

表面反射层在激光防护上的作用

吴平,李雅娣,马喜梅

(中国航天科技集团公司第四研究院第41所)

固体火箭发动机燃烧、热结构与内流场国防科技重点实验室,陕西 西安 710025)

[摘要] 为了研究激光辐照时反射层对基材的防护作用,采用铝箔作为高反射层进行激光辐照对比试验。结果表明:铝箔高反射层的存在降低了激光辐照对基材的热烧蚀和热影响,这种防护方式对基材抗激光防护效果显著。

[关键词] 反射层;激光防护;试验研究;铝箔;激光辐照

[中图分类号] TG665

[文献标识码] A

[文章编号] 1001-3660(2008)05-0082-03

Effect of the Reflecting Layer on Laser Protection

WU Ping, LI Ya-di, MA Xi-mei

(The National Key Laboratory of Combustion, Thermostructure and Flow of Solid Rocket Engine, The 41st Institute of the Fourth Academy of China Aerospace Science and Technology Corporation, Xi'an 710071, China)

[Abstract] In order to study the protection of the reflecting layer for material, using aluminum foil act as reflecting layer, the irradiation experiment by laser was finished by comparative method. Results show that the high reflecting layer of aluminum foil reduces the thermal ablation and thermal effect of material irradiated by laser, and the application of a reflecting layer on laser protection has a marked effect.

[Key words] Reflecting layer; Laser protection; Experimental research; Aluminum foil; Laser irradiation

0 引言

目前强激光对导弹的危害性已成为导弹研究中将面临的问题,这就要求在研究破坏作用的同时,要提出有效的防护措施来减少这种危害的存在。研究表明,强激光对导弹威胁的主要表现是热破坏以及热-力耦合破坏,但追其根源主要还是由于激光对壳体热效应,引起材料的烧蚀或熔融,从而降低壳体强度导致破坏。所以对激光的防护主要在于如何降低和减少激光作用于材料所引起的热效应。

对激光的防护主要有以下方式:1)线性光学式。它主要利用材料对光的反射和散射特性,使入射激光大部分反射或散射出去,降低激光能量在材料上的沉积,从而保护材料;2)热烧蚀式。这主要利用有效烧蚀热高的材料在高能激光照射下发生烧蚀,消耗大量的能量,从而保护材料。3)线性光学/热烧蚀综合式^[1]。该方式综合利用反射和热烧蚀原理,由烧蚀层和反射层组成的混合结构。在国外许多国家已经在这方面进行了一些研究,其中 Milling 等利用反光铝结构表面作为防激光结构,将其用于飞机蒙皮;Slomp 等制作了1种多层式涂层,用对辐射稳定的颗粒状覆盖层覆盖在透明的防辐射薄膜上,防辐射薄膜底部

沉积有镜面反射的金属层^[3];美国通用电气公司实验室生产了1种据称是十分有效的抗激光加固材料,用于飞行器的抗激光加固。这种材料的结构是由许多很薄的可以反射激光的石墨层组成,每层石墨如同镜子一般,可以将激光能量反射掉,从而保护飞行器不受热损伤^[4]。美国海军用1种含有铝颜料的有机硅高温涂料 TT2P228,反射系数大,可在650℃高温条件下起到抗激光防护作用^[5]。在国内抗激光防护研究还属于起步阶段。我们在研究强激光对导弹的破坏性的同时,针对线性光学式防护效果进行了一些试验研究。

1 材料反射特性对激光引起热效应的影响

激光是1种能量密度高,方向性强及单色性好的电磁波,在激光辐照材料的研究中,可以用经典的概念来描述激光束于固体材料的相互作用。激光入射到材料表面后,能量为 E_0 的光能将一部分被反射,剩余能量则被吸收和透射出去。按照能量守恒原理可以简单写为:

$$E_0 = E_{\text{反射}} + E_{\text{吸收}} + E_{\text{透射}} \quad (1)$$

但实际上,当辐射能进入固体或液体表面后,在1个极短的距离内就被吸收完了。对于金属,这一距离只有 $1\mu\text{m}$ 的数量级,因此可以认为固体和液体几乎没有热辐射穿透。于是,对于固体和液体,式(1)^[2]简化为:

$$E_0 = E_{\text{反射}} + E_{\text{吸收}} \quad (2)$$

因此,激光对材料产生热效应的主要方式是通过材料对激

[收稿日期] 2008-07-07

[基金项目] 总装基金课题(51411020503HT4101)

[作者简介] 吴平(1979-),女,陕西西安人,硕士,研究方向为激光烧蚀研究。

光能量的吸收,激光束的能量是一定的,材料吸收得越多,就有多多的能量被转化成热能。线性光学防护方式利用了式(2)^[2]的守恒关系,使 $E_{\text{反射}}$ 部分增大很多,从而减少了 $E_{\text{吸收}}$,降低了激光引起的热效应,从而达到防护的目的。

2 反射层材料的选取

反射层材料的选取主要考虑其反射特性和散射特性,金属材料的表面反射率较高,是比较理想的反射层材料,其中 Ag 和 Al 是金属材料中表面反射系数最高的 2 种材料,他们的反射率可达到 0.94~0.99。但由于 Ag 的表面反射率在在一定程度上受激光波长的影响(例如 Ag 对波长为 0.25 μm 的光束的反射率只有 0.3),铝膜和金膜的反射率和吸收系数的关系见图 1。而由图 1^[2]可以看出 Al 的反射率受波长的影响比较小,而且 Al 与 Ag 相比有较好的耐温性能。因此,选取 Al 材料作为反射层进行试验研究。

考虑到试件制作的简单、方便性,试验试件反射层采用铝箔胶带直接粘敷于试件表面。另外,对试验用铝箔胶带进行反射系数测试,从测试结果(见图 2)可看出其反射性能和文献中的较一致。

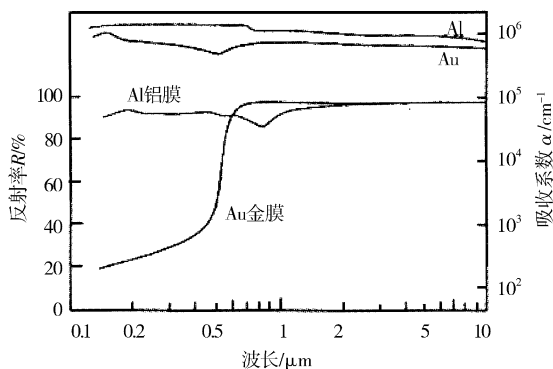


图 1 铝膜和金膜的反射率和吸收系数

Figure 1 The reflectivity and absorptivity of aluminum foil and gold foil

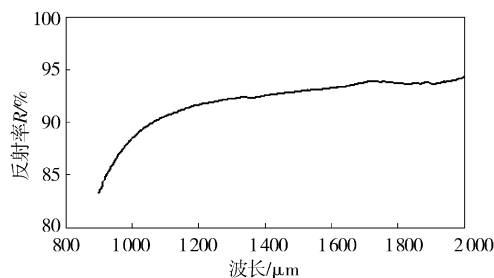


图 2 铝箔表面反射率

Figure 2 The reflectivity and absorptivity of aluminum foil

3 试验及试验分析

3.1 试验设计

铝箔反射层激光防护试验主要通过对表面粘贴铝箔反射层试件和无反射层基材试件进行激光辐照比照试验。试验过程中,激光束照射在试件中心,同时测试试件底面中心实时温度,

获得时间温度曲线。铝箔反射层激光防护试验在设计上考虑各种因素对反射层性能的影响,研究不同条件下,反射层对基材的激光防护性能,将试验分 2 组进行分析:第 1 组基材材料不同,反射防护性能;第 2 组激光参数不同,基材材料相同反射防护性能(见表 1)。试验装置如图 3 所示,激光器为额定输出功率为 5 000 W 的 CO₂ 激光器,激光工作波长 10.6 μm ,激光器的出光时间通过具有数控装置的控制编程控制。

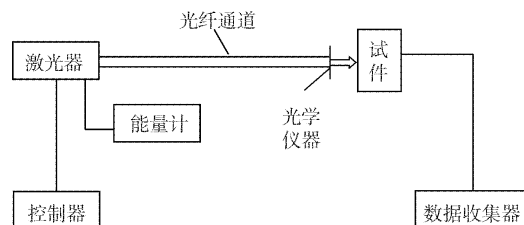


图 3 试验装置简图

Figure 3 Diagram of experimental set-up

表 1 试验参数及基材材料

Table 1 Parameter of experiment and material

	SiO ₂ 纤维复合板基材
第 1 组	氧化锆金属组合板 碳纤维板基材
第 2 组	功率密度 1 528.7 W/cm ² , 辐照时间 1 s, 碳纤维板基材 功率密度 1 961 W/cm ² , 辐照时间 3 s, 碳纤维板基材

3.2 试验结果分析

反射层的作用是利用具有高反射系数的表层,将激光能量反射掉使材料表面沉积的能量尽可能少。其抗激光防护性能主要表现在:减小基材受到的热扰动和降低基材的烧蚀。材料的热扰动主要体现在其受外界能量的影响引起自身温度的变化^[6]。因此,通过温度来评定试件受到激光能量的热影响。

3.2.1 反射层对基材热效应的影响

对 2 组试件进行激光辐照试验,获得各材料在激光作用下粘贴反射层和无反射层试件的背壁温度时间曲线(见图 4~图 7)。分析温度曲线图可得出反射层对减弱激光对基材的热扰动有着显著的效果。试验用材料试件有无反射层其背壁温度相差 50℃ 左右,各种试件 2 种状态温度差异幅度最大可达到 2 倍多。另外由第 1 组二氧化硅纤维复合板、氧化锆金属组合板和碳纤维板 3 种不同性能材料粘贴反射层的试验数据可以看出,反射层对基材的抗激光防护效果不受基材材料的影响,对于不同的基材材料防护效果都很明显。同样,对第 2 组碳纤维板在 2 种不同激光功率密度作用下的试验曲线进行分析(见图 6、图 7),在高功率长时间激光束作用下,反射层的防护效果依然显著。

3.2.2 反射层对基材烧蚀性能的影响

通过称取试验前后试件的质量,获得试件受激光辐照后的质量烧蚀损失(见表 2)。分析表 2 中试件试验前后的质量变化,具有铝箔反射层的试件质量损失较低,因此,反射层的存在降低了基材结构的热烧蚀,这样也就加强了防护结构的抗烧蚀性能。综上分析,反射层对于抗激光防护是非常有效的。

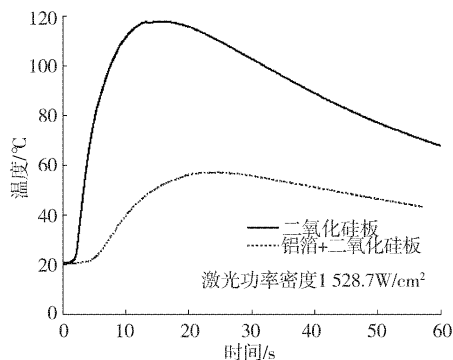
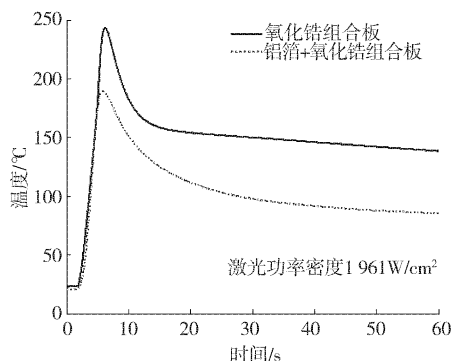
图4 SiO₂ 纤维复合板试验温度曲线Figure 4 The temperature of SiO₂ fiber ply

图5 氧化锆金属板试验温度曲线

Figure 5 The temperature of the metal based zirconia ply

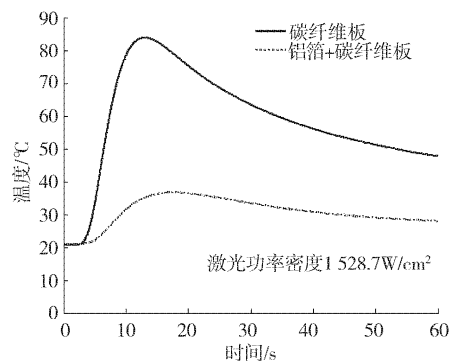


图6 碳纤维板试验温度曲线

Figure 6 The temperature of carbon fiber ply

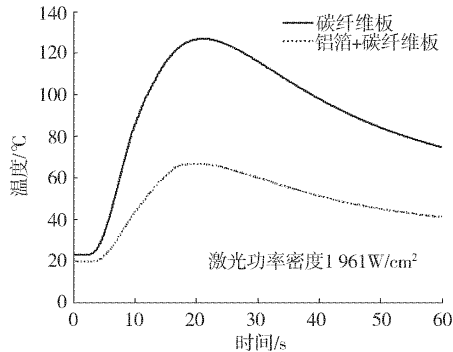


图7 改变激光功率碳纤维板试验温度曲线

Figure 7 The temperature of carbon fiber ply when the power of laser was changed

表2 有反射层和无反射层试件试验结果对比
Table 2 The result comparison of the reflecting layer and no reflecting layer sample

试件状态	功率密度 /(W · cm ⁻²)	出光 时间/s	最高温度 /℃	质量 损失/g
SiO ₂ 纤维复合板	1 528.7	1	112	0.065 3
SiO ₂ 纤维复合板 + 铝箔			57	0.016 9
碳纤维/环氧	1 528.7	1	84	0.737 4
碳纤维/环氧 + 铝箔			35	0.013 2
碳纤维/环氧	1 961	3	127	0.081 8
碳纤维/环氧 + 铝箔			67	0.033 9

4 结 论

通过设计反射层激光防护性能试验,选取铝箔作为高反射层来研究反射层对材料抗激光防护的作用。在试验中从2个角度出发:基材材料不同,反射防护性能;激光参数不同,基材材料相同反射防护性能,通过分析粘贴反射层和无反射层试件的试验结果,认为反射层起到了将激光能量部分反射出去的作用,降低了底部基材的热效应,达到了防护作用。

[参 考 文 献]

- [1] 孟献丰, 陆春华. 激光技术的应用与防护[J]. 红外与激光工程, 2005, 34(2): 136-141
- [2] 孙承伟. 激光辐照效应[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002. 6-27
- [3] 陆建. 高功率激光与材料相互作用机理研究进展[J]. 激光技术, 1996, 20: 181-184
- [4] 计世番. 导弹的抗激光加固[J]. 导弹与航天运载技术, 1996, 5: 36-42
- [5] 郭亚林. 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
- [6] 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, 37(3): 71-74

(上接第65页)

度 600r/min、温度 50℃。

3 结 论

1) 在形成 Cu-W 复合镀层的过程中, 镀液中 W 的质量浓度和电流密度对复合镀层中 W 沉积量影响显著, 搅拌强度和温度的影响其次。

2) 复合电沉积 Cu-W 复合镀层的最优工艺如下: W 的质量浓度为 35g/L、电流密度为 4A/dm²、搅拌强度为 600r/min、温度为 50℃。

[参 考 文 献]

- [1] 《表面处理工艺手册》编审委员会. 表面处理工艺手册[M]. 上海: 上海科技出版社, 1991. 68-76
- [2] 刘小兵, 王徐承, 陈煜, 等. 复合电沉积的最新研究动态[J]. 电化学, 2003, 2(9): 117-124
- [3] 荣命哲. 电接触理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004. 1-27
- [4] 张万胜. 电触头材料国外基本情况[J]. 电工合金, 1995, (1): 1-20