



热障涂层表面激光改性及其对涂层抗CMAS性能的影响

曹高明,吴静*

(沈阳理工大学材料科学与工程学院,辽宁 沈阳 110159)

摘要:热障涂层是影响航空发动机涡轮叶片抗腐蚀性能的3大关键因素之一,其可大幅提高涡轮叶片的工作温度。目前,涡轮叶片最常使用的是 Y_2O_3 部分稳定 ZrO_2 (YSZ)热障涂层,但是该涂层抵抗环境沉积物(简称CMAS,其成分主要为 CaO 、 MgO 、 Al_2O_3 和 SiO_2)腐蚀能力弱,在CMAS作用下涂层会发生相变、结构破坏及服役寿命大幅降低。为改善CMAS作用下YSZ热障涂层的相和结构稳定性,以及提高涂层的抗CMAS性能,采用脉冲Nd:YAG激光系统对镍基高温合金基体的YSZ涂层进行表面改性,通过优化激光参数获得激光改性的热障涂层,并对其进行 $1250\text{ }^\circ\text{C}\times 4\text{ h}$ 的CMAS腐蚀试验。利用X射线衍射(XRD)、光学电镜(OM)、扫描电子显微镜(SEM)等,表征改性涂层的相组成、表面形貌、改性层微观结构、改性层/原始涂层的界面结合状态,同时分析改性涂层组织结构特征和抗CMAS腐蚀性能。结果表明,YSZ涂层表面经过激光改性后,形成了具有柱状晶结构的改性层,该层表面光滑且内部存在纵向裂纹,其厚度及与下方原始涂层的界面结合状况均受激光改性参数的影响。通过激光参数的优化,确定激光光束长度为80 mm、扫描速度为 $8\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$,这有助于提高改性层/原始涂层的界面匹配性。CMAS腐蚀试验结果表明,激光改性涂层具有良好的相稳定性和结构稳定性。采用激光表面改性可提高热障涂层的抗CMAS腐蚀性能,但抗腐蚀性能提高的程度依赖于改性层的厚度和微观结构,特别是纵向裂纹的分布。

关键词:热障涂层;CMAS;YSZ;表面改性;激光参数优化;相组成;微观结构;纵向裂纹

中图分类号:TG174

文献标志码:A

文章编号:1673-9981(2025)02-0301-07

引文格式:曹高明,吴静.热障涂层表面激光改性及其对涂层抗CMAS性能的影响[J].材料研究与应用,2025,19(2):301-307.

CAO Gaoming, WU Jing. Laser Modification of Thermal Barrier Coating Surfaces and Its Effects on the CMAS Resistance of the Coating[J]. Materials Research and Application, 2025, 19(2): 301-307.

0 引言

涡轮叶片是航空发动机的核心热端部件,承受着高温、高压、高速气流冲刷等恶劣工作环境。航空发动机涡轮叶片多采用镍基高温合金制备,最高可承受温度不超过 $1150\text{ }^\circ\text{C}$,然而涡轮叶片所处的工作环境温度明显地高于 $1150\text{ }^\circ\text{C}$,甚至高达 $1600\text{ }^\circ\text{C}$ ^[1-2]。采用气膜冷却技术和热障涂层(Thermal barrier coatings, TBCs)技术,通过二者的共同作用,可使涡轮叶片安全可靠地工作。TBCs是涂覆在涡轮叶片表面的高温防护涂层,一般由陶瓷隔热层、金属粘结层,以及二者之间的热氧化物生长层(Thermally grown oxide, TGO)构成,TBCs陶瓷层的制备方法包括等离子喷涂、电子束物理气相沉积、等离子物理气相沉积等^[3-5]。目前,最广泛使用的是 Y_2O_3 部分稳定 ZrO_2 (YSZ)TBCs涂层,制备态的涂层呈现亚稳

态四方相结构(Metastable tetragonal, t'), t' -YSZ具有优秀的断裂韧性和抗热冲击性能。

随着TBCs服役温度越来越高,YSZ涂层出现了一系列问题,特别是环境沉积物腐蚀问题。发动机在运行时摄入大量的沙尘、固态小颗粒、火山灰等,这些物质(通常简称为CMAS)在燃烧室里经历高温后呈现熔融态而附着在叶片表面,主要成分为 CaO 、 MgO 、 Al_2O_3 和 SiO_2 ^[6-9]。CMAS对TBCs有严重的腐蚀作用,机理主要表现为热化学作用和热机械作用。高温下,CMAS与YSZ涂层发生相互作用,导致涂层中的稳定剂 Y_2O_3 缺失,使得 t' 转变成单斜相(m)并伴随3%—5%的体积变化,使得涂层内部产生裂纹乃至剥落;同时,热化学反应还破坏了涂层的结构,使得涂层丧失了原有的层片状、柱状晶结构,大幅降低涂层的隔热效果及抗热冲击性

收稿日期:2025-02-15

基金项目:新型陶瓷纤维及其复合材料国家级重点实验室基金项目(WDZC20245250503);辽宁省教育厅基本科研项目(LJKMZ20220589)

作者简介:曹高明,硕士研究生,研究方向为热障涂层。E-mail:271551543@qq.com。

通信作者:吴静,博士,副教授,研究方向为功能涂层设计与制备。E-mail:wujing_sylu@163.com。

能^[10-13]。另外,熔融的CMAS还大量渗入涂层内孔隙、微裂纹、柱晶间隙,使得涂层致密化,降低了涂层的应变容限,使得在冷热循环中极易开裂和剥落^[14-16]。因此,CMAS是TBCs过早剥落失效的重要原因,CMAS问题一直是TBCs领域的研究热点。为改善TBCs的抗CMAS性能,开展了大量的研究工作,主要的方法包括物理隔离、涂层成分改性、表面防护层技术等。在物理隔离方面,Wang等^[17]在YSZ涂层表面电镀Pt膜,在CMAS腐蚀时,电镀的致密且无缺陷Pt膜可有效保护YSZ涂层免受CMAS的侵蚀。在YSZ涂层成分改性方面,Fan等^[18]采用Sc掺杂改性YSZ涂层并发现,经过24 h的CMAS腐蚀,ScYSZ涂层仅在顶层检测到Ca,而YSZ涂层在整个截面均可检测到Ca,表明Sc掺杂能提高YSZ涂层的抗CMAS腐蚀能力。在表面防护层技术方面,Wang^[19]和Ozgurluk^[20]等制备了La₂Zr₂O₇/YSZ双陶瓷TBCs,La₂Zr₂O₇层同CMAS反应生成的磷灰石相能有效抑制CMAS向涂层内进一步的渗透。Wang等^[21]在YSZ涂层表面制备了3种不同结构的(Gd_{0.8}Yb_{0.2})₂Zr₂O₇陶瓷层,高温下CMAS与(Gd_{0.8}Yb_{0.2})₂Zr₂O₇层的反应产物主要由Gd-磷灰石和c-ZrO₂基萤石组成,并发现柱间间隙最小、比表面积最大的(Gd_{0.8}Yb_{0.2})₂Zr₂O₇层的CMAS防护性能最好。Guo等^[22-25]系统研究了CMAS作用下稀土磷酸盐材料及涂层的高温稳定性,发现CMAS作用下稀土磷酸盐表面可迅速形成一层磷灰石薄层,该薄层几乎完全阻挡了熔融CMAS内渗,而且稀土磷酸盐表面能低,熔融CMAS在其表面难润湿,极大降低了CMAS在表面的黏附量,因此稀土磷酸盐是一种优秀的CMAS防护层材料。此外,采用激光对TBCs进行表面改性,可降低其表面粗糙度,提高涂层的抗腐蚀性能。Arshad等^[26]利用脉冲激光对等离子喷涂La₂Zr₂O₇TBC表面进行了改性,涂层的强度增大且未产生相变。Fan等^[27]采用激光改性TBC表面时对样品进行预热,减小了激光重熔过程中涂层内热梯度和冷却速率,获得了缺陷较少、应力较低的改性涂层。Ghasemi^[28]和Ahmadi-Pidani等^[29]采用激光分别对纳米YSZ涂层以及CeO₂、Y₂O₃共稳定ZrO₂涂层进行表面改性,发现改性后涂层的抗Na₂SO₄+V₂O₅熔盐腐蚀性能得到显著提高。因此,激光改性技术对提高TBCs的强度、抗腐蚀性能等方面具有重要的促进作用。但是,激光改性TBCs得到实际应用仍然有很长的路要走,研究亟需进一步深化、细化,如改性层的厚度、微观结构的精确控制,以及改性层与原始涂层的界面匹配性和改性涂层抗CMAS腐蚀

机理等。

本研究采用激光技术对等离子喷涂YSZ-TBCs进行表面改性,研究了激光的光束长度和扫描速度对改性层的厚度、纵向裂纹特征、界面匹配性等的影响,以确定优化的激光参数,并采用该参数对YSZ涂层实施表面改性,研究了改性涂层在1250℃下的CMAS腐蚀行为,揭示了激光改性涂层抗CMAS机理,促进了激光改性技术在TBC领域中的应用。

1 试验部分

1.1 YSZ热障涂层制备

采用化学共沉淀法制备7%(质量分数)Y₂O₃部分稳定ZrO₂(7YSZ)粉末,详细制备参数参阅文献[30-31]。先对7YSZ粉末进行造粒处理,再采用大气等离子喷涂(Metco 7M)制备YSZ涂层,基体为Ni基高温合金(见表1)。在喷涂YSZ涂层之前,先采用超音速火焰喷涂(HVOF)制备NiCoCrAlY粘结层。喷涂YSZ涂层和NiCoCrAlY粘结层的工艺参数分别列于表2和表3,其中参数选自预优化程序。

表1 Ni基高温合金基体成分

Table 1 Chemical composition of the Ni-based alloy

成分	含量w/%	成分	含量w/%
Ni	余量	Mo	2.9
Co	4.5—6.0	Al	5.3—5.9
Cr	10.0—12.0	Fe	<2.0
Ti	2.3	W	4.8—5.5

表2 等离子喷涂YSZ涂层的工艺参数

Table 2 Fabrication parameters of plasma sprayed YSZ coating

参数	数值
电流/A	560
电压/V	55
主气Ar流量/(L·min ⁻¹)	40
次气H ₂ 流量/(L·min ⁻¹)	10
送粉速率/(g·min ⁻¹)	24
喷涂距离/mm	100

表3 超音速火焰喷涂NiCoCrAlY粘结层工艺参数

Table 3 HVOF parameters of NiCoCrAlY bond coat

参数	数值
O ₂ 流量/(m ³ ·h ⁻¹)	48.11
航空煤油流量/(m ³ ·h ⁻¹)	0.198
燃料/氧气比	7/1700
送粉速率/(g·min ⁻¹)	62
喷涂距离/mm	360

1.2 YSZ涂层激光表面改性

使用波长为1 064 nm的脉冲Nd:YAG激光系统(LWY-400, HGTECH, 中国)对YSZ涂层样品进

行表面改性,激光束90°垂直照射在涂层表面,通过调节激光光束长度和扫描速度,对YSZ涂层样品进行改性。具体的激光参数列于表4。

表4 YSZ热障涂层表面改性激光参数

Table 3 Parameters of surface modification laser for YSZ thermal barrier coating

样品	脉宽	出光频率/Hz	扫描速度/(mm·s ⁻¹)	激光功率/W	光束长度/mm
C1	1	40	10	4	70
C2	1	40	10	4	80
C3	1	40	8	4	80

1.3 CMAS腐蚀实验

选用的CMAS粉末成分含量(摩尔百分数)为45% SiO₂、33% CaO、13% AlO_{1.5}、9% MgO,其制备方法参考文献[32-33]。对激光改性YSZ涂层进行CMAS腐蚀试验时,所用的CMAS浓度为20 mg·cm⁻²,在涂覆CMAS粉末之前,需精确地计算涂层样品的面积以换算成所需的CMAS质量。为保证CMAS粉末涂覆均匀,选用75 μm的细网筛,将CMAS粉末少量多次地筛分到样品表面,在筛分前和每次筛分后称量涂层样品质量,直至二者质量差达到所需沉积的腐蚀物的质量。CMAS腐蚀试验在1 250 °C、保温4 h条件下进行。

1.4 相及微观结构分析

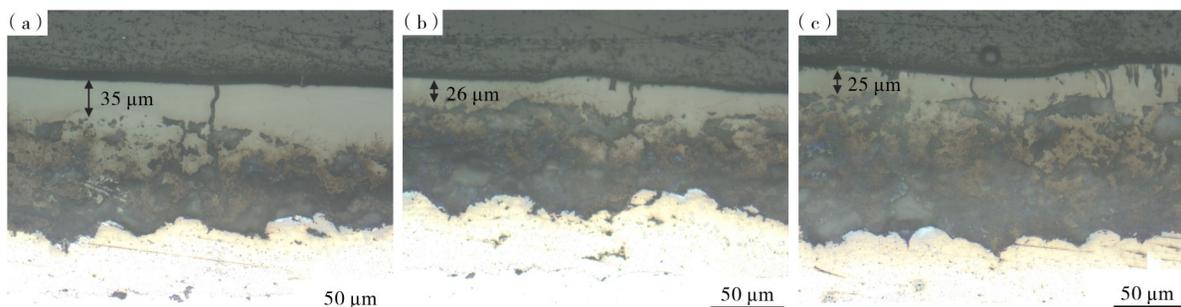
采用光学显微镜(OM, Axio Scope. A1, 德国蔡司生产)、扫描电子显微镜(SEM, Nanosem 430, 美国FEI),观察涂层样品的表面形貌和截面微观结构。采用X射线衍射仪(XRD, D8 Advanced, 德国Bruker生产),分析涂层表面腐蚀产物的相组成,其中扫描范围为20°—90°、速率为0.2 (°)·s⁻¹。

2 结果与讨论

2.1 激光表面改性参数优化

选取不同的激光光束长度、扫描速度,以研究他

们对热障涂层激光改性层的厚度、纵向裂纹、界面结合情况的影响。图1为不同激光光束长度下改性热障涂层的截面光镜图。从图1可见,经过激光改性后,热障涂层表面形成了一层致密的改性层,在改性层中可观察到明显的纵向裂纹,其中C1涂层样品改性层的平均厚度约为35 μm, C2涂层样品改性层的平均厚度较薄约为26 μm,而C3涂层样品改性层的平均厚度约为25 μm。结果表明,增大激光光束长度可降低改性层的厚度。这是由于激光光束长度越大,则激光作用的距离越大,到达涂层表面的能量就越少且分散,使得涂层获得的能量越少,使改性层的厚度越薄。对于热障涂层来说,首先保证的是隔热功能,若过多地强调抗CMAS性能而增加改性层的厚度,必将削弱热障涂层的隔热功能。因此,选取适宜的光束长度为80 mm。从图1还可见,改变激光扫描速度对改性层的厚度影响不大,当激光扫描速度为8 mm·s⁻¹时改性层中的纵向裂纹明显增多。这主要原因是激光扫描速度下降,涂层在单位时间内吸收的热量增多,使得改性层内部应力增大,在随后的冷却过程中容易产生纵向裂纹。C2涂层与和C3涂层对比可发现, C3涂层的改性层与下方原始涂层界面结合更完整。这主要是由于改性层中存在更多纵向裂纹释放了应力,增强了改性层与原始涂层的界面匹配。



(a)—C1涂层;(b)—C2涂层;(c)—C3涂层。

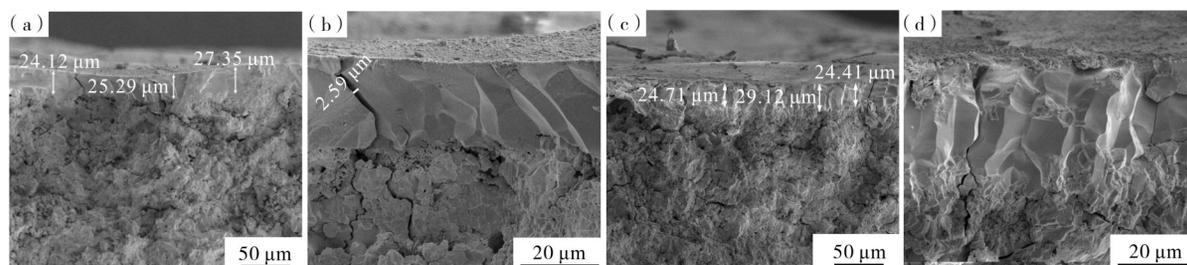
(a)—C1 coating;(b)—C2 coating;(c)—C3 coating.

图1 采用不同激光参数改性的YSZ涂层截面光镜照片

Figure 1 Cross sectional OM images of YSZ coatings after laser modification with different parameters

对C2和C3涂层样品进行截面SEM观察,结果如图2所示。从图2可见:C2和C3两种涂层样品的改性层厚度相差不大,且厚度较为均匀约为25—28 μm ;改性层的结构与下方的原始涂层结构差别明显,其呈现致密的柱状晶结构;改性层中存在纵向裂纹,宽度约为2.5 μm 。比较C2和C3涂层的改性层与原始涂层的界面可发现:C2涂层与原始涂层的界

面存在较多的孔隙,结合不佳;C3涂层与原始涂层的界面结合状态明显更好,呈现良好的界面匹配性。这是由于热障涂层工作时要承受冷热循环,涂层体系内部良好的界面匹配可提高涂层的热循环寿命。因此,最终优选的激光改性参数为光束长度80 mm、扫描速度8 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 。



(a)—C2涂层(低倍);(b)—C2涂层(高倍);(c)—C3涂层(低倍);(d)—C3涂层(高倍)。

(a)—C2 coating (low magnification); (b)—C2 coating (high magnification); (c)—C3 coating (low magnification); (d)—C3 coating (high magnification).

图2 采用两种不同激光参数改性的YSZ涂层断面SEM照片

Figure 2 Cross sectional SEM images of YSZ coatings after laser modification with two different parameters

2.2 激光改性热障涂层结构特征与抗CMAS性能

采用优选的参数对YSZ热障涂层进行激光表面改性,得到的样品的宏观形貌如图3所示。从图3可见,在改性涂层的表面可隐约观察到激光作用的痕迹,这些痕迹在涂层表面分布均匀。

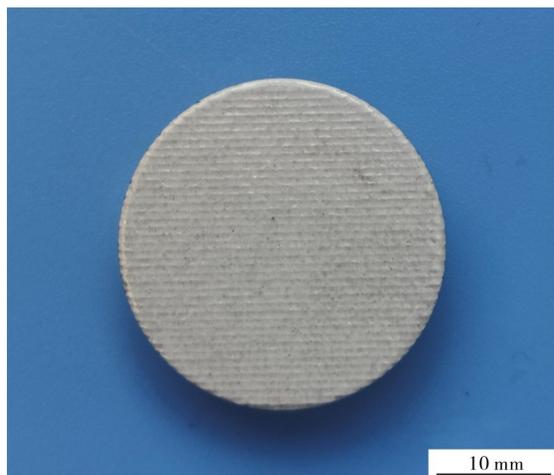
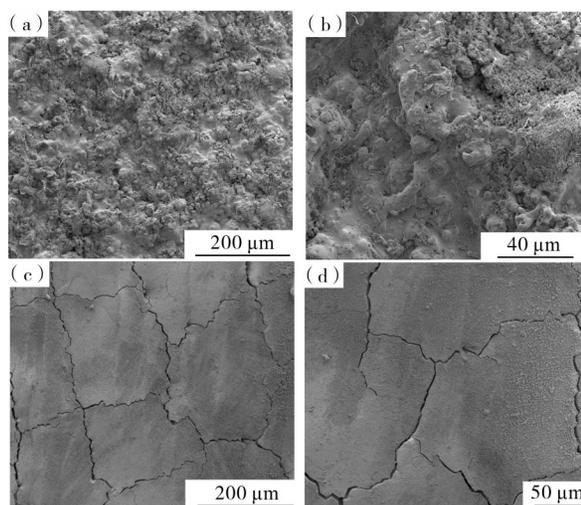


图3 采用优化的参数制备的激光表面改性YSZ涂层试样

Figure 3 Macro image of YSZ coating sample after laser modification with the optimized parameter

原始涂层和改性涂层的表面微观形貌如图4所示。从图4(a)和(b)原始涂层的表面SEM照片可发现,涂层表面分为光滑区和粗糙区。光滑区域是由等离子喷涂过程中熔融颗粒沉积而形成的,而粗糙区是由喷涂过程中未能完全熔融的呈半熔融态的

颗粒高速撞击基体并与其结合而形成的。改性后的涂层表面如图4(c)和(d)所示。从图4(c)和(d)可见,与原始涂层相比,改性涂层的表面更加光滑,粗糙区域完全消失。这主要是由于涂层表面经过激光作用,使得构成粗糙区域的小颗粒重新熔融。特别值得关注,改性涂层表面存在许多裂纹,这些裂纹的形成与改性层的形成机制密切相关。热障涂层受到激光作用而吸收能量,使得表层熔化并致密化,当激



(a)—YSZ涂层(低倍);(b)—YSZ涂层(高倍);(c)—改性YSZ涂层(低倍);(d)—改性YSZ涂层(高倍)。

(a)—YSZ coating (low magnification); (b)—YSZ coating (high magnification); (c)—modified YSZ coating (low magnification); (d)—modified YSZ coating (high magnification).

图4 制备态和激光改性YSZ涂层表面形貌SEM照片

Figure 4 Surface morphologies of the as-sprayed and laser modified YSZ coatings

光热源撤离时形成的致密层在冷却过程中会产生较大应力,从而导致改性层中形成纵向裂纹。由于改性层的结构与下方原始涂层存在较大差异,在冷热循环过程中,改性层/原始涂层的界面会产生失配现象。当改性层中存在纵向裂纹时,这些裂纹有助于提高改性层的应变容限,降低改性层/原始涂层的界面失配度,从而有助于改性涂层的热循环稳定性。但同时,这些纵向裂纹的存在也会对改性涂层的抗熔融CMAS腐蚀性能有影响。

图5为原始YSZ涂层以及激光改性YSZ涂层在1250℃下CMAS腐蚀4h的XRD图谱。从图5可见,原始涂层和激光改性涂层除了存在较多的 t' -ZrO₂相衍射峰外,还出现了较为明显的 m -ZrO₂

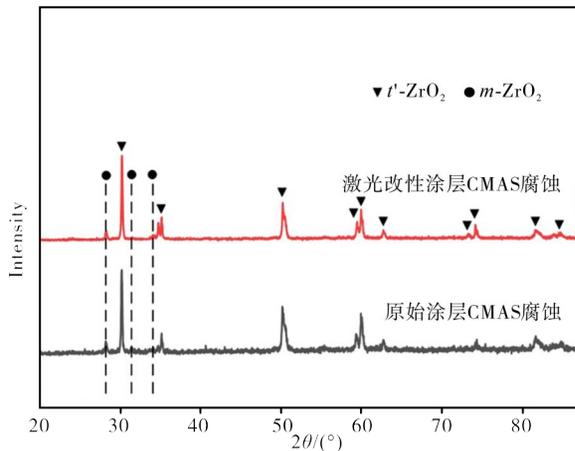
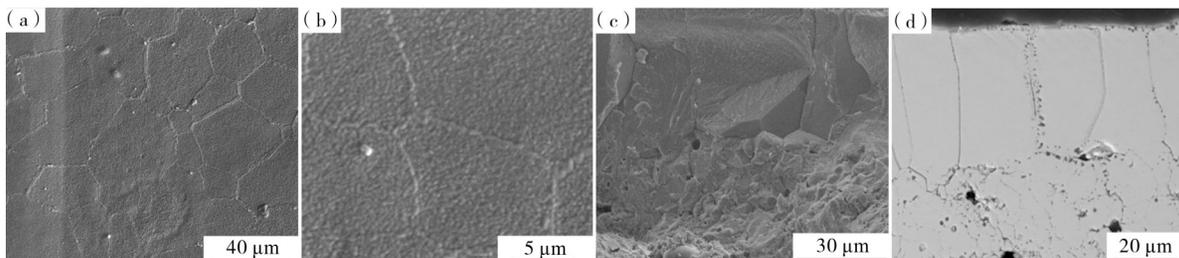


图5 原始YSZ涂层和激光改性YSZ涂层CMAS腐蚀后的XRD图谱

Figure 5 XRD patterns of the as-sprayed and CMAS corroded YSZ coatings



(a)—表面(低倍);(b)—表面(高倍);(c)—断面;(d)—截面。

(a)—surface (low magnification); (b)—surface (high magnification); (c)—fracture section; (d)—cross section.

图6 激光改性YSZ涂层CMAS腐蚀后的表面和截/断面SEM照片

Figure 6 Surface and cross-section SEM images of laser modified YSZ coatings after CMAS corrosion

3 结论

(1)激光作用在热障涂层表面可使之致密化,形成具有柱状晶结构的改性层。改性层中分布有纵向裂纹,有助于提高改性层/原始涂层的界面匹配性。

(2)激光参数影响着改性层的厚度、与原始涂层界面结合状态、纵向裂纹分布,优选的激光参数为

相衍射峰。 m -ZrO₂相衍射峰的产生,是因YSZ涂层遭受了CMAS腐蚀。与原始涂层相比,激光改性涂层表面检测的 m 相衍射峰较弱,说明产生的 m -ZrO₂相比较少,在相同的CMAS腐蚀条件下改性涂层的 t' -ZrO₂相稳定性更佳。

图6(a)和(b)为激光改性YSZ涂层经CMAS腐蚀后的表面微观形貌。从图6(a)和(b)可见,经过CMAS腐蚀后改性涂层中的裂纹轮廓依然可见,但裂纹宽度大大减小。从图6(b)可见,改性涂层中的裂纹似乎被弥合了,且改性涂层表面变得不再光滑,而是出现许多小颗粒。表明,激光改性YSZ涂层表面受到了CMAS的腐蚀,这些小颗粒就是腐蚀形成的 m -ZrO₂。由于 t' -ZrO₂变成 m -ZrO₂会伴随3%—5%的体积膨胀,使得改性涂层中的纵向裂纹宽度减小。图6(c)为CMAS腐蚀后改性YSZ涂层的断面SEM图。从图6(c)可见:改性层依然保持柱状晶结构,且柱晶内部完整,几乎观察不到CMAS破坏的痕迹;柱晶与下方原始涂层的界面基本完好,未出现明显的裂纹,下方涂层基本保持了等离子喷涂涂层的层状结构特征。由于等离子喷涂YSZ涂层的抗CMAS腐蚀性能极低,经过1250℃×2h腐蚀后,涂层基本上被破坏殆尽^[12-13]。因此,对上述涂层样品截面进行磨抛(见图6(d)),观察改性后涂层抗CMAS腐蚀性能。从图6(d)可见,在改性涂层的表面、纵向裂纹边缘及改性层/原始涂层界面处,均出现了一些CMAS腐蚀痕迹,但是改性涂层基本上保持了内部微观结构的完整。表明,经激光改性后YSZ涂层的抗CMAS腐蚀性能大幅提高。

光频率40 Hz、激光功率4 W、光束长度80 mm、扫描速度8 mm·s⁻¹。

(3)激光改性YSZ涂层表面更光滑,在CMAS作用下(1250℃×4h)改性涂层的相稳定性、结构稳定性均比原始涂层好,体现出了良好的抗CMAS性能。

(4)后续的研究应集中于改性层的结构设计与纵向裂纹精准控制方面,避免熔融CMAS通过纵向裂纹内渗。

参考文献:

- [1] GUO H B, GONG S K, XU H B. Progress in thermal barrier coatings for advanced aeroengines [J]. *Materials China*, 2009, 28(9-10): 18-26.
- [2] 赵云松, 张迈, 戴建伟, 等. 航空发动机涡轮叶片热障涂层研究进展[J]. *材料导报*, 2023, 37(6): 21040168-21040175.
- [3] DAROLIA R. Thermal barrier coatings technology: Critical review, progress update, remaining challenges and prospects [J]. *International Materials Reviews*, 2013, 58(6): 315-348.
- [4] 郭洪波, 宫声凯, 徐惠彬. 新型高温/超高温热障涂层及制备技术研究进展[J]. *航空学报*, 2014, 35(10): 2722-2732.
- [5] 魏晓东, 侯国梁, 赵荻, 等. 氧化物掺杂YSZ热障涂层的最新研究进展[J]. *表面技术*, 2020, 49(6): 92-103.
- [6] SMIALEK J L, ARCHER F A, GARLICK R G. Turbine airfoil degradation in the persian gulf war [J]. *Journal of the Minerals*, 1994, 46(12): 39-41.
- [7] KIM J, DUNN M G, BARAN A J, et al. Deposition of volcanic materials in the hot sections of two gas turbine engines [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1993, 115(3): 641-651.
- [8] GUO L, HE W T, CHEN W B, et al. Progress on high-temperature protective coatings for aero-engines [J]. *Surface Science and Technology*, 2023, 1: 1-39.
- [9] 郭磊, 高远, 叶福兴, 等. 航空发动机热障涂层的CMAS腐蚀行为与防护方法[J]. *金属学报*, 2021, 57(9): 1184-1198.
- [10] LEVI C G, HUTCHINSON J W, VIDAL-SÉTIF M H, et al. Environmental degradation of thermal-barrier coatings by molten deposits [J]. *MRS Bulletin*, 2012, 37(10): 932-941.
- [11] ZHANG B P, SONG W J, GUO H B. Wetting, infiltration and interaction behavior of CMAS towards columnar YSZ coatings deposited by plasma spray physical vapor [J]. *Journal of European Ceramic Society*, 2018, 38(10): 3564-3572.
- [12] GUO L, ZHANG X M, XIN H. Corrosiveness of CMAS and CMAS+salt (NaVO_3 , Na_2SO_4 and NaCl) to YSZ thermal barrier coating materials [J]. *Corrosion Science*, 2022, 209: 110738.
- [13] GUO L, ZHANG X M, LIU M G, et al. CMAS+sea salt corrosion to thermal barrier coatings [J]. *Corrosion Science*, 2023, 218: 111172.
- [14] KRÄMER S, FAULHABER S, CHAMBERS M, et al. Mechanisms of cracking and delamination within thick thermal barrier systems in aeroengines subject to calcium-magnesium-alumino-silicate (CMAS) penetration [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2008, 490: 26-35.
- [15] WU J, GUO H B, GAO Y Z, et al. Microstructure and thermophysical properties of yttria stabilized zirconia coatings with CMAS deposits [J]. *Journal of European Ceramic Society*, 2011, 31: 1881-1888.
- [16] LI D X, JIANG P, GAO R H, et al. Experimental and numerical investigation on the thermal and mechanical behaviours of thermal barrier coatings exposed to CMAS corrosion [J]. *Journal of Advanced Ceramics*, 2021, 10: 551-564.
- [17] WANG L, GUO L, LI Z M, et al. Protectiveness of Pt and $\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ layers on EB-PVD YSZ thermal barrier coatings against calcium-magnesium-alumina-silicate (CMAS) attack [J]. *Ceramics International*, 2015, 41: 11662-11669.
- [18] FAN W, BAI Y, LIU Y F, et al. Corrosion behavior of Sc_2O_3 - Y_2O_3 co-stabilized ZrO_2 thermal barrier coatings with CMAS attack [J]. *Ceramics International*, 2019, 45(12): 15763-15767.
- [19] WANG R, DONG T S, WANG H D, et al. CMAS corrosion resistance in high temperature and rainwater environment of double-layer thermal barrier coatings modified by rare earth [J]. *Ceramics International*, 2019, 45(14): 17409-17419.
- [20] OZGURLUK Y, DOLEKER K M, AHLATCI H, et al. Investigation of calcium-magnesium-alumino-silicate (CMAS) resistance and hot corrosion behavior of YSZ and $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ /YSZ thermal barrier coatings (TBCs) produced with CGDS method [J]. *Surface and Coating Technology*, 2021, 411: 126969.
- [21] WANG B, JIANG C Y, WU Y T, et al. Effect of microstructure on CMAS corrosion behavior of $(\text{Gd}_{0.8}\text{Yb}_{0.2})_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ /YSZ thermal barrier coatings prepared by EB-PVD [J]. *Corrosion Science*, 2023, 223: 111477.
- [22] WANG F, GUO L, WANG C M, et al. Calcium-magnesium-alumina-silicate (CMAS) resistance characteristics of LnPO_4 ($\text{Ln}=\text{Nd}, \text{Sm}, \text{Gd}$) thermal barrier oxides [J]. *Journal of European Ceramic Society*, 2017, 37: 289-296.
- [23] GUO L, FENG J Y, MENG S J. Corrosion resistance of GdPO_4 thermal barrier coating candidate in the presence of CMAS+ NaVO_3 and CMAS [J]. *Corrosion Science*, 2022, 208: 110628.
- [24] LI Y Y, YU Y, GUO L, et al. Stress distribution around the reaction layer of CMAS and GdPO_4 thermal

- barrier coatings based on finite element analysis [J]. *Surface and Coating Technology*, 2022, 445:128701.
- [25] MENG S J, GUO L, GUO H B, et al. CMAS-phobic and infiltration inhibiting protective layer material for thermal barrier coatings [J]. *Journal of Advanced Ceramics*, 2024, 13(8): 1254-1267.
- [26] ARSHAD A, YAJID M A M, IDRIS M H. Microstructural characterization of modified plasma spray LZ/YSZ thermal barrier coating by laser glazing [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 39: 941-946.
- [27] FAN Z J, WANG R J, MEI X S, et al. Microstructure evolution in yttria stabilized zirconia during laser hybrid induction modification [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 810: 151898.
- [28] GHASEMI R, SHOJA-RAZAVI R, MOZAFARINIA R. Laser glazing of plasma-sprayed nanostructured yttria stabilized zirconia thermal barrier coatings [J]. *Ceramics International*, 2013, 39 (8) : 9483-9490.
- [29] AHMADI-PIDANI R, SHOJA-RAZAVI R, MOZAFARINIA R, et al. Improving the hot corrosion resistance of plasma sprayed ceria-yttria stabilized zirconia thermal barrier coatings by laser surface treatment [J]. *Mater Design*, 2014, 57: 336-341.
- [30] GUO L, LI M Z, YE F X. Phase stability and thermal conductivity of RE₂O₃ (RE=La, Nd, Gd, Yb) and Yb₂O₃ co-doped Y₂O₃ stabilized ZrO₂ ceramics [J]. *Ceramics International*, 2016, 42(6): 7360-7365.
- [31] 郭磊, 辛会, 张馨木, 等. 激光表面改性对熔盐环境下热障涂层相稳定性和微观结构的影响[J]. *表面技术*, 2020, 49(1): 41 - 48.
- [32] YAN Z, GUO L, LI Z H, et al. Effects of laser glazing on CMAS corrosion behavior of Y₂O₃ stabilized ZrO₂ thermal barrier coatings [J]. *Corrosion Science*, 2019, 157: 450-461.
- [33] 韩志勇, 赖浩瀚, 张权, 等. 热障涂层抗CMAS腐蚀的表面改性研究进展[J]. *表面技术*, 2024, 53(16): 35-50.

Laser Modification of Thermal Barrier Coating Surfaces and Its Effects on the CMAS Resistance of the Coating

CAO Gaoming, WU Jing*

(School of Materials Science and Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159)

Abstract: Thermal barrier coating is one of the three key technologies for aircraft engine turbine blades, which can significantly increase the operating temperature of turbine blades. Y₂O₃ partially stabilized ZrO₂ (YSZ) thermal barrier coating is the most widely used currently. However, it is vulnerable to corrosion by environmental deposits (mainly composed of CaO, MgO, Al₂O₃, and SiO₂, abbreviated as CMAS). Under the action of CMAS, YSZ coating undergoes phase transformation and structural damage, leading to reducing its service life significantly. To improve the phase and structural stability of YSZ thermal barrier coatings under CMAS, and enhance their CMAS resistance, YSZ TBCs were prepared on the surface of a nickel based high-temperature alloy substrate, and their surfaces were modified using a pulsed Nd:YAG laser system. Laser parameters were optimized to obtain desirable laser modified TBC samples. The coating samples were subjected to CMAS corrosion tests under 1 250 °C for 4 h. X-ray diffraction (XRD), optical electron microscopy (OM) and scanning electron microscopy (SEM) were used to characterize the phase composition, surface morphology, microstructure of the modified layer, and the interface between the modified layer and the original coating. The microstructure characteristics and CMAS resistance of the modified coating were analyzed. After laser modification, a modified layer with a columnar crystal structure was formed on the surface of the YSZ coating. The thickness of the modified layer and its bonding with the original coating were affected by the laser modification parameters. Through the optimization process, the optimal laser parameters were obtained with a beam length of 80 mm and a scanning speed of 8 mm·s⁻¹. The laser modified coating has a smooth surface and some longitudinal cracks, which helps to improve the interface matching between the modified layer and the original coating. Under the action of CMAS, laser modified YSZ coatings exhibit good phase stability and structural stability. Therefore, laser surface modification can improve the CMAS resistance of YSZ TBCs, but the degree of the improvement depends on the thickness and microstructure of the modified layer, especially the distribution of longitudinal cracks.

Keywords: thermal barrier coatings (TBCs); CMAS; YSZ; surface modification; laser parameter optimization; phase composition; microstructure; longitudinal cracks