

掺杂相对ZrB₂陶瓷涂层抗激光烧蚀性能的影响

贺敏波 任伟艳 杨雨川 郭志华 胡月宏

Effect of doping phase on laser ablation resistance of ZrB₂ ceramic coatings

HE Minbo, REN Weiyan, YANG Yuchuan, WU Zhihua, HU Yuehong

引用本文:

贺敏波, 任伟艳, 杨雨川, 等. 掺杂相对ZrB₂陶瓷涂层抗激光烧蚀性能的影响[J]. 应用光学, 2023, 44(6): 1177–1184. DOI: 10.5768/JAO202344.0610003

HE Minbo, REN Weiyan, YANG Yuchuan, et al. Effect of doping phase on laser ablation resistance of ZrB₂ ceramic coatings[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(6): 1177–1184. DOI: 10.5768/JAO202344.0610003

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0610003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

气体浓度激光光谱检测温度影响修正研究

Study on temperature influence correction of gas concentration laser spectrum detection

应用光学. 2020, 41(2): 348–353 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0203002>

基于紫外刻写相移光栅的温度应力同时测量传感器

Simultaneous measurement sensor of temperature and stress based on UV lithography phase-shifted grating

应用光学. 2021, 42(1): 200–206 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0108002>

利用光斑图像特征确定飞秒激光有效烧蚀焦距

Effective ablation focus determination of femtosecond laser by using spot image feature

应用光学. 2017, 38(5): 831–836 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0507002>

波长和强度同时响应的锥形多模光纤温度传感器

Tapered multi-mode fiber temperature sensor based on simultaneous response of wavelength and intensity

应用光学. 2017, 38(2): 331–335 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0208001>

高精度光纤陀螺零位误差的磁温特性研究

Research on magnetic temperature characteristics of zero error on high precision fiber-optic gyro

应用光学. 2020, 41(1): 220–227 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0108001>

飞秒激光直写PMMA制备微流道的工艺技术研究

Research on technology with femtosecond laser direct-writing on PMMA microchannels

应用光学. 2018, 39(3): 442–446 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0307003>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2023) 06-1177-08

掺杂相对 ZrB_2 陶瓷涂层抗激光烧蚀性能的影响

贺敏波, 任伟艳, 杨雨川, 邬志华, 胡月宏

(河南大学 人工智能学院, 郑州 475000)

摘要: 耐高温陶瓷作为高熔点材料, 具有优异的高温抗烧蚀性能, 有可能满足未来抗激光防护的需求。为摸清 ZrB_2 陶瓷涂层抗激光防护性能, 采用高功率固体激光器作为测试光源, 搭建了激光烧蚀实验平台和激光耦合特性测量系统, 重点对 ZrB_2 陶瓷涂层开展了激光烧蚀实验和涂层反射率测试。实验研究了不同激光参数条件下 ZrB_2 涂层抗激光烧蚀性能, 以及掺杂相 (SiC 、 MoSi_2) 的影响。结果表明, 相比于未掺杂 ZrB_2 涂层, 掺杂后 ZrB_2 涂层抗激光烧蚀能力明显下降。分析认为掺杂相可提高 ZrB_2 涂层抗氧化性能, 但不利于发挥氧化生成物 ZrO_2 的高反射和隔热作用, 致使抗激光损伤阈值降低。激光损伤前后涂层反射率的测试结果, 也证实了 ZrO_2 的高反射率是增强 ZrB_2 涂层抗激光损伤阈值的关键。同时, 利用有限元软件建立了连续激光烧蚀下 ZrB_2 陶瓷涂层温度计算模型, 并以基底发生熔化为判据, 仿真得到了陶瓷涂层典型的抗激光烧蚀阈值参数。

关键词: 陶瓷涂层; 硼化锆; 掺杂相; 激光烧蚀; 反射率; 温度

中图分类号: TN249

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202344.0610003

Effect of doping phase on laser ablation resistance of ZrB_2 ceramic coatings

HE Minbo, REN Weiyan, YANG Yuchuan, WU Zhihua, HU Yuehong

(School of Artificial Intelligence, Henan University, Zhengzhou 475000, China)

Abstract: High temperature resistant ceramics, as high melting point materials, have excellent high-temperature ablation resistance and may meet the needs of future laser protection. In order to understand the laser protection performance of ZrB_2 ceramic coating, a high-power solid-state laser was used as the test light source, and a laser ablation experimental platform as well as laser coupling characteristic measurement system were established. The focus was on conducting laser ablation experiments and coating reflectivity tests on ZrB_2 ceramic coating. The laser ablation resistance of ZrB_2 coatings under different laser parameter conditions, and the influences of doped phases (SiC , MoSi_2) were studied by experiment. The results show that compared to the undoped ZrB_2 coating, the doped ZrB_2 coating shows a significant decrease in laser ablation resistance. The conclusion analysis suggests that the doped phase can improve the oxidation resistance of ZrB_2 coating, but it is not conducive to the high reflection and insulation effects of the oxidation product ZrO_2 , resulting in a decrease in the threshold of laser damage resistance. The reflectivity test results of the coating before and after laser damage also confirms that the high reflectivity of ZrO_2 is the key to enhancing the laser damage resistance threshold of ZrB_2 coating. Meanwhile, a temperature calculation model for ZrB_2 ceramic coating under continuous laser ablation was established by using finite element software, and the typical laser ablation threshold parameters of ceramic coatings were simulated based on the criterion of substrate melting.

Key words: ceramic coating; ZrB_2 ; doped phase; laser ablation; reflectance; temperature

收稿日期: 2023-08-16; 修回日期: 2023-09-09

基金项目: 十三五毁伤专项 (2019JHHS2)

作者简介: 贺敏波 (1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事激光辐照效应与机理研究。E-mail: hmb@stu.xjtu.edu.cn

引言

随着人们对高速飞行器关键技术的攻关与突破,高速飞行器在朝着更高速飞行方面获得了长足发展,其巡航速度亦不断提高并刷新,由早期的亚音速飞行进步到超音速飞行,甚至是近些取得突破的超高音速飞行。当这些高速飞行器以高巡航速度进入地球大气层时,飞行器表面的温度会升高并且可以达到极高的数千摄氏度,主要源于地球大气层与飞行器表面之间的剧烈摩擦产生了明显的气动加热效应,这势必导致飞行器表面会发生高温烧蚀等现象。此外,在固体火箭的发动机运转过程中,尾喷管喉衬所处的环境往往极为恶劣复杂,譬如超高温、高速气流和粒子流冲刷等复杂环境,这样的条件也容易引起高温烧蚀等不利现象的发生。在上述这些典型的高温、高热环境中,C/C复合材料由于具有卓越的耐高温、高强度等性能,故而成为了高温热防护材料的首选。但C/C复合材料因其特有的高温氧化敏感性,成为其应用的关键障碍^[1-2],因此,为解决高速飞行器、火箭等关键部位的热防护问题,竭力寻觅或制备新的耐高温抗氧化涂层具有重要的现实意义。ZrB₂作为一种超高温陶瓷材料,在高温抗烧蚀领域展现出了广阔的应用前景,主要是源于它具有高熔点、高比热和高温化学性能稳定等优良特性。为摸清ZrB₂陶瓷涂层的高温烧蚀性能,众多学者进行了大量有益的探索研究^[3-7]。研究表明,引入第二相(如SiC、MoSi₂等)可以显著改善ZrB₂陶瓷涂层的高温抗氧化性能^[8-10]。但大多数的研究条件仅仅局限于采用常规烧蚀方法^[11-12],譬如氧乙炔火焰等手段,其在激光作用下的烧蚀响应研究还相对较少^[13-17],且对其激光烧蚀机理认识仍然不足。

近些年,随着激光技术的快速发展,激光作为一种非接触的高效加热源,其热流密度愈来愈高,这对结构材料的抗激光加固与防护技术也提出了更高要求。为满足未来防护材料的需求,寻找具有高损伤阈值的材料或改进现有防护技术就变得更加迫切。因此,深入研究防护涂层在激光作用下的烧蚀规律和损伤阈值,有助于提高材料抗激光防护水平,为抗激光防护技术的发展提供坚实的理论基础和数据支持。基于此,本文采用激光烧蚀法对ZrB₂陶瓷涂层进行考核。首先搭建了基于高功率连续波固体激光器的烧蚀效应实验平台,着重开展掺杂相对ZrB₂陶瓷涂层抗激光烧蚀

性能影响研究,通过宏观和微观形貌相结合,深入剖析ZrB₂陶瓷涂层在激光下的烧蚀机理,并对比分析激光损伤前后陶瓷涂层耦合特性变化规律,以及研究建立连续激光烧蚀下ZrB₂陶瓷涂层温度计算模型。

1 实验

1.1 激光烧蚀实验

设计的实验光路示意图如图1所示,主要是用来开展ZrB₂陶瓷涂层样品激光烧蚀实验。实验所用激光光源为波长1070 nm的连续固体光纤激光器,其发出的激光束经透镜进行准直后,再经由两片微透镜组进行整形,最后经透镜聚焦后作用于实验样品前表面;实验样品前方架设红外热像仪,主要用于测量激光辐照下实验样品前表面的温升变化。实验样品为ZrB₂陶瓷涂层,采用真空等离子喷涂技术制备了无掺杂相和含有掺杂相共3种涂层样品,即ZrB₂、ZrB₂-SiC和ZrB₂-MoSi₂,其中涂层厚度约为200 μm,掺杂相的质量分数约为20%,涂层基底为2 mm厚度的钛合金。

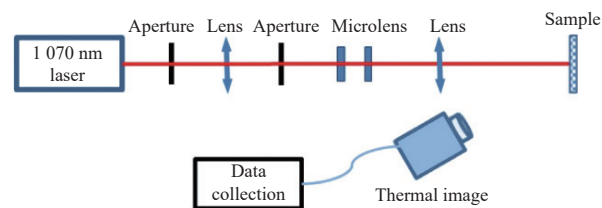


图1 实验光路示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental system

固体光纤激光器发射激光时长可通过自身电控机械快门来精确控制,确保了激光束仅在所需时间范围内作用于实验样品。因此,在激光烧蚀实验前,我们只需要关注或者控制2个参数,即到达实验样品表面的激光功率和光斑形态。本文实验过程中尽可能保持到达靶面处的激光光斑大小不变,控制或改变激光器的输出功率,从而获得实验所需的到靶激光功率密度。实验前需要测量获取实验光路系统透过率,即改变激光器输出功率,利用激光功率计测量实验靶面处的激光功率,通过线性定标计算得到光学系统透过率约为0.73。另外,在到靶激光功率较低的情况下,采用短波相机测量获取实验样品靶面处光斑形态分布,如图2所示。按照光强半高宽来计算,光斑尺寸约为7 mm×7 mm,近似看成一个均匀的方形光斑。因此,在已

知到靶激光功率和激光光斑大小的情况下,可估算给出作用于样品表面的平均激光功率密度。

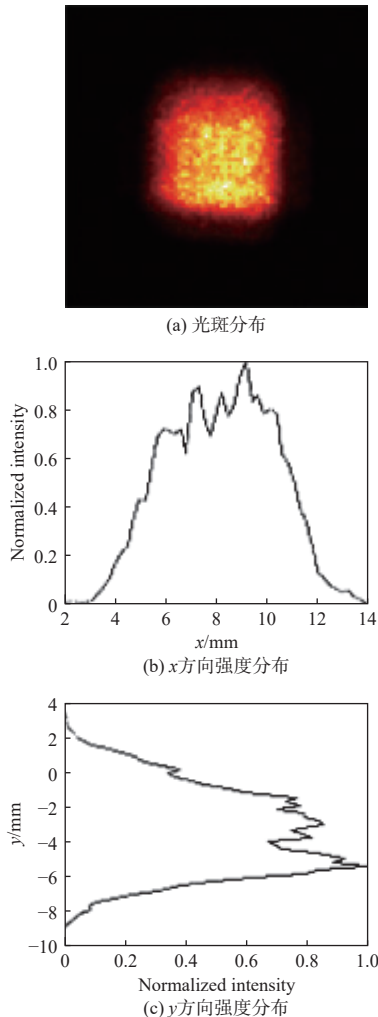


图2 靶面处激光光斑分布

Fig. 2 Laser spot distribution at target surface

1.2 激光耦合特性测量

本文陶瓷涂层样品属于不透明材料,因此仅需测量样品的反射率,即可得到样品对激光能量的耦合系数。基于此,文中搭建了陶瓷涂层样品反射率测量系统,光路示意图如图3所示。从图3可以看出,经第1个分光镜衰减后的激光束经第2个分光镜后变成两束,一束进入积分球1,由探测器1监测激光功率的稳定性,另一束进入积分球2,由探测器2探测样品的反射信号,其中数据采集系统用来记录和处理两路探测器的信号数据。在测试前需利用标准板对测试系统进行标定,而后才能计算给出测试样品的反射率。由于该测试系统不受激光器功率波动影响,因此,反射率测试结果具有很好的稳定性和一致性。

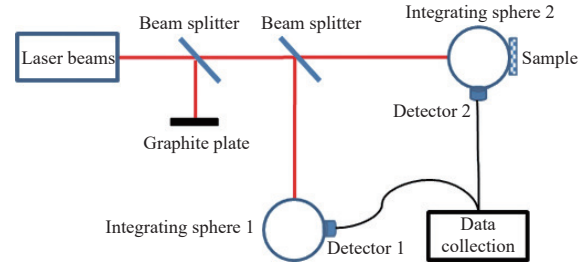


图3 反射率测量系统光路

Fig. 3 System optical path of reflectivity measurement

2 实验结果与讨论

文中通过研究不同激光功率、不同辐照时间下涂层的激光烧蚀行为,探究该陶瓷涂层的激光烧蚀机理及反射率特性变化。另外,以基底发生熔化为判据,大致给出该类陶瓷涂层的激光损伤阈值,为横向比较涂层抗激光烧蚀能力提供依据。

2.1 抗激光烧蚀性能与机理分析

图4展示了不同激光参数条件下 ZrB_2 涂层的典型烧蚀情况。由损伤形貌可知,涂层表面烧蚀形貌可化分为中心、过渡和边缘3个区域。其中,边缘区代表了未受激光辐照影响的区域,该区域颜色与样品起初的颜色基本保持一致;相比于边缘区颜色,过渡区由于受到轻微氧化而出现颜色加深;中心区则代表了发生严重激光烧蚀区域,该区域因烧蚀氧化严重而呈现白色,特别是当激光功率密度较高时中心区将出现基底熔化。由图4知,激光辐照10 s时基底已出现熔化现象,对应的功率密度高达 $1222 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$,而辐照20 s时基底刚刚出现熔化现象,对应的功率密度高达 $1162 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。

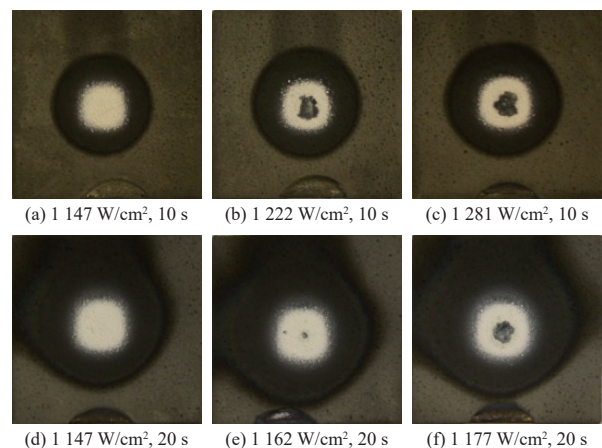
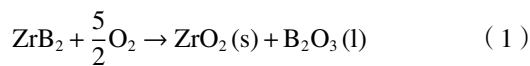


图4 ZrB_2 涂层典型损伤形貌与激光参数

Fig. 4 Damage morphologies of ZrB_2 coating with typical laser parameters

作为耐高温涂层,虽然 ZrB_2 熔点为 $3245\text{ }^\circ\text{C}$,但高温时仍容易发生氧化,主要发生如下反应:



在氧化过程中,首先生成了 ZrO_2 和处于熔融状态的 B_2O_3 ,这两种化合物共同覆盖于涂层表面,形成的覆盖层在阻隔氧气渗入方面表现出了一定的效果,能有效防止内部涂层氧化反应的继续发生^[14];然而,当温度升高到超过 B_2O_3 的挥发温度(约 $1100\text{ }^\circ\text{C}$)时, B_2O_3 会挥发并引起氧化反应加剧,内部涂层将继续氧化,最终形成白色的 ZrO_2 层;当基底界面温度达到钛合金熔化温度($1538\text{ }^\circ\text{C} \sim 1649\text{ }^\circ\text{C}$)时,基底出现熔化现象。

图5为 ZrB_2 涂层经激光辐照后的典型扫描电镜(scanning electron microscope, SEM)形貌图,其中图5(a)是损伤区域的低倍形貌,可见在损伤区域有裂纹存在,但未发现涂层脱落导致的凹坑;图5(b)是该区域的高倍形貌,结合能谱仪(energy dispersive spectrometer, EDS)结果可知,该区域主要由 ZrO_2 晶粒堆叠而成,结构疏松、存在较多气孔,未发现熔融态的 B_2O_3 存在,说明激光辐照过程使得涂层发生显著氧化,形成了疏松多孔的 ZrO_2 晶粒;从图5(c)可以看出, ZrO_2 晶粒之间存在明显的空隙。

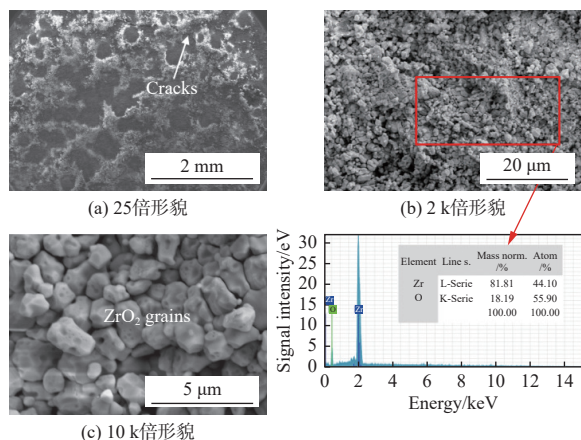


图5 ZrB_2 涂层典型损伤区域 SEM 形貌

Fig. 5 SEM morphology of ZrB_2 coating after laser irradiation

大量研究表明,以 SiC 或者 MoSi_2 作为第二相可以显著改善 ZrB_2 陶瓷涂层的抗氧化性能,究其原因是 SiC 和 MoSi_2 的氧化生成物之一 SiO_2 。在高温时,玻璃相 SiO_2 表现出良好的流动性、愈合性,使得它能够有效地将涂层表面的裂纹修复或孔洞封堵,以防止氧气的侵入,从而表现为优异的高温抗氧化性能^[8-12]。但其考核条件往往为常规烧

蚀方法,这与激光烧蚀情况有所不同。为了研究考核掺杂相对激光烧蚀性能的影响,下文又选取了 $\text{ZrB}_2\text{-SiC}$ 和 $\text{ZrB}_2\text{-MoSi}_2$ 作为比较对象。图6和图7分别为不同激光参数条件下 $\text{ZrB}_2\text{-SiC}$ 和 $\text{ZrB}_2\text{-MoSi}_2$ 涂层的典型损伤形貌。对比图4、图6和图7并分析可知,掺杂相涂层表面的白色 ZrO_2 成分明显减少,表明 SiC 和 MoSi_2 确实可以明显提高 ZrB_2 涂层的抗氧化性能,尤其是 MoSi_2 表现更为出色,但抗氧化性能的提高却带来了涂层抗激光损伤阈值的降低。由图6知,激光辐照 10 s 时基底已出现熔化现象,对应的功率密度为 1147 W/cm^2 ,而辐照 20 s 时基底出现熔化并形成鼓包现象,对应的功率密度为 $939\text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。由图7知,激光辐照 10 s 时基底已出现熔化现象,对应的功率密度为 $939\text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$,而辐照 20 s 时基底出现熔化现象,对应的功率密度为 $745\text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。

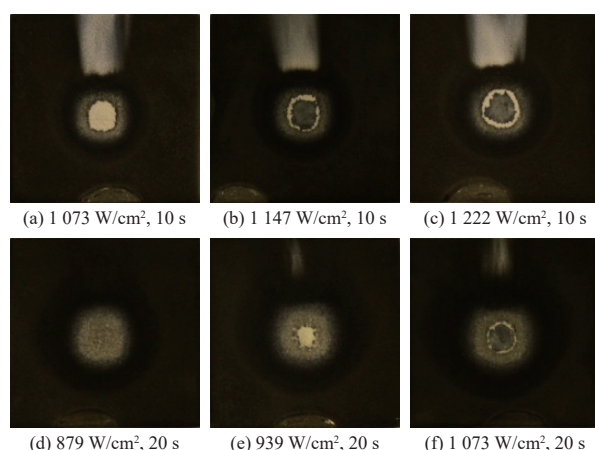


图6 $\text{ZrB}_2\text{-SiC}$ 涂层典型损伤形貌与激光参数

Fig. 6 Damage morphologies of $\text{ZrB}_2\text{-SiC}$ coating with typical laser parameters

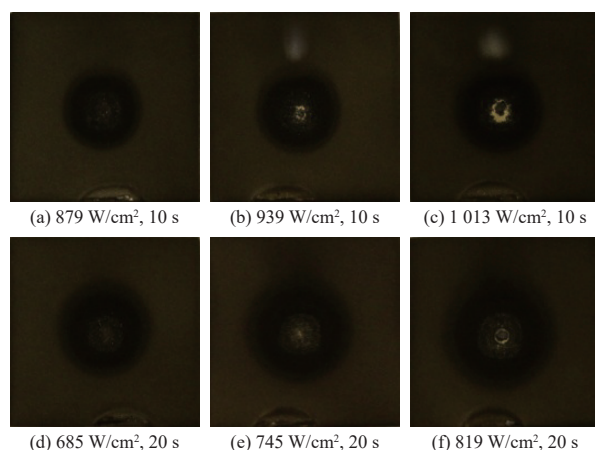


图7 $\text{ZrB}_2\text{-MoSi}_2$ 涂层典型损伤形貌与激光参数

Fig. 7 Damage morphologies of $\text{ZrB}_2\text{-MoSi}_2$ coating with typical laser parameters

图 8 为 ZrB₂-SiC 涂层经激光辐照后的典型 SEM 形貌图。图 8(a)和(b)是损伤区域的低倍形貌,可见涂层经辐照之后在损伤区域有较大的裂纹存在;图 8(c)是该区域的高倍形貌,结合 EDS 结果可知,该区域主要成分应是涂层因氧化产生的 ZrO₂ 晶粒。同时由于 Si 含量较少,未形成致密的液相 SiO₂ 层,表明掺杂相 SiC 的硅源作用并不明显。

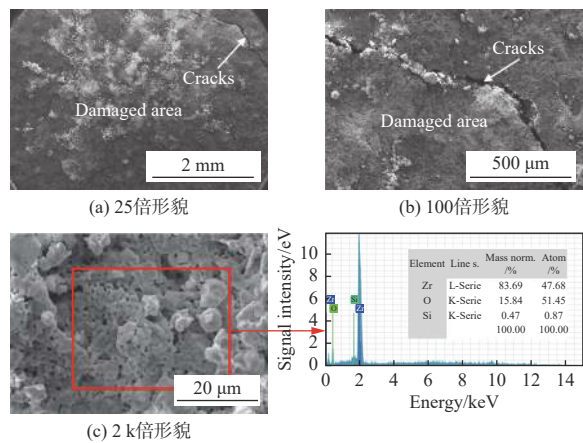


图 8 ZrB₂-SiC 涂层典型损伤区域 SEM 形貌
Fig. 8 SEM morphology of ZrB₂-SiC coating after laser irradiation

图 9 为 ZrB₂-MoSi₂ 涂层经激光辐照后的典型 SEM 形貌图。图 9(a)是损伤区域的低倍形貌,可见辐照中心区域由于基体的熔融形成了鼓包,在鼓包周围有裂纹产生;图 9(b)是辐照中心区域的高倍形貌,结合 EDS 结果可知,中心区域主要是由 ZrO₂ 颗粒堆叠而成,存在大量气孔,未发现明显的液相层,可能是由于辐照中心温度较高,液相 SiO₂ 挥发殆尽,只有 ZrO₂ 颗粒存在;图 9(c)为辐照周

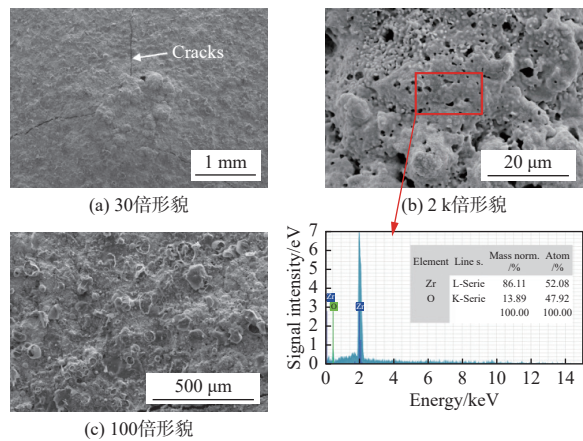


图 9 ZrB₂-MoSi₂ 涂层典型损伤区域 SEM 形貌
Fig. 9 SEM morphology of ZrB₂-MoSi₂ coating after laser irradiation

边区域的高倍形貌,由图可见涂层表面有大量气泡,并且有气泡爆裂现象,推测原因是在氧化过程中涂层表面 SiO₂ 液相层覆盖了涂层气孔,阻碍了气态 B₂O₃ 向外部挥发,导致气泡结构形成。但随着气态 B₂O₃ 的积累,最终冲破气泡,造成气泡爆裂。

2.2 激光烧蚀损伤对反射率的影响

利用图 3 所示反射率测量系统对损伤前后的涂层进行反射率测试,结果如表 1 所示。

表 1 激光损伤前后涂层反射率(@1070 nm)
Table 1 Coatings reflectance before and after laser damage (@1 070 nm)

Coatings	Reflectance	
	Before	After
ZrB ₂	0.236	0.677(white area)
		0.292(melting area)
ZrB ₂ -SiC	0.098	0.545(white area)
		0.243(melting area)
ZrB ₂ -MoSi ₂	0.171	0.072(black area)

从实验结果可知,在激光辐照损伤前,本文 3 种 ZrB₂ 涂层样品反射率均不高,具体表现为 ZrB₂ 涂层反射率略高于掺杂相 ZrB₂ 涂层,即掺杂相 ZrB₂ 涂层的激光能量耦合系数略高于 ZrB₂ 涂层,其中 ZrB₂-SiC 涂层的能量耦合系数最高,接近 90%。然而在激光辐照损伤后,ZrB₂ 涂层样品发生烧蚀氧化生成 ZrO₂,致使表面颜色变白,但 ZrB₂-MoSi₂ 涂层抗氧化性能较好,其表面颜色加深主要呈黑色。由表 1 知,氧化生成白色的 ZrO₂ 可明显提高涂层的反射率。对于白色区,ZrB₂ 涂层反射率高于 ZrB₂-SiC 涂层。相反,ZrB₂-MoSi₂ 涂层损伤区呈黑色,反射率为 7.2%,较损伤前的反射率降低了约 10%。另外,对于熔化区,ZrB₂ 涂层与 ZrB₂-SiC 的反射率较为接近。通过对比分析知,在相同激光参数条件下,ZrB₂-MoSi₂ 涂层对激光能量沉积最多,ZrB₂-SiC 涂层次之,ZrB₂ 涂层最少。由此可推断,与之相反,涂层抗激光损伤能力将逐渐增强,这与前文给出的结果一致。分析认为,掺杂相 SiC 和 MoSi₂ 虽然提高了 ZrB₂ 涂层高温抗氧化性能,但不利于发挥 ZrO₂ 的高反射和隔热作用,最终会引起涂层抗激光损伤阈值降低。

3 温度计算模型与仿真

相比于传统实验测试,数值仿真不仅可以有效缩短研究周期、降低成本,而且对于激光辐照下涂层内部传热过程以及烧蚀机理的研究更是有着重

要的意义。为节省计算时间,仿真计算时取对称边界建立 1/4 模型,并采取以下一些假设:1) 忽略固体热膨胀;2) 忽略涂层氧化反应细节;3) 不考虑基底热物性参数随温度的变化;4) 考虑界面热阻。基于此,建立三维温度计算模型如下。

在涂层材料中:

$$\rho_1(T_1)C_1(T_1)\frac{\partial T_1}{\partial t}=\nabla\cdot[k_1(T_1)\nabla T_1],(0<z<d_1)\quad(3)$$

在基底材料中:

$$\rho_2C_2\frac{\partial T_2}{\partial t}=\nabla\cdot(k_2\nabla T_2),(d_1<z<d_1+d_2)\quad(4)$$

初始条件:

$$T_1|_{t=0}=T_2|_{t=0}=T_0\quad(5)$$

边界条件:

$$-k_1\frac{\partial T_1}{\partial z}\Big|_{z=0}=[1-R(T_1)]I(x,y)-\varepsilon\sigma(T_1^4-T_0^4)\quad(6)$$

$$-k_1\frac{\partial T_1}{\partial z}\Big|_{z=d_1}=\frac{T_2-T_1}{R_s}\quad(7)$$

$$-k_2\frac{\partial T_2}{\partial z}\Big|_{z=d_1}=\frac{T_1-T_2}{R_s}\quad(8)$$

$$-k_2\frac{\partial T_2}{\partial z}\Big|_{z=d_1+d_2}=0\quad(9)$$

式中: ρ_1 、 C_1 和 k_1 分别为涂层的密度、热容和热导率,它们均是温度的函数; ρ_2 、 C_2 和 k_2 分别为基底的密度、热容和热导率; T_1 和 T_2 分别为涂层和基底的温度; d_1 和 d_2 分别为涂层和基底的厚度; T_0 为环境温度; R 为涂层对激光能量的反射率,是温度的函数; I 为激光功率密度; ε 为涂层发射率; σ 为斯忒藩-玻尔兹曼常数; R_s 为涂层与基底界面处的热阻。

相关材料热物性参数如表 2 所示,涂层热物性参数主要是结合氧化过程,由 ZrB_2 和 ZrO_2 的热物性参数依据温度插值获得。在激光辐照过程中,反射率变化是结合氧化过程依据实测值进行温度插值获得。计算时采取的界面热阻修正范围是 $1\times 10^{-6}\text{ m}^2\text{K/W}\sim 3\times 10^{-5}\text{ m}^2\text{K/W}$ 。

表 2 材料热物性参数

Table 2 Thermal physical parameters of material

Material	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$C/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	$k/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$
ZrB_2	6090	760	83
ZrO_2	4780	457	1.7
Titanium alloy	4500	703	11.8

为与实验结果比较,仿真参数采用实验值:激光功率密度 $1222\text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$,光斑大小 7 mm ,辐照时间 10 s 。 ZrB_2 陶瓷涂层温度仿真计算结果与实验

结果如图 10 所示,图中“—□—”为陶瓷涂层表面实测温度,实线为陶瓷涂层表面仿真温度,虚线为钛合金基底上表面仿真温度,水平虚线代表钛合金熔点温度(选取 $1649\text{ }^\circ\text{C}$)。由图 10 可知,在激光辐照过程中,仿真模拟结果与实验结果在趋势上具有较好的一致性,表明本文温度模型具有一定合理性。为进一步开展 ZrB_2 陶瓷涂层抗激光烧蚀阈值研究提供仿真技术途径。

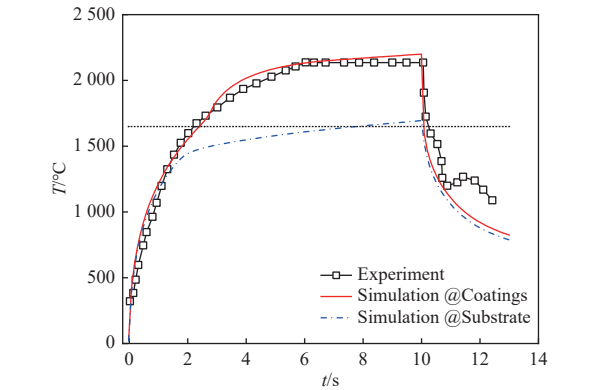


图 10 ZrB_2 涂层温度结果比较

Fig. 10 Temperature results comparison of ZrB_2 coating

基于该温度计算模型,本文以基底钛合金达到熔化温度(取 $1649\text{ }^\circ\text{C}$)为损伤阈值判据,通过仿真得到了不同激光辐照时长下陶瓷涂层发生损伤所对应的功率密度(详见表 3),除激光辐照时长 10 s 和 20 s 的实验工况外,还仿真给出了激光辐照时长 5 s 时陶瓷涂层参考损伤阈值。然而,真正的物理过程往往牵连太多的因素,再复杂的模型也只能描述比较重要的方面,即使模型包含许多参数,也难以完全表述样品或实验现象的真实特性。

表 3 陶瓷涂层激光损伤阈值仿真结果

Table 3 Simulation results of laser damage threshold for ceramic coatings

Sample	Irradiation duration/s	Experimental result/($\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$)	Simulation result/($\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$)
ZrB_2	5	—	~1340
	10	~1222	~1200
	20	~1162	~1150
$\text{ZrB}_2\text{-SiC}$	5	—	~1300
	10	~1147	~1100
	20	~939	~900
$\text{ZrB}_2\text{-MoSi}_2$	5	—	~1150
	10	~939	~930
	20	~745	~700

4 结论

文中搭建了激光烧蚀效应测试平台和积分球法反射率测量系统, 通过宏观与微观形貌分析相结合, 研究了 ZrB₂ 涂层抗激光损伤性能, 并考察了掺杂相 SiC 和 MoSi₂ 对 ZrB₂ 涂层烧蚀性能的影响, 以及烧蚀损伤对涂层反射特性的影响。实验结果表明, 相比于未掺杂 ZrB₂ 涂层, 掺杂后 ZrB₂ 涂层的抗激光烧蚀能力明显下降, 主要是掺杂相可提高 ZrB₂ 涂层抗氧化性能, 但不利于发挥氧化生成物 ZrO₂ 的高反射和隔热作用, 致使抗激光损伤阈值降低。值得说明的是, 激光烧蚀与常规恒定高温或净热流密度烧蚀不同, 激光加载的净热流密度与材料的能量耦合系数密切相关。最后, 通过简化物理模型, 基于有限元法建立了连续激光辐照下 ZrB₂ 涂层的温度计算模型, 仿真得到了不同激光辐照时长下陶瓷涂层的可能损伤阈值参数, 并初步验证了温度模型和仿真结果的合理性, 为后续进一步开展陶瓷涂层抗激光烧蚀阈值研究提供了仿真技术支持。

参考文献:

- [1] 付前刚, 张佳平, 李贺军. 抗烧蚀 C/C 复合材料研究进展[J]. 新型炭材料, 2015, 30(2): 97-105.
FU Qiangang, ZHANG Jiaping, LI Hejun. Advances in the ablation resistance of C/C composites[J]. New Carbon Materials, 2015, 30(2): 97-105.
- [2] 王俊山, 徐林, 李炜, 等. 航天领域 C/C 复合材料研究进展[J]. 宇航材料工艺, 2022, 52(2): 1-12.
WANG Junshan, XU Lin, LI Wei, et al. Research progress on C/C composites for aerospace applications[J]. Aerospace Materials & Technology, 2022, 52(2): 1-12.
- [3] 王伟志, 马国政, 韩珩, 等. 激光熔覆陶瓷涂层研究现状与展望[J]. 机械工程学报, 2023, 59(7): 92-109.
WANG Weizhi, MA Guozheng, HAN Heng, et al. Research status and prospect of laser cladding ceramic coatings[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(7): 92-109.
- [4] 何江怡. ZrB₂ 及其复合陶瓷的高温抗氧化性能[J]. 宇航材料工艺, 2015, 45(3): 1-6.
HE Jiangyi. High temperature oxidation resistance of ZrB₂ and its composites[J]. Aerospace Materials & Technology, 2015, 45(3): 1-6.
- [5] 刘雨蒙, 郝建洁, 李佳艳, 等. C/C 复合材料表面 ZrB₂ 基陶瓷涂层改性及抗氧化性能研究[J]. 热喷涂技术, 2021, 13(1): 22-32.
- LIU Yumeng, HAO Jianjie, LI Jiayan, et al. Study on modification and anti-oxidation performance of ZrB₂ based ceramic coating on C/C composites[J]. Thermal Spray Technology, 2021, 13(1): 22-32.
- [6] 刘晓燕, 魏春城, 吴炳辉. ZrB₂ 基超高温陶瓷抗氧化性研究进展[J]. 陶瓷学报, 2016, 37(2): 115-119.
LIU Xiaoyan, WEI Chuncheng, WU Binghui. Research progress on antioxidant activity of ZrB₂ based ultra high temperature ceramics[J]. Journal of Ceramics, 2016, 37(2): 115-119.
- [7] 刘子京, 樊坤阳, 黄淙, 等. C/C 复合材料 ZrB₂ 基超高温陶瓷涂层的研究进展[J]. 材料科学与工艺, 2022, 30(5): 69-81.
LIU Zijiang, FAN Kunyang, HUANG Cong, et al. Research progress of ZrB₂ based ultra-high-temperature ceramic coatings on C/C composites[J]. Materials Science and Technology, 2022, 30(5): 69-81.
- [8] 毛金元, 刘敏, 毛杰, 等. 等离子喷涂制备 ZrB₂-MoSi₂ 复合涂层及其抗氧化性能[J]. 无机材料学报, 2015, 30(3): 282-286.
MAO Jinyuan, LIU Min, MAO Jie, et al. Oxidation-resistance of ZrB₂-MoSi₂ composite coatings prepared by atmospheric plasma spraying[J]. Journal of Inorganic Materials, 2015, 30(3): 282-286.
- [9] 柳彦博. 等离子喷涂 ZrB₂/SiC 涂层微结构控制与抗烧蚀性能表征[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
LIU Yanbo. Microstructure control and ablation resistance characterization of plasma sprayed ZrB₂/SiC coating[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015.
- [10] 周海军, 张翔宇, 高乐, 等. ZrB₂-SiC 超高温陶瓷涂层的抗烧蚀性能研究[J]. 无机材料学报, 2013, 28(3): 256-260.
ZHOU Haijun, ZHANG Xiangyu, GAO Le, et al. Ablation properties of ZrB₂-SiC ultra-high temperature ceramic coatings[J]. Journal of Inorganic Materials, 2013, 28(3): 256-260.
- [11] 王佳文, 刘敏, 邓春明, 等. 等离子喷涂制备 ZrB₂-SiC 涂层及其抗氧-丙烷焰流烧蚀性能[J]. 中国表面工程, 2016, 29(4): 103-110.
WANG Jiawen, LIU Min, DENG Chunming, et al. Ablation-resistance of ZrB₂-SiC coating under oxygen-propane torch flame prepared by atmospheric plasma spraying[J]. China Surface Engineering, 2016, 29(4): 103-110.

- [12] 文波, 马康智, 倪立勇, 等. 低压等离子喷涂 $\text{ZrB}_2\text{-SiC}$ 复合涂层烧蚀机理研究[J]. 热喷涂技术, 2016, 8(3): 30-35.
- WEN Bo, MA Kangzhi, NI Liyong, et al. The research on ablation mechanism of $\text{ZrB}_2\text{-SiC}$ coating prepared by low pressure plasma spraying (LPPS)[J]. Thermal Spray Technology, 2016, 8(3): 30-35.
- [13] 严振宇. ZrB_2 基复合材料在强激光作用下的烧蚀机理研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2014.
- YAN Zhenyu. Study on ablation mechanism of ZrB_2 based composites under intense laser[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2014.
- [14] 徐强, 邵正山, 朱时珍, 等. $\text{ZrB}_2\text{-ZrC}$ 超高温陶瓷激光烧蚀行为研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2015, 44(增刊1): 533-536.
- XU Qiang, SHAO Zhengshan, ZHU Shizhen, et al. Laser ablation behavior of $\text{ZrB}_2\text{-ZrC}$ ultra high temperature ceramics[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2015, 44(S1): 533-536.
- [15] 张天宇, 孔斌, 陈敏孙, 等. 陶瓷涂层加固铝合金薄板的抗激光性能测试[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(6): 0606002.
- ZHANG Tianyu, KONG Bin, CHEN Minsun, et al. Anti-laser performance test of aluminum alloy plates reinforced by ceramic coating[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(6): 0606002.
- [16] 李镭昌, 魏昕. 激光熔覆复合涂层WC对裂纹产生机理影响研究[J]. 激光技术, 2023, 47(1): 52-58.
- LI Leichang, WEI Xin. Study on the effect of laser cladding composite coating and its WC on crack formation mechanism[J]. Laser Technology, 2023, 47(1): 52-58.
- [17] 朱洁旻, 赵懿, 杨振, 等. 陶瓷抗激光涂层对钛合金焊缝及凹槽区域的防护效果研究[J]. 西北工业大学学报, 2021, 39(6): 1281-1288.
- ZHU Jiemin, ZHAO Yi, YANG Zhen, et al. The damage effect of weld seam and groove area of titanium alloy with ceramic laser resistant coating[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2021, 39(6): 1281-1288.