

基于等离子喷涂的反射型激光防护涂层研究

朱锦鹏^{1,2}, 马 壮^{1,2}, 高丽红^{1,2*}, 柳彦博^{1,2}, 王富耻^{1,2}, 刘 玲^{1,2}, 朱时珍^{1,2}

(1. 北京理工大学 材料学院, 北京 100081;

2. 冲击环境材料技术国家级重点实验室, 北京 100081)

摘要: 本文首先介绍了激光武器在未来战争中的突出地位和发展现状, 阐明了高能激光束与目标材料相互作用时的热效应毁伤机理; 总结了基于等离子喷涂的反射型激光防护涂层的研究进展, 包括等离子喷涂金属涂层和陶瓷涂层的研究进展、以及各自的技术特点和防护效果, 为高能激光防护领域的研究提供了借鉴。研究表明, 控制金属涂层在激光辐照过程中的氧化现象能有效地提高涂层的激光防护性能, 同时具有优异反射性能的新型陶瓷涂层在高能激光防护领域中有较好的发展前景。

关键词: 高能激光; 激光防护; 反射材料; 等离子喷涂; 表面涂层

中图分类号: TG148 文献标识码: A doi: 10.3788/CO.20171005.0578

Reflective laser protective coating based on plasma spraying

ZHU Jin-peng^{1,2}, MA Zhuang^{1,2}, GAO Li-hong^{1,2*}, LIU Yan-bo^{1,2},
WANG Fu-chi^{1,2}, LIU Ling^{1,2}, ZHU Shi-zhen^{1,2}

(1. School of Materials Science and Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. National Key Laboratory of Science and Technology on Materials under
Shock and Impact, Beijing 100081, China)

* Corresponding author, E-mail: gaolihong@bit.edu.cn

Abstract: This paper first introduces the significant status and state-of-the-art of laser weapon in future war, discusses the thermal damage mechanism of high-energy laser beam interacting with target materials, and summarizes the research progress of reflective laser protective coating based on plasma spraying, including plasma-sprayed metallic and ceramic coatings. In addition, their individual technical characteristics and protecting performance are also analyzed, which provide a reference in research field of high-energy laser protection. The result of research shows that the control of oxidation for the metallic coating in the process of laser irradiation can effectively improve the laser protective performance. Moreover, we believe that the new ceramic coatings with excellent reflectivity will have a better development prospects in the field of high-energy laser protection.

Key words: high-energy laser; laser defense; reflective materials; plasma spraying; surface coating

1 引言

激光技术在军事上的主要应用之一是以激光束作为能量载体的各种激光武器^[1-6]。它是利用高亮度强激光束携带的巨大能量来摧毁或杀伤敌方飞机、导弹和卫星等目标的高技术新概念武器。与其它传统武器相比,具有无需提前量、打击精度高、拦截距离远、作战灵活和连续战斗力强等优势。也正是由于高能激光的这些特点,已经引起了欧美一些军事强国的极大重视,并对激光武器的研究取得了一定的进展。

高能激光束使辐照目标发生复杂的损伤破坏效应,即瞬间造成目标毁伤破坏。其毁伤机理^[7-9]主要体现在:热效应破坏,当材料与高能激光束长时间相互作用时,由于对激光能量大量吸收就会导致材料自身发生汽化,当激光强度超过材料本征的汽化阈值时,会发生激光热烧蚀现象。与此同时,材料的汽化会使部分呈凝聚态的颗粒或液滴一起被冲刷出去,从而对材料造成剥落、击穿等毁伤。

此外,高能激光的破坏形式因材料体系的不同会有很大的差异。对于金属材料^[10-12],当高能激光束作用于其表面时,材料将立刻被加热,随后熔融、气化,发生毁伤破坏。对于高分子材料^[13],在高能激光辐照区域,聚合物迅速温升、熔化、发生分子解离,即产生热烧蚀或热冲击毁伤效应,并且在辐照结束烧蚀损伤会继续加剧。对复合材料^[14-15],在高能激光作用下,其外表面发生烧蚀热解,同时出现剥离破坏现象,进而导致复合材料力学性能显著降低。

高能激光武器的发展已经对现役武器装备产生了极大的威胁,高能激光的安全与防护形势愈发紧迫,如何实现有效的激光防护已经引起各军事强国的极大重视,也是对从事高能激光防护科研人员的新的挑战。

2 高能激光防护材料的研究现状

高能激光防护目前采用的主要方式有以下几种:高反射型防护^[16],主要是利用防护材料对特

定波长的高能激光束具有良好的反射和散射性能,能够使入射激光的大部分能量被反射或散射出去,从而降低激光能量在材料上的沉积,达到保护基体的目的。热烧蚀型防护^[17],主要利用材料与高能激光相互作用时发生的热烧蚀效应,因其高的烧蚀热焓值能够消耗大量的激光能量,进而达到保护基体的目的。复合型防护^[18],即防护体系由反射层与烧蚀层或隔热层双层结构组成,综合利用高反射与热烧蚀/热障原理来实现防护效果。

目前,国外许多学者已经对高能激光防护展开了一些研究,并取得了较大的进展^[19-20]。Robert W. Milling 等人^[21]在专利中使用金属材料铝在飞机蒙皮下方做反射层,保护其免受激光破坏;Slemp 等人^[22]研制的多层式涂层,在透明的防辐射薄膜上覆盖对辐射稳定的涂层,同时在防辐射薄膜底部沉积有反射率非常高的金属层。美国通用公司开发了由石墨作为主要成分的抗激光防护材料,该材料由多层石墨薄层组成,每层石墨都能够有效地反射入射激光的能量,从而实现有效的激光防护。美国海军将含有铝颜料的有机硅高温涂料用于激光防护,因其具有优异的反射性能,该材料可在 650 °C 高温条件下起到抗激光防护作用。国内在抗高能激光防护方面的研究报道较少,主要是集中在热烧蚀型防护研究方面。李静等人^[23]以有机硅树脂、聚碳硅烷和玻璃粉为粘结剂,添加无机耐热填料制备的激光烧蚀涂层,具有良好的抗激光烧蚀及隔热性能。彭国良等人^[24]通过研发复合材料激光辐照效应的模拟程序,计算了激光强度及其稳定性对 C/SiC 陶瓷基复合材料烧蚀效率的影响。于庆春等人^[25]采用刷涂的方法制备了一种新型的片状石墨增强钡酚醛树脂基复合材料,在激光辐照过程中呈近平行的层状分布的片状石墨对入射激光起到平面反射作用,能够有效地降低激光辐照的能量沉积,具有良好的激光烧蚀性能。

3 基于等离子喷涂技术的反射型高能激光防护材料研究

现今对高能激光的反射型防护,主要利用各

种镀膜技术在材料表面形成具有抗激光辐照的薄膜,这些镀膜工艺存在效率低、受工件体积与形状限制很大和成本较高等缺点。相比较而言,等离子喷涂技术所制备的反射型高能激光防护涂层则具有良好的应用前景。北京理工大学在国内率先开展了等离子喷涂高能激光防护涂层材料的研究,并取得了可喜的进展。对于金属材料,通过等离子喷涂工艺能够实现金属涂层具有接近其块体的高反射性。对于陶瓷材料,自主设计研发了新型高反射陶瓷材料,并通过等离子喷涂工艺能够实现与金属相当的高反射性。

等离子喷涂属于热喷涂技术的一种,它是利用直流电弧电离工作气体产生的等离子焰流,将由载气送入的待喷涂粉末(金属或陶瓷)加热到熔融或半熔融状态,并使之高速撞击喷射到预先处理好的工作表面,并沉积在零件表面获得结合良好的层状致密涂层。等离子喷涂主要优点如下:等离子焰流温度高,热量相对集中,能够熔化绝大多数高熔点和硬度的粉末材料。因为等离子喷涂时的焰流喷射速度高,喷涂颗粒能够获得较大的动能,所制备的涂层具有较高的致密度。喷涂后涂层表面粗糙度低,并且可较精确的控制涂层厚度。另外,惰性气体(He、Ar、N₂等或其混合气体)作为等离子喷涂的工作气体,能有效的保护工件表面和喷涂粉末颗粒在喷涂时的高温环境中不受氧化,从而获得相结构单一的涂层。

3.1 等离子喷涂金属涂层反射材料

金属本征材料在近红外波段具有很高的理论反射率(如图 1 所示)^[26],可作为高能激光防护涂层的首选材料。但是以等离子喷涂涂层的形式在高能激光防护中应用时,不可避免的存在各种缺陷,如孔隙、界面和裂纹等,这些缺陷均可能成为激光的吸收体,将对涂层的激光反射性能产生很大的影响,因此涂层的成分、宏微观结构等调控技术对制备高反射金属涂层至关重要。

北京理工大学针对等离子喷涂金属涂层开展了系列研究,以金属 Al 为例。通过等离子喷涂工艺可以控制 Al 涂层的成分组织结构,得到高激光反射率的 Al 涂层,达到其本征反射率水平。由表 1 可知,制备的孔隙率为 1.73% 的 Al 涂层在表面粗糙度为 Ra0.56 时对 CO₂ 激光的本征反射率为

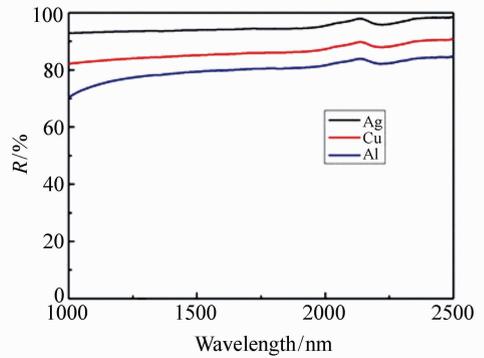


图 1 金属反射率随波长变化曲线

Fig. 1 Optical reflectivity spectra of metallic materials

98.1%, 接近块体材料激光反射率理论值 99%^[27]。这主要是由于优化后的等离子喷涂工艺能够对 Al 涂层的微观组织结构进行有效的调控,进而实现了涂层的高反射率。

表 1 等离子喷涂 Al 涂层的反射率@10.6 μm

Tab. 1 Reflectivity of plasma sprayed Al coatings at 10.6 μm

Al coating	Surface roughness	Reflectivity/%
Polished	Ra0.56	98.1
Polished	Ra4.50	87.4
Unpolished	Ra9.30	62.4

图 2 为典型金属涂层单个颗粒变形形貌。由于熔融金属的流动性好,熔滴整体向外自由的铺展,形成扁平盘状层片结构。典型的金属涂层由这种扁平状层片结构单元堆积形成,其截面金相如图 2(b) 所示,大部分区域金属变形颗粒搭接状态良好,结构致密。从明显的颗粒界面搭接处可以看到,涂层中颗粒变形形成的盘状层片结构单元的厚度大部分在 2~5 μm 的范围内,并以厚度为 4 μm 左右的层片状组织为主。由于单一变形颗粒内部与连续块体材料相似,金属涂层对激光的吸收深度可以参考金属的趋肤深度(对于 Al 约为 7.9 nm),远小于涂层厚度。当 Al 涂层表面粗糙度小于 Ra0.56 时,激光与 Al 涂层的相互作用可以等效为与 Al 涂层中单个变形颗粒的相互作用,Al 涂层能够达到相当于连续块体材料的激光反射率。

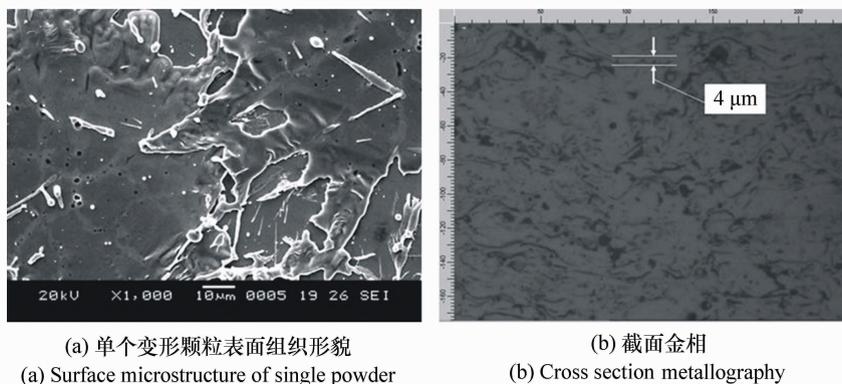


图2 典型金属涂层形貌

Fig. 2 Morphology of typical metal coating

图3给出了金属涂层反射率与激光功率密度关系的示意图。金属涂层反射率随激光功率密度的关系主要分为两个区域。在I区范围以内的激光辐照下,金属涂层吸收的激光能量所引起的温升对涂层的性能影响不明显,涂层仍表现为本征反射性能。在Al涂层反射率与激光功率密度关系图中,I区和II区的分界线约在 $2.5 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$,在此I区范围内Al涂层的反射率基本平稳。由于激光器产生光束的能量和光斑大小是随着激光能量的增加而趋于稳定。激光器在低能量输出时,激光能量偏小而光斑直径偏大,导致试验测试数据低于实际值。随着发射激光能量的增加,激光能量和光斑直径趋于稳定在设定值,试验测试的反射率数值也趋于实际值。当激光能量增加到一定值时,Al金属涂层的反射率出现拐点。

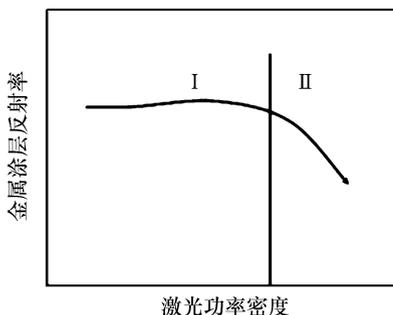


图3 Al涂层反射率随激光功率密度变化的趋势图

Fig. 3 Schematic diagram for illustrating relation between laser energy density and metallic coatings laser reflectivity

在II区范围内,金属涂层的反射率随着激光功率密度的增加而呈下降趋势。Al涂层激光反射率下降的主要原因是Al涂层表面在激光辐照过程出现了氧化。Al涂层激光辐照损伤区表面形成氧化层的反射率远小于金属Al的反射率导致了Al涂层激光反射率的突降。另外,当辐照的激光功率密度足够大时,Al涂层吸收的激光能量会使涂层表面温度增加。金属理论研究表明,对于绝大多数金属,当温度升高时会改变材料的能带结构,电子-电子以及电子-声子之间的散射作用增加使得电导率下降,同时涂层的激光反射率也随之下降^[28]。

金属涂层在未达到其激光辐照损伤阈值时仍表现出本征的高反射率特性。图4为Al涂层分别在功率密度为 $1 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$ 、 $3 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$ 和 $7 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ 的激光辐照4s后的表面宏观形貌。当激光功率密度为 $1 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$ 时,辐照后的涂层因其高反射性能而没有出现损伤效应,涂层性能稳定。当激光功率密度达到 $3 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$ 时,辐照后的Al涂层仅在光斑中心区域出现局部损伤,其微观放大照片见图5,损伤区域的能谱分析表明,其氧元素原子百分比为17%,说明涂层在激光辐照后开始出现氧化现象,该激光功率密度基本对应Al涂层的激光光学损伤阈值,也就是在Al涂层反射率与激光功率密度关系图上I区到II区的拐点位置,此时涂层的高反射性能并未出现明显下降。随着辐照在Al涂层表面上的激光功率密度越来越大,辐照后涂层表面损伤区的损伤加

剧。当辐照在 Al 涂层表面的激光功率密度达到 $7 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ 时, 损伤区的氧元素的原子百分比均在 45% 以上, 部分区域的铝元素和氧元素的原子比达到 4:6, 说明 Al 涂层在该激光功率密度辐照后明显氧化, 生成完整的 Al_2O_3 层, 进一步证明

了金属涂层表面氧化现象是导致该涂层激光反射率下降的本质因素, 即控制金属涂层在激光辐照过程中的氧化是提高金属涂层光学损伤阈值的途径之一。

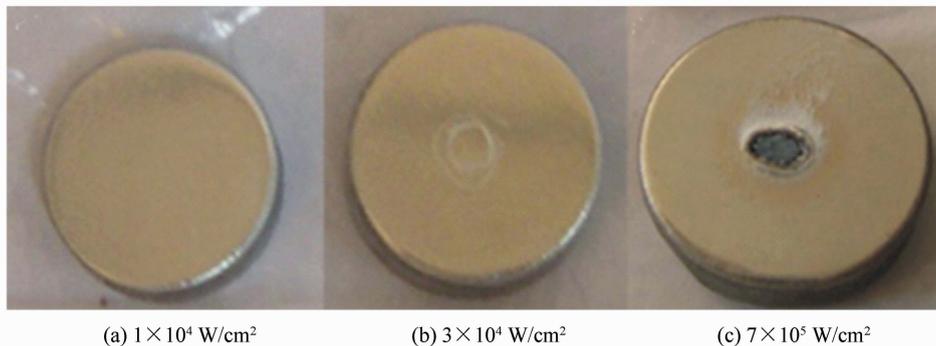


图 4 Al 涂层激光辐照损伤

Fig. 4 Macroscopical damage on Al coatings surface after laser irradiation

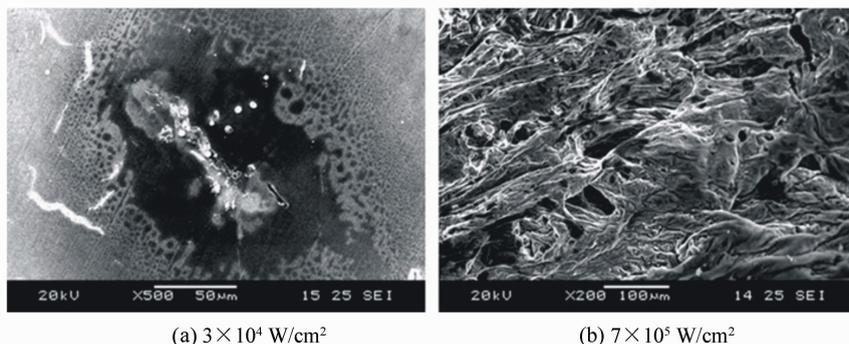


图 5 Al 涂层激光辐照损伤表面扫描电镜照片

Fig. 5 SEM micrographs of damaged Al coatings surface after laser irradiation

3.2 等离子喷涂陶瓷涂层材料

金属材料虽然对激光具有较高的反射能力, 但因其熔点相对较低, 高温时易发生氧化等缺点限制了金属材料在激光防护领域中的应用。陶瓷材料具有较高的熔点和优良的化学稳定性^[29-30], 有望成为在激光防护应用的备选材料。目前, 北京理工大学研究了等离子喷涂制备 Al_2O_3 、 ZrO_2 、 TiO_2 等传统氧化物材料的相结构对连续激光反射率的影响, 并针对更高能激光的防护需求, 开展了新型高反射陶瓷材料研究。

以 Al_2O_3 为例, $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 块体对 CO_2 连续激光的反射率仅为 $6.55\% \pm 0.20\%$, 而北京理工大学

制备的等离子喷涂 Al_2O_3 涂层对 CO_2 连续激光的反射率为 $23.65\% \pm 0.80\%$ ^[31]。通过对 Al_2O_3 涂层的物相分析, 发现等离子喷涂制备的 Al_2O_3 涂层具有两相结构: γ 相和 α 相, 前者为主相。这表明具有不同晶体结构的 Al_2O_3 呈现出对激光的不同反射能力, 即不同的能带结构导致 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 的激光反射性能优于 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 。从二者的态密度分布图(见图 6)可以看出, $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 因存在 6 eV 的禁带, 使价电子的连续跃迁受到阻碍, 而 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 则存在电子轨道交叠, 即为电子带间跃迁提供了条件, 有利于产生电子连续跃迁, 从而提高产生光子的几率, 使 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 对激光的反射率得到提高^[32]。

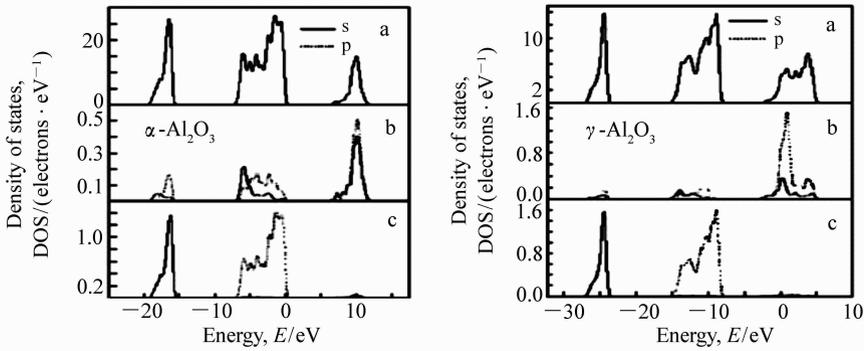


图6 Al₂O₃的总态密度和Al、O的分波态密度

Fig. 6 Total DOS(a) and partial DOS of Al(b) and O(c) atoms of Al₂O₃

在激光辐照过程中,γ-Al₂O₃涂层的反射率会随激光功率密度的增加而发生改变。在600 W/cm²功率密度辐照时,涂层仍保持着其本征反射率,但当激光功率密度增加到2 000 W/cm²时,反射率却下降到α-Al₂O₃的反射率水平,随着激光功率密度继续增加到9 000 W/cm²,其反射率水平未发生明显变化。对在功率密度为2 000 W/cm²连续激光辐照后的涂层试样进行物相分析,发现在其激光辐照损伤区的主相已转变为α-Al₂O₃。从该涂层表面损伤区域的微观结构组织(见图7)可以看到排列整齐且呈三维方向生长的α-Al₂O₃悬臂晶。这说明在激光的作用下,Al₂O₃涂层中的亚稳相γ-Al₂O₃会向稳定相α-Al₂O₃转变,这将导致涂层反射率下降。同时反射率的下将引起涂层对激光能量吸收的增加。因此,通过提高Al₂O₃

激光防护效果。

由于传统陶瓷材料的反射率普遍较低,面向未来更高功率更长时间的激光防护,现有的材料已不能满足需求,北京理工大学从“材料基因组”思想出发,探索新型高反射率陶瓷涂层原材料的研发。采用第一性原理和分子动力学方法,建立了能带结构—介电函数—反射率之间的关系,提出采用高对称性陶瓷材料并适当掺杂,可使导带移动到最低能量,使得费米面处有最多的活泼的电子,有利于带间跃迁,从而反射率增大,基于此设计出La_{1-x}Sr_xTiO_{3+δ}高反射率陶瓷材料(见图8),在近红外波段具有和金属相当的高反射率^[27]。采用高温固相反应法制备了的La_{1-x}Sr_xTiO_{3+δ}块体样品,具有层状钙钛矿晶体结构,晶粒呈层片状,其在近红外到中红外区域反射率超过了典型金属材料的反射率,为其作为新一代的激光反射涂层材料奠定基础。

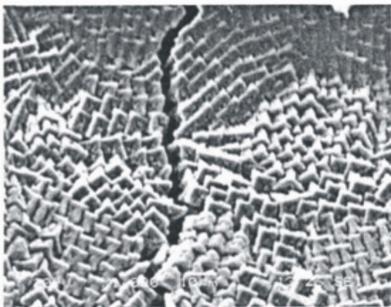


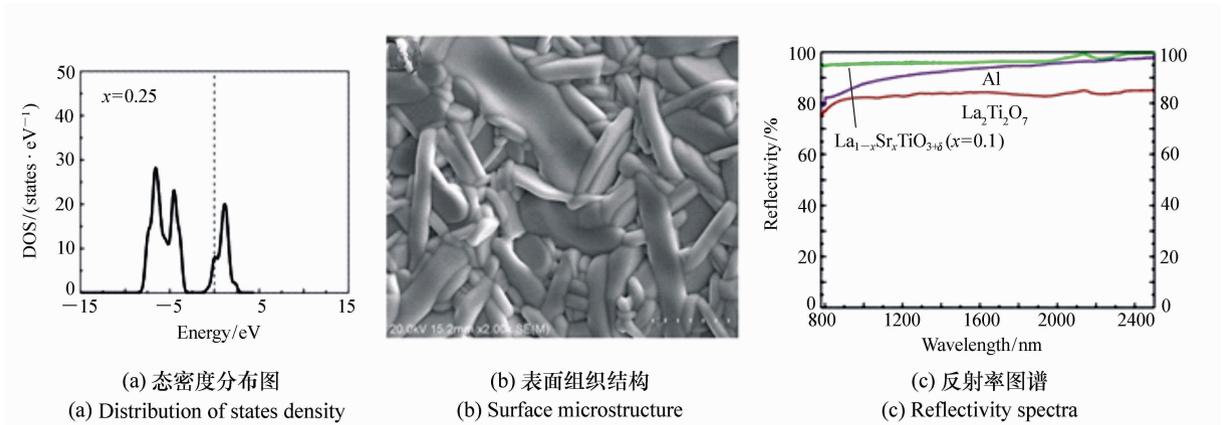
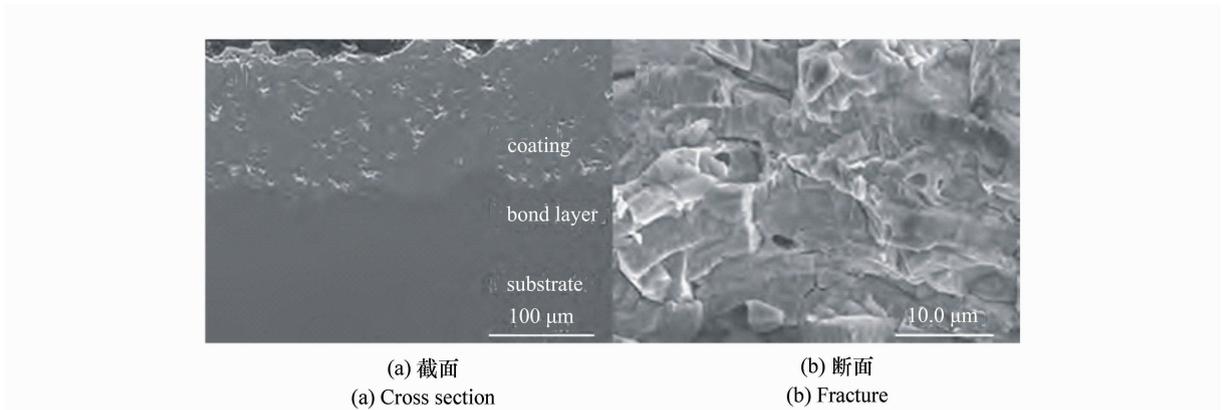
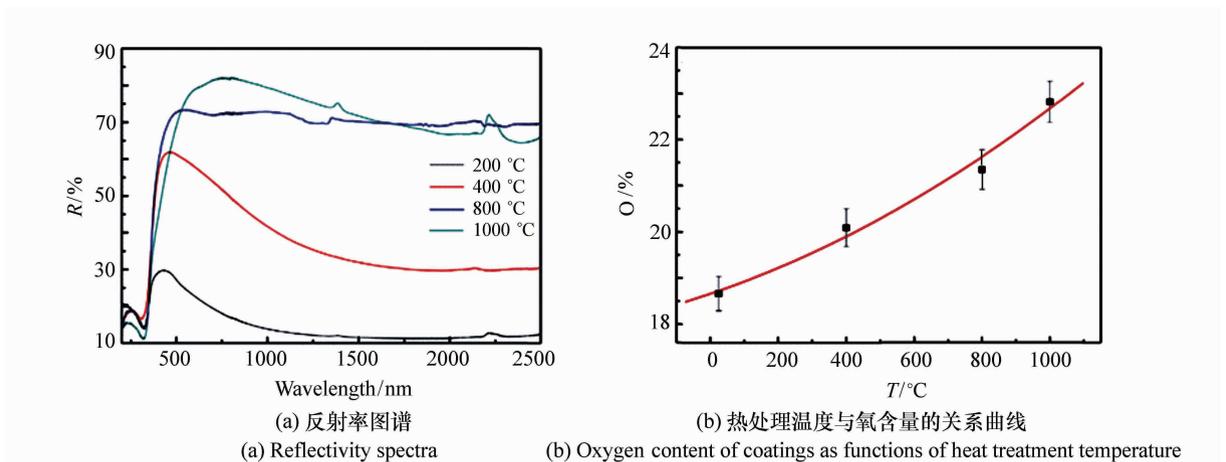
图7 Al₂O₃涂层激光辐照损伤区微观形貌

Fig. 7 Microstructure in Al₂O₃ coating's damage area irradiated by laser

通过对喷涂工艺的优化,采用等离子喷涂工艺制备的La_{1-x}Sr_xTiO_{3+δ}涂层^[30](见图9),其孔隙率低至3.5%,涂层结合强度可高达40 MPa,高于常见Al₂O₃陶瓷涂层的结合强度(约30 MPa),是传统热防护涂层ZrO₂的2~3倍。这是由于采用优化后的等离子喷涂工艺使喷涂颗粒在喷涂过程中得到充分熔融,在接下来沉积过程中得到有效铺展,进而使涂层内部层状结构之间得到了有效的紧密结合,减少了涂层中孔隙的形成,因而具有良好力学性能。

涂层亚稳相的稳定性,可以改善Al₂O₃涂层的抗

图10为等离子喷涂的La_{1-x}Sr_xTiO_{3+δ}涂层反

图 8 $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_{3+\delta}$ 块体材料Fig. 8 $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_{3+\delta}$ bulk material图 9 $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_{3+\delta}$ 涂层 SEM 形貌Fig. 9 SEM images of a plasma sprayed $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_{3+\delta}$ coating图 10 $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_{3+\delta}$ 涂层Fig. 10 $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_{3+\delta}$ coatings

射率,可以看到与块体材料本征反射率相比变化较大。这主要是因为,在等离子喷涂过程,具有高

温还原性的等离子焰流导致 $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_{3+\delta}$ 喷涂颗粒氧元素缺失,进而使制备的 $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_{3+\delta}$ 陶

瓷涂层中存在大量对光产生吸收效应的氧空位缺陷。因此,通过对该涂层采用相关后续热处理工艺,弥补了喷涂过程中的不足,使其反射率得到了显著提高,最高可达82%左右,远远高于传统氧化物陶瓷涂层的反射率。目前,正在开展 $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_{3+\delta}$ 陶瓷涂层的激光防护方面的研究,其良好的力学性能及光学性能为作为新一代的激光反射层材料奠定了基础。

4 结束语

本文介绍了激光武器的发展现状,阐明了高

能激光束热效应毁伤机理,归纳总结了基于等离子喷涂的反射型激光防护涂层的研究进展。研究表明,开展材料在激光辐照条件下的毁伤与防护研究,将对武器装备的抗激光防护技术的发展具有重要的推动作用,特别是针对硬杀伤的防护,传统的技术和材料已无法满足现代军事激光防护的要求,因此,加强激光防护新材料和新技术的研究、提高武器装备在现代高技术战争条件下的生存能力和突防能力势在必行。性能稳定的全波段高损伤阈值的反射型涂层将是新一代激光防护材料的发展趋势。

参考文献:

- [1] 任国光. 高能激光武器的现状与发展趋势[J]. 激光与光电子学进展,2008(9):62-69.
REN G G. Current situation and development trend of high energy laser weapon[J]. *Laser & Optoelectronics Process*,2008(9):62-69. (in Chinese)
- [2] 宗思光,吴荣华,曹静,等. 高能激光武器技术与应用进展[J]. 激光与光电子学进展,2013(8):158-167.
ZONG S G,WU R H,CAO J,*et al.*. Developments and trends of high energy laser weapons[J]. *Laser & Optoelectronics Process*,2013(8):158-167. (in Chinese)
- [3] 陈军燕,杨春才,马寒,等. 美军高能固体激光武器实战化的技术瓶颈[J]. 激光与红外,2016(4):381-386.
CHEN J Y,YANG CH C,MA H,*et al.*. Bottleneck of high-energy solid-state laser for practical application in the US army [J]. *Laser & Infrared*,2016(4):381-386. (in Chinese)
- [4] 张同鑫,李权. 对抗超高速武器的机载激光武器发展研究[J]. 航空科学技术,2016(3):5-8.
ZHANG T X,LI Q. Research on the development of airborne laser weapons against hypersonic weapons[J]. *Aeronautical Science & Technology*,2016(3):5-8. (in Chinese)
- [5] 任国光,伊炜伟,屈长虹. 高功率光纤激光器及其在战术激光武器中的应用[J]. 激光与红外,2015(10):1145-1151.
REN G G,YI W W,QU CH H. High-power fiber lasers and their applications in tactical laser weapons[J]. *Laser & Infrared*,2015(10):1145-1151. (in Chinese)
- [6] APOLLONOV V V. Laser weapons-myths and prospects[J]. *Chinese Optics*,2014(3):491-498.
- [7] 赵杨,张昊春,李焱,等. 激光辐照材料烧蚀特性的数值仿真[J]. 化工学报,2014(S1):426-432.
ZHAO Y,ZHANG H CH,L Y,*et al.*. Numerical simulation of laser ablation properties of irradiated material[J]. *CIESC Journal*,2014(S1):426-432. (in Chinese)
- [8] 李海燕,李四新,罗万清,等. 高超声速飞行器高温流场对激光武器毁伤效应的影响[J]. 强激光与粒子束,2010(6):1192-1196.
LI H Y,LI S X,LUO W Q,*et al.*. Effects of high temperature flowfields around hypersonic air vehicles on laser lethality [J]. *High Power Laser and Particle Beams*,2010(6):1192-1196. (in Chinese)
- [9] 罗积军,徐军,侯素霞,等. 强激光对燃烧室壳体的热-力毁伤研究[J]. 光子学报,2012(6):713-717.
LUO J J,XU J,HOU S X,*et al.*. Thermal and dynamics damage in combustion chamber case under high power laser[J]. *Acta Photonica Sinica*,2012(6):713-717. (in Chinese)
- [10] 周旭宜,王清海. 导弹抗激光毁伤分析[J]. 航空兵器,2011,4:18-20.
ZHOU X Y,WANG Q H. Missiles' counter high-energy laser damage analysis[J]. *Aero Weaponry*,2011,4:18-20. (in Chinese)
- [11] 金方圆,陈波,鄂书林,等. 皮秒激光烧蚀 Al 膜的理论分析与实验验证[J]. 发光学报,2014,35(6):754-760.

- JIN F Y, CHEN B, E SH L, *et al.*. Theory analysis and experiment verification on picosecond laser ablation of Al film [J]. *Chinese J. Luminescence*, 2014, 35(6):754-760. (in Chinese)
- [12] 韦成华, 王立君, 刘卫平, 等. 基于多层氧化膜演化的 45[#] 钢激光辐照热响应[J]. 光学精密工程, 2014, 22(8): 2062-2066.
WEI CH H, WANG L J, LIU W P, *et al.*. Thermal response of 45[#] steel coupling with multi-layer oxide film evolution by laser radiation[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(8):2062-2066. (in Chinese)
- [13] 蒙文, 韩晓飞, 李云霞, 等. 激光辐照下尼龙纤维材料的热烧蚀规律[J]. 光学精密工程, 2014, 22(8):2015-2019.
MENG W, HAN X F, LI Y X, *et al.*. Thermal ablation law of nylon materials under laser irradiation[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(8):2015-2019. (in Chinese)
- [14] 贺敏波, 马志亮, 韦成华, 等. 热解对碳纤维/环氧复合材料激光烧蚀的影响[J]. 红外与激光工程, 2016, 3: 0306001-4
HE M B, MA ZH L, WEI CH H, *et al.*. Influence of pyrolysis on the laser ablation of carbon-fiber/epoxy composite[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 3:0306001-4. (in Chinese)
- [15] 吴凌远, 李阳龙, 刘国栋, 等. 1 064 nm 纳秒激光对石墨烯的损伤效应研究[J]. 强激光与粒子束, 2015, 8:081009-4.
WU L Y, LI Y L, LIU G D, *et al.*. 1 064 nm nanosecond laser induced damage effect on graphene[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 8:081009-4. (in Chinese)
- [16] 黄强, 王丽熙, 张其土. 双波段激光防护多层反射膜的设计[J]. 光学技术, 2007(S1):147-149.
HUANG Q, WANG L X, ZHANG Q T. Design of double-wavelength reflective multi-layer coatings for laser protection [J]. *Optical Technique*, 2007(S1):147-149. (in Chinese)
- [17] 陈博, 万红, 白书欣. 石墨改性环氧树脂抗强激光辐照性能[J]. 强激光与粒子束, 2011, 10:2617-2620.
CHEN B, WANG H, BAI SH X. Laser resistance capability of graphite modified epoxy resin[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 10:2617-2620. (in Chinese)
- [18] 李雅娣, 吴平, 马喜梅, 等. 氧化锆涂层在激光防护中的应用研究[J]. 表面技术, 2008, 3:71-74.
LI Y D, WU P, MA X M, *et al.* Study on application of Zirconia coating in Laser protection[J]. *Surface Technology*, 2008, 3:71-74. (in Chinese)
- [19] 郭亚林, 梁国正, 丘哲明, 等. 激光辐照下的材料破坏和防护研究进展[J]. 材料保护, 2003, 12:8-10 + 13.
GUO Y L, LIANG G ZH, QIU ZH M, *et al.*. Damage and protection progress of materials irradiated by laser beam[J]. *Materials Protection*, 2003, 12:8-10 + 13. (in Chinese)
- [20] 金珂, 卢鹤, 曾一兵, 等. 激光辐照下热防护涂层烧蚀过程的数值分析[J]. 功能材料, 2015, 20:20128-20135.
JIN K, LU W, ZENG Y B, *et al.*. Numerical analysis on ablation process of thermal protective coating under laser irradiation[J]. *J. Functional Materials*, 2015, 20:20128-20135. (in Chinese)
- [21] MILLING R W. Laser defense and counter measure system of aircraft; US, 3986690 [P]. 1976-10-19.
- [22] SLEMP, WAYNE S. Particulate and solar radiation stable coating for spacecraft; US, 4008348 [P]. 1977-02-15.
- [23] 李静, 张金栋, 张玉忠, 等. 耐高温抗激光烧蚀涂层研制与性能表征[J]. 航空材料学报, 2014, 1:34-38.
LI J, ZHANG J D, ZHANG Y ZH, *et al.*. Development and characterization of high-temperature and laser ablation resistant coating[J]. *J. Aeronautical Materials*, 2014, 1:34-38. (in Chinese)
- [24] 彭国良, 张相华, 王玉恒, 等. 激光参数对 C/SiC 复合材料烧蚀热的影响[J]. 中国激光, 2013, 11:1103011-5.
PENG G L, ZHANG X P, WANG Y H, *et al.*. Effect of laser parameters on C/SiC composites material ablation heat[J]. *Chinese J. Lasers*, 2013, 11:1103011-5. (in Chinese)
- [25] 于庆春, 万红. 片状石墨增强树脂基复合材料的耐激光烧蚀性能研究[J]. 无机材料学报, 2012, 2:157-161.
YU Q CH, WAN H. Ablation capability of flake graphite reinforced barium-phenolic resin composite under long pulse laser irradiation[J]. *J. Inorganic Materials*, 2012, 2:157-161. (in Chinese)
- [26] ZHU J P, MA Z, GAO L H, *et al.*. Influence of microstructure on the optical property of plasma-sprayed Al, Cu, and Ag coatings[J]. *Materials and Design*, 2016, 111:192-197.

- [27] 孙承伟. 激光辐照效应[M]. 北京:国防工业出版社,2002.
SUN CH W. *Laser Irradiation Effect*[M]. Beijing:National defence of Industry Press,2002. (in Chinese)
- [28] 田蔚. 材料物理性能[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2004.
TIAN S. *Physical Properties of Materials*[M]. Beijing:Beihang Press,2004. (in Chinese)
- [29] ZHU J P,GAO L H,MA Z,*et al.* . Optical property of $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_{3+\delta}$ coatings deposited by plasma spraying technique [J]. *Applied Surface Science*,2015,356:935-940.
- [30] ZHU J P,MA Z,GAO L H,*et al.* . Plasma spraying of $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_{3+\delta}$ coating[J]. *Science of Advanced Materials*,2015, 7:2611-2616.
- [31] 李东荣,王富耻,马壮,等. 等离子喷涂 Al_2O_3 涂层 CO_2 连续激光反射性能的研究[J]. 有色金属,2008,5:38-41.
LI D R,WANG F C,MA ZH,*et al.* . Research on the CO_2 -CW-laser reflectivity of plasma sprayed Al_2O_3 coatings[J]. *Nonferrous Metals*,2008,5:38-41. (in Chinese)
- [32] 邓世均. 高性能陶瓷涂层[M]. 北京:化学工业出版社,2004.
DENG SH J. *High-performance Ceramic Coating*[M]. Beijing:Chemical Industry Press,2004. (in Chinese)

作者简介:



朱锦鹏(1989—),男,河南周口人,博士研究生,2012年于东北大学获得学士学位,主要从事高能激光防护涂层方面的研究。E-mail:zhujinpeng0812@126.com



高丽红(1984—),女,吉林白山人,副教授,硕士生导师,2007年、2009年于北京理工大学分别获得学士、硕士学位,2012年于法国马赛中央理工大学获得博士学位,主要从事光学薄膜表征、高能激光防护涂层材料方面的研究。E-mail:gaolihong@bit.edu.cn