

含液体金属复合壳体结构的抗强激光特性 及其数值模拟

杨 阳¹ 刘 静^{1,2}

(¹中国科学院理化技术研究所低温工程学重点实验室, 北京 100190)
²清华大学医学院生物医学工程系, 北京 100084)

摘要 热烧蚀破坏是激光辐照过程中最常见且最易发生的现象。为防御激光辐照对壳体的热烧蚀破坏,以现有防护结构为基础提出了一种含液体金属的复合壳体结构,通过在壳体防护结构中设置一种能在常温下处于液体状态的金属材料,借助液体金属材料良好的导热特性及流动性能,在激光辐照时将光斑辐射部位所积聚的大量能量快速疏散,从而达到防护激光武器的目的。为明晰这种含液体金属复合壳体结构的抗激光性能,建立了相应的三维模型,并对其中典型的抗激光辐照过程进行了数值模拟和分析。结果表明,此方法可有效降低激光光斑照射表面的温度,从而延缓壳体发生软化的过程,由此还可实现更强大的抵御激光辐照的能力。新方法可进一步推广至各式反激光防护体系中。

关键词 材料; 抗激光辐照; 热烧蚀破坏; 液体金属; 复合壳体结构

中图分类号 TJ95 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0702010

Anti-laser Characteristics of Hybrid Shell Structure with Liquid Metal Layer and Its Numerical Simulation

Yang Yang¹ Liu Jing^{1,2}

¹Key Laboratory of Cryogenics, Technical Institute of Physics and Chemistry,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

²Department of Biomedical Engineering, School of Medicine, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract In order to avoid the thermal ablation destruction induced by the laser weapon, a thin layer of liquid metal is sandwiched into the hybrid structure shell. The unique merit of this hybrid structure lies in the excellent characteristics of liquid metal in thermal conductivity and flow to rapidly dissipate the thermal energy accumulated at the radiation spot. To evaluate and understand the practicability of this defensive measure against the intense laser, a comprehensive investigation on the suitability of using liquid metal is performed to sustain the thermal ablation damage. Numerical simulations are performed on three-dimensional heat transfer problems in the composite structure embedded with liquid metal. It is found that the new method can effectively reduce the temperature at the shell surface, which subsequently delays the softening process, and then achieves a powerful ability to withstand the intense laser. The strategy is expected to be useful in a variety of anti-laser systems.

Key words materials; anti-laser; thermal ablation destruction; liquid metal; hybrid structure shell

OCIS codes 140.3330; 140.6810; 140.3440

1 引 言

高能激光的破坏效应主要有热烧蚀破坏、激波破坏以及辐射破坏三种^[1~4]。其中热烧蚀破坏效应最为常见且最易发生。当高能激光束照射到目标上

后,目标壳体表面材料温度由表及里迅速升高,当达到一定温度时材料被熔融甚至气化,由此形成的蒸气以极高的速度向外膨胀喷溅,同时冲刷带走熔融材料液滴或固态颗粒,从而在材料上造成凹坑甚至

收稿日期:2011-02-14; 收到修改稿日期:2011-04-01

基金项目:国家自然科学基金(50977087)资助课题。

作者简介:杨 阳(1982-),女,博士,助理研究员,主要从事热学微系统及液体金属散热技术等方面的研究。

E-mail: yangy@mail.ipc.ac.cn

穿孔。目前,导弹、飞机、卫星的壳体一般都选用熔点在 1500 ℃ 左右的合金材料,对此,功率在 2~3 MW 的脉冲高能激光只需在其壳体表面某固定部位辐照 3~5 s,即可轻易地使其烧蚀熔融甚至气化^[1]。

以导弹为例,为了提高针对激光威胁的突防能力,各国开始重视研究反激光措施,既有抗激光侦察的隐身技术,又有抗激光杀伤的防护技术,如旋转导弹、超高音速导弹等,而导弹表面涂覆反光涂层或隔热保护层的反激光措施尤为引人关注^[5]。

本文提出一种含液体金属的抗激光辐照复合壳体结构。该复合结构中添加有能够在常温下处于液体状态的金属材料。借助液体金属材料良好的导热及流动性能来实现防护激光热烧蚀破坏的目的。为了明晰这种含液体金属复合壳体结构的抗激光性能,建立了相应的三维模型,并对其典型的抗激光辐照过程进行了数值模拟和分析。

2 抗激光辐照过程的数值模型

现代导弹壳体结构一般由三层组成[图 1(a)],即在燃料密封衬套层外逐层覆盖由玻璃纤维复合材料构成的导弹壳体层及外包层结构。当前最常见的激光防护结构由两层隔热层夹持一层抗激光烧蚀阻挡层组成,将此三层粘结在一起,再固联到导弹壳体的外表面上[图 1(b)]。其中隔热层可以是软木复合材料(软木酚醛、软木环氧树脂、软木腈橡胶),厚

度可在 0.1~1 cm 之间选择;烧蚀阻挡层一般由浸渍重金属、树脂的碳纤维织物构成。实验证明,这种在导弹壳体外附着低热导率的隔热层及烧蚀阻挡层结构具有很强的抗激光烧蚀性能^[1,5]。根据上述防护技术的结构特点及材料特性,本文提出一种含液体金属的抗激光辐照复合壳体结构。如图 2(a)所示,该复合壳体结构由烧蚀阻挡层、液体金属层以及导弹金属壳体组成,其中液体金属层镶嵌于烧蚀阻挡层之中。激光光斑辐照于此复合壳体结构上,光斑热量向壳体内部传递时,由于液体金属夹层在水平与法线方向上悬殊的特征尺寸比例,使得热量快速在夹层平面内扩展开来,不仅减少了壳体法线方向的热量传递,同时还可实现烧蚀阻挡层表面的降温效果。另外,液体金属材料所具备的热膨胀及流动特性,可进一步提升其在平面内的热量扩散能力。

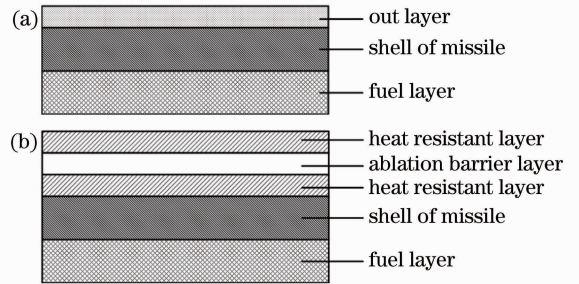


图 1 (a)现代导弹的壳体结构;(b)当前常见抗激光导弹壳体防护结构设计
Fig. 1 (a) Shell structure of modern missiles; (b) current common protective missile shell for anti-laser

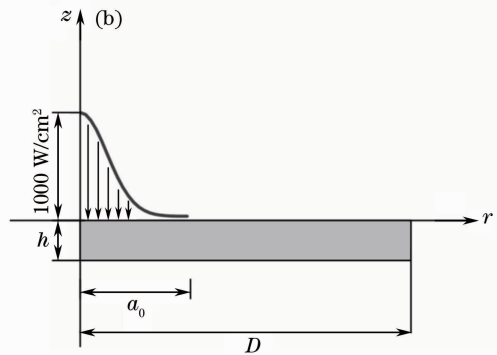
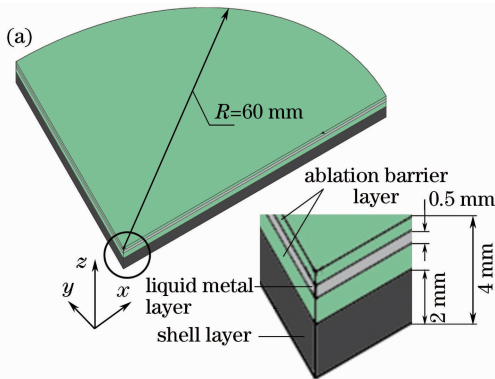


图 2 (a) 计算区域设置;(b)光斑能级、位置、半径设置

Fig. 2 (a) Calculation domain; (b) setup of the power level, location and radius

由于结构的对称性,本文将计算区域设置为半径 60 mm,中心角为 90°的扇形,其中烧蚀阻挡层厚 2 mm,液体金属层镶嵌于烧蚀阻挡层中且厚度为 0.5 mm,导弹金属壳体厚 2 mm[图 2(a)]。激光照射区域位于烧蚀阻挡层上表面中心处,如图 2(b)所示,光斑能量成正态分布 $I = I_0 \exp(-8r^2/a_0^2)$,其中中心

能量为 $I_0 = 1000 \text{ W/cm}^2$,光斑直径为 $a_0 = 20 \text{ mm}$, r 为计算区域半径方向。光斑中心与计算区域中心重合。除激光照射部位外,烧蚀阻挡层其余表面均设置为对流换热边界条件,其中环境温度为 300 K,对流换热系数为 $20 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$;各结构层的交界面设置为热耦合边界条件;沿半径方向成 90°夹角的

边界设置为对称边界条件；其余表面均设置为绝热边界条件。计算过程中，选择陶瓷材料作为烧蚀阻挡层，合金结构钢材料 30CrMnSiA 作为金属壳体层，而镶嵌于烧蚀阻挡层中的液体金属选择材料镓。这 3 种材料的热物性参数分别来自文献[6~9]。

3 数值模拟结果

3.1 含液体金属的复合壳体结构抗激光有效性评估

借助三维计算传热学的方法来验证含液体金属复合壳体结构抗激光性能的有效性。首先，数值模拟将对比含液体金属夹层与无液体金属夹层的烧蚀阻挡层表面在激光照射下的温度分布情况。当相同能量的激光束分别照射于有液体金属夹层与无液体金属夹层的烧蚀阻挡层表面时，所得到的计算结果如图 3 所示。

图 3 分别为 2 s 时刻含液体金属与不含液体金属的烧蚀阻挡层上表面温度场云图。激光束仅照射烧蚀阻挡层 2 s 后，含液体金属夹层的烧蚀阻挡层表面温度已明显低于无液体金属夹层的表面温度。图 4 为烧蚀阻挡层上下表面中心点在各时刻下的温度值。虽然两种情况下烧蚀阻挡层上表面的升温速率有所变缓，但含液体金属夹层和无液体金属夹层的烧蚀阻挡层上表面的温度差值仍然随着时间的推

移而增大。烧蚀阻挡层下表面虽然升温速率逐渐降低，且 5 s 时刻之前，含液体金属夹层的烧蚀阻挡层下表面温度略高于无液体金属夹层的情况，5 s 时刻之后，两条曲线的相对位置发生了变化，且温度差值亦随着时间的变化而增大。10 s 时刻时，两种情况在烧蚀阻挡层上表面中心点位置的温度差已高达 647.2 K，而在其下表面中心点处，温度差值亦达到 33.1 K。此时的温度值还远不及烧蚀阻挡层的软化温度。以上结果表明，有液体金属夹层的烧蚀阻挡层在相同能量的激光光束照射下，其各层中心点的温度均低于无液体金属夹层的情况，这种现象在其上表面中心点位置处表现得尤为突出。

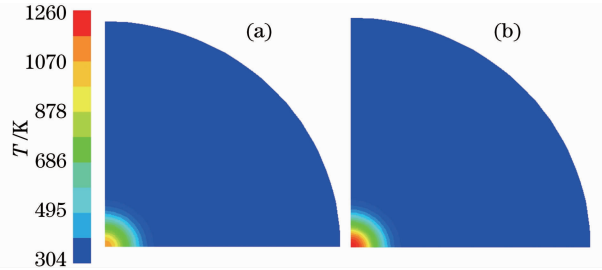


图 3 烧蚀阻挡层上表面温度场云图(2 s 时刻)。(a)有液体金属夹层；(b)无液体金属夹层

Fig. 3 Temperature contour on the supine surface of the ablative thermal protection layer at 2 s. (a) With liquid metal film; (b) without liquid metal film

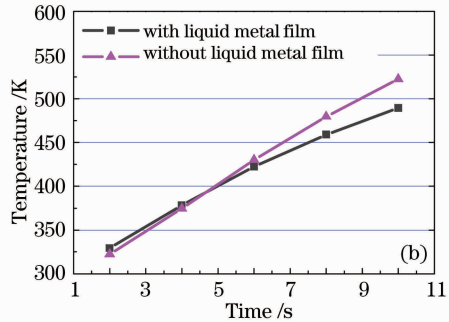
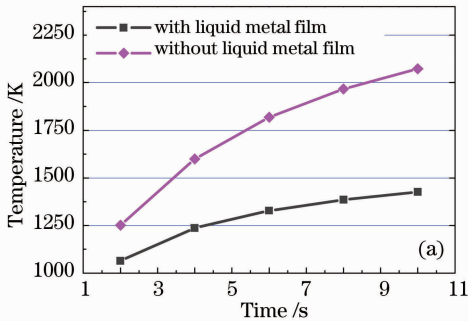


图 4 烧蚀阻挡层各时刻的温度值。(a)上表面中心点(0,0,4)；(b)下表面中心点(0,0,2)

Fig. 4 Surface temperature of the ablative thermal protection layer. (a) On the supine surface center (0,0,4); (b) on the lower surface center (0,0,2)

图 5 为 10 s 时刻时两种情况在计算区域内各平面温度曲线分布的对比图。可以看出，在半径约小于 10 mm 的区域内，有液体金属夹层的烧蚀阻挡层各平面温度均明显低于无液体金属夹层的情况，而在半径约大于 10 mm 小于 20 mm 的区域内，情况却与之相反。出现这种现象是由于液体金属材料较烧蚀阻挡层材料具有较好的导热性能，换言之，其具有良好的均温能力。此时，烧蚀阻挡层上表面由

中心向四周剧烈的温度梯度得到缓解，集中的热量能够有效地沿水平方向扩展，因此在远离中心的区域内温度会有所升高。

由此可以判断，相同能量的激光武器作用下，液体金属夹层能够明显降低烧蚀阻挡层被激光照射表面的温度，从而延缓其发生软化的过程，由此实现更为强大的抵御激光辐照的能力。

此外，将光斑中心能量 I_0 分别设置为 1000，

800, 400, 200 和 100 W/cm² 时,图 6 为 2 s 和 10 s 时刻烧蚀阻挡层上下表面中心点的温度值,可以看

出,光斑中心能量越高,两种烧蚀阻挡层上表面的温度值相差越显著。

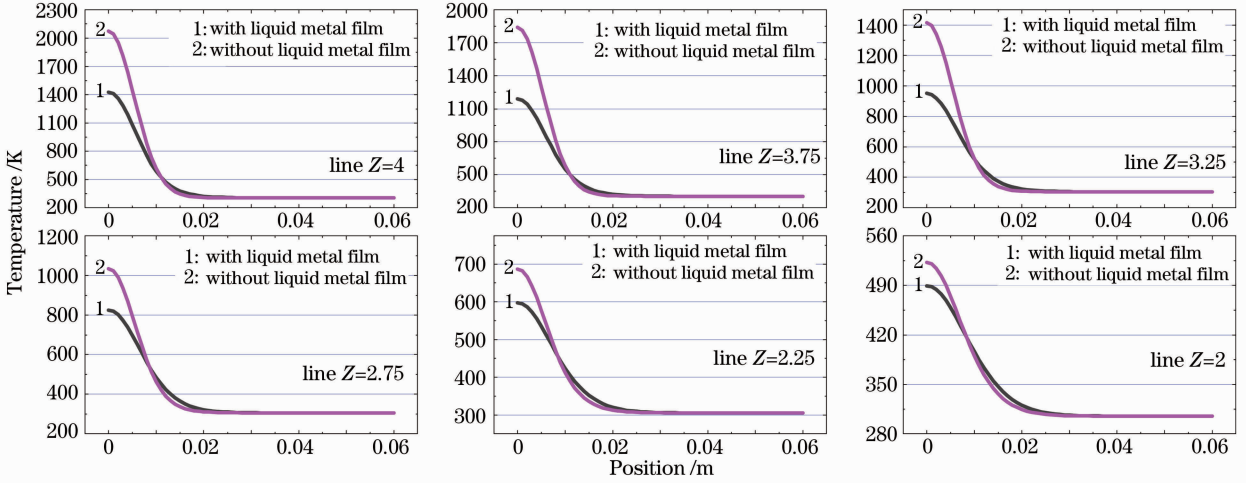


图 5 10 s 时刻时计算区域内各平面温度曲线分布对比图

Fig. 5 Comparison of the temperature distribution on each layer at 10 s

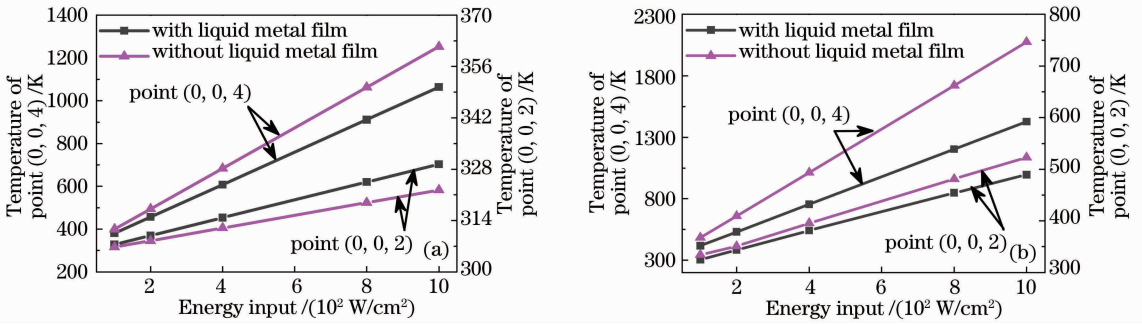


图 6 不同光斑中心能量下烧蚀阻挡层上下表面中心点的温度值。(a) 2 s 时刻; (b) 10 s 时刻

Fig. 6 Temperature of the ablative thermal protection layer on the supine surface center (0,0,4) and the lower surface center (0,0,2). (a) 2 s moment; (b) 10 s moment

3.2 参数化研究

3.2.1 液体金属夹层位置的影响

改变厚度为 0.5 mm 的液体金属夹层在烧蚀阻挡层中的位置,将液体金属夹层上表面与烧蚀阻挡层

上表面间的距离分别设置为 0.25, 0.50, 0.75 mm, 所得计算结果如图 7 所示。图中显示,当液体金属夹层上表面与烧蚀阻挡层上表面间距离为 0.25 mm 时,其在相同能量激光光斑照射下所形成的上表面中心

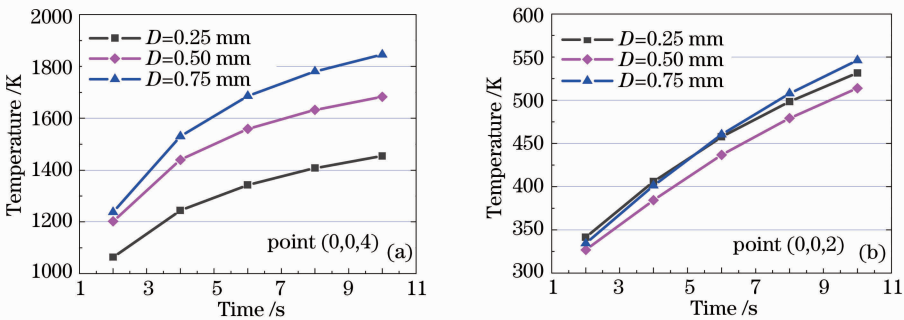


图 7 烧蚀阻挡层各时刻的温度值。(a) 上表面中心点(0,0,4); (b) 下表面中心点(0,0,2)

Fig. 7 Surface temperature of the ablative thermal protection layer. (a) On the supine surface center (0,0,4); (b) on the lower surface center (0,0,2)

温度最低,比 0.75 mm 情况约低 400 K;而当此间距为 0.50 mm 时,烧蚀阻挡层下表面的温度均低于其他两种情况,但温度差值相对较小,比 0.75 mm 情况低 32 K。

3.2.2 液体金属夹层厚度与重量的影响

作为抗激光防护结构的要求之一,其不会使防护主体的总成本和总重量增加太多。由于液体金属密度较大,因此金属夹层厚度与其抗激光能力间的对应关系,应使其既可以缓解烧蚀阻挡层的软化过

程,又能够遵从从不增重太多的要求。图 8 为设置了不同液体金属夹层厚度的计算结果。从烧蚀阻挡层上表面中心点的温度值可以看出,并非液体金属夹层的厚度越厚越好。当液体金属夹层的厚度为 0.75 mm 时,其在相同能量激光照射下所形成的上表面中心温度最低,比 0.25 mm 情况约低 576 K;当此厚度为 1.0 mm 时,烧蚀阻挡层下表面的温度最高,而其他三种情况则相差不多。

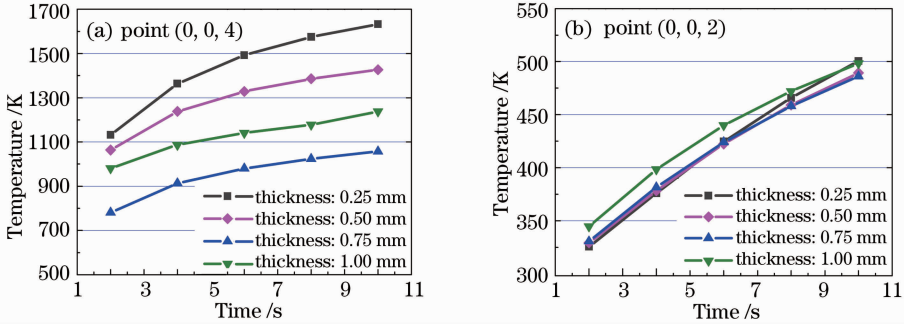


图 8 烧蚀阻挡层各时刻的温度值。(a) 上表面中心点(0,0,4); (b) 下表面中心点(0,0,2)

Fig. 8 Surface temperature of the ablative thermal protection layer. (a) On the supine surface center (0,0,4); (b) on the lower surface center (0,0,2)

将各种情况下烧蚀阻挡层上表面中心点在 10 s 时的温度值与无液体金属夹层的烧蚀阻挡层上表面中心点温度相减,再除以各种情况下液体金属夹层的厚度,得到单位质量下液体金属夹层所能实现的降温效果。结果表明,虽然当厚度为 0.25 mm 时烧蚀阻挡层上表面中心点温度最高,但其单位质量下液体金属夹层所能实现的降温范围最大。由此可以认为,镶嵌于烧蚀阻挡层中的液体金属夹层的厚度不宜过厚,小于 0.5 mm 即可。

3.2.3 热膨胀流动及相变过程的影响

以上所有计算过程,只考虑了液体金属较好的

导热性能便可以对烧蚀阻挡层的抗激光能力起到显著的提升。作为液体金属的低熔点和可流动的特性,其相变及流动现象在传热过程中是不可避免的,因此,针对这两种特性的系统评估是必不可少的。

针对其热膨胀流动性能,液体金属的密度与其温度存在如下关系: $\rho = 6262.68 - 0.61T^{[9]}$ 。将计算区域沿平面 $y=0$ 对称扩展,并将初始温度值设置为高于液体金属熔点的 305 K,假设重力沿 y 轴负方向作用,图 9(a),(b)展示了 10 s 时刻单纯导热以及热膨胀流动时烧蚀阻挡层上表面温度场云图,图 9(c)为同一时刻在重力作用下液体金属夹层中

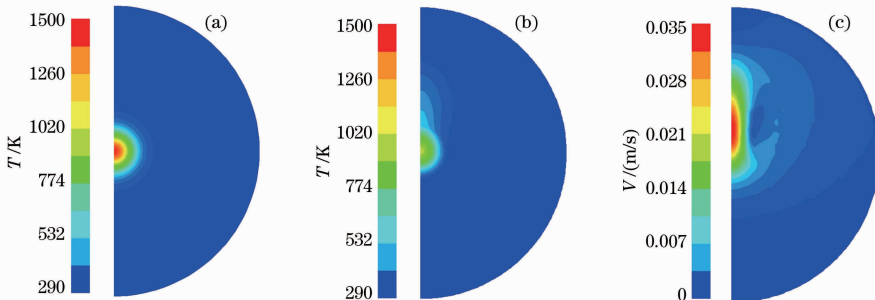


图 9 (a) 10 s 时刻无流动情况下烧蚀阻挡层上表面的温度场云图; (b) 10 s 时刻有热膨胀流动(重力沿 y 轴负方向)情况下烧蚀阻挡层上表面的温度场云图; (c) 10 s 时刻重力沿 y 轴负方向时液体金属夹层中的速度场云图

Fig. 9 Temperature contour on the supine surface of the ablative thermal protection layer. (a) Without thermal expansion flow; (b) with thermal expansion flow (gravity: positive y direction); (c) velocity contour in the liquid metal layer when the gravity along the positive y direction

的速度场云图。显然,液体金属夹层内部因热膨胀流动作用使得热扩散区域的面积更大,对烧蚀阻挡层上表面的降温作用更为显著。

另外,此计算中选用的液体金属材料镓的熔点为 302.8 K,当处于 293 K 的环境温度时,液体金属呈固体状,因此在激光照射开始后,首先会出现液体金属相变现象,熔融后变成液态的液体金属同样会产生热膨胀流动。图 10 便是在重力作用下液体金属夹层中心点的相变及温度变化曲线。图 11(a)展示了重力作用下烧蚀阻挡层上表面温度场云图,图 11(b)和(c)分别为重力作用下液体金属夹层中的速度场和液体分数场云图。

将以上两个环节所得到的烧蚀阻挡层上下表面中心点在各时刻下的温度值进行对比,如图 12 所示,相同重力方向下,无相变热膨胀时各中心点的温度值在 5 s 时刻后均低于相变热膨胀的情况。液体金属夹层内部因相变及热膨胀流动作用所得到的热扩散面积也低于无相变热膨胀情况。这是由于,相变热膨胀情况下,热膨胀流动仅发生于被激光

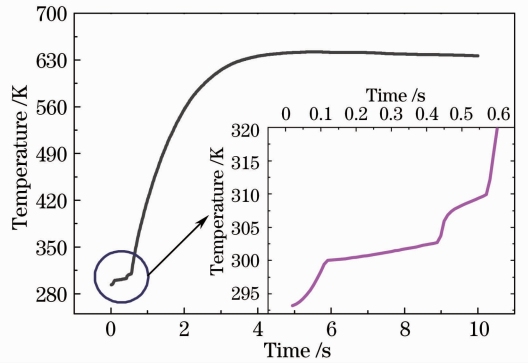


图 10 重力沿 y 轴负方向时液体金属夹层中心点的相变及温度变化曲线。插图是圆圈部分的放大图
Fig. 10 Transient response curve of the temperature on the liquid metal layer center when the gravity along the positive y direction. Inset is enlarged view in the circle

照射熔化的区域,而在无相变热膨胀情况下,液体金属夹层内部均为液体状态,可流动面积更大,因此沿水平面方向的均温效果更为显著。

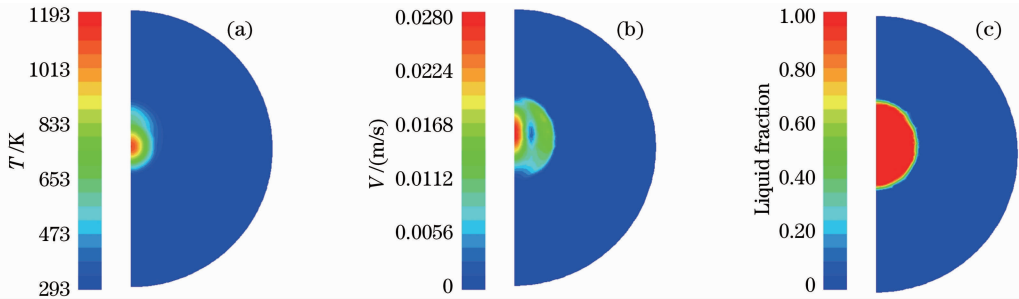


图 11 (a)重力作用下烧蚀阻挡层上表面的温度场云图;(b)重力作用下液体金属夹层中的速度场云图;(c)重力作用下液体金属夹层中的液体分数场云图

Fig. 11 (a) Temperature contour on the supine surface of the ablative thermal protection layer; (b) velocity contour in the liquid metal layer; (c) liquid fraction contour in the liquid metal layer

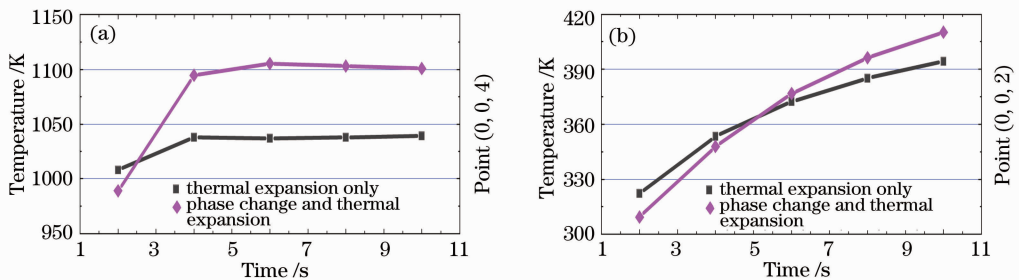


图 12 不同情况下烧蚀阻挡层中心点各时刻的温度值。(a)上表面中心点(0,0,4);(b)下表面中心点(0,0,2)

Fig. 12 Surface temperature of the ablative thermal protection layer. (a) On the supine surface center (0,0,4); (b) on the lower surface center (0,0,2)

此时,将无液体金属夹层与含液体金属夹层的三种情况(表 1)中所得到的 10 s 时刻烧蚀阻挡层上下表面的温度曲线分布进行对比(图 13),不难发

现,液体金属热膨胀及相变过程的存在,使烧蚀阻挡层被激光光斑照射表面的温度得到了进一步的降低。

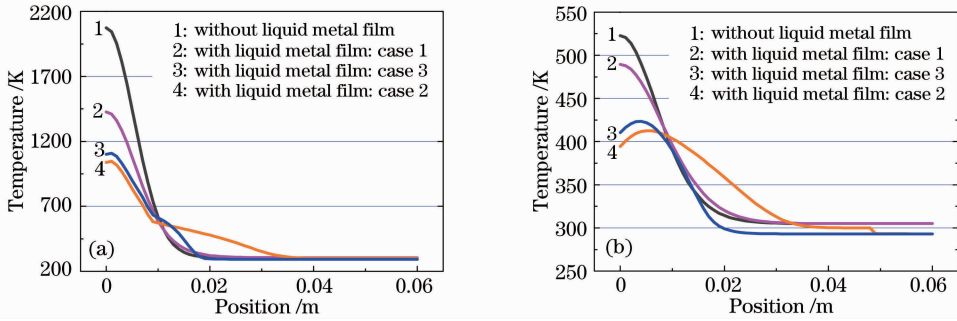


图 13 10 s 时刻烧蚀阻挡层上下表面温度曲线分布对比图。(a) 上表面温度曲线；(b) 下表面温度曲线

Fig. 13 Comparison of the temperature distribution in the ablative thermal protection layer at 10 s. (a) On the supine surface; (b) on the lower surface

表 1 含液体金属夹层的 3 种传热情况

Table 1 Three kinds of heat transfer conditions in liquid metal layer

Heat transfer condition	No.
Heat conduction only	case 1
Thermal expansion only	case 2
Phase change and thermal expansion	case 3

3.2.4 不同液体金属的影响

液体金属是熔点不超过铝熔融温度(660.37 °C)的 17 种金属的总称。这 17 种金属分别是汞、铯、镓、铷、钾、钠、铟、锂、锡、铋、铊、镉、铅、锌、锑、镁、铝。另外,还有许多合金以及上述金属的合金在室温甚至在更低的温度时也为液态,如钠钾合金的熔点只有-12.5 °C。液体金属中,熔点相对较低的有汞、镓、钠、钾等,其中除汞具有毒性且导热率较低外,其他如镓、钠、钾及其合金等,一般都具有较高的热导系数、较低的粘度以及良好的比热和稳定性,可用作热传导剂和热处理剂。由于液体金属的种类较多,其共同的特性为熔点较低,与此同时,液体金属不同组分的配比合金,也同样具有低熔点的特征。最为常见且性质稳定的液体金属,除上述计算中使用的材料镓以外,还有铟和锡。

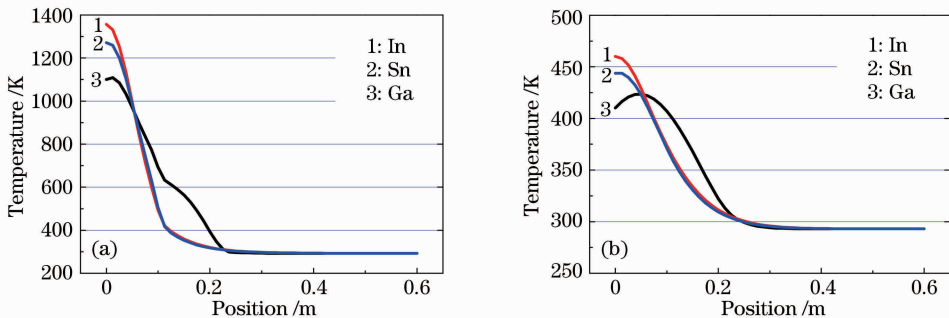


图 15 10 s 时刻烧蚀阻挡层上下表面温度曲线分布对比图。(a) 上表面温度曲线；(b) 下表面温度曲线

Fig. 15 Comparison of the temperature distribution in the ablative thermal protection layer at 10 s

(a) On the supine surface; (b) on the lower surface

根据文献[9]所提供数据,3 种液体金属的热物理性质不尽相同。在同时考虑相变及热膨胀流动且重力沿 y 轴负方向的情况下,选择这 3 种液体金属进行计算,所得结果如图 14~16 所示。其中图 14 为液体金属夹层中心点的相变及温度变化曲线;图 15 是 10s 时刻烧蚀阻挡层上下表面温度曲线分布对比图;图 16 分别展示了烧蚀阻挡层上下表面中

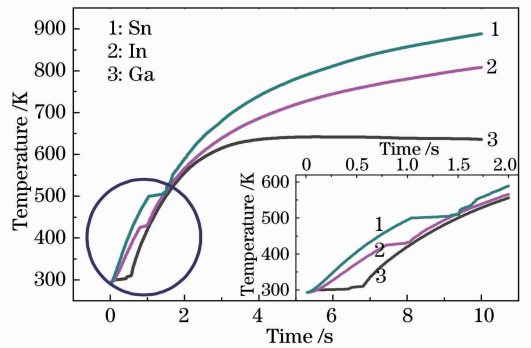
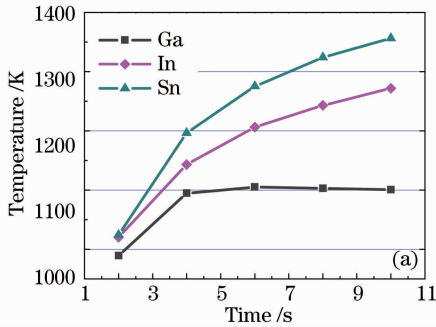


图 14 液体金属夹层中心点的相变及温度变化曲线。

插图是圆圈部分的放大图

Fig. 14 Transient response curve of the temperature on the liquid metal layer center. Inset is enlarged view in the circle

心点各时刻的温度值。虽然铟与锡具有相对较高的热导率,但其相变潜热较低且熔点较高,因此选择这两种金属的液体金属夹层对烧蚀阻挡层的保护能力



还不及金属镓。由此可以得出一个结论,即选用液体金属夹层这种方式提高烧蚀阻挡层抗激光性能时,需要选择熔点较低的金属镓及其合金。

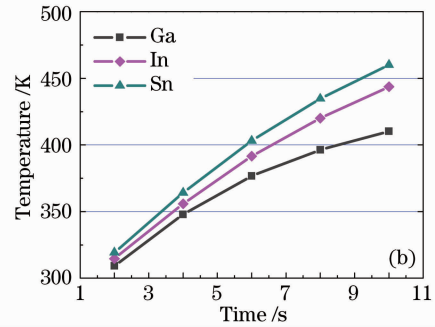


图 16 烧蚀阻挡层各时刻的温度值。(a)上表面中心点(0,0,4);(b)下表面中心点(0,0,2)

Fig. 16 Surface temperature of the ablative thermal protection layer. (a) On the supine surface center (0,0,4); (b) on the lower surface center (0,0,2)

4 结 论

突破了现有抗激光烧蚀的基本选材思路,在极低热导率的烧蚀阻挡层中添加了具有较高热导率的液体金属材料,借助液体金属材料良好的导热特性及流动性能,在激光辐照时将光斑辐射部位所积聚的大量能量快速疏散,从而达到抗激光防护的目的。通过数值模拟所得结果显示,该方法可有效降低被激光照射的烧蚀阻挡层表面温度,从而延缓其发生软化的过程,与此同时,计算还表明,此方法在较高的激光入射功率下,效果更为显著。

进一步的参数化研究表明,液体金属夹层可在烧蚀阻挡层强度允许的范围,尽可能地靠近其上表面;由于重量所限,其厚度不宜过厚,在计算设计工况下,小于等于 0.5 mm 即可;另外,液体金属的热膨胀流动以及相变特性,同样能促进此种方法抵御激光的能力,且其流动特性的促进效果更为明显,因此,尽可能选择熔点较低的液体金属镓及其合金更能实现该方法的功效。

本方法中选用的液体金属镓,相对其他常见金属而言,其热导率相对不存在优势,且密度较高,因此,单纯从导热及重量控制的角度出发,液体金属显得并不出众。但固体材料间的接触热阻是影响导热效率的关键问题,若在烧蚀阻挡层中添加如铝、铜等常见的金属夹层,不但未来的加工工艺及过程十分复杂,且其较高的接触热阻同样会影响该方法的效果。而对液体金属而言,较低的熔点可使其在室温的情况下呈现流动状态,因此,液体金属与固体壁面之间的接触热阻基本可以忽略,与此同时,加工过程

中只需将液体金属灌装于烧蚀阻挡层的夹层之间并使其充满,此过程工艺简单,加工便捷。

综上所述,本文所提出的这种含液体金属复合壳体结构,是在抗激光防护措施中的全新尝试,其性能独特,不仅具有防抗光辐照的能力,且防御效果显著。而此种复合结构还可进一步推广至各式军事装备的反激光防护壳体结构中,为我国防御激光武器事业提供新的思路。

参 考 文 献

- Xu Huizhong. Analysis on the damage mechanism of high-energy laser weapons and aircraft defense pathway[J]. *Aerospace China*, 2004, **42**(9): 34~37
徐惠忠. 高能激光武器的毁伤机理及飞行器防御途径分析[J]. *中国航天*, 2004, **42**(9): 34~37
- She Hui, Tan Sheng. Development and application prospects of high-energy laser weapon[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2002, **31**(3): 267~271
余辉,谭胜. 高能激光武器的发展和应用前景[J]. *红外与激光工程*, 2002, **31**(3): 267~271
- Huang Yong, Liu Jie. Analysis on kill mechanism and characteristics of high energy laser weapon [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2004, **10**(3): 20~23
黄勇,刘杰. 高能激光武器的杀伤机理及主要特性分析[J]. *光学与光电技术*, 2004, **10**(3): 20~23
- Li Yong, Wang Minle, Zhang Jun. Damaging evaluation of high-energy laser weapon to ballistic missile[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, **35**(5): 588~592
李勇,汪民乐,张均. 高能激光武器对弹道导弹毁伤能力研究[J]. *红外与激光工程*, 2006, **35**(5): 588~592
- Song Yaping, Liu Liping. Overview of laser weapon and missiles with laser countermeasure [J]. *Laser & Infrared*, 2008, **38**(10): 967~970
宋亚萍,刘丽萍. 激光反导与导弹反激光措施综述[J]. *激光与红外*, 2008, **38**(10): 967~970
- Ma Qingfang, Fang Rongsheng, Xiang Licheng et al.. Practical Handbook of Thermophysical Properties[M]. Beijing: China

Agricultural Machinery Press, 1986
 马庆芳, 方荣生, 项立成等. 实用热物理性质手册[M]. 北京: 中国农业机械出版社, 1986
 7 Guan Zhenzhong. Laser Processing Manual[M]. Beijing: China Metrology Publishing House, 1998. 28~74
 关振中. 激光加工工艺手册[M]. 北京: 中国计量出版社, 1998. 28~74
 8 Huang Guoxiu. Analysis on the Laser Mental Treatment

Temperature Field [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2008. 32~40
 黄国秀. 激光与金属相互作用的温度场分析[D]. 长春: 长春理工大学, 2008. 32~40
 9 Qian Zengyuan. The Thermal Properties of Low Melting Point Metal[M]. Beijing: Science Press, 1985
 钱增源. 低熔点金属的热物性[M]. 北京: 科学出版社, 1985

Ho:YAG 陶瓷激光器实现21 W 连续波输出

2 μm 波长激光处于人眼安全区域, 在激光雷达、医疗、自由空间通讯等领域有着广阔的应用前景。近年来, 随着制备工艺的突破, 多晶透明激光陶瓷的光学质量、光谱和激光特性愈加接近单晶, 且具有显著的制备优势, 成为继单晶、玻璃之后又一值得瞩目的激光材料。然而由于缺少合适的抽运源, 2 μm 波长单掺钬激光陶瓷的研究进展相对滞后于 1 μm 波长的掺钕、镱陶瓷材料。最近, 复旦大学与新加坡南洋理工大学及徐州师范大学合作, 以南洋理工大学唐定远研究小组制备的高质量 Ho:YAG 陶瓷作为激光增益介质(掺杂浓度为 1.5% 和 2.0% (原子数分数), 双面镀增透膜), 采用掺铊光纤激光共振抽运技术, 成功实现了 21 W 的连续波输出。

研究组用自建的可调谐、窄线宽掺铊光纤激光器作为 Ho:YAG 陶瓷激光器的共振抽运源, 在 1907 nm 波长实现了抽运与吸收的精确匹配, 通过对掺钬浓度和谐振腔的优化, 最终在长度为 14 mm、掺杂浓度为原子数分数 1.5% 的 Ho:YAG 陶瓷上(图 1)实现了 21 W 的连续波输出(图 2); 相

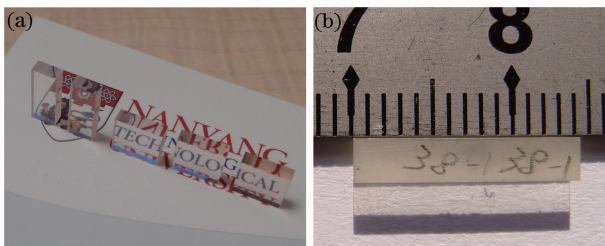


图 1 (a) 不同掺杂浓度 Ho:YAG 透明陶瓷样品;
 (b) 用于激光实验的 Ho:YAG 陶瓷棒
 Fig. 1 (a) Ho:YAG transparent ceramics of different Ho³⁺ concentrations and (b) Ho:YAG ceramic sample

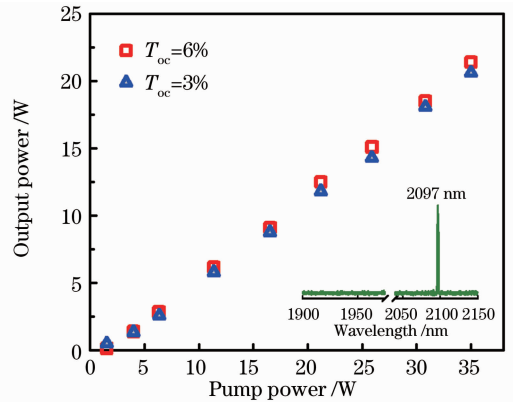


图 2 输出镜透射率 $T=6\%$ 和 $T=3\%$ 时输出功率与抽运功率之间的关系。插图为陶瓷激光器的输出谱线
 Fig. 2 Output power versus incident pump power with output couplers of 3% and 6% transmission. Inset is output spectrum at 2097 nm

应的抽运功率为 35 W, 输出激光波长为 2097 nm, 斜率效率为 63.6%, 光-光转化效率则达到了 61.1% (平凹谐振腔长约 20 mm, 输出凹面曲率 100 mm; 抽运光束腰半径约 150 μm , $M^2 \approx 2$)。当最大抽运功率为 35 W 时, 输出与抽运功率之间仍然保持良好线性, 预示着系统的最大输出功率仍有进一步提高的空间。

陈浩^{1,3} 沈德元^{1*} 章健² 杨浩²
 唐定远² 赵婷³ 杨晓芳³

¹ 复旦大学微纳光子结构教育部重点实验室, 复旦大学光科学与工程系, 上海 200433
² 南洋理工大学电气与电子工程学院, 新加坡 639798
³ 徐州师范大学物理与电子工程学院, 江苏 徐州 221116