANG J, et al. Preparation, microstructural evolution and properties of NieZr intermetallic/ZreSi ceramic reinforced composite coatings on zirconium alloy by laser cladding [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 647: 41-49.
- [6] 宋建丽, 李永堂, 邓琦林, 等. 激光熔覆成型技术的研究进展[J]. 机械工程学报, 2010, 46(14): 29-39.
- SONG J L, LI Y T, DENG Q L, et al. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(14): 29-39.
- [7] CHEN J L, LI J, SONG R, et al. Effect of the scanning speed on microstructural evolution and wear behaviors of laser cladding NiCrBSi composite coatings [J]. Optics & Laser Technology, 2015, 72: 86-99.
- [8] 杨晓倩, 李亚江, 马群双, 等. 激光熔覆工艺研究现状及发展[J]. 机械制造文摘(焊接分册), 2015, (1): 30-34.
- YANG X Q, LI Y J, MA Q S, et al. Mechanical Manufacturing Abstracts (welding fascicle), 2015 (1): 30-34.
- [9] LIU Z, SONG K, GAO B, et al. Microstructure and mechanical properties of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ directionally solidified eutectic ceramic prepared by laser 3D printing [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2016, 32(4): 320-325.
- [10] 沈宇, 关义青, 白松, 等. 激光熔覆技术的发展现状及展望[J]. 特种加工技术, 2011, (10): 21-24.
- SHEN Y, GUAN Y Q, BAI S, et al. Special Processing Technology, 2011 (10): 21-24.
- [11] 刘祥. 激光熔覆 $\text{Al}+\text{Al}_2\text{O}_3$ 涂层对提高AZ91D镁合金表面性能的研究[D]. 衡阳: 南华大学, 2014.
- [12] 杨友文. 高温合金表面陶瓷涂层压片预置激光熔覆制备工艺试验研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
- [13] WANG D S, TIAN Z J, WANG S L, et al. Microstructural characterization of Al_2O_3 -13wt.% TiO_2 ceramic coatings prepared by squash presetting laser cladding on GH4169 superalloy [J]. Surface & Coatings Technology, 2014, 254: 195-201.
- [14] 吴东江, 吴楠, 杨策, 等. 预热对 Al_2O_3 陶瓷激光熔覆层温度梯度影响的模拟[J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42(10): 2039-2042.
- WU D J, WU N, YANG C, et al. Rare Metal Materials and Engineering, 2013, 42(10): 2039-2042.
- [15] LI H C, WANG D G, CHEN C Z, et al. Phase composition, microstructure and in vitro bioactivity of laser cladding $\text{CaO}-\text{ZrO}_2-\text{SiO}_2$ system coatings on titanium alloy [J]. Materials Letters, 2015, 157: 139-142.
- [16] 孙登月, 侯广义, 张军营. 激光熔覆 ZrO_2 -8% Y_2O_3 涂层提高轧辊抗热冲击性能的研究[J]. 燕山大学学报, 2014, 38(3): 216-219.
- SUN D Y, HOU G Y, ZHANG J Y. Journal of Yanshan University, 2014, 38(3): 216-219.
- [17] MASANTA M, SHARIF S M, CHOUDHURY A R. Microstructure and properties of $\text{TiB}_2-\text{TiC}-\text{Al}_2\text{O}_3$ coating prepared by laser assisted SHS and subsequent cladding with micro-/nano- TiO_2 as precursor constituent [J]. Materials and Design, 2016, 90: 307-317.
- [18] FAES M, VALKENAERS H, VOGELER F, et al. Extrusion-based 3D printing of ceramic components [J]. Procedia CIRP, 2015, 28: 76-81.
- [19] 陈长军, 张敏, 常庆明, 等. 镁合金表面激光熔覆纳米三氧化二铝[J]. 中国激光, 2008, 35(11): 1752-1755.
- CHEN C J, ZHANG M, CHANG Q M, et al. Laser cladding of magnesium alloy on surface of nano alumina [J]. Chinese Laser, 2008, 35(11): 1752-1755.
- [20] 刘安民, 汪新衡, 邓斌, 等. 纳米 Al_2O_3 颗粒增强Ni基合金激光

- 熔覆涂层高温抗氧化性能的研究[J]. 材料导报, 2014, 24(28): 20–23.
- LIU A M, WANG X H, DENG B, et al. Nano Al_2O_3 particles reinforced Ni based alloy laser cladding of high temperature oxidation resistance of coating material [J]. Materials Review, 2014, 24(28): 20–23.
- [21] WANG H Y, ZUO D W, SUN Y L, et al. Microstructure of nanometer Al_2O_3 dispersion strengthened Ni-based high-temperature protective coatings by laser cladding [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2009, 19(3): 586–591.
- [22] XU P, LIN C X, ZHOU Z Y, et al. Wear and corrosion resistance of laser cladding AISI 304 stainless steel/ Al_2O_3 composite coatings [J]. Surface & Coatings Technology, 2014, 238: 9–14.
- [23] 张维平, 路董华, 余娟娟, 等. 氧化锆增韧机制在激光熔覆技术中的应用[J]. 中国激光, 2014, 41(11): 1–5.
- ZHANG W P, LU D H, YU J J, et al. Application of the toughening mechanism of zirconia in laser cladding [J]. Chinese Laser, 2014, 41(11): 1–5.
- [24] YAO D X, GOMES C M, ZENG Y P, et al. Near zero shrinkage porous Al_2O_3 prepared via 3D-printing and reaction bonding [J]. Materials Letters, 2015, 147: 116–118.
- [25] SHISHKOVSKY I, SMUROV I. Titanium base functional graded coating via 3D laser cladding [J]. Materials Letters, 2012, 73: 32–35.
- [26] 邱小林. 激光熔覆TiC金属基陶瓷涂层的研究[J]. 热加工工艺, 2006, 36(10): 19–22.
- QIU X L. Hot Working Technology, 2006, 36(10): 19–22.
- [27] DU B S, PAITAL S R, DAHOTRE N B. Synthesis of TiB_2 -TiC/Fe nano-composite coating by laser surface engineering [J]. Optics & Laser Technology, 2013, 45: 647–653.
- [28] 张建华, 田宗军, 赵剑锋, 等. 纳米SiC激光熔覆陶瓷涂层组织结构分析[J]. 光电子·激光, 2004, 15(6): 702–705.
- ZHANG J H, TIAN Z J, ZHAO J F, et al. Analysis on microstructure and structure of ceramic coating by nano SiC laser cladding [J]. Journal of Optoelectronics and Lasers, 2004, 15(6): 702–705.
- [29] LUSQUINOS F, POU J, QUINTERO F, et al. Laser cladding of SiC/Si composite coating on Si-SiC ceramic substrates [J]. Surface & Coatings Technology, 2008, 202: 1588–1593.
- [30] 戴晟, 左敦稳, 方淳, 等. 激光熔覆Ni/TiC复合涂层组织与性能[J]. 机械制造, 2014, 43(3): 63–65.
- DAI S, ZUO D W, FANG C, et al. Mechanical Manufacturing, 2014, 43(3): 63–65.
- [31] 韦子运, 汪新衡, 刘安民. 纳米SiC颗粒增强Ni基激光熔覆涂层高温抗氧化性能的研究[J]. 湖南农机, 2014, 41(7): 94–96.
- WEI Z Y, WANG X H, LIU A M. Hunan Agricultural Machinery, 2014, 41(7): 94–96.
- [32] 柴龙顺, 王存山, 韩立, 等. 纳米TiC/C对激光熔覆镍基合金涂层组织和性能的影响[J]. 中国激光, 2014, 41(12): 1–7.
- CHAI L S, WANG C S, HAN L, et al. Chinese Laser, 2014, 41(12): 1–7.
- [33] 李养良, 仪登亮, 潘东, 等. 激光熔覆原位合成TiC增强Fe基复合层组织研究[J]. 热加工工艺, 2015, 44(6): 142–148.
- LI Y L, YI D L, PAN D et al. Thermal Processing Technology, 2015, 44 (6): 142–148.
- [34] 李琦, 刘洪喜, 张晓伟, 等. 铝合金表面激光熔覆NiCrAl/TiC涂层生成和强化机制[J]. 热加工工艺, 2015, 44(2): 138–141.
- LI Q, LIU H X, ZHANG X W, et al. Heat Treatment Technology, 2015, 44(2): 138–141.
- [35] 李刚, 李浩. TiC-CNTs陶瓷涂层制备及外观形貌[J]. 科技视界, 2015, (9): 121.
- LI G, LI H. Technology Vision, 2015 (9): 121 (in Chinese).
- [36] SAVALANI M M, NG C C, LI Q H, et al. In situ formation of titanium carbide using titanium and carbon-nanotube powders by laser cladding [J]. Applied Surface Science, 2012, 258: 3173–3177.
- [37] CHEN D Q, LIU D, et al. Microstructure and fretting wear resistance of γ /TiC composite coating in situ fabricated by plasma transferred arc cladding [J]. Surface & Coatings Technology, 2014, 239: 28–33.
- [38] MA Q S, LI Y J, WANG J, et al. Microstructure evolution and growth control of ceramic particles in wide-band laser clad Ni60/WC composite coatings [J]. Materials & Design, 2016, 92: 897–905.
- [39] FARAHMAND P, LIU S, ZHANG Z, et al. Laser cladding assisted by induction heating of Ni-WC composite enhanced by nano-WC and La_2O_3 [J]. Ceramics International, 2014, 40: 15421–15438.
- [40] 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: 1646–1653.
- [41] 张艳梅, 华海, 帅歌国, 等. 激光熔覆微纳米WC颗粒增强镍基金属陶瓷涂层的裂纹研究[J]. 热加工工艺, 2014, 43(24): 154–160.
- ZHANG Y M, HUA H, SHUAI G G, et al. Hot Working Technology, 2014, 43(24): 154–160.
- [42] 熊大辉, 闵大勇, 蔡菲菲, 等. 半导体激光熔覆Co/B₄C复合材

- 料的研究[J]. 应用激光, 2014, 34(2): 91-94.
- XIONG D H, MIN D Y, CAI F F, et al. Application of Laser, 2014, 34(2): 91-94.
- [43]TECHEL A, BERGER L M, NOWOTNY S. Microstructure of advanced Tic-based coatings prepared by laser cladding [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2007, 16(3): 374-380.
- [44]陈莹莹. 激光熔覆原位自生碳化物陶瓷增强铁基表面复合材料的研究[D]. 上海: 上海工程技术大学, 2010.
- [45]刘贵仲, 钟文华, 高原. 激光熔覆涂层缺陷的形成及防治[J]. 表面技术, 2012, 41(5): 89-92.
- LIU G Z, ZHONG W H, GAO Y. Surface Technology, 2012, 41(5): 89-92.
- [46]林雪, 郝建军, 刘丽愉. 生物活性陶瓷涂层材料的制备及研究进展[J]. 电镀与精饰, 2012, 34(4): 14-16.
- LIN X, HAO J J, LIU L Y. Electroplating and Finishing, 2012, 34(4): 14-16.
- [47]李福泉, 王树立, 陈彦宾, 等. Ti_6Al_4V 表面激光熔覆生物陶瓷复合涂层研究[J]. 中国激光, 2015, 42(6): 1-8.
- LI F Q, WANG S L, CHEN Y B, et al. Chinese Laser, 2015, 42(6): 1-8.
- [48]高亚丽, 马广超, 张海波, 等. 医用镁合金激光熔覆羟基磷灰石涂层生物相容性研究[J]. 应用激光, 2014, 34(6): 528-532.
- GAO Y L, MA G C, ZHANG H B, et al. Application of Laser, 2014, 34(6): 528-532.
- [49]张冬明. 激光熔覆HA生物陶瓷涂层制备及其性能分析[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2013.
- [50]鲍雨梅, 高海明, 许景顺, 等. 激光熔覆生物陶瓷涂层物相分析[J]. 中国激光, 2014, 41(10): 1-6.
- BAO Y M, GAO H M, XU J S, et al. Chinese Laser, 2014, 41(10): 1-6.
- [51]CHENG G J, PIRZADA D, CAI M, et al. Bioceramic coating of hydroxyapatite on titanium substrate with Nd-YAG laser [J]. Materials Science and Engineering: C, 2005, 25(4): 541-547.
- [52]CHENG G J, CHANG Y. Experiment, thermal simulation, and characterizations on transmission laser coating of hydroxyapatite on metal implant [J]. Journal of Biomedical Materials Research: Part A, 2010, 92(1): 70-79.
- [53]胡淑慧. 钛合金表面激光熔覆生物陶瓷涂层组织及性能的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- [54]PEI X B, WANG J, WAN Q B, et al. Functionally graded carbon nanotubes/hydroxyapatite composite coating by laser cladding [J]. Surface & Coatings Technology, 2011, 205: 4380-4387.
- [55]王东生, 田宗军, 沈理达, 等. 激光熔覆技术研究现状及其发展[J]. 应用激光, 2012, 32(6): 539-544.
- WANG D S, TIAN Z J, SHEN L D, et al. Application of Laser, 2012, 32(6): 539-544.
- [56]励达, 刘爱国. 激光熔覆技术研究进展分析[J]. 焊接, 2014, (9): 11-14.
- LI D, LIU A G. Welding, 2014 (9): 11-14.
- [57]张坚, 吴文妮, 赵龙志. 激光熔覆研究现状及发展趋势[J]. 热加工工艺, 2013, 42(6): 131-139.
- ZHANG J, WU W N, ZHAO L Z. Hot Working Technology, 2013, 42(6): 131-139.