

提高 MCrAlY 涂层抗高温氧化性能方法的研究进展

周圣丰¹ 刘佳¹ 熊征² 戴晓琴³ 李玲华¹ 张泽忠¹ 顾梦豪¹

¹南昌航空大学材料科学与工程学院, 江西 南昌 330063

²海军工程大学理学院, 武汉 430033

³南昌航空大学信息工程学院, 南昌 330063

摘要 常规法制备的 MCrAlY 涂层具有等轴晶形态、微气孔与裂纹等问题, 其抗高温氧化性能有待提高。基于此, 国内外研究者提出了许多提高 MCrAlY 涂层抗高温氧化性能的方法。综述了这些方法, 指出其存在的主要问题, 并提出了激光-感应复合熔覆球磨诱导柱晶 MCrAlY 涂层新方法, 即将 NiCr 粉(或 NiCr 粉、Co 粉)、Al 粉与 Y₂O₃ 粉在高能球磨机内进行机械合金化处理, 获得由 γ -Ni/ γ' -Ni₃Al 组成、形貌呈多角状以及内部存在大量缺陷的球磨 MCrAlY 粉末, 然后感应预热高温合金基材的同时快速激光熔覆。该方法不仅获得了无裂纹的 MCrAlY 涂层, 而且诱使 MCrAlY 涂层呈柱状晶生长, 使其抗高温氧化性能大大提高。

关键词 材料; MCrAlY 涂层; 氧化机理; 抗高温氧化

中图分类号 TG115

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.120004

Research Progress on Improving the High-Temperature Oxidation Resistance of MCrAlY Coatings

Zhou Shengfeng¹ Liu Jia¹ Xiong Zheng² Dai Xiaoqin³ Li Linghua¹

Zhang Zezhong¹ Gu Menghao¹

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

²School of Science, Naval University of Engineering, Wuhan, Hubei 430033, China

³School of Information Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang, Jiangxi 330063, China

Abstract MCrAlY coatings prepared by conventional methods have polycrystalline structure, micropores and cracks. The high-temperature oxidation resistance of MCrAlY coatings needs to be improved. Many measurements have been put forward by domestic and foreign researchers to improve their high-temperature oxidation resistance. These methods are reviewed and the related problems are also analyzed. Moreover, the method on cryomilling inducing the columnar growth of MCrAlY coatings by laser-induction hybrid cladding (LIHRC) is put forward. NiCr powder (or NiCr powder, Co powder), Al powder and Y₂O₃ powder are treated by mechanical alloying in high-energy milling apparatus to obtain the cladding powder consisting of γ -Ni/ γ' -Ni₃Al with large amounts of internal defects. The cryomilled MCrAlY powder presents the polygonal morphology. Preheating the substrate by induction heater is combined with laser cladding simultaneously. This method can not only obtain the crack-free MCrAlY coatings, but also induce the columnar growth in MCrAlY coatings. The high-temperature oxidation resistance of MCrAlY coating is improved significantly.

Key words materials; MCrAlY coatings; oxidation mechanism; high-temperature oxidation resistance

OCIS codes 160.3900; 140.3390; 350.3390

1 引言

随着航空技术的发展, 航空燃气涡轮发动机的流量比、推重比、涡轮进口温度进一步提高, 导致现有的高温合金难以满足要求。因此, 除了开发新型高温合金, 采用由 YSZ 陶瓷顶层和 MCrAlY 粘结层构成的热障

收稿日期: 2015-04-01; 收到修改稿日期: 2015-06-12; 网络出版日期: 2015-11-26

基金项目: 国家自然科学基金(51261027)、江西省自然科学基金(20132BAB206012)、航空科学基金(2014ZE56013)

作者简介: 周圣丰(1977—), 男, 博士, 副教授, 主要从事激光表面强化、激光快速制造及纳米材料与技术等方面的研究。

E-mail: zhousf1228@163.com

涂层是目前大幅度提高航空燃气涡轮发动机工作温度切实可行的方法^[1-3]。一般而言,MCrAlY(M=Co, Ni或CoNi)涂层可降低YSZ陶瓷顶层与高温合金基材之间热胀系数不匹配,且可以进一步提高基材的抗高温氧化性能。因此,MCrAlY涂层的抗高温氧化能力被认为是热障涂层的寿命控制因素,研究其高温失效机理以及进一步提高其抗高温氧化性能,近年来引起了研究者的广泛关注^[4-8]。

2 提高MCrAlY涂层抗高温氧化性能的方法

2.1 活性元素法

为了进一步提高MCrAlY涂层的抗高温氧化性能,通常在MCrAlY涂层内添加少量活性元素,如Si、B、Ti与Re^[9]等,这样不仅可以降低涂层的氧化速率,而且可以提高氧化膜的黏附强度^[10-12]。目前,关于活性元素的作用机理尚未统一,大致存在两种模型:

1) 力学模型。添加活性元素后形成的化合物和微观结构可以降低氧化膜的内应力,增加氧化膜与基体的实际接触面积,起到“钉子”效应;

2) 防止空位与杂质在界面处聚集模型。一般而言,活性元素比杂质元素能够以更快的速度在界面处偏聚,能够有效地降低杂质元素在界面的偏聚,起到提高氧化膜结合力的效果。

活性元素法具有操作方便与效率高等特点,可以显著提高氧化膜的抗剥落性能及降低合金的氧化速率,在耐热合金、高温防护涂层上具有广阔的应用前景。但是,微量活性元素的检测困难、复杂元素间的相互作用、在不同合金体系上所表现出的氧化特征不一致以及每一种活性元素最佳添加含量范围仍不清楚。更为重要的是,至今对其详细的微观作用机制尚无统一的认识。上述因素都在一定程度上制约了活性元素法的进一步应用。

2.2 预氧化法

大量的研究表明^[13-15],MCrAlY涂层的抗高温氧化性能取决于缓慢生成连续稳定氧化物的能力。因此,对MCrAlY涂层进行预氧化处理成为了一种有效提高其抗高温氧化性能的方法。例如,Mineaki等^[13]在尖晶石型(Co,Ni)(Al,Cr)₂O₄的溶解压(10^{-14} ~ 10^{-15} atm, 1 atm= 1.01×10^5 Pa)与1050 °C下,对等离子喷涂CoNiCrAlY涂层预氧化4 h,然后在空气中1200 °C条件下氧化50 h,结果表明:未预氧化的CoNiCrAlY涂层,高温氧化后不仅生成了 α -Al₂O₃,还生成了大量有害的(Co,Ni)(Al,Cr)₂O₄尖晶石型氧化物;但是,涂层经过预氧化后,生成了连续且致密的 α -Al₂O₃膜,可以有效抑制氧的内扩散与金属离子的外扩散,降低有害尖晶石型氧化物的形成速率,提高CoNiCrAlY涂层的抗高温氧化性能。

张林伟等^[14]也开展了预氧化法对冷喷涂NiCoCrAlY涂层抗高温氧化性能(1050 °C恒温氧化200 h)影响的研究,结果发现:未预氧化的冷喷涂NiCoCrAlY涂层在氧化的初期,表面除了生成 α -Al₂O₃膜外,还有少量尖晶石型氧化物生成,且随着氧化时间的延长,尖晶石型氧化物对应的衍射峰强度不断增加[图1(a)]。但是,预氧化的冷喷涂NiCoCrAlY涂层直到100 h后才出现尖晶石型氧化物的衍射峰[图1(b)]。Chen等^[15]在研究低压1080 °C条件下预氧化等离子喷涂NiCoCrAlY涂层24 h的过程中也发现了类似的规律:预氧化可以促使涂层优先形成一层连续且致密的 α -Al₂O₃膜,有效地抑制尖晶石型氧化物的形成,降低氧化物的生长速率,从而提高涂层的抗高温氧化性能。

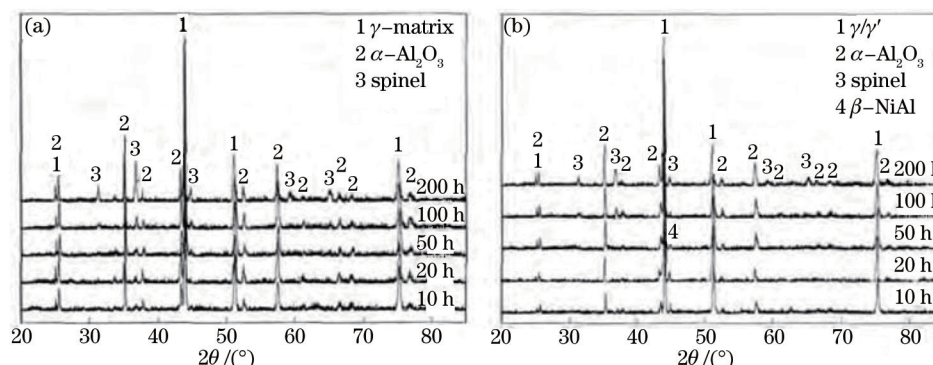


图1 NiCoCrAlY涂层氧化后X-射线衍射谱。(a) 等离子喷涂层;(b) 真空预氧化后涂层

Fig.1 XRD patterns of NiCoCrAlY coatings after oxidation. (a) As-sprayed coating; (b) vacuum pre-oxidation coating

综上所述,预氧化法是指涂层在热循环氧化实验前,先经高温氧化几小时,促使涂层优先形成一层连续且致密的 α - Al_2O_3 膜,该方法具有两个优点:1)抑制有害类尖晶石氧化物的生长;2)降低涂层中合金元素的氧化速率,从而延长涂层的使用寿命。但是,预氧化法对实验要求比较苛刻,通常需要低压或者真空环境,对于大型或异型工件,需要特殊设计的加热炉,而且装卸十分困难,应用前景不容乐观。

2.3 第二相颗粒法

前面所述的预氧化法能够提高MCrAlY涂层的抗高温氧化性能,但是整个工艺需要在低压或真空中进行,工艺较复杂,成本偏高。近年来,采用高熔点的第二相颗粒增强MCrAlY涂层,成为了一种有效提高其抗高温氧化性能的方法,受到了研究者的广泛关注。例如,Wu等^[16]研究了微米级的 Al_2O_3 颗粒对激光熔覆NiCrAlY涂层抗高温氧化性能的影响(在1000℃恒温氧化100h)。结果表明: Al_2O_3 颗粒能够细化NiCrAlY涂层的晶粒,促进其在高温下发生铝的选择性氧化;此外,弥散分布的 Al_2O_3 颗粒能够钉住晶界和阻碍晶体的生长,以及阻止 Ni^{2+} 与 Cr^{3+} 向外扩散,从而大幅提高涂层的抗高温氧化性能。相对于微米级的第二相颗粒而言,纳米级的第二相颗粒具有优异的力学、热学以及物理化学等性能,被广泛用于金属基复合材料的增强相。例如,Wang等^[17]研究了纳米第二相颗粒如SiC、 Al_2O_3 与 CeO_2 颗粒(质量分数均为1%)对激光熔覆NiCoCrAlY涂层抗高温氧化性能的影响(在1050℃循环氧化10h)。结果表明:与未掺入纳米第二相颗粒的激光熔覆涂层相比,在掺入了纳米相颗粒的激光熔覆层内,晶体生长形态由树枝晶转变为胞状晶,氧化后涂层没有剥落,氧化增重速率减小,抗高温氧化性能明显提高。

因此,激光熔覆技术制备的颗粒增强MCrAlY涂层,将MCrAlY涂层的强韧性、良好的工艺和增强颗粒优异的耐磨、耐高温、抗氧化特性有机结合起来,使涂层具有良好的综合性能。颗粒增强MCrAlY涂层按增强体的加入方式分为原位析出颗粒增强涂层与外加颗粒增强涂层。在涂层中直接加入 Al_2O_3 颗粒就属于外加颗粒增强涂层方式,该方式不仅能够细化MCrAlY涂层的晶粒,促进其在高温下发生铝的选择性氧化,而且 Al_2O_3 颗粒能够钉住晶界和阻碍晶体的生长,阻止 Ni^{2+} 与 Cr^{3+} 向外扩散,大大提高涂层的抗高温氧化性能。但是,外加的 Al_2O_3 颗粒和MCrAlY涂层的湿润性差,密度相差较大,导致 Al_2O_3 颗粒分布不均匀,易产生裂纹等,弱化了 Al_2O_3 颗粒对MCrAlY涂层的整体增强效果。

2.4 阻挡层法

传统的渗铝涂层(β -NiAl)和MCrAlY涂层用于镍基高温合金时,涂层和基材之间的互扩散极易在界面处形成有害的二次反应区(SRZ),该区主要由 γ' 母相与针状或片状的 γ 及脆性的拓扑密排相(TCP)组成。SRZ的形成使高温合金的 γ/γ' 晶粒粗化,抗蠕变能力以及抗高温氧化性能降低。为了克服这个问题,研究者们在MCrAlY涂层和高温合金基材之间制备了一个能阻碍它们相互扩散的阻挡层^[18-23]。一般而言,扩散阻挡层主要分为金属阻挡层和陶瓷阻挡层。其中,国内外研究者对金属阻挡层如Ta、Hf-Ni、Ir-Ta-Al、Ni-W、NiCr等做了大量的工作。例如,Wu等^[18]在NiAl涂层表面先采用电镀法制备Re-Ni层,然后采用包渗法制备Cr层,从而形成Re-Ni-Cr金属阻挡层,结果表明:和没有阻挡层的NiAl涂层相比,制备了阻挡层的NiAl涂层中 γ' -Ni₃Al和TCP的数量大大降低;高温氧化过程中形成的 σ 相可以有效阻碍NiAl涂层与高温合金基材中合金元素之间的互扩散,从而大幅度提高涂层的抗高温氧化性能。Kuppusami等^[19]在研究Ir-Ta-Al阻挡层(先采用磁控溅射Ir-Ta靶,沉积到TMS-75高温合金,然后包埋渗铝,形成阻挡层)对铝化物涂层抗氧化性(1100℃循环氧化600h)时,也发现了相似的规律。

但是,金属阻挡层只能阻止部分合金元素的扩散,而且也会在界面处形成脆性相。陶瓷阻挡层能够完全阻止涂层和基材之间的相互扩散,有效地避免该问题的发生。常用的陶瓷阻挡层有:TiN、Al-O-N、 Al_2O_3 、Cr-Al-O-N与Cr-O-N等。例如,Lou等^[23]研究了离子镀TiN陶瓷阻挡层对MCrAlY涂层抗高温氧化性能的影响,发现陶瓷阻挡层和金属阻挡层的抗氧化性机理相同,都是阻碍MCrAlY涂层内的Al向内扩散以及高温合金基材中的合金元素向外扩散。但是,陶瓷阻挡层与高温合金基材之间的结合力有待提高,在高温下(1000℃以上)陶瓷阻挡层可能会失效。

2.5 铝化法

长期以来,国内外研究者一直致力于对MCrAlY涂层进行改性处理,使之能在更高温度下使用。在对MCrAlY涂层进行改性处理的方法中,渗铝法是一种简单、有效且常用的方法,它主要分为预铝化处理和后

铝化处理。预铝化处理是采用固体粉末包埋法将试验用粉渗铝,然后再沉积到基材上形成涂层;后铝化处理是先制备涂层,然后再将涂层进行渗铝处理。

大量的研究表明:渗铝法能够提高 MCrAlY 涂层的抗高温氧化性能。例如, Lih 等^[24]预铝化处理等离子喷涂 Co-29Cr-6Al-1Y 涂层 2~10 h,然后在 1050 °C 进行热循环氧化试验,结果表明:预铝化处理 2 h 的涂层,表面不能形成连续的 β -CoAl 层;预铝化处理 4 h 以上的涂层,表面生成了厚约 15~20 μm 且均匀致密的 β -CoAl 层,可以有效降低涂层的氧化速率,循环氧化寿命随着预铝化时间的增加而增加。后铝化处理也是一种有效提高 MCrAlY 涂层抗高温氧化性能的方法,例如, Xin 等^[25]对磁控溅射 Ni-30Cr-8Al-0.5Y 涂层进行后铝化处理,结果发现:在 1100 °C 时,未渗铝涂层中 Al 被过度消耗,抗高温氧化性能急剧下降;铝化涂层表面生成了保护性的 α -Al₂O₃ 膜,极大地提高了其抗高温氧化性能。

显然,铝化法的显著优点是设备简单,操作方便,特别适用于机械零部件的表面改性处理。但是,在铝化的过程中,渗铝剂容易氧化及造成环境污染,工件尺寸受限制,易使工件表面的粗糙度增加。

2.6 激光重熔法

与前面所述的几种方法不同,激光重熔法是近年来研究的热点,尤其将等离子喷涂法与激光重熔法相结合的技术,受到了研究者的广泛关注^[26-28]。这是因为采用激光重熔法可以明显降低等离子喷涂 MCrAlY 涂层的气孔率,使组织均匀致密,提高涂层与高温合金基体之间的结合强度,改善其抗高温氧化性能^[29]。例如, Zhang 等^[27]在研究激光重熔对离子喷涂 NiCoCrAlY 涂层的影响时发现:合适的激光工艺参数可以细化重熔区的晶粒,提高涂层的致密度以及结合区的强度,不稀释重熔区的合金元素,大幅度提高涂层的抗高温氧化性能。Wu 等^[28]发现等离子喷涂 NiCrAlY/Al₂O₃ 涂层经过激光重熔后,出现了厚约 180~220 μm 且均匀致密、无空位与裂纹以及未融化颗粒的涂层,在 1000 °C 下恒温氧化 100 h,氧化物 α -Al₂O₃ 的颗粒比等离子喷涂层的小,合金元素的扩散通道减少,如图 2 所示,抗高温氧化性能大幅度提高。

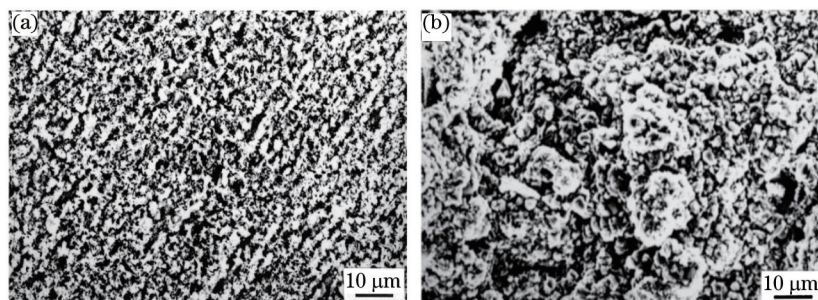


图 2 NiCrAlY/Al₂O₃ 涂层氧化后的表面形貌。(a) 激光重熔;(b) 等离子喷涂

Fig.2 Surface morphology of NiCrAlY/Al₂O₃ coatings after oxidation. (a) Coating by laser remelting; (b) coating by plasma spraying

因此,激光重熔法能够明显细化喷涂层的晶粒,减少气孔与夹杂,提高涂层与高温合金基体之间的结合强度。但是,激光重熔法并不能完全焊合喷涂层内的气孔,而且由于在激光热辐射后形成熔池的温度梯度很大,快速凝固过程产生的热应力易导致涂层开裂。

3 激光-感应复合熔覆球磨诱导柱晶 MCrAlY 涂层新方法

综合国内外的研究结果可以看出:常规法制备的 MCrAlY 涂层具有等轴晶形态、微气孔微裂纹,尽管国内外的研究者提出了许多提高 MCrAlY 涂层抗高温氧化性能的方法,但是如何制备柱晶 MCrAlY 涂层及进一步提高其抗高温氧化性能,无论在军机或民机上都是亟待解决的关键问题。基于此,作者提出了激光-感应复合熔覆球磨诱导柱晶 MCrAlY 涂层的新方法^[29],其基本原理是:将 NiCr 粉(或 NiCr 粉、Co 粉)、Al 粉与 Y₂O₃ 粉在高速球磨机内进行机械合金化处理,获得流动性好、适合自动送粉的球磨 MCrAlY 粉末;利用高频感应加热线圈的集肤效应将定向凝固高温合金表面在短时间内加热到一定温度,然后将激光束与粉末喷嘴定位到感应加热区,实现激光热源与感应加热源的复合;球磨 MCrAlY 粉末在复合热源作用下发生熔化,当复合热源移开后快速凝固形成柱晶 MCrAlY 涂层。这主要是因为球磨 MCrAlY 粉末主要由 γ -Ni/ γ' -Ni₃Al 组成,内部存在大量的空位、位错与孪晶等缺陷,在激光-感应复合熔覆过程中可以大幅度提高对激光束能量的吸

收率,从而提高熔池的温度梯度与冷却速度,抑制柱状晶向等轴晶的转变,诱使MCrAlY涂层呈柱状晶生长。本实验室已在高温合金GH4169表面进行了激光-感应复合熔覆球磨诱导柱晶MCrAlY涂层的试验^[30],当激光功率为3 kW,激光扫描速度为1800 mm/min,送粉率为70.3 g/min,基材预热温度约为673 K时,与呈等轴晶形态的未球磨MCrAlY涂层相比[图3(a)与3(c)],球磨MCrAlY涂层呈柱状晶生长[图3(b)与3(d)]且抗高温氧化性能优异(图4)。该方法不仅从根本上突破了单纯激光熔覆最常见、破坏性最大的冶金缺陷-裂纹,而且利用球磨诱导MCrAlY涂层呈柱晶生长,可以有效降低热循环过程中合金元素如Al、Cr与Ni的晶界扩散通道,从而大幅度提高其抗高温氧化性能。

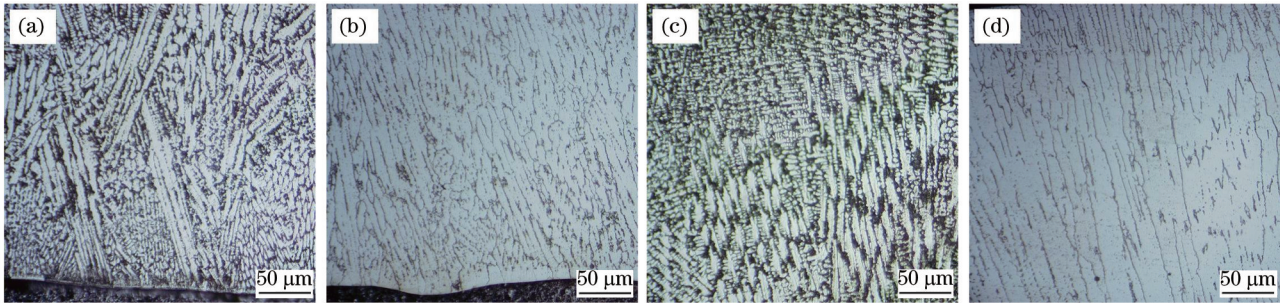


图3 激光-感应复合熔覆MCrAlY涂层的显微结构。(a)未球磨涂层的底部;(b)球磨涂层的底部;(c)未球磨涂层的中部;(d)球磨涂层的中部

Fig.3 Microstructure of MCrAlY coating by laser-induction hybrid cladding. (a) Bottom and (c) center of non-cryomilled coating; (b) bottom and (d) center of cryomilled coating

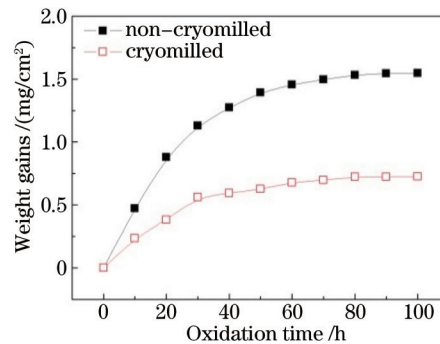


图4 激光-感应复合熔覆未球磨与球磨MCrAlY涂层在1273 K的氧化动力学曲线

Fig.4 Oxidation kinetic curves of non-cryomilled and cryomilled MCrAlY coatings by laser-induction hybrid cladding at 1273 K

4 总结与展望

提高MCrAlY涂层抗高温氧化性能的方法主要有:活性元素法、预氧化法、第二相颗粒法、扩散阻挡层法、铝化法、激光重熔法,但上述方法均存在一定的不足。例如,活性元素的添加含量在多少范围内对提高MCrAlY涂层抗高温氧化性能有效,有待深入研究。预氧化法需在低压或真空中进行,工艺较复杂。扩散阻挡层法中的金属阻挡层易在界面处形成脆性相;陶瓷阻挡层与高温合金基材之间的结合力较弱。铝化法在涂层渗铝时,粉末易挥发而污染环境。因此,节约成本、简化操作工艺、提高工作效率、保证高温合金基材与MCrAlY涂层间的结合强度,并能进一步提高MCrAlY涂层的抗高温氧化性能是实现工业化应用的前提。基于此,提出了一种激光-感应复合熔覆球磨诱导柱晶MCrAlY涂层的新方法,该方法不仅提高了激光熔覆效率,而且获得了无裂纹的MCrAlY涂层,并诱使MCrAlY涂层呈柱状晶生长,使其抗高温氧化性能大大提高,在表面强化与修复航空燃气涡轮发动的高温端部件领域具有广阔的应用前景^[31-32]。

参考文献

- 1 Guo Hongbo, Gong Shengkai, Xu Huibin. Progress in thermal barrier coatings for advanced aeroengines[J]. 2009, 28(9): 18-24.

郭洪波, 宫声凯, 徐慧彬. 先进航空发动机热障涂层技术研究进展[J]. 中国材料进展, 2009, 28(9): 18-24.

- 2 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.
- 3 Liu Chunbo, Lin Feng, Jiang Xianliang. Current state and future development of thermal barrier coating[J]. The Chinese Journal of 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.
- 4 Vaidyanathan K K, Gell M, Jordan E. Mechanisms of spallation of electron beam physical vapor deposited thermal barrier coatings with and without platinum aluminate bond coat ridges[J]. Surface and Coatings Technology, 2000, 133(11): 28-34.
- 5 Wang Dongsheng, Tian Zongjun, Shen Lida, *et al.*. Research status of MCrAlY coatings prepared by laser cladding[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2013, 37(12): 1-5.
王东生, 田宗军, 沈理达, 等. 激光熔覆 MCrAlY 涂层的研究现状[J]. 机械工程材料, 2013, 37(12): 1-5.
- 6 Kulkarni A, Wang Z, Nakamura T. Comprehensive microstructural characterization and predictive property modeling of plasma-sprayed zirconia coatings[J]. Acta Materialia, 2003, 51(5): 2457-2475.
- 7 Hesnawi A, Li H F, Zhou Z H, *et al.*. Isothermal oxidation behavior of EB-PVD MCrAlY bond coat[J]. Vacuum, 2007, 81(8): 947-952.
- 8 Zhang Tianyou, Wu Chao, Xiong Zheng, *et al.*. Research progress in materials and preparation techniques of thermal barrier coatings[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(3): 030004.
张天佑, 吴 超, 熊 征, 等. 热障涂层材料及其制备技术的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(3): 030004.
- 9 Quadackers W J, Beele W, Czech N, *et al.*. Long-term oxidation tests on a re-containing MCrAlY coating[J]. Surface and Coatings Technology, 1997, 94(10): 41-45.
- 10 Liu X, Huang L, Bao Z B, *et al.*. Oxidation behavior of graded NiCrAlYRe coatings at 900, 1000 and 1100 °C[J]. Oxidation of Metal, 2009, 71(3): 125-142.
- 11 Czech N, Schmitz F, Stamm W. Improvement of MCrAlY coatings by addition of rhenium[J]. Surface and Coatings Technology, 1994, 68(12): 17-21.
- 12 Guo H B, Wang D, Peng H, *et al.*. Effect of Sm, Gd, Yb, Sc and Nd as reactive elements on oxidation behaviour of β -NiAl at 1200 °C[J]. Corrosion Science, 2014, 78(1): 369-377.
- 13 Matsumoto M, Hayakawa K, Kitaoka S, *et al.*. The effect of preoxidation atmosphere on oxidation behavior and thermal cycle life of thermal barrier coatings[J]. Materials Science and Engineering: A, 2006, 441(1): 119-125.
- 14 Zhang Linwei, Wang Lu, Wang Quansheng, *et al.*. Effect of vacuum pre-oxidation on oxidation behavior of NiCoCrAlY coating prepared by cold spray[J]. Journal of Materials Engineering, 2014, (1): 1-5.
张林伟, 王 鲁, 王全胜, 等. 真空预氧化对冷喷涂 MCrAlY 涂层氧化行为的影响[J]. 材料工程, 2014, (1): 1-5.
- 15 Chen W R, Wu X, Marple B R, *et al.*. Pre-oxidation and TGO growth behaviour of an air-plasma-sprayed thermal barrier coating[J]. Surface and Coatings Technology, 2008, 202(16): 3787-3796.
- 16 Wu Y N, Qin M, Feng Z C, *et al.*. Improved oxidation resistance of NiCrAlY coatings[J]. Materials Letters, 2003, 57(16): 2404-2408.
- 17 Wang H Y, Zuo D W, Chen X F, *et al.*. Microstructure and oxidation behaviors of nano-particles strengthened NiCoCrAlY clad coatings on superalloys[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010, 23(3): 297-304.
- 18 Wu Y, Li X W, Song G M, *et al.*. Improvement of the oxidation resistance of the single-crystal Ni-based TMS-82+ superalloy by Ni-Al coatings with/without the diffusion barrier[J]. Oxidation of Metals, 2010, 74(5): 287-303.
- 19 Kuppusami P, Murakami H. Effect of Ta on microstructure and phase distribution in cyclic oxidized Ir-Ta modified aluminate coatings on nickel base single crystal superalloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2007, 452(4): 1-9.
- 20 Wu F, Murakami H, Suzuki A. Development of an iridium-tantalum modified aluminate coating as a diffusion barrier on nickel-base single crystal superalloy TMS-75[J]. Surface and Coatings Technology, 2003, 168(1): 62-69.
- 21 Narita T, Ford S, Yoshioka T, *et al.*. Formation of Pt-modified γ' -Ni₃Al and Re-based σ -alloy coating system and cyclic oxidation behavior of coated superalloy[J]. Material Science Forum, 2008, 595: 135-141.
- 22 Wang Q M, Wu Y N, Guo M H, *et al.*. Ion-plated Al-O-N and Cr-O-N films on Ni-base superalloys as diffusion barriers[J]. Surface and Coatings Technology, 2005, 197(1): 68-76.
- 23 Lou H Y, Wang F H. Effective of Ta, Ti and TiN barriers on diffusion and oxidation kinetics of sputtered CoCrAlY coatings

- [J]. Vacuum, 1992, 43(5): 757-761.
- 24 Lih W, Chang E, Chao C H, *et al.*. Effect of pre-aluminization on the properties of $ZrO_2-8wt\%Y_2O_3/Co-29Cr-6Al-1Y$ thermal barrier coatings[J]. Oxidation of Metals, 1992, 38(1): 99-124.
- 25 Ren X, Wang F H. High-temperature oxidation and hot-corrosion behavior of a sputtered NiCrAlY coating with and without aluminizing[J]. Surface and Coatings Technology, 2006, 201(1): 30-37.
- 26 Chang K C, Wei W J, Chen C. Oxidation behavior of thermal barrier coatings modified by laser remelting[J]. Surface and Coatings Technology, 1998, 102(3): 197-204.
- 27 Zhang Y P, Zhou Z R, Cheng J M, *et al.*. Laser remelting of NiCoCrAlY clad coating on superalloy[J]. Surface and Coatings Technolog, 1996, 79(1): 131-134.
- 28 Wu Y N, Zhang G, Feng Z C, *et al.*. Oxidation behavior of laser remelted plasma sprayed NiCrAlY and NiCrAlY/ Al_2O_3 coatings [J]. Surface and Coatings Technology, 2001, 138(1): 56-60.
- 29 Zhou Shengfeng, Diao Xiaqin. The Method on Column Crystal NiCrAlY Coatings by Laser-Induction Hybrid Cladding: China, 201510039150.8[P]. 2015-10-03.
周圣丰, 戴晓琴. 一种激光-感应复合熔覆柱晶 NiCrAlY 涂层的方法: 中国, 201510039150.8[P]. 2015-10-03.
- 30 Zhou S F, Xiong Z, Dai X Q, *et al.*. Microstructure and oxidation resistance of cryomilled NiCrAlY coating by laser induction hybrid rapid cladding[J]. Surface and coatings technology, 2014, 258(15): 943-949.
- 31 Qi Yongai, Zhao Jianfeng, Xie deqiao, *et al.*. Flexural property of GH4169 nickel-based superalloy by laser repair[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(11): 1103009.
戚永爱, 赵剑峰, 谢德巧, 等. 激光修复 GH4169 镍基高温合金的弯曲性能[J]. 中国激光, 2013, 40(11): 1103009.
- 32 Ming Xianliang, Chen Jing, Tan Hua, *et al.*. Research on persistent fracture mechanism of laser forming repaired GH4169 superalloy[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(11): 1103009.
明宪良, 陈静, 谭华, 等. 激光修复 GH4169 镍基高温合金的持久断裂机制研究[J]. 中国激光, 2013, 40(11): 1103009.

栏目编辑: 张浩佳