

激光熔覆裂纹的形成机理及控制方法

Forming Mechanism and Controlling Method of Laser Cladding Crack

山东建筑大学材料科学与工程学院 于承雪 景财年
北京航空制造工程研究所高能束流加工技术重点实验室 李怀学

[摘要] 激光熔覆技术是利用激光辐射使熔覆材料和基体表面同时熔化并快速凝固,从而显著改善基体材料物理性能的一种新工艺方法。但激光熔覆工艺的选择不当则会使熔覆层产生裂纹、气孔、未熔合等,从而影响熔覆制件的综合性能。本文研究了激光熔覆裂纹的种类以及熔覆层的应力类型,分析了裂纹产生的机理,指出材料间热膨胀系数、弹性模量的明显差别及激光熔池区域的温度梯度所决定的热应力是熔覆层裂纹形成的根源。并从熔覆材料和基体材料的合理选择、成形工艺参数的合理设计及热处理等方面,阐述了熔覆裂纹的影响因素和控制方法。

关键词: 激光熔覆 裂纹 应力 形成机理

[ABSTRACT] Laser cladding is a new surface strengthening technology which uses laser radiation to make coating materials and the surface of substrate melted and rapidly solidified. The technology can significantly improve physical performance of the substrate materials. However, such as crack, pore, and ill bonding between cladding layers might appear if the process parameters are controlled improperly and the comprehensive performance of the laser cladding parts will be influenced. The laser cladding cracks and the stress styles are classified, the forming mechanism of the cracks produced in the laser cladding layer is deeply analyzed. The root of the cladding cracks is formed by the obvious difference of thermal expansion coefficient and elastic modulus of the materials and the thermal stress determined by temperature gradient of the laser molten pool. The influencing factors of the cladding cracks and the way of preventing from cracks in laser cladding layer is discussed including the cladding materials and substrate materials, the parameters of cladding process and heat treatment.

Keywords: Laser cladding Crack Stress Forming mechanism

激光熔覆过程的实质是高能激光束和金属粉末及

基材相互作用时,粉末和基材快速熔化、快速冷却的过程。由于这一过程时间极短,远离平衡态,过热度和过冷度远大于常规热处理,因此可以使材料在激光辐照区中形成晶粒高度细化的组织结构和较小的变形。激光熔覆技术的优点^[1-2]有:(1)可通过混合不同合金粉末进行成分设计,得到完全致密的冶金结合涂层;(2)由于快速的加热和冷却过程,激光熔覆层组织均匀致密,微观缺陷少;(3)激光束的功率、位置和形状等能够精确控制,易实现选区甚至微区熔覆,且对基体的热影响小;(4)属于无接触加工,便于自动化,实现柔性加工。

然而,由于材料的熔化、凝固和冷却都是在极快的条件下进行的,如果材料选择和成形工艺匹配不当,容易在成形件中形成裂纹,一旦产生裂纹,已成形的金属零件只能报废处理。因此,揭示成形过程中裂纹的形成机理,为防止裂纹的产生提供理论和实践依据,对激光熔覆技术的工业化应用具有重要意义。

本文介绍了激光熔覆裂纹的种类,分析了裂纹产生的机理,并提出了防止和消除裂纹的方法。

1 激光熔覆裂纹的分类

根据裂纹产生的位置可分为熔覆层裂纹、界面基体裂纹和搭接区裂纹。其中界面基体裂纹最常见,这是由于基体与熔覆层材料的热膨胀系数差异较大,在热应力作用下容易在基体与熔覆层接合处形成裂纹。熔覆层裂纹则主要是由于熔覆过程中温度和应力大小分布不均并与材料的热膨胀系数不匹配所致,而搭接区裂纹主要是由于成形工艺参数中的搭接率选择不合理,在熔覆过程中易形成未熔合和气孔,从而在各种应力的共同作用下导致裂纹的产生,且容易贯穿整个熔覆层。如图1~3所示^[3]。

根据裂纹的大小和形状可分为宏观裂纹和显微裂纹。宏观裂纹起源于熔覆层和基体结合处,并沿着与扫描方向垂直的方向扩展,贯穿整个熔覆层。显微裂纹则是当激光熔覆结束之后借助显微镜观察,在熔覆层表面或内部发现的细小裂纹。

根据裂纹的微观形貌和断口形貌可分为^[4-5]冷裂

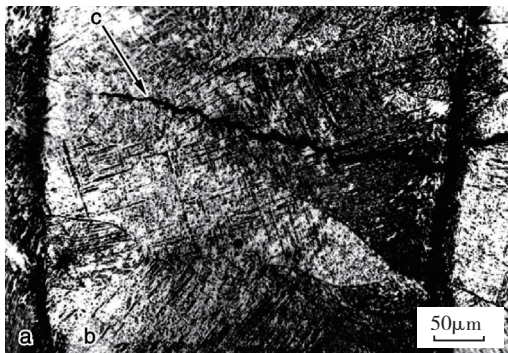


图1 熔覆层裂纹
Fig.1 Cladding layer crack

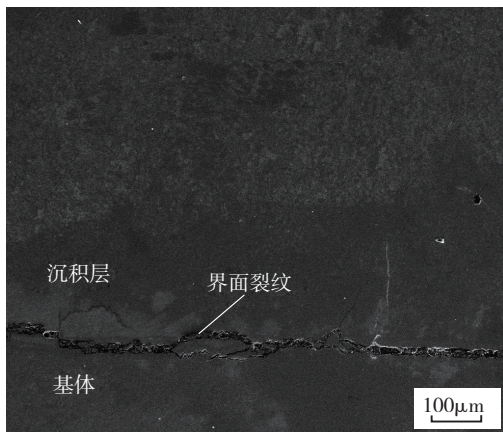


图2 界面基体裂纹
Fig.2 Substrate interface crack

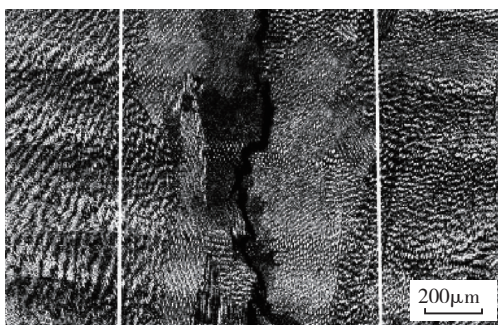


图3 搭接区裂纹
Fig.3 Overlapped crack

纹、热裂纹。冷裂纹断面较平齐,断口有金属光泽,并有二次裂纹产生,是典型的脆性断口。这是由熔覆合金的低延性及熔覆过程中热应力双重作用的结果。在激光快速成形过程中,镍基自熔合金熔覆层的开裂属于冷裂纹范畴。随镍基自熔合金中 B、Si 元素含量的提高,弥散分布的硼化物和硅化物的数量增加,使镍基自熔合金延性降低,导致熔覆层开裂倾向增大。而热裂纹断面,具有明显的氧化彩色,树枝晶晶界面相当圆滑,这是由于凝固温度区间内晶界处的残余液相受熔覆层中的热应力作用所导致的液膜分离的结果。对于奥氏体不锈钢等材料,熔覆层的开裂属于热裂纹范畴。

2 激光熔覆裂纹产生的机理

由于激光熔覆是快速加热和快速冷却过程,凝固过程中不可能有足够的液体金属补充,且在随后的固态冷却收缩过程中受到周围较冷基材束缚,造成的内应力往往难以得到释放,而一旦释放就会造成裂纹。激光熔覆中,材料间热膨胀系数、弹性模量的明显差别及激光熔池区域的温度梯度所决定的热应力是裂纹形成的根源,而熔覆层成分与组织梯度导致的微观应力则促使裂纹扩展。

熔覆层中的应力主要有以下几种:

(1)热应力。热应力分为两种:一种是在同种材料内部,当材料受热后,由材料的温度梯度造成的;另一种是由于基材和熔覆材料的弹性模量、热膨胀系数不同,从而使各层之间的热膨胀率和收缩率不一致而产生的。

(2)组织应力。组织应力是由于金属材料受热熔化发生相变而产生的。

(3)约束应力。约束应力也是由两方面原因造成的:一是由于熔覆过程很快,熔池温度过高,熔池中已经熔化的部分材料受热膨胀,但受到周围材料的约束即受到压应力作用;另一方面是由于扫描光束移开后,被扫描区域迅速冷却,而熔覆区域因材料的整体性不能自由收缩导致较大拉应力的作用。

裂纹的产生是因为内应力超过了一定的值。裂纹的产生必须满足以下临界条件:

$$\delta_{\max} \leq \varepsilon,$$

即应力的产生与集中大于材料的屈服强度时,熔覆层局部区域的塑性 δ_{\max} 不足以承受当时发生的应变 ε ,导致裂纹的产生。由应力产生的应变主要与材料的物理性能、热循环特性以及约束条件有关,其中热应力产生的应变最为显著。激光熔覆过程的应力场是三维应力场,其三向热应变抑制引起的热应力为

$$\sigma_T = -\frac{\alpha \cdot \Delta T \cdot E}{1 - 2\nu},$$

式中, E 为杨式模量, ν 为泊松比, α 是熔覆层与基体的热膨胀系数差, ΔT 为熔覆层凝固温度与室温之差。当熔覆层的热膨胀系数大于基体的热膨胀系数时, $\sigma_T < 0$, 热应力为压应力;反之, $\sigma_T > 0$, 热应力为拉应力。

事实上,由于熔池中各处温度不同,温度场复杂,当温度梯度过大或者熔覆层之间的热膨胀率和收缩率不一致时,都会促使热应力增大。而在激光熔覆过程中,上述因素都可以单独作用或交互作用产生裂纹。

3 防止、消除激光熔覆裂纹的方法

根据裂纹产生的机理可知,裂纹的产生是由于熔覆

过程中产生的内应力超过了材料的屈服极限所致。那么,如何在内应力导致裂纹发生之前控制熔覆过程中内应力的分布成为防止和消除裂纹的关键。因此,本文从材料的热物性、成形工艺参数的优化以及热处理等方面,探讨了控制裂纹产生的方法。

3.1 激光熔覆材料的合理设计

(1)合理选择熔覆层与基体热膨胀系数及热容的匹配关系。

材料间热膨胀系数、弹性模量的明显差别是影响热应力大小的一个主要因素。从下式^[9]

$$\sigma_2 \frac{1-\mu}{E\Delta T} < \Delta\alpha < \sigma_1 \frac{1-\alpha}{E\Delta T},$$

可以看出,随着熔覆层与基体热膨胀系数差异的减小,熔覆层热应力 σ 也随之减小。因此减小熔覆层和基体材料热膨胀系数的差异是一种减少熔覆层残余拉应力,减小其开裂敏感性的有效方法之一。此外,基体材料的热容也是一个应该考虑的因素,如果基体材料热容较大,则熔覆过程中储存的热量就多,使得温度梯度大,容易形成宏观裂纹。

(2)在基体上添加过渡层,提高基体对熔覆层的润湿性。

在基体与熔覆层中间添加的过渡层要与基体热物性参数匹配较好且抗裂性强,从而降低熔覆层和基体界面裂纹产生的机率并能提高熔覆层和基体的结合强度。由于熔覆层材料和基体材料的不同,熔覆层和基体的界面是宏观裂纹形成的源头,在基体上添加过渡层,会提高熔覆层材料和基体的润湿性,防止在加热或冷却过程中,液-液或液-固界面之间产生气孔。因此,通过添加过渡层的方法,能够降低裂纹率。LIUQB等^[6]通过在基体上添加Ni基合金涂层的试验证明,由于Ni基合金导热率、热膨胀系数与铁接近,二者润湿性较好,因此减少了Ni与Fe界面处残余应力出现峰值的点。此外,Ni和Fe可在界面处形成固溶体,提高了结合强度。

(3)在熔覆材料中添加合金元素,提高熔覆组织强度和韧性。

在熔覆层中添加一种或几种合金元素,在满足其性能要求的基础上增加韧性相,提高熔覆组织的强度,是控制裂纹产生及扩展的一种有效方法。

刘其斌^[7]等采取激光熔覆方法修复航空发动机叶片铸造缺陷时发现,当添加含量为1.5wt%的 Y_2O_3 时,可在铸造镍基高温合金叶片上获得无裂纹的修复涂层,当 Y_2O_3 含量高于或低于1.5wt%时,熔覆层内部或熔覆层表面将产生裂纹。GREZEV等^[8]曾在Ni-Cr-B-Si合金中分别加入质量分数为3%的FeV、FeTi和FeSi合金,发现熔覆层中韧性相增加,其开裂性显著下降。SONG

等^[9]的研究表明,Fe基合金中加入Ni、Co能提高熔覆层的塑韧性,随Ni含量的变化,熔覆层搭接区的结晶方向发生了变化而导致裂纹走向与激光扫描方向的夹角减小,直至裂纹消失。由此进一步提出了通过控制结晶方向减小熔覆层开裂敏感性的方法。昆明举等^[10]在Ni基WC金属陶瓷熔覆层中加入适量的MgO,裂纹大大减少。显微组织得到明显细化,提高了熔覆层的耐磨性能。王东升等^[11]研究了加入适量的 V_2O_5 对激光熔覆NiCrBSi粉末的影响,发现 V_2O_5 能够减少脆性相和细化组织,明显降低裂纹的敏感性。王清波等^[12]在45#钢表面进行镍基合金粉添加Mo的熔覆试验表明,通过对激光熔覆工艺参数和Mo含量的优选,获得了成形良好、无裂纹、组织致密的熔覆层。

稀土元素及其氧化物的加入也可以细化晶粒,提高熔体的流动性,降低熔池的表面张力,改善熔覆层的表面粗糙状况,优化组织和提高性能。CHEN Ch Zh等^[13]研究发现,在陶瓷涂层中添加 CeO_2 、 Y_2O_3 、CaO和MgO等稀土氧化物会使重熔层裂纹减少,且抗拉强度、断裂韧性及热循环寿命有所提高。邓迟等^[14]采用激光熔覆处理单纯钛合金、钛合金和涂层原料以及预熔钛为过渡层的生物陶瓷涂层,对比研究了稀土对纵截面组织形貌的影响,结果显示稀土对具有降低涂层开裂倾向的作用。昆明举等^[15]在自熔性粉末Ni60中加入 In_2O_3 ,得到了无裂纹的高质量激光熔覆层。赵高敏等^[16]在铁基合金中加入 La_2O_3 对16Mn钢进行激光熔覆,由于 La_2O_3 的加入,使晶粒细化和晶界净化,提高了熔覆层的硬度,并使组织趋向均匀。梁二军等^[17]通过在镍基陶瓷熔覆层中比较加入 Y_2O_3 和 CeO_2 后的结果发现, CeO_2 在抑制微观裂纹、细晶变质和提高显微硬度方面都有更好的效果。马运哲等^[18]在镍基自熔性粉末中添加一定的稀土氧化物 CeO_2 后,使得熔覆层明显细化,减少了激光熔覆开裂倾向,增加了熔覆层硬度。

3.2 激光熔覆工艺参数的合理选择

优化工艺方法和参数,尽可能减少熔覆层的开裂。对于不同的材料体系和使用要求,其减少熔覆层的开裂可以采用不同的改进途径。

(1)选择合适的粉末尺寸。

由于功率密度和粉末尺寸存在着一定的关系,所以在选择合适的粉末尺寸的同时,适当减小粉末颗粒尺寸,或者使用球状颗粒或混合粉末都能在一定程度上改进其抗裂性能。

(2)选择合理的功率密度。

功率密度控制熔覆层的汽化、熔化量和冷却速度,因此,与送粉量、扫描速度相匹配的功率密度能提高熔覆的质量。在送粉速率保持恒定的条件下,随着激光比

能量的增大,熔层的裂纹率减少,开裂倾向降低。

(3)采用合理的扫描速度、送粉速率。

在激光功率和熔覆速率不变的情况下,随着送粉速率的增加,熔覆层裂纹率先呈上升趋势,但当送粉速率增加到一定值时,裂纹率又开始减少。在其他工艺参数相同的条件下,随着熔覆速率的增大,熔池凝固时间缩短、凝固速率增加,裂纹率明显增加^[19]。

(4)选择合理的搭接率。

搭接率是影响形成熔合不良缺陷的一个重要因素。搭接率过小会使各熔覆道之间出现凹陷。相对大的搭接率会使熔覆层表面变得平整,但是如果搭接率过高则可能会出现气孔和裂纹的产生^[20]。因此,选择合适的搭接率是避免熔覆层中出现裂纹的关键,也是获得具有平整表面成形件的关键。

但要想完全消除裂纹,还应当从加强散热条件,将熔覆过程中的热量从熔覆层中传导出去,避免由于激光束的能量在熔覆层中积累而产生较大的残余应力所导致的裂纹。笔者在进行多层熔覆试验过程中,在保证熔覆层完全熔化的前提下,随着熔覆层数的增加,逐渐减小激光功率、降低扫描速度、同时减少送粉量,避免了裂纹的产生,同时提高了熔覆层的表面质量。

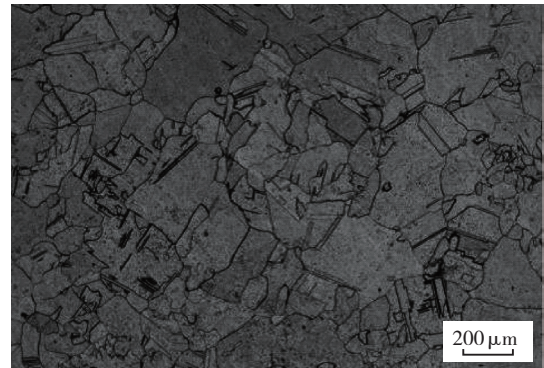
3.3 基板预热和后续热处理

在熔覆前后或者进行过程中,对基材进行预热处理,可减少或消除熔覆层中的残余应力,有效消除或减少熔覆层中的裂纹。

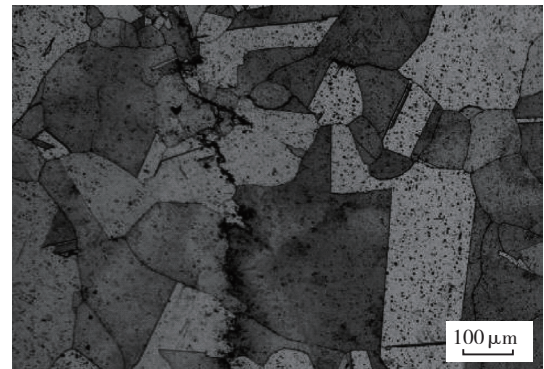
宋建丽等^[21]对镍基合金火焰喷涂层进行宽带激光熔覆试验,结果发现,基体的预热和熔覆后保温缓冷可有效降低温度梯度,释放残余内应力,当预热温度为300℃时,熔覆层裂纹消失。梁志宏等^[22]利用自行研制的激光金属熔覆成形设备和基板预热系统进行了成形试验,在相同的激光功率、光斑直径、送粉速度、和扫描速度等工艺参数前提下,试验结果表明通过基板预热可以提高成形材料的成形率,有效地降低成形过程的拉应力,明显减少和降低了熔覆层裂纹的产生。激光熔覆后进行后续处理是为了降低和消除残余应力,能够避免熔覆层使用过程中外界因素的诱导而产生裂纹。笔者发现,退火和中温回火可以消除微观偏析,降低微观应力,防止裂纹的产生。热等静压技术(HIP)可以闭合材料内部微小孔隙和微小疏松等缺陷,提高材料的性能。有研究表明,激光立体成形 Rene88DT 合金^[23]后经过热等静压下的扩散连接,成形过程中的显微裂纹得到了很好的愈合,同时在裂纹修复愈合后形成了明显的 MC 型碳化物迹线(如图 4 所示)。

3.4 其他方法

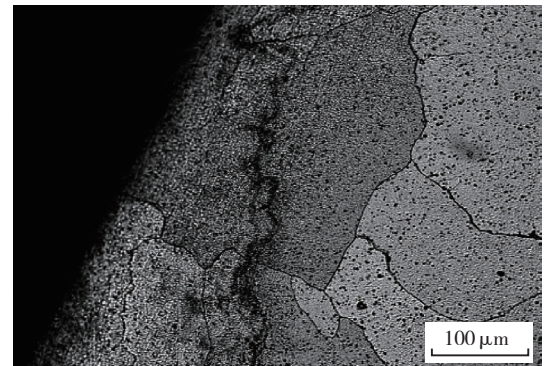
降低熔覆过程中应力的作用,即能有效降低熔覆裂



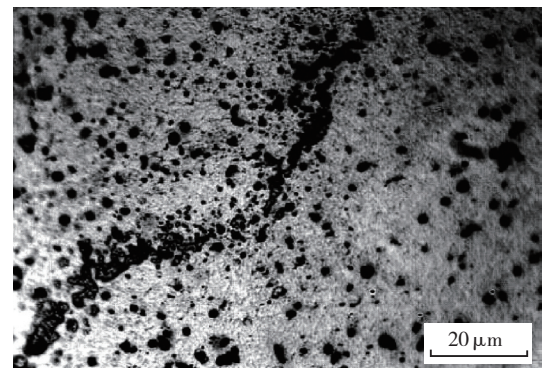
(a) Rene88DT 合金典型组织



(b) 试样中部裂纹愈合



(c) 试样边缘裂纹愈合



(d) 裂纹愈合后的析出物

图4 HIP处理后激光立体成形Rene88DT合金裂纹的修复愈合

Fig.4 Crack healed microstructure of LSFed Rene88DT after HIP treatment

纹的产生。因此,能降低应力的方法都可以应用于激光熔覆技术中。

毛怀东等^[24]在熔覆层中加入不锈钢网,利用其较低的屈服强度和良好的塑性形成网状应力释放带,降低了熔覆层中的应力值,控制了熔覆层中的裂纹。陈畅源等^[25]发现在熔覆过程中施加超声震动有利于抑制裂纹倾向。超声波在熔池中的空化及搅拌作用能使正在长大的枝晶网破碎形成均匀分布的小晶核,致使硬质相和温度梯度分布均匀化,减少熔池含气量,从而减少裂纹的产生。蒙宣伊^[26]在对送粉式激光熔覆应力产生机理进行深入分析的基础上,结合应力场数值模拟分析,结果表明熔覆层中心偏基体一侧是裂纹敏感区,该区域处于纵向拉伸、横向和厚向压缩的第三类主应变状态。有研究报道,在激光熔覆过程中添加保温炉能减少熔覆层开裂,但保温炉设计相当复杂,而且会影响激光加工操作。此外,还可用润湿角和单位面积裂纹数目为衡量熔覆层裂纹的敏感性指标,通过神经网络建立预测模型,来优化工艺及材料参数,有效减少裂纹的产生。

4 结束语

激光熔覆裂纹失效的因素很复杂,必须根据不同材料和不同使用状况选择合理的熔覆材料和成形工艺参数。目前,还没有简便、理想的方法可以完全防止和消除激光熔覆裂纹的产生,主要是依靠经验来减少裂纹的产生和扩展,缺乏理论上的突破。因此,下一步研究应着重在:深入研究激光熔覆理论、熔覆层与基体的界面理论;利用数值模拟方法研究激光熔覆过程中温度场和应力场的分布,预测应力集中部位,以优化成形工艺参数;建立材料物理性能参数随温度变化以及材料相变区间的数据库,以便选择成形工艺参数;积极探索各种外部辅助手段,如保温炉、超声震动等,以减少裂纹的产生。

激光熔覆技术尽管目前存在一些应用上的问题,但随着对其理论和工艺研究的逐渐深入和趋于完善,必然会在工业中大规模应用,并产生深远的影响。

参考文献

- [1] 吴培桂,张光钧.激光多层熔覆技术的研究现状及发展.上海工程技术大学学报,2009,23(4):374-378.
- [2] 邱星武,李刚,邱玲.激光熔覆技术的发展现状.热处理技术与装备,2009,30(6):6-8.
- [3] 黄卫东,林鑫.激光立体成形高性能金属零件研究进展.中国材料进展,2010,29(6):12-27.
- [4] 陈静,杨海欧,李延民,等.激光快速成形过程中熔覆层的两种开裂行为及其机理研究.应用激光,2002,22(3):300-304.
- [5] 陈静,林鑫,王涛,等.316L不锈钢激光快速成形过程中熔覆

层的热裂机理.稀有金属材料与工程,2003,32(3):183-186.

- [6] Liu Q B, Zhu W D, Chen J. A method of improving laser cladding Fe-based alloy coating on high temperature alloy. Journal of Gui zhou University of Technology, 2000, 29(5): 56-59.
- [7] 刘其斌,李绍杰.航空发动机叶片铸造缺陷激光熔覆修复的研究.金属热处理,2006,31(3):52-55.
- [8] Grezevan, Safonovan. Cracking and microstructure of laser deposited chromium-boron-nickle alloy. Welding International, 1987, 22(1): 50.
- [9] Song W L, Zhu P D, Gan C H, et al. Effects of crystallizing orientation on crack direction and cracking sensitivity in laser clad layers. Chinese Journal of Lasers, 1995, 22(4): 309-312.
- [10] 昆明举,袁斌,赵栋,等.MgO对镍基碳化钨激光熔覆层组织和耐磨性的影响.应用激光,2002,22(2):127-131.
- [11] 王东升,于志青,昆明举,等.V2O5和工艺参数对镍基合金激光熔覆层裂纹敏感性的影响.激光杂志,2005,26(6):81-82.
- [12] 王清波,窦新旺,昆明举,等.Mo对高硬度镍基合金激光熔覆组织和耐磨性的影响.应用激光,2005,25(2):97-100.
- [13] Chen Ch Zh, Lei T, Q H, et al. Problems and the improving measures in laser remelting of plasma sprayed ceramic coatings. Materials Science and Technology, 2002, 10(4): 431-435.
- [14] 邓迟,王勇.稀土对激光熔覆生物陶瓷涂层纵截面组织形貌的影响.表面技术,2006,35(2):31-33.
- [15] 昆明举,杨坤,袁斌,等.In2O3对Ni60激光熔覆层的影响.焊接学报,2005,26(8):27-30.
- [16] 赵高敏,王昆林,李传刚.La2O3对激光熔覆Fe基合金熔覆层显微组织的影响.金属热处理,2004,29(4):9-13.
- [17] 梁二军,杜利平,陈长青.CeO2Y2O3和MgO对镍基碳化钨金属陶瓷熔覆层裂纹及组织的影响.应用激光,2001,21(6):385-388.
- [18] 马运哲,董世运,徐滨士,等.CeO2对激光熔覆Ni基合金涂层组织与性能的影响.中国表面工程,2006,19(1):7-11.
- [19] 丁阳喜,欧阳志明.激光熔覆层裂纹的影响因素.材料研究与应用,2008,2(3):211-214.
- [20] 杨宁,杨帆.激光熔覆工艺参数对熔覆层质量的影响.热处理技术与装备,2010,31(4):17-19.
- [21] 宋建丽,邓琦林,陈畅源,等.宽带激光熔覆高硬度火焰喷涂层组织和裂纹行为.机械工程学报,2006,42(12):169-174.
- [22] 梁志宏,马恩波.激光熔覆成形预热基板设计及试验研究.机械设计与制造,2009,7:54-56.
- [23] Zhao X M, Chen J, Lin X, et al. The Effect of hot isostatic pressing on crack healing, microstructure, mechanical properties of rene88dt superalloy prepared by laser solid forming. Materials Science and Engineering A, 2009, 504: 129-134.
- [24] 毛怀东,张大卫,刘泽福.激光熔覆层网状添加物对裂纹控制的影响.天津大学学报,2008,41(5):553-557.
- [25] 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.南京航空航天大学学报,2005,37:44-47.
- [26] 蒙宣伊.送粉式激光熔覆裂纹机理的数值模拟.湖南工程学院学报,2010,20(1):39-42.

(责编 晓立)