

热障涂层材料及其制备技术的研究进展

张天佑¹ 吴超¹ 熊征² 周圣丰¹

¹南昌航空大学材料与科学工程学院, 江西 南昌 330063

²中国海军工程大学理学院, 湖北 武汉 430074

摘要 热障涂层能够增加高温合金的工作温度和使用寿命,被广泛用于航空发动机高温端部件的表面防护领域。对国内外热障涂层材料及其制备技术进行了综述,指出其存在的主要问题,并提出激光-感应复合熔覆梯度功能热障涂层的新方法,即在感应预热基材的同时实现与激光热源的复合,形成激光-感应复合熔覆热源,结合涂层的梯度结构设计,在高效率下获得无裂纹、高性能的热障涂层。

关键词 激光技术;热障涂层;激光-感应复合熔覆;高温合金

中图分类号 TN29 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.030004

Research Progress in Materials and Preparation Techniques of Thermal Barrier Coatings

Zhang Tianyou¹ Wu Chao¹ Xiong Zheng² Zhou Shengfeng¹

¹School of Material Science and Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang, Jiangxi 330063, China

²College of Science, Naval University of Engineering, Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract To increase the operation temperature and service life of superalloy, thermal barrier coatings are widely employed in the surface protective field of high-temperature components of aircraft engine. In this paper, the research progress on materials and preparation techniques of thermal barrier coatings is reviewed. The main issues are analyzed and the method of the functionally graded thermal barrier coatings by laser-induction hybrid cladding (LIHC) is put forward. Namely, the substrate is preheated meanwhile laser cladding is carried out to form LIHC heat source, which is combined with the design of functionally graded structure. As a result, the crack-free and high-property thermal barrier coatings can be obtained under the condition of high efficiency.

Key words laser technique; thermal barrier coating; laser-induction hybrid cladding; superalloys

OCIS codes 140.3390; 140.3460; 350.3850

1 引言

随着航空发动机向着高推重比方向的发展,燃烧室的工作温度不断提高,如军用飞机的燃气温度高达1600℃,而用于制造涡轮机叶片的镍基高温合金的最高使用温度只有1100℃,已经满足不了现代航空发动机的使用要求。基于此,除了改进冷却结构系统外,在高温合金表面制备热障涂层(TBC)成为一种高效与快捷的方法^[1-4]。

热障涂层一般由高隔热、抗腐蚀的陶瓷涂层和金属粘结层组成。陶瓷涂层的主要功能是在高温载荷下减弱热量向基体的传送,提高基体抗氧化与抗腐蚀的性能。金属粘结层的作用是缓解陶瓷层和基体热膨胀的不匹配,提高基体的抗高温氧化性能。目前,TBC技术是应用于航空发动机高温端部件表面防护领域不

收稿日期: 2013-10-12; 收到修改稿日期: 2013-11-12; 网络出版日期: 2014-02-19

基金项目: 国家自然科学基金(51261027)、江西省自然科学基金(2013BAB206012)

作者简介: 张天佑(1988—),男,硕士研究生,主要从事激光加工技术方面的研究。E-mail: youzi949092821@163.com

导师简介: 周圣丰(1977—),男,博士,副教授,主要从事激光表面强化与激光快速制造等方面的研究。

E-mail: zhousf1228@163.com(通信联系人)

可或缺的关键技术,随着科学技术的发展,在航天、航空、电力、化工、冶金等众多领域将会得到更为广泛的研究与应用。本文综述了TBC材料及制备技术的研究进展并提出了激光-感应复合熔覆梯度功能TBC的新方法。

2 热障涂层的结构与材料

2.1 热障涂层的结构体系

为了使热障涂层达到最好的隔热效果,必须对热障涂层系统进行结构设计^[6]。目前,热障涂层的结构主要分为三种:双层结构、多层结构和梯度结构^[6],如图1所示。其中,双层结构主要由陶瓷层和粘结层构成[图1(a)],具有结构简单与工艺成熟的优点。但是,陶瓷层与粘结层的热膨胀系数及弹性模量相差较大,在高温热循环过程中易脱落。因此,为了缓解界面热物理性能的不匹配,发展了多层结构,主要由金属粘结层、多层隔热层、 Al_2O_3 阻氧层以及陶瓷顶层等构成[图1(b)]。与双层结构相比,该结构虽然降低了氧化层生长速度,提高了涂层抗氧化性能,但是工艺复杂,抗热震性能改善不大,在航空发动机领域的应用受到较大限制。因此,为了进一步提高热障涂层的抗高温氧化与力学性能,对涂层进行梯度结构设计[图1(c)],使涂层的化学成分、组织结构及力学性能沿涂层厚度方向呈梯度变化,实现陶瓷层与高温合金的最佳性能匹配,降低涂层的残余应力,有效防止了涂层的剥落^[7-8]。

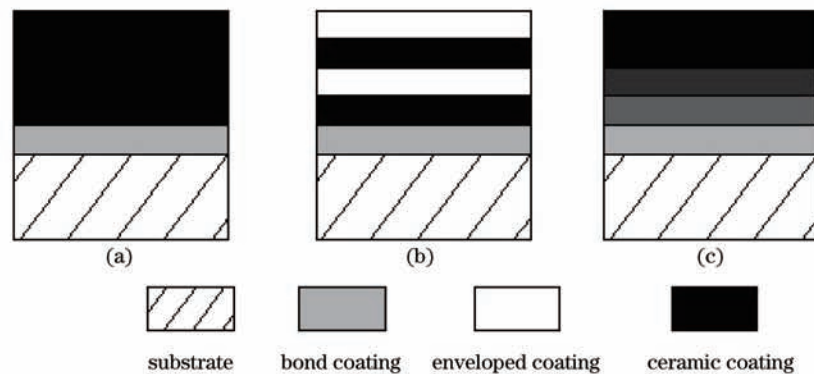


图1 TBC的三种结构。(a)双层结构;(b)多层结构;(c)梯度结构^[6]

Fig.1 Three kinds of TBC structures. (a) Double-layer system; (b) multi-layer system; (c) graded system^[6]

2.2 热障涂层材料

目前,热障涂层系统普遍是以 MCrAlY ($M=\text{Ni}, \text{Co}$ 或 NiCo)抗高温氧化合金作为金属粘结层,表层为陶瓷隔热层。热障涂层使用的陶瓷材料需要具有热膨胀系数与基体材料相匹配以及抗高温腐蚀、低热导率、相稳定等特点。目前,常用的热障涂层陶瓷材料主要有 Al_2O_3 、 SiO_2 、 ZrO_2 ,它们的物理性能如表1所示^[2,6,10-12]。其中, ZrO_2 具有高熔点和低热导率,且热膨胀系数接近金属材料,被广泛用作热障涂层的陶瓷材料。但是,在高温下 ZrO_2 具有同素异晶转变,相变使体积变化从而产生组织应力,导致涂层开裂或剥落。为了抑制 ZrO_2 在高温下的同素异晶转变,通常采用 MgO 、 Y_2O_3 等稳定剂实现 ZrO_2 的部分稳定^[11]。其中, Y_2O_3 对 ZrO_2 的热导率影响不大,可以有效避免 ZrO_2 在高温下的相变,是目前使用最为广泛的稳定剂。

为了进一步提高热障涂层的使用温度,国内外学者对在 Y_2O_3 部分稳定 ZrO_2 (YSZ)的中添加 HfO_2 、 CeO_2 等展开了广泛的研究。例如,美国国家航空航天局(NASA)近来发展了 HfO_2 - Y_2O_3 热障涂层,并在实验室中成功地制备了等离子喷涂 HfO_2 - Y_2O_3 热障涂层,结果表明加入多种氧化物的热障涂层具有更好的热循环性能^[13]。为了寻求导热率更低材料,近年来人们广泛关注稀土锆酸盐材料 $\text{A}_2\text{B}_2\text{O}_7$ ($A=\text{La}, \text{Nd}, \text{Sm}, \text{Gd}, \text{Dy}, \text{Er}, \text{Yb}$ 等稀土元素, $B=\text{Zr}, \text{Ce}$ 等)。有数据表明,稀土锆酸盐材料在 $700\text{ }^\circ\text{C}\sim 1200\text{ }^\circ\text{C}$ 之间的导热系数为 $1.1\sim 1.7\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$,高温下的物相和化学组分更稳定^[14]。Vassen等^[15]的研究结果表明,尽管烧绿石结构的 $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 具有高熔点、低导热系数和较高的烧结活性,在 $1400\text{ }^\circ\text{C}$ 下依然能够保持相的稳定性,但是热膨胀系数较小,抗热震性能有待进一步提高。

粘结层材料可以改善陶瓷层与金属基体的物理相容性,起到抗氧化腐蚀以及使陶瓷层与金属基体紧密结合的作用,它的成分至关重要。通常选用具有抗高温氧化能力的 MCrAlY ($M=\text{Ni}, \text{Co}$ 或 NiCo)合金作为热

障涂层与基体间的粘结层。粘结层中, Ni或Co是基体元素, 因各自的物理化学性能的不同, 使得镍基MCrAlY涂层的抗氧化性能较优, 钴基涂层的耐热疲劳性能较好。其中, Al是生成 γ' (Ni_3Al)强化相和 Al_2O_3 的必需元素, Al_2O_3 膜主要起抗高温氧化的作用; Cr在MCrAlY涂层表面经高温氧化后形成 Cr_2O_3 膜, 能够提高基体的抗热腐蚀效果。因此, 涂层中Al与Cr元素的含量对形成氧化膜的成分及连续性有十分重要的影响。另外, Y在涂层内的质量分数一般在1%以下, 具有细化晶粒以及提高 Al_2O_3 膜与基体结合力的作用, 改善涂层的控热震性能^[16]。

表1 热障涂层陶瓷材料及其主要性能

Table 1 Physical properties of main ceramics as TBCs

Material	Melt point / $^{\circ}\text{C}$	Density /(g/cm^3)	Heat conductivity / [$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$]	Coefficient of thermal expansion/ (10^{-6}K^{-1})	Young's modulus / GPa
8YSZ	2700	5.6	2.12	10.7	-
$3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$	1810	3.156	3.3	4.5	147
$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$	2040	3.99	21	8.0	372
ZrO_2	2700	5.60	2.3	11.0~13.0	140
$\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$	2300	-	1.56	9.1	175
SiO_2	1713	2.32	1.59	5	-
LaPO_4	2070	-	1.8	10.5	133
BaZrO_3	2690	-	3.42	8.1	181

3 热障涂层的制备技术

目前, 制备热障涂层的技术主要有等离子喷涂(PS)、电子束-物理气相沉积(EB-PVD)、激光熔覆等。其中, 等离子喷涂具有工艺成熟、沉积效率高优点^[17], 制备的热障涂层具有“鱼鳞”状的层状结构, 与基材呈结合力较差的机械结合, 在使用过程中易脱落。另外, 为了克服等离子喷涂层高孔隙率和裂纹引起的抗高温氧化性能和涂层寿命降低的问题, 对等离子喷涂涂层进行激光重熔处理, 可以获得呈外延生长的柱状晶结构^[18], 提高涂层与基材的结合强度, 焊合部分裂纹, 但并不能完全消除等离子喷涂层内的气孔与裂纹。

关于EB-PVD制备热障涂层技术的研究, 虽然国内起步较晚, 但研究水平不低, 如北京航空航天大学、北京航空制造工程研究所等单位采用引进的EB-PVD设备对热障涂层的制备与性能进行了广泛的研究, 并取得了突破性进展^[19-20]。据报道, 采用EB-PVD技术制备的热障涂层的显微组织由许多彼此分离的柱状晶组成, 且每个柱状晶又与底层牢固结合, 其抗剥落寿命比离子喷涂层提高了近7倍^[21]。显然, EB-PVD涂层具有更高应变容限的柱状结构, 可以有效改善离子喷涂层气孔率偏高的不足, 具有热循环寿命高、致密、结合力好等优势^[22]。但是, 在热循环下这种彼此分离且具有应变容限行为的柱状晶结构, 能够相互移动并为氧和腐蚀剂的进入提供通道, 导致其高温耐蚀性能降低, 而且EB-PVD技术对设备的要求高, 价格昂贵, 操作复杂, 沉积效率低, 技术难度大, 工业应用受到了较大的限制。

由于等离子喷涂层高孔隙率和裂纹引起的抗高温氧化性能和涂层寿命降低的问题, 激光熔覆热障涂层的方法受到国内外学者的广泛关注。与PS、EB-PVD等加工方法相比, 激光熔覆热障涂层具有如下优点: 可对热障涂层材料进行成分和结构的设计, 得到完全致密、与基材冶金结合的涂层; 激光束光斑小、能量密度高, 在熔覆的过程中可以将基材的热影响区(HAZ)与热变形减少到最低程度, 熔覆层与基材呈冶金结合, 结合强度高, 不易脱落^[23-25]; 激光熔覆具有快速加热与快速冷却的特点, 得到的热障涂层的组织为致密柱状晶, 可以改善涂层的控高温氧化及控热震性能, 提高热障涂层的服役寿命^[26-29]。例如, Pei等^[27]在1045钢上激光熔覆 $\text{ZrO}_2\text{-Ni}$ 基热障涂层材料, 得到大量的亚稳态的 $t'\text{-ZrO}_2$ 和少量的 $m\text{-ZrO}_2$ 组成的陶瓷外层以及与基材呈冶金结合的Ni基粘结层, 显微硬度达到了1700 Hv, 远高于热喷涂加工方法制备的热障涂层。但是, 陶瓷层在快速加热到快速冷却的过程中 ZrO_2 易发生相变, 而且陶瓷层与高温合金的热膨胀系数差异较大, 将引发涂层裂纹的产生。

4 热障涂层的发展

激光熔覆热障涂层具有结合强度高优点,但是目前热障涂层材料通常采用热喷涂工艺的合金粉末,由于激光熔覆快速加热和快速冷却的特点,采用激光熔覆热喷涂工艺的合金粉末容易造成涂层产生气孔和裂纹^[30]。因此,必须开发全新的符合专属激光熔覆加工特点的MCrAlY材料。另外,为了克服在激光熔覆过程中产生的裂纹,在对基材进行感应加热的同时实施激光熔覆,从而在基材表面形成激光-感应复合熔覆热源,根据粘结金属与陶瓷相的热物理性能对涂层进行梯度结构设计,将残余应力降低到最小程度,实现在高效条件下,获得组织致密、无气孔与裂纹、与基材呈冶金结合的功能梯度热障涂层^[31]。例如,为了消除常规热障涂层的裂纹与热生长氧化物(TGO),本实验室前期开展了激光-感应复合快速熔覆功能梯度YSZ/NiCrAlY涂层的研究^[32],实验室采用的工艺参数:激光功率5 kW,扫描速度1000~3500 mm/min,送粉率20~150 g/min,感应热源的功率30~80 kW,工作频率50 kHz。图2为涂层的宏观形貌,经检测制备的YSZ/NiCrAlY梯度涂层无裂纹,表面平整光滑,且显微硬度呈梯度分布(图3),等温氧化后,激光感应复合快速熔覆功能梯度YSZ/NiCrAlY涂层内亚稳态的四方氧化锆(t' -ZrO₂)转变为稳态的四方氧化锆(t -ZrO₂),从而极大地提高了基材高温合金GH4169的抗高温氧化性能(图4)。

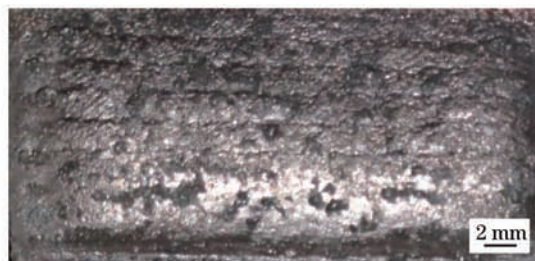


图2 激光-感应复合快速熔覆功能梯度YSZ/NiCrAlY涂层的宏观形貌

Fig.2 Surface morphology of functionally graded YSZ/NiCrAlY coating by laser-induction hybrid rapid cladding

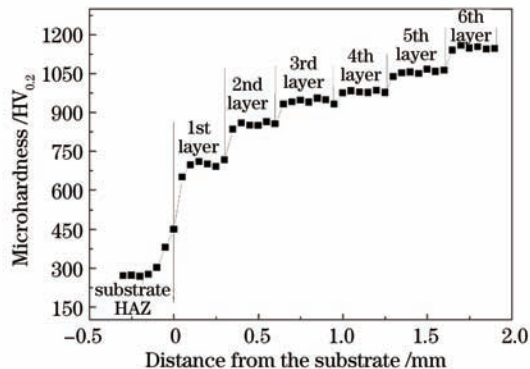


图3 激光-感应复合快速熔覆功能梯度YSZ/NiCrAlY涂层显微硬度

Fig.3 Microhardness of functionally graded YSZ/NiCrAlY coating by laser-induction hybrid rapid cladding

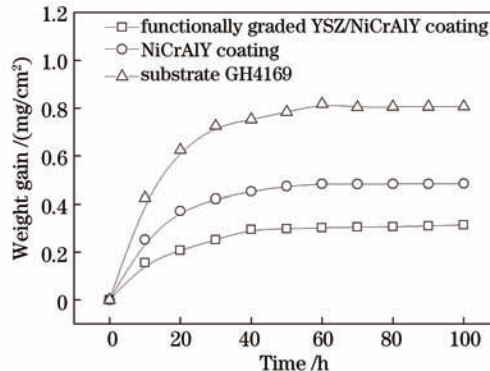


图4 激光-感应复合快速熔覆功能梯度YSZ/NiCrAlY涂层氧化动力学曲线

Fig.4 Oxidation kinetics of functionally graded YSZ/NiCrAlY coating by laser-induction hybrid rapid cladding

5 结束语

目前,等离子喷涂和电子束-物理气相沉积是制备热障涂层最为广泛的技术,但因结合力有待提高,存在显微气孔、微裂纹和热生长氧化物,导致涂层易失效剥落且使用寿命降低。激光-感应复合快速熔覆功能梯度YSZ/NiCrAlY热障涂层技术,因制备的涂层具有无裂纹、表面平整与光滑、化学成分与性能呈梯度分布、抗高温氧化性能优异等优点,展现出了新的生命力和应用前景。

参考文献

- 1 Yu Haitao, Mu Rende, Xie Min, *et al.*. Evolution status and processing technologies of thermalbarrier coatings [J].

- Chinese Rare Earths, 2010, 31(5): 83-87.
于海涛, 牟仁德, 谢敏, 等. 热障涂层的研究现状及其制备技术[J]. 稀土, 2010, 31(5): 83-87.
- 2 Zhou Hong, Li Fei, He Bo, *et al.*. Research progresses in materials for thermal barrier coatings [J]. Materials Review, 2006, 20(10): 40-43.
周洪, 李飞, 何博, 等. 热障涂层材料研究进展[J]. 材料导报, 2006, 20(10): 40-43.
- 3 Li Jianbao, Zhou Yichun. New Materials Science and Application Technology [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
李建保, 周益春. 新材料科学及其实用技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- 4 R A Miller. Thermal barrier coatings for aircraft engines: history and directions [J]. Thermal Spray Technology, 1997, 6(1): 35-39.
- 5 Liu Fengling. The structure design of thermal barrier coating for 21 century [J]. Materials Protection, 2000, 33(1): 86-88.
刘凤岭. 面向 21 世纪的热障涂层结构设计[J]. 材料保护, 2000, 33(1): 86-88.
- 6 Xu Huibin, Gong Shengkai, Liu Fushun. Recent development in materials design of thermal barrier coatings for gas turbine [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2000, 21(1): 7-12.
徐惠彬, 宫声凯, 刘福顺. 航空发动机热障涂层材料体系的研究[J]. 航空学报, 2000, 21(1): 7-12.
- 7 M L Mendelson, T N Mckechnie, L B Spiegel. Graded thermal barrier coatings: evaluation [J]. Ceramic Engineering and Science Proceedings, 2008, 15(4): 555-562.
- 8 Wang Xuebing, Zhang Xinghong, Du Shanyi. Current status of graded thermal barrier coatings [J]. China Surface Engineering, 2004, 17(3): 5-12.
王学兵, 张幸红, 杜善义. 梯度热涂层的研究现状[J]. 中国表面工程, 2004, 17(3): 5-12.
- 9 Liu Chunbo, Lin Feng, Jiang Xianliang. Current state and future development of thermal barrier coating [J]. Chinese J Nonferrous Metals, 2007, 17(1): 1-13.
刘纯波, 林锋, 蒋显亮. 热障涂层的研究现状与发展趋势[J]. 中国有色金属学报, 2007, 17(1): 1-13.
- 10 Lin Feng, Jiang Xianliang. Research progress on plasma spraying [J]. J Functional Materials, 2003, 34(3): 254-257.
林锋, 蒋显亮. 热障涂层的研究进展[J]. 功能材料, 2003, 34(3): 254-257.
- 11 Deng Shijun. High Performance Ceramic Coating [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003.
邓世均. 高性能陶瓷涂层[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- 12 X Q Cao, R Vassen, D Stoeber. Ceramic materials for thermal barrier coatings [J]. J Eur Ceram Soc, 2004, 24(1): 1-10.
- 13 Lu Anxian, Chang Ying, Cai Xiaomei. Investigation on plasma-sprayed ZrO₂ thermal barrier coating on nickel alloy substrate [J]. J Central South University of Technology, 2012, 9(4): 225-228.
- 14 Pan Wei, Xiu Qiang, Wang Jingdong, *et al.*. Rare Earth Zirconate High Temperature Thermal Barrier Coating Material and Preparation Method [P]. Chinese Patent, CN1657573, 2005-08-24.
潘伟, 徐强, 王敬栋, 等. 稀土锆酸盐高温热障涂层材料及其制备方法[P]. 中国专利, CN1657573, 2005-08-24.
- 15 R Vassen, X Cao, F Tietz, *et al.*. Zirconates as new materials for thermal barrier coatings [J]. J Am Ceram Soc, 2000, 83(8): 2023-2028.
- 16 Liu Jianming, Chen Meiyang, Ren Xianjing, *et al.*. The effects of alloy elements on the MCrAlY coatings [J]. Thermal Spray Technology, 2010, 2(4): 30-34.
刘建明, 陈美英, 任先京, 等. 合金元素在 MCrAlY 涂层中的作用[J]. 热喷涂技术, 2010, 2(4): 30-34.
- 17 Mu Rende, He Limin, Lu Feng, *et al.*. Development in research on TBC deposition technologies [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2007, 31(5): 1-4.
牟仁德, 何利民, 陆峰, 等. 热障涂层制备技术研究进展[J]. 机械工程材料, 2007, 31(5): 1-4.
- 18 Zhang Gang, Liang Yong. Progress and research of laser prepared thermal barrier coatings [J]. J Shenyang Institute of Technology, 2000, 19(1): 1-7.
张罡, 梁勇. 激光制备陶瓷热障涂层的研究和发展[J]. 沈阳工业学院学报, 2000, 19(1): 1-7.
- 19 Guo Hongbo, Gong Shengkai, Xu Huibin, *et al.*. Development of EB-PVD gradient thermal barrier coatings and their thermal fatigue behaviour [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2000, 36(7): 703-706.
郭洪波, 宫声凯, 徐惠彬, 等. EB-PVD 梯度热障涂层的制备及其热疲劳性能[J]. 金属学报, 2000, 36(7): 703-706.
- 20 He Shimei, He Limin, Mu Rende, *et al.*. Effect of incontinuous deposition on the cyclic oxidation behavior of EB-PVD TBCs [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007, 36(3): 702-705.

- 贺世美, 何利民, 牟仁德, 等. EB-PVD 非连续沉积对热障涂层热循环氧化性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(3): 702-705.
- 21 Yu Haitao, Song Xiwen, Mu Rende. Thermal cycle characteristics of YSZ TBCs deposited by EB-PVD [J]. Aeroengine, 2010, 36(6): 50-57.
于海涛, 宋希文, 牟仁德. 电子束物理气相沉积 YSZ 热障涂层热循环性能[J]. 航空发动机, 2010, 36(6): 50-57.
- 22 E W Douglas, A M Robert, I E Jeff, *et al.*. Tailored microstructure of EB-PVD 8YSZ thermal barrier coatings with low thermal conductivity and high thermal reflectivity for turbine applications [J]. Surf Coat Technol, 2005, 190(1): 132-149.
- 23 Zhi Xiang, Zhao Jianfeng, Cai Jun. Effect of process parameters on forming quality of fusion zone in laser cladding [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(10): 101403.
智翔, 赵剑峰, 蔡军. 激光熔覆修复工艺参数对熔合区成形质量的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(10): 101403.
- 24 Zhu Gangxian, Zhang Anfeng, Li Dichen. Effect of process parameters on surface smoothness in laser cladding [J]. Chinese J 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.
- 25 Yuan Qinglong, Feng Xudong, Cao Jingjing, *et al.*. Research on microstructure of Ni-based alloy coating by laser cladding [J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(8): 2116-2120.
袁庆龙, 冯旭东, 曹晶晶, 等. 激光熔覆镍基合金涂层微观组织研究[J]. 中国激光, 2010, 37(8): 2116-2120.
- 26 M F Morks, N F Fahim, T Muster, *et al.*. In-situ synthesis of functional silica nanoparticles for enhancement the corrosion resistance of TBCs [J]. Surf Coat Technol, 2013, 225: 106-111.
- 27 Y T Pei, J H Ouyang, T C Lei. Laser cladding of ZrO₂-(Ni alloy) composite coating [J]. Surf Coat Technol, 1996, 81(2-3): 131-135.
- 28 K M Jasim, R D Rawlings, D R F West. Thermal barrier coatings produced by laser cladding [J]. J Mater Sci, 1990, 25(12): 4943-4948.
- 29 J H Ouyang, S Nowotny, A Richter, *et al.*. Characterization of laser clad yttria partially-stabilized ZrO₂ ceramic layers on steel 16MnCr5 [J]. Surf Coat Technol, 2001, 137(1): 12-20.
- 30 Wang Dongsheng, Tian Zongjun, Wang Jingwen, *et al.*. A method of crack control in laser cladding process with changing power density distribution of laser beam [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(1): 0103004.
王东生, 田宗军, 王经文, 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.
- 31 Zhou Shengfeng, Du Nan, Zeng Xiaoyan. The Method of Functionally Graded Thermal Coating by Laser Induction Hybrid Rapid Cladding [P]. Chinese Patent, CN101748402A, 2010-06-23.
周圣丰, 杜楠, 曾晓雁. 激光感应复合熔覆梯度功能热障涂层的方法[P]. 中国专利, CN101748402A, 2010-06-23.
- 32 Zhou Shengfeng, Dai Xiaoqin, Zhang Tianyou, *et al.*. Functionally graded YSZ/NiCrAlY coating prepared by laser induction hybrid rapid cladding [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(4): 0403004.
周圣丰, 戴晓琴, 张天佑, 等. 激光感应复合快速熔覆功能梯度 YSZ/NiCrAlY 涂层的研究[J]. 中国激光, 2013, 40(4): 0403004.