

强激光辐照下双层壳体温度场和应力场的数值模拟*

雷勇军¹, 吴非²

(1. 国防科技大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073; 2. 酒泉卫星发射中心, 酒泉 735000)

摘要:强激光照射下结构的热力学响应是激光应用技术的重要问题。本文采用三维有限元分析模型,对双层圆柱壳在强激光辐照下的温度场、应力场和位移场进行了数值模拟与分析。分析时考虑了材料参数随温度的变化特性,主要探讨了不同光斑直径下双层壳温度场的变化趋势,研究了外层壳厚度、热膨胀系数、弹性模量和泊松比等参数对内层壳光斑中心处温升、应力和变形的影响规律。结论表明,激光光斑直径对内层壳的温度场分布有着重要影响,且内层壳温度分布和外层壳热传导系数相关;所有材料参数中,热膨胀系数对应力场分布的影响最大,厚度次之,弹性模量和泊松比影响最小。本文所得结论可为结构的激光破坏效应分析提供重要参考。

关键词:激光辐照; 双层壳体; 温度场; 热应力; 有限元法

中图分类号: TN246 文献标识码: A

Numerical Simulation on Temperature and Stress Fields of Two-layered Shell Irradiated by the Intensive Laser Beam

LEI Yong-jun¹, WU Fei²

(1. College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Jiuquan Satellite Launch Center, Jiuquan 735000, China)

Abstract: The thermal dynamic response of structures irradiated by the intensive laser beam has been an important issue in the area of laser application. Adopting three-dimensional finite element model, numerical simulation and analysis were performed in order to make out the temperature, stress and displacement fields of two-layered cylindrical shell irradiated by intensive laser beam. In the study, the several parameters of materials corresponding to temperature were considered as variables. The influence on distribution of temperature field brought by various laser spot diameters was also studied. And the rules of temperature rise, stress and displacement of inner layer at the spot center were investigated, while the outer layer's thickness, expansion factor, the elastic modulus and the Poisson ratio were changing. It is shown that, the diameter of laser spot plays an important role in the temperature field distribution, keeping in touch with conductivities of outer layer; expansion factor is the dominant parameter affecting stress field, thickness is a lesser dominant one, and elastic modulus and Poisson ratio are the least. The conclusion can provide a substantial reference for the laser breakage analysis and anti-laser reinforcing technology.

Key words: laser irradiation; two-layered shell; temperature field; thermal stress; finite element method

强激光照射下结构的热力学响应分析在民用和军事工业上有重大的应用背景,该方面的理论与试验研究工作,已成为激光应用技术研究方向的热点问题。国外方面,Adachi^[1], Medford^[2]分别采用平板和圆柱壳研究了连续激光和其他外载联合作用下结构破坏问题。国内许多学者对结构在激光辐照下的热力学响应问题进行了计算和研究。赵剑衡等^[3-5]考虑材料热性能参数随温度的变化特性,采用有限元方法进行了强激光辐照下

柱壳的数值模拟,纪峥等^[6-7]同样通过考虑材料参数(弹性模量、泊松比、热膨胀系数)随温度的变化,对激光束照射下的内压柱壳进行了热爆破数值模拟,计算结果表明激光照射区域产生的热应力和材料热软化将导致轴压圆柱壳发生热屈曲破坏;邵元培等^[8]对“爱国者”导弹发动机激光破坏的计算分析。李雅娣等^[9]采用有限元方法计算了充压圆柱壳在激光辐照下的温度场和应力场,用以模拟点火发射固体火箭发动机在强激光

* 收稿日期:2011-05-17

基金项目:教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-080-0148);高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20069998002);国防科技大学科研计划项目(JC10-01-01)

作者简介:雷勇军(1968—),男,教授,博士。

辐照下的结构响应问题。郭少锋等^[10]建立了强激光辐照下充压圆柱壳热力学响应的物理模型与数值计算模型,求解了激光辐射产生的非线性温度场。在此基础上,考虑塑性和屈服强度的温度相关性,获得了非线性的应力场,计算了两种不同类型圆柱壳在高功率连续 CO₂ 激光作用下的破坏阈值,给出了破坏时间与功率密度的关系以及壳体破坏的危险区域。然而以上研究都仅针对单层材料或单层结构,工程中经常出现的双层甚至多层结构的温度场以及热应力计算却相对较少涉及。吴非等^[11-12]采用有限元方法对强激光照射下双层壳体的温度场进行了数值模拟,分析了外层壳体的性能参数变化对内层壳体温度场分布的影响,但尚未分析强激光辐照下内层壳体的变形和应力分布特性。

本文以文献[11-12]为基础,采用有限元方法,进一步分析了强激光辐照下双层的变形场和应力场,以及在激光功率一定的情况下,外层壳体的热传导系数、比热和厚度的变化对内层壳体温升效应、变形场和应力场的影响。此外,根据材料参数的温度相关性,分析了内层壳体材料参数随温度的变化特性对其温升效应、变形场和应力场的影响,并将计算结果与强激光照射下单层壳体的计算结果进行了比较,得出一些有意义的结论。

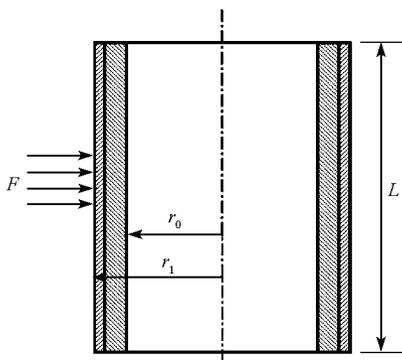


图1 受激光束辐照的双层圆柱壳

Fig.1 Two-layered cylindrical shell irradiated by laser beam

1 计算模型

取图1中圆柱壳的长为2000mm,内半径为200mm,外层壳体材料为某种耐高温材料,其厚度可变,变化范围为0.5~2mm;内层壳体厚度为2mm,材料为钢,其热传导系数为29.56 W/(m·°C),比热为524J/(kg·°C)。连续激光到达壳体表面时光斑直径为10~120mm,光强为400W/cm²,其分布为高斯分布。考虑到激光能量只是部分被吸收,取吸收系数为0.3。假定光斑作用于圆柱壳的中部,这样受激光辐照的圆柱壳有两个对称面,为减

少计算量,取结构的1/4进行计算。

由于温度变化仅在激光辐照区域内比较剧烈,而在远离激光辐照区,温度几乎不发生改变。因此在有限元计算中,将传热区域(包括激光辐照区域和过渡区域)取为激光辐照区域的3倍来考虑。为了精确考虑外层壳体传热特性对内外层圆柱壳温度分布的影响,同时为减少计算量,只将传热区域(见图2和图3)划分为体单元,其余部分划分为壳单元,这与单层壳体的计算是不同的。

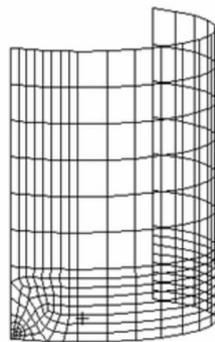


图2 1/4圆柱壳单元划分示意图

Fig.2 Element division of one quarter cylindrical shell

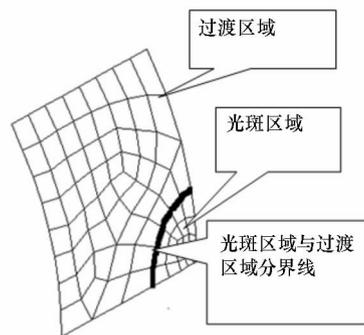


图3 光斑区域及过渡区域单元划分示意图

Fig.3 Element division of laser spot and transition region

2 激光光斑直径对双层壳温度场的影响分析

对于高斯激光束,光斑直径对激光束的功率与能量分布有着重要影响,直接影响到激光束对结构的加热与破坏效果。对于相同功率密度的激光,光斑直径越大,结构越容易破坏,即使在激光功率密度降低的情况下,适当扩大光斑直径,仍可增强激光辐照破坏效应。因此,本节分析并讨论了激光光斑直径对双层壳温度场分布的影响,同时还考虑了外层壳热传导系数对内层壳温升分布的影响。

光斑直径可变,其变化范围为10~120mm,激光束辐照时间均为10s。仍取吸收系数为0.3,进行温度场计算分析,计算结果如图4所示。由图4可知,在光斑直径较小的情形下,光斑中心处

的温升随热传导系数的增加而降低;而在光斑直径较大的情形下,光斑中心处的温升随热传导系数的增加而增加。其原因是:在光斑直径较小的情形下,激光辐照区的温度梯度较大,在激光辐照区,热量很容易沿轴向和环向传播,这样光斑中心处吸收的热量相对减少,从而导致光斑中心处的温升降低;另一方面,当外层壳体热传导系数较大时,此时材料的热导率较大,同时外层壳体沿轴向和环向传热速度也会加快,光斑中心处吸收的热量同样会减少,也会导致光斑中心处的温升降低,此时光斑中心处的温升会随热传导系数的增加而降低。而在光斑直径较大的情形下,激光辐照区的温度梯度较小,此时激光的热能沉积作用加强,在激光辐照区,沿轴向和环向方向的热量传输较少,此时即使加大外层壳的热传导系数,热量沿轴向和环向方向传输依然很困难。在这种情况下,激光辐照区的能量主要集中向厚度方向传播,光斑中心处的温升会随热传导系数的增大而上升。

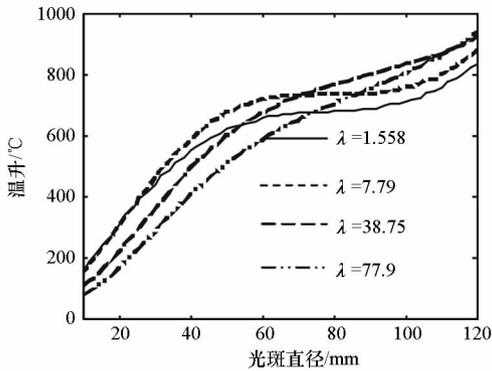


图4 热传导系数不同时内层壳体光斑中心处温升随光斑直径的变化 ($t = 10s$)

Fig.4 Temperature rise of inner shell at spot center versus spot diameter under various conductivities ($t = 10s$)

3 强激光照射下双层壳应力场计算

考虑图1所示圆柱壳,取内层圆柱壳材料参数 E 和 α 随温度的变化如表1所示,采用有限元法分析双层壳体的温度场、应力场和位移场分布问题。

表1 内层圆柱壳材料的 E 和 α 随温度的变化

Tab.1 Values of E and α of inner cylindrical shell versus various temperatures

$T(^{\circ}C)$	0	20	100	200	300	400	450	500	550	600
$E(GPa)$	211	210	206	201	189	184	178	168	156	141
$\alpha(\times 10^{-6} \cdot ^{\circ}C^{-1})$	10.76	10.76	11.53	12.25	12.90	13.58	13.93	14.02	14.22	14.62

因为该模型主要是为了研究防热层对内层壳体温度场、应力场和位移场的影响。因此假定内层壳体(普通低碳钢)的热传导系数、比热、厚度、

弹性模量、材料热膨胀系数均保持不变,而分如下两种情况来考虑外层壳体厚度、热传导系数、材料热膨胀系数的变化对内层壳体温度场、应力场和位移场的影响。

(1)分别取外层壳体厚度为 0.5mm、1mm、1.5mm 和 2mm,热传导系数为 0.779W/(m·°C), 1.558W/(m·°C), 38.95W/(m·°C), 77.9W/(m·°C), 而保持比热为 845.1J/(kg·°C),来计算内层壳体的温度场,结果如图5所示。然后将所求的温度场作为温度载荷,对受内压作用的双层壳体进行热力耦合分析,内层壳体光斑中心处应力场、位移场如图6与图7所示。由图5可知,随着外层壳体厚度的增加,内层壳体温度会降低,这是因为在外层壳体材料热传导系数不变的情况下,随着外层壳体厚度的增加,在相同时间内传输到内层壳体的热量减少,从而使内层壳体的温升幅度减

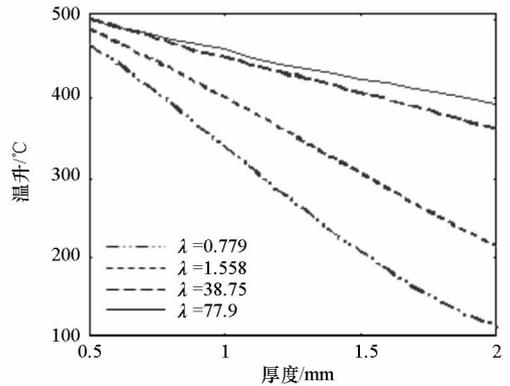


图5 热传导系数不同时内层壳体光斑中心处温升随厚度的变化 ($t = 3s$)

Fig.5 Temperature rise of inner shell at spot center versus thickness under various conductivities ($t = 3s$)

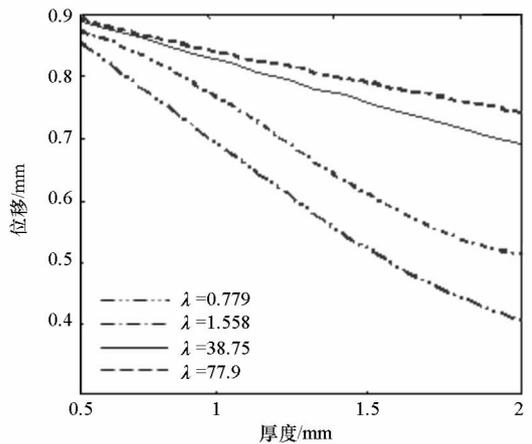


图6 热传导系数不同时内层壳体光斑中心处位移随厚度的变化 ($t = 3s$)

Fig.6 Displacement of inner shell at spot center versus thickness under various conductivities ($t = 3s$)

小。同样由图5中4条曲线可知,在外层壳体厚度、比热不变的情况下,随着外层壳体材料热传导系数的增加,内层壳体的温升会随着增加,这说明在光斑直径较大的情形下,外层壳体的低导热系数有利于缓解内层壳体的温升,例如当外层壳体厚度为2.0mm,其热传导系数从77.9W/(m·℃)变到0.779W/(m·℃)时,引起内层壳体光斑中心的温升从396.90℃下降到113.24℃。由图6与图7可知,在外层壳体厚度比热不变的情况下,内层光斑中心点应力和位移均会随着外层壳体材料热传导系数的增加而增加,这是因为随着外层壳体材料热传导系数的增加,内层壳体的温升幅度也相应增加,而温升幅度的增加引起热应力与热变形相应增加,因而使内层壳光斑中心点应力和位移增大。例如当外层壳体厚度为2.0mm,其热传导系数从0.779W/(m·℃)变到77.9W/(m·℃)时,光斑中心点应力由21.51MPa增加到604.45MPa,光斑中心点位移则由0.459mm增加为0.755mm。

表2 内层壳体光斑中心应力、位移随外层壳体厚度与材料热膨胀系数的变化

Tab.2 Values of stress and displacement of inner shell at spot center versus various thickness and expansion factors of outer layer

厚度 (mm)	内层壳体光斑中心点应力(MPa)					内层壳体光斑中心点位移(mm)				
	材料热膨胀系数 $\alpha (\times 10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$					材料热膨胀系数 $\alpha (\times 10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$				
	8.6	10.75	12.90	15.05	17.20	8.6	10.75	12.90	15.05	17.20
0.5	742.51	741.64	740.64	739.86	738.97	0.852	0.853	0.854	0.855	0.856
1.0	449.82	447.44	445.07	442.70	440.35	0.698	0.700	0.703	0.706	0.708
1.5	178.46	174.25	170.11	166.03	162.02	0.554	0.558	0.563	0.567	0.571
2.0	21.51	19.36	17.25	15.85	13.67	0.459	0.465	0.470	0.476	0.482

表3还给出了外层壳体厚度(1mm)、比热(845.1J/(kg·℃))、热传导系数(0.779W/(m·℃))、泊松比(0.3)不变而弹性模量改变时内层壳体光斑中心点应力、位移的变化结果。而当外层壳体厚度(1mm)、比热(845.1J/(kg·℃))、热传导系数(0.779W/(m·℃))、弹性模量(3500MPa)不变而泊松比改变时,内层壳体光斑中心点应力、位移的变化结果如表4所示。由表

表3 内层壳体光斑中心应力、位移随外层壳体弹性模量的变化

Tab.3 Values of stress and displacement of inner shell at spot center versus various elastic modulus of outer layer

厚度 (mm)	内层壳体光斑中心点应力(MPa)				内层壳体光斑中心点位移(mm)			
	弹性模量 E (MPa)				弹性模量 E (MPa)			
	3500	7000	14000	21000	3500	7000	14000	21000
1.0	449.82	445.53	437.42	429.90	0.6979	0.7011	0.7073	0.7133

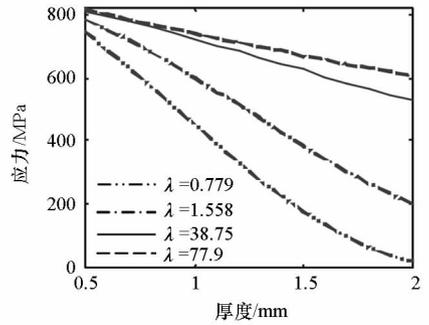


图7 热传导系数不同时内层壳体光斑中心处应力随厚度的变化(t=3s)

Fig.7 Stress of inner shell at spot center versus thickness under various conductivities (t=3s)

(2)分别取外层壳体厚度为0.5mm、1mm、1.5mm和2mm,材料热膨胀系数为 $8.6 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, $10.75 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, $12.90 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, $15.05 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, $17.20 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$,而保持热传导系数为0.779W/(m·℃),比热为845.1J/(kg·℃),来计算内层壳体的热力响应。内层壳体光斑中心点应力、位移的变化结果如表2所示。

3和表4可知,外层壳体材料的弹性模量、泊松比以及热膨胀系数对内层壳体的应力场和位移场的影响较小。这是由于作为隔热涂层材料,外层壳体材料的弹性模量仅为内层壳体的几十分之一,与内层壳相比,其承载能力非常弱,故外层壳体材料力学性能的变化对内层壳体的结构响应影响不大。

表4 内层壳体光斑中心应力、位移随外层壳体泊松比的变化

Tab.4 Values of stress and displacement of inner shell at spot center versus various Poisson ratio of outer layer

厚度 (mm)	内层壳体光斑中心点应力(MPa)				内层壳体光斑中心点位移(mm)			
	材料泊松比				材料泊松比			
	0.3	0.35	0.4	0.45	0.3	0.35	0.4	0.45
1.0	449.82	449.29	448.70	448.02	0.6979	0.6983	0.6988	0.6994

若内层壳体外面无隔热层,此时双层壳体退化为单层壳体,用同样功率大小的激光辐照该壳体相同时间(假定吸收系数不变),计算得到内层壳体光斑中心的温升为 556.04℃,应力为 1089.78MPa,最大变形量为 2.36mm。而根据前面的计算结果(见表3),当在内层壳体外面再加一层厚度为 1mm,传热系数为 0.779w/(m·℃),比热为 845.1kJ/(kg·℃),弹性模量为 3500MPa,泊松比为 0.3,材料热膨胀系数为 8.6 × 10⁻⁶·℃⁻¹的隔热材料,同样功率大小的激光束辐照相同的时间,内层壳体光斑中心的温升为 341.26℃,应力为 449.82MPa,最大变形量为 0.698mm,由此可见外层隔热层的热防护作用。

4 结论

本文采用3维有限元分析模型,就工程中具有重要应用背景的双层壳在强激光辐照下的温度场、应力场和位移场进行了计算。分析了在激光功率一定的情况下,外层壳体的热传导系数、厚度和材料热膨胀系数的变化对内层壳体温度场、应力场和位移场的影响,根据计算结果,可得出如下结论:

(1)激光光斑直径与外层壳的热传导系数对内层壳的温度场分布有着重要影响,要想取得预期的隔热效果,对于小光斑,宜增大外层壳的热传导系数,而对于大光斑,相反应该减小外层壳的热传导系数;

(2)在所分析的参数中,外层壳体的热传导系数对内层壳体的温度场影响最大,进而影响到内层壳体的应力场和位移场变化。因而应选取热传导系数较小的材料作隔热层材料,同时为了使隔热层有一定的承载能力,应适当提高隔热层材料的弹性模量;

(3)在一定范围内,外层壳体材料的厚度对内层壳体的应力场和位移场影响较大,而其弹性

模量和泊松比的变化对内层壳体的应力场和位移场影响较小;

(4)所采用的方法和计算模型对于研究多层壳体结构的热传导问题是可行的,相关研究结果是进一步分析多层复合结构的激光破坏效应以及结构的抗激光加固等方面研究的基础。

参考文献:

- [1] Adachi J, Anastasi R F, et al. Laser Produced Strength Degradation of Plates in Tension and Tubes in Torsion[R]. ADAD60454,1978.
- [2] Medford J E, Gray P M. The Response of Structural Materials to Combined Laser and Mechanical Loading[R]. AIAA-80-1550,1980.
- [3] 赵剑衡,章冠人,刘绪发. 强激光辐照下充压柱壳结构变形的数值模拟[J]. 高压物理学报, 1996, 10(4): 262-268.
- [4] 赵剑衡,章冠人,刘绪发. 强激光辐照下柱壳温度场的数值模拟[J]. 高压物理学报, 1996,10(1):44-49.
- [5] 袁红,赵剑衡,谭福利,等. 激光辐照下旋转充压柱壳失效的数值模拟[J]. 应用激光, 2006, 26(3): 167-171.
- [6] 纪峥,刘勇刚. 激光束照射下内压柱壳的热爆破数值模型[J]. 强激光与粒子束, 1996, 8(1): 100-103.
- [7] Ji Z, Deng K S, Davies A W, et al. Numerical Modeling of a Thermal Destruction of a Cylindrical Shells with Internal Pressure Under Laser Irradiation [J]. Computers and Structures, 1999, 71(4):359-370.
- [8] 邵元培,计世藩. 对“爱国者”导弹发动机激光破坏的计算分析[J]. 红外与激光工程, 1999, 28(6): 41-46.
- [9] 李雅娣,张钢锤,王华,等. 激光辐照充压柱壳温度场和应力场数值模拟[J]. 固体火箭技术, 2006, 29(1):19-21.
- [10] 郭少锋,陆启生,陈金宝,等. 强激光辐照下充内压圆柱壳的破坏阈值和破坏时间[J]. 中国激光, 2002, 29(9): 783-786.
- [11] 吴非,周建平,雷勇军. 强激光照射下双层壳体温度场的数值模拟[J]. 国防科技大学学报, 2003, 25(4): 5-9.
- [12] 吴非. 强激光辐照下结构热力效应分析[D]. 长沙:国防科学技术大学,2006.