

激光熔覆 MCrAlY 涂层的研究现状

王东生^{1,2}, 田宗军¹, 沈理达¹, 黄因慧¹

(1. 南京航空航天大学机电学院, 南京 210016; 2. 铜陵学院机械工程学院, 铜陵 244000)

摘要: 综述了激光熔覆 MCrAlY 涂层的研究现状, 阐述了其面临的主要问题, 并指出了当前激光熔覆 MCrAlY 涂层研究的热点主要集中在颗粒增强复合涂层、纳米涂层、梯度涂层和活性元素改性涂层的制备, 熔覆层的开裂控制, 工艺参数优化及激光熔覆过程中的数值模拟等方面, 并对今后的发展方向进行了展望。

关键词: 激光熔覆; MCrAlY 涂层; 研究现状

中图分类号: TG156.99

文献标志码: A

文章编号: 1000-3738(2013)012-0001-05

Research Status of MCrAlY Coatings Prepared by Laser Cladding

WANG Dong-sheng^{1,2}, TIAN Zong-jun¹, SHEN Li-da¹, HUANG Yin-hui¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. College of Mechanical Engineering, Tongling University, Tongling 244000, China)

Abstract: The research status of MCrAlY coatings prepared by laser cladding is reviewed. The existent problems are presented and the development prospects, such as preparation of particle reinforced composite coatings, nanostructured coatings, gradient coatings, crack control of clad coatings, process parameters optimization and numerical simulation of laser cladding process are also discussed. And the future development direction is also prospected.

Key words: laser cladding; MCrAlY coating; research status

0 引言

现代航空发动机的结构设计和制造技术是发动机研制、发展、使用中的重要环节。为了降低航空发动机的燃料消耗, 提高推力质量比和使用寿命, 现代发动机的工作温度越来越高, 如我国某型涡扇发动机的涡轮前温度为 1 750 °C, 而下一代推力质量比为 10 的发动机涡轮前温度将提高到 1 850 °C 左右。由于推力质量比的提高, 许多密度低、室温韧性好、高温强度高的先进材料将被大量使用, 此外为适应更高的温度, 各种高温防护涂层也得到了广泛应用^[1]。

高温防护涂层的发展主要经历了单一铝化物涂层、改性铝化物涂层、包覆涂层(又称 MCrAlY 涂层)和热障涂层(TBCs)四个阶段^[1]。其中 MCrAlY (M 为镍和/或钴)涂层可作为单独使用的耐热涂层或热障涂层的连接层, 相对于其它涂层, MCrAlY 涂层可以根据实际需要选择合适的涂层成分, 成分选择更加灵活。另外, 它还具有相当优异的韧性和抗热疲劳强度, 因此已广泛应用于燃气轮机部件。

MCrAlY 涂层发展至今已有 40 多 a 的历史, 其制备工艺也在不断地改进和发展中。目前, 已成熟的制备 MCrAlY 涂层技术主要有等离子喷涂技术(PS)^[2]和电子束物理气相沉积技术(EB-PVD)^[3]。等离子喷涂技术具有成本低、生产效率高、涂层厚度可调以及成分易控制等优点, 但该涂层呈典型的层状结构, 且得到的涂层气孔多、抗热冲击性能差, 涂层与基体为机械结合, 耐应变能力差。而 EB-PVD 技术制备的涂层为垂直于基体表面的柱状晶结构, 孔隙少, 涂层与基体具有较高的结合力, 抗热冲击和剥落能力强, 但 EB-PVD 技术的沉积速率较低, 设

收稿日期: 2012-09-23; 修订日期: 2013-06-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51205198, 21171131); 中国博士后科学基金面上资助项目(2012M511266); 安徽省自然科学基金资助项目(1208085QE84); 江苏省博士后科研资助计划项目(1102052C); 安徽省高等学校省级优秀青年人才基金重点项目(2012SQRL190ZD); 安徽省高等学校省级自然科学研究项目(KJ2011B185)

作者简介: 王东生(1978—), 男, 江苏宜兴人, 副教授, 博士。

备昂贵,受元素蒸气压影响涂层的成分较难控制,基体零件需要加热且试样尺寸不能太大。因此这两种制备技术都有明显的不足,从而限制了其应用范围。随着表面工程技术的发展,出现了许多新型的 MCrAlY 涂层制备技术,其中最具代表性的技术有激光熔覆技术(LC)、超音速火焰喷涂技术、爆炸喷涂技术、多弧离子镀^[4]、磁控溅射^[5]和电火花沉积等。

激光熔覆技术是一种通过在基材表面添加熔覆材料,利用高功率密度的激光束使之与基材表面一起熔凝,在基材表面形成冶金结合的添料熔覆层,从而显著改善基层表面的耐磨、耐蚀、耐热、抗氧化等特性的表面改性技术。由于高能量密度产生极快的加热速度、功率输出精确可控和熔覆表面区域的可选择性,激光熔覆技术已引起了广泛的关注和重视,并已广泛用于 MCrAlY 涂层的制备。目前激光熔覆材料通常采用预置和送粉两种方式将粉末引入激光熔池。其中,送粉多为同轴送粉,而常用的粉末预置方法主要有等离子喷涂法、化学粘结法以及压片法等。与等离子喷涂和 EB-PVD 等工艺相比,激光熔覆技术制备的涂层具有稀释度小、组织致密、结合强度高等特点,另外熔覆材料选择广泛,因此应用前景广阔。

为了给激光熔覆 MCrAlY 涂层的相关研究人员提供参考,作者综述了国内、外激光熔覆制备 MCrAlY 涂层的研究进展,并对其存在的问题及发展趋势进行了探讨。

1 激光熔覆常规 MCrAlY 涂层

在 20 世纪 80 年代,开始出现对激光熔覆 MCrAlY 涂层的探索性研究,如 Sivakumar 等^[6]采用 CO₂ 激光对 NiCoCrAlY 等离子喷涂层进行激光熔覆封孔处理;进入 90 年代后,研究重点转向激光工艺参数的优化,如 Mahank 等^[7]分析了激光功率、扫描速度等工艺参数对涂层熔化宽度、深度的影响,并研究了激光熔覆的最优参数;而近几年来大部分研究主要集中在激光熔覆对 MCrAlY 涂层的影响,并认为激光熔覆可提高涂层的抗高温氧化及耐热腐蚀等性能^[8-12]。

作者采用等离子喷涂工艺制备了 MCrAlY 涂层^[11],并用激光熔覆工艺对涂层进行处理,研究了激光熔覆对涂层微观组织及抗氧化性能的影响。结果表明,经过激光重熔处理后,涂层的片层状组织得

以消失,致密性提高,消除了原涂层的大部分孔洞、夹杂等缺陷,同时使铝元素在涂层表面重新分布,形成了铝的富集区;经过激光熔覆后原涂层的抗高温氧化性能显著提高。激光熔覆 MCrAlY 涂层具有较高抗高温氧化性能的主要原因有:激光熔覆使涂层表面形成了铝的富集区,氧化过程中形成了保护性的 Al₂O₃ 膜;激光熔覆使涂层致密性提高,从而减少了高温氧化过程中氧化扩散通道;此外,激光熔覆的快速冷却使涂层晶粒细化,有利于氧化初期铝的选择性氧化,使氧化速率降低。

最近作者又利用高频感应辅助激光熔覆技术制备了 MCrAlY 涂层^[12],并与激光直接熔覆制备的 MCrAlY 涂层进行对比研究。结果表明,在高频感应辅助作用下,涂层的温度场发生了改变,温度梯度降低,涂层中的铝元素有充分的时间上浮,在涂层表面形成了大量 Al₂O₃ 陶瓷相,从而使得涂层的抗氧化性能进一步提高。

与等离子喷涂工艺相比,激光熔覆 MCrAlY 涂层具有更好的性能,而与电子束物理气相沉积技术相比,激光熔覆技术又有较好的价格优势。但受到激光功率的限制,激光熔覆技术在制备大尺寸均匀强化表面涂层上还有一定的欠缺,随着大功率激光器的出现及宽带熔覆技术的应用,激光熔覆 MCrAlY 涂层逐渐走向实用化。特别是感应加热辅助激光熔覆工艺,它能够弥补单纯激光熔覆能量不足及热源分布不均的缺点,具有工艺稳定性好、易于形成冶金结合、易获得无裂纹的熔覆涂层等优点。

2 激光熔覆活性元素改性 MCrAlY 涂层

在 MCrAlY 涂层中添加微量活性元素,包括稀土(RE)、锆、钎、硅、硼等,可显著降低其氧化速度,并改善氧化膜的抗剥落性能,这一效应被称作活性元素效应^[13]。MCrAlY 中微量稀土元素钇的添加就是基于这一效应。

CeO₂ 是另一类常用的稀土改性材料,为了研究 CeO₂ 颗粒对 NiCoCrAlY 涂层抗氧化性能的影响,王宏宇等^[14]采用激光熔覆技术在镍基高温合金表面制备了 4 种不同含量 CeO₂ 颗粒改性 NiCoCrAlY 涂层,分析了它们在 1 050 ℃ 空气氛围中的等温氧化行为,并初步探讨了 CeO₂ 颗粒的作用机制。结果表明,添加的稀土氧化物颗粒可提高 NiCoCrAlY 涂层的高温氧化性能,并且,随着稀土掺杂量的增加,效果更加明显。在高温氧化过程中弥散析出的

稀土合金相,不仅提高了氧化膜的粘附性,有效预防空位、气孔等缺陷在涂层/氧化膜界面的聚集长大,减少大晶界或热裂纹的撕裂,而且还部分缓冲了高温氧化过程中释放出来的热拉应力,减少了热拉应力对表层氧化膜的开裂破坏,保护了表层氧化膜的完整性,大大降低氧化速率。目前关于稀土改性 MCrAlY 涂层的氧化机理有成相膜理论、钝化膜破坏理论及催化吸附理论等。

最近,国内外许多学者先后发现在 MCrAlY 涂层中添加少量的硅、硼、锆和钎等元素,能进一步改善其高温性能,表明这些活性元素在改善 MCrAlY 涂层氧化行为方面与稀土钇具有很好的协同作用。例如, Wang 等^[15-16]的研究表明,用硅和硼对 NiCoCrAlY 涂层进行改性后,可显著提高其抗热冲击性能。

3 激光熔覆颗粒增强 MCrAlY 复合涂层

现代科技的发展对 MCrAlY 涂层性能的要求越来越高,要求其同时具备抗高温性能以及高的导热系数、强度、蠕变抗力、应变等级和良好的稳定性等综合性能,单纯的 MCrAlY 涂层已不能胜任上述使用要求。颗粒增强的 MCrAlY 复合涂层因具有优良的性能而倍受关注,增强颗粒常用 WC、TiC、SiC、Al₂O₃ 等高熔点陶瓷材料。采用激光熔覆技术制备的陶瓷颗粒增强 MCrAlY 复合涂层将 MCrAlY 涂层的强韧性、良好的工艺性和增强颗粒优异的耐磨、耐蚀、耐高温和抗氧化特性有机结合起来,是目前激光熔覆 MCrAlY 涂层领域的研究热点^[17-21]。

颗粒增强 MCrAlY 复合涂层按增强体的加入方式可分为外加颗粒增强 MCrAlY 复合涂层和原位析出颗粒增强 MCrAlY 复合涂层。直接加入陶瓷颗粒是常用的一种方法,如文献^[17]研究了增强 Al₂O₃ 第二相对激光熔覆 NiCrAlY 涂层的影响。结果表明,Al₂O₃ 第二相起到了细化晶粒的作用,可以促进高温下铝的选择性氧化,使涂层表面形成 Al₂O₃ 保护膜;另外,第二相能阻碍 Ni²⁺、Cr³⁺ 向外扩散,因此可改善涂层的抗氧化性。胡泽祥等^[18]采用激光熔覆技术,以 HfB₂ 高温陶瓷颗粒作为耐磨增强相,在纯钛表面制备了 NiCoCrAlY/HfB₂ 复合涂层,研究了该复合涂层的组成、组织结构及不同温度下的摩擦磨损性能。结果表明, NiCoCrAlY/HfB₂ 复合涂层的主要组成为 NiTi、HfB₂、TiB₂、

Co₃Ti、CrTi₄ 和 Hf₃Ni₇ 相,复合涂层与基材成冶金结合,涂层晶体结构主要为块状晶;涂层的平均显微硬度约为 850 HV0.2,是基材硬度的 4.25 倍;在 20,100,300,500 °C 温度下涂层的摩擦因数和磨损率均随温度的升高而减小,复合涂层的磨损率在 10⁻⁴~10⁻⁵ mm³·N⁻¹·m⁻¹ 数量级,具有较好的高温耐磨性能,涂层的磨损机制主要为磨粒磨损和粘着磨损。

但是,外加陶瓷相与 MCrAlY 基体的润湿性差,陶瓷相分布不均匀,易产生裂纹等,从而削弱了整体强化效果。原位反应合成技术是在一定条件下,通过化学反应在基体内原位生成高强度、高弹性模量的陶瓷增强相,以达到强化的效果,可有效克服外加陶瓷相的缺陷,因此受到越来越多研究人员的重视,其面临的最大问题是难以精确控制和优化强化相的分布。Meng 等^[19]在钛合金表面通过激光熔覆预置 B₄C 和 NiCoCrAlY 粉体,在激光高能量密度作用下 B₄C 与钛原位反应生成 TiB₂ 和 TiC 增强相,复合涂层的显微硬度是基体的 3.5 倍,耐磨性能也大大高于基体。

纳米材料由于其结构的特殊性,具有一般材料难以获得的优异性能,为涂层性能的提高提供了有利的条件。将纳米陶瓷颗粒与激光熔覆 MCrAlY 涂层相结合,制备纳米颗粒增强的复合涂层也是研究热点之一。文献^[20-21]中以高分散性金属基微纳米复合粉体作为熔覆材料,通过激光熔覆工艺成功制备了纳米颗粒增强 NiCoCrAlY 涂层,考察了不同种类、不同含量纳米颗粒增强 NiCoCrAlY 熔覆涂层的显微组织、抗氧化性能、抗热腐蚀性能及抗热震性能等,并探讨了纳米颗粒的作用机制。

4 激光熔覆梯度 MCrAlY 涂层

梯度功能材料(FGM)是为适应大温差服役环境,由日本科学技术厅于 1987 年在“关于为缓和热应力的梯度功能材料开发基础技术的研究”计划中提出的。在其制备过程中,通过连续地控制微观结构要素,使成分、组织连续变化,不存在明显的界面,从而大大缓和了热应力。近年来,“梯度化”作为一种材料的设计思想和结构控制方法已不再局限于热应力缓和功能,它的应用已经扩展到航空、航天、原子能、机械、化工、电子、生物医学等众多领域,在耐磨、耐热、耐腐蚀等结构材料方面同样具有广泛的应用前景。激光熔覆作为一种常用的梯度涂层制备方

法而得到了广泛的研究^[22]。

为了进一步提高激光熔覆 MCrAlY 涂层在苛刻、极端环境的应用范围,作者^[23-25]将激光熔覆纳米颗粒增强的复合涂层和激光熔覆梯度涂层两者有机结合起来,提出了一种激光多层熔覆制备纳米陶瓷颗粒增强梯度 MCrAlY 复合涂层的新方法。该方法主要步骤为:先采用机械复合法(如高能球磨)把一定配比的 MCrAlY 与纳米陶瓷(如 Al_2O_3)增强颗粒的混合粉制备成纳米粒子分散均匀的包覆型复合粉;然后,采用模压法制备激光熔覆薄片,即利用压力机或压片机在模具中将配制好的复合粉体压制薄片,实现熔覆层的绿色预置;再利用多层激光熔覆的方法制备纳米陶瓷颗粒增强 MCrAlY 梯度复合涂层,即先在基体表面熔覆一层含有少量纳米陶瓷颗粒的熔覆薄片,然后依次熔覆纳米颗粒含量逐渐增加的模压薄片,重复以上过程,就可以得到纳米陶瓷增强颗粒沿厚度方向逐渐增加的梯度涂层。通过纳米颗粒的弥散强化机制可使其具有优异的强韧性,再加上梯度涂层的应力缓和机制从而有望解决 MCrAlY 熔覆层易开裂的问题。纳米颗粒及梯度涂层的强化作用使该涂层具有优异的性能,使其能应用于航空涡轮发动机叶片等关键零部件表面。

5 存在的主要问题及发展趋势

制约激光熔覆 MCrAlY 涂层应用的最大问题是涂层脆性高、裂纹倾向大。裂纹产生的原因主要归因于熔覆层内部存在的较大残余应力^[26]。目前所采用的抑制熔覆层开裂的方法主要为:调整应力状态,尽可能降低拉应力;优化工艺方法和参数;合理设计熔覆层等^[27]。作者^[27]提出了一种通过改变激光功率密度分布来控制熔覆层裂纹的方法,当采用凸字形光斑进行熔覆时,可在一定程度上起到了预热、缓冷的效果,从而降低熔覆区与非熔覆区的温度梯度;另外,在熔覆效果相当的前提下,该熔覆层中的残余应力也较小,因而可以有效减小熔覆层的开裂趋势。

如前所述,制备颗粒增强复合涂层、纳米涂层、梯度涂层,添加活性元素对涂层改性以及抑制熔覆层的开裂等都是当前激光熔覆 MCrAlY 涂层领域的研究方向,另外基于神经网络的激光熔覆工艺参数优化及熔覆过程数值模拟也是研究方向之一。

激光熔覆过程非常复杂,影响因素很多,包括激光功率、光斑尺寸、离焦量、激光束模式、扫描速度、

熔覆层厚度和搭接量等。这些因素都不同程度地影响了熔覆层的质量,而且各个因素之间相互作用的关系复杂,因此工艺参数与涂层质量之间是复杂的非线性关系,很难找到一个反映其内部规律的精确的数学模型。现阶段优化激光熔覆工艺参数的方法是以大量的工艺试验数据为依据,积累加工经验,但这种方法工作量大,成本高。近年来,随着计算机技术与神经网络技术的发展,神经网络在复杂非线性工程建模中得到了广泛应用。由于复杂的逻辑操作能力和高度的非线性函数逼近能力,以及很强的容错性、自适应学习能力、并行处理信息能力及非线性的映射能力,神经网络已被用于激光熔覆工艺参数优化^[28]。

激光熔覆过程中涉及的主要物理场有温度场、应力场、应变场和流场等。通过建立激光熔覆过程中各种物理现象模型,包括温度场和应力场,可以发现工艺过程中各种主要物理量的变化规律,以及各种工艺参数对这些物理量的影响规律,从而达到对材料以及材料加工过程中成分、工艺、组织结构及性能的控制和优化。作者^[29]采用 ANSYS 有限元软件中的间接热力耦合方法,建立了激光熔覆 MCrAlY 涂层热力耦合有限元模型,对激光重熔温度场和应力场进行了分析。在掌握激光熔覆以及冷却过程中温度场和应力场随时间变化规律的基础上,分析了熔覆层中裂纹形成的机理及影响因素,并提出了一些解决激光重熔层裂纹产生的主要方法。文献^[30]使用 ANSYS 软件对激光熔覆 MCrAlY 涂层的温度场进行了模拟,并计算了形状控制因子。结果表明,在热源中心正下方的晶粒是沿基体垂直方向析出的;冷却速率越大,晶粒越细小;熔覆材料或基材达到熔点的时间与达到最大冷却速率时间的先后顺序对其凝固组织形态有重要影响,若冷却速率先达到最大值,其组织呈胞状晶粒,否则,其组织呈柱状树枝晶,这个研究结果有助于指导激光熔覆凝固行为的研究。

6 结束语

采用激光熔覆技术制备 MCrAlY 涂层已成为近年来的研究热点,并且取得了一定成果,但与其越来越高的性能要求相比仍有不少差距,诸多相关技术(如感应加热辅助激光熔覆技术、脉冲电流辅助激光熔覆技术及激光熔覆原位生成颗粒增强梯度涂层技术等)有待进一步深入探索和研究,从而使其在实际应用中得以更好的发挥。

参考文献:

- [1] 何业东,齐慧滨. 材料腐蚀与防护概论[M]. 北京:机械工业出版社,2005:1-32.
- [2] SINGH H, PURI D, PRAKASH S, *et al.* Characterisation of high temperature oxide scales for plasma sprayed NiCrAlY coated Ni-and Fe-based superalloys[J]. *Anti-Corrosion Methods and Materials*, 2006, 53(3): 283-295.
- [3] HESNAWI A, LI H F, ZHOU Z H, *et al.* Isothermal oxidation behaviour of EB-PVD MCrAlY bond coat[J]. *Vacuum*, 2007, 81(8): 947-942.
- [4] 周宏明,易丹青. 钴基高温合金表面电弧离子镀 NiCrAlY 涂层的抗高温氧化性能[J]. *机械工程材料*, 2007, 31(12): 54-58.
- [5] 张重远,李美姮,孙晓峰,等. 单晶高温合金溅射 NiCrAlY 微晶涂层的循环氧化行为[J]. *机械工程材料*, 2001, 25(9): 7-9.
- [6] SIVAKUMAR R, MORDIKE B L. Laser melting of plasma sprayed NiCoCrAlY coatings[J]. *Surface Engineering*, 1987, 3(4): 299-399.
- [7] MAHANK T A, SINGH J, KULKARNI A K. Laser glazing of plasma sprayed Ni-Cr-Al-Y alloy[J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 1998, 13(6): 829-839.
- [8] VILAR R, SANTOS E C, FERREIRA P N, *et al.* Structure of NiCrAlY coatings deposited on single-crystal alloy turbine blade material by laser cladding[J]. *Acta Materialia*, 2009, 57(18): 5292-5302.
- [9] KWAKERNAAK C, NIJDAM T J, SLOOF W G. Microstructure refinement of NiCoCrAlY alloys by laser surface melting[J]. *Metallurgical and Materials Transactions; A*, 2006, 37(3): 695-703.
- [10] PARTES K, GIOLLI C, BARDI U. High temperature behaviour of NiCrAlY coatings made by laser cladding[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2008, 202(10): 2208-2213.
- [11] 王东生,田宗军,陈志勇,等. TiAl 合金表面激光重熔等离子喷涂 MCrAlY 涂层研究[J]. *材料工程*, 2009(7): 72-78.
- [12] 高雪松,田宗军,黄因慧,等. 高频感应辅助激光熔覆 MCrAlY 涂层的微观组织及其抗氧化性能[J]. *南京航空航天大学学报*, 2012, 44(1): 37-42.
- [13] 李美栓. 金属的高温腐蚀[M]. 北京:冶金工业出版社,2001.
- [14] 王宏宇,左敦稳,王明娣,等. 纳米 CeO_{2p} 对镍基合金表面 NiCoCrAlY 熔覆涂层氧化行为的影响[J]. *金属学报*, 2009, 45(8): 971-977.
- [15] WANG Q M, TANG Y J, GUO M H, *et al.* Thermal shock cycling behavior of NiCoCrAlYSiB coatings on Ni-base superalloys- part I: accelerated oxidation attack[J]. *Materials Science and Engineering; A*, 2005, 406(1/2): 337-349.
- [16] WANG Q M, LI H, GUO M H, *et al.* Thermal shock cycling behavior of NiCoCrAlYSiB coatings on Ni-base superalloys: II. Microstructure evolution[J]. *Materials Science and Engineering; A*, 2005, 406(1/2): 350-357.
- [17] WU Y N, ZHANG G, FENG Z C, *et al.* Oxidation behavior of laser remelted plasma sprayed NiCrAlY and NiCrAlY-Al₂O₃ coatings[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2001, 138(1): 56-60.
- [18] 胡泽祥,刘杰瑞,郭纯,等. 激光熔覆 NiCoCrAlY/HfB₂ 复合涂层结构及高温摩擦学性能[J]. *中国表面工程*, 2012, 25(2): 69-74.
- [19] MENG Q W, GENG L, ZHENG Z Z. Laser cladding Ni-base composite coating on titanium alloy with pre-placed B₄C + NiCoCrAlY[J]. *Materials Science Forum*, 2005, 475/479: 905-908.
- [20] WANG H Y, ZUO D W, CHEN G, *et al.* Hot corrosion behaviour of low Al NiCoCrAlY clad coatings reinforced by nano-particles on a Ni-base super alloy[J]. *Corrosion Science*, 2010, 52(10): 3561-3567.
- [21] WANG H Y, ZUO D W, YAN J, *et al.* Effects of nanometer Al₂O₃ particles on oxidation behaviors of laser cladding low Al NiCoCrAlY coatings[J]. *Oxidation of Metals*, 2010, 74(1/2): 49-60.
- [22] JASIM K M, RAWLINGS R D, WESTD R F. Metal-ceramic functionally gradient materials produced by laser processing[J]. *Journal of Material Science*, 1993, 28(10): 2820-2826.
- [23] 王东生,周杏花. 一种激光熔覆纳米陶瓷颗粒增强的金属基梯度涂层制备方法:中国,201110351156.0[P]. 2012-05-09.
- [24] WANG D S, TIAN Z J, WANG S L, *et al.* Preparation technology of nanometer ceramic particles reinforced metal-matrix graded coating by laser multi-layer cladding[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 217/219: 1006-1009.
- [25] WANG D S, TIAN Z J, WANG S L, *et al.* Microstructure and wear resistance of laser cladding nano-Al₂O₃/MCrAlY composite graded coating on TiAl alloy[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 217/219: 1350-1353.
- [26] 陈建敏,王凌倩,周健松,等. 激光熔覆 Ni 基涂层研究进展[J]. *中国表面工程*, 2011, 24(2): 13-21.
- [27] 王东生,田宗军,王经文,等. 一种通过改变激光能量密度分布控制熔覆层裂纹的方法[J]. *中国激光*, 2011, 38(1): 0103004-1~0103004-5.
- [28] 倪立斌,刘继常,伍耀庭,等. 基于神经网络和粒子群算法的激光熔覆工艺优化[J]. *中国激光*, 2011, 38(2): 0203003-1~0203003-6.
- [29] 王东生,田宗军,沈理达,等. TiAl 合金表面激光重熔等离子喷涂 MCrAlY 涂层热力耦合有限元分析[J]. *应用激光*, 2008, 28(2): 92-98.
- [30] 陈刚,黎向锋,左敦稳,等. 基于有限元的激光熔覆凝固过程分析[J]. *中国机械工程*, 2012, 23(4): 468-473.

欢 迎 来 稿

欢 迎 订 阅

欢 迎 刊 登 广 告