

文章编号: 1001-2486(2003)04-0005-05

强激光照射下双层壳体温度场的数值模拟*

吴非, 周建平, 雷勇军

(国防科技大学航天与材料工程学院, 湖南长沙 410073)

摘要: 运用有限元法对强激光照射下双层壳体的温度场进行了数值模拟。详细分析了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的影响。计算中考虑了内层壳体的热损耗效应。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的影响, 并将计算结果与强激光照射下单层壳体的温度场进行了比较, 得到一些有意义的结论。

关键词: 强激光; 双层壳体; 温度场

中图分类号: TN246 **文献标识码:** A

Numerical Simulation of Temperature Field in the Two-layered Shell Irradiated by the Intensive Laser Beam

WU Fei, ZHOU Jian-ping, LEI Yong-jun

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

Abstract: The temperature field distribution in the two-layered shell is simulated numerically by using the finite element method. The influence of material properties of the outer shell on the temperature rise in the inner shell is analyzed under a given laser power. The results indicate that the difference of material properties of the outer shell in specific, thermal conductivity as well as its thickness can greatly change the temperature of the inner shell. The thermal wastage in the inner shell between the inner and outer shell are investigated in the process of computation. Moreover, the effect of temperature-depending material properties of the inner shell on its temperature rise is presented. And some significant conclusions are reached by comparing with the temperature field distribution of the one-layered shell irradiated by the intensive laser beam.

Key words: intensive laser beam; two-layered shell; temperature field

强激光照射下双层壳体的温度场分析在民用和军事工业上都有极其特殊的应用背景。例如, 为了加强金属表面对激光的吸收, 通常在金属表面加一层涂料; 为了防止热辐射和温度变化可能对导弹造成的热损伤, 通常在导弹表面覆盖一层较薄的防热层(如高硅氧)。国内有许多学者对结构在激光辐照下的温度场进行了计算和研究, 纪峥等^[1~4]对在激光束照射下的内压柱壳进行了热爆破数值模拟; 赵剑衡、章冠人等^[5]用有限元方法计算了强激光辐照下柱壳温度场的变化和分布情况, 计算中考虑了材料热性能参数随温度的变化; 漆海滨等^[6]利用热传导理论分析了强激光对运动物体的加热问题, 得出了物体表面温度、激光功率密度、光斑尺寸及光斑相对于物体运动速度之间的关系; 强希文等^[7,8]根据激光源加热金属材料的温度时空分布, 考虑材料的物性参数随温度的变化, 通过求解热传导方程得到各种情况下材料的温度时空分布。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极少涉及。

1 控制方程

如图 1 所示, 研究一双层厚壁圆柱壳在激光辐照下的温度场分布。假设该圆柱壳的内径为 r_0 , 外径为 r_1 , 长为 l , 且作用在圆柱壳上的激光束为高斯光束, 此外无其它内热源, 那么该双层圆柱壳在不考虑热力耦合效应时热传导方程为:

* 收稿日期: 2003-03-11

基金项目: 国家杰出青年基金资助项目(19925209); 湖南省自然科学基金资助项目(02JJY2009)

作者简介: 吴非(1974-), 男, 博士生。

$$\frac{\partial T_i}{\partial t} = a_i^2 \left(\frac{\partial^2 T_i}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_i}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T_i}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T_i}{\partial z^2} \right) \quad i = 1, 2 \quad (1)$$

其中, i 表示内外层壳(下同), 如 T_1 为外层壳体的温度场, T_2 为内层壳体的温度场。壳体外表面($r = r_1$)的边界条件为:

$$- \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} = \alpha_1 P_s \quad (2)$$

在两层壳体接触处, 若为理想接触, 两层壳体之间无能量积累, 则有

$$- \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} \quad (T_1 = T_2) \quad (3)$$

两层壳体之间若为非理想接触, 则有

$$- \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} = R(T_1 - T_2) \quad (T_1 \neq T_2) \quad (4)$$

考虑内层壳体的热损耗边界条件, $r = r_0$ 时,

$$- \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} = sT_2 \quad (5)$$

前几式中, α_1 为外层壳体表面对激光的吸收系数, P_s 为入射激光的功率密度, λ 为热传导系数, a_i 为热扩散系数, 且 $a_i^2 = \lambda/c_i$, c_i 为壳体材料的比热, R 为两层壳体之间的接触面热导, s 为内层壳体表面的散热系数。

2 物理模型和简化的有限元计算模型

图 1 所示圆柱壳长为 120mm, 内半径为 56mm, 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, 材料为铝合金, 其热传导系数为 117.6 W/(m·K), 比热为 883J/(kg·K)。连续激光到达壳体表面时光斑直径为 10mm, 光强为 400W/cm²。考虑到激光能量只是部分被吸收, 取吸收系数为 0.3, 这样原来的问题变为在柱壳上有一个热流输入区。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, 取结构的四分之一进行计算(见图 2)。激光束照射到圆柱壳表面时, 可看做边界热流输入的导热问题。

由于温度仅在激光辐照区域内变化比较剧烈, 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三倍来考虑。为了精确考虑外层壳体传热特性对内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 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(在单层壳体的计算中全部为壳单元, 而在该模型的计算中要考虑体单元与壳单元之间的耦合)。

3 温度场计算结果分析

因为该模型主要是为了研究防热层对内层壳体温度场的影响, 因此假定内层壳体(铝合金材料)的热传导系数、比热、厚度均保持不变, 而分如下两种情况来考虑外层壳体厚度、热传导系数、比热的变化对内层壳体温度场的影响。

(1) 分别取外层壳体厚度为 0.5mm, 1mm, 1.5mm, 2mm, 热传导系数为 7.79W/(m·K), 38.95W/(m·K), 77.9W/(m·K), 保持比热为 845.1J/(kg·K), 计算内层壳体的温度场。结果表明, 随

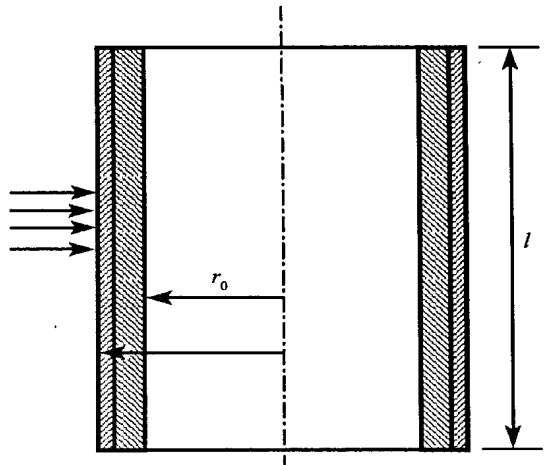


图 1 受激光束辐照的双层圆柱壳

Fig. 1 Two-layered shell irradiated by laser beam

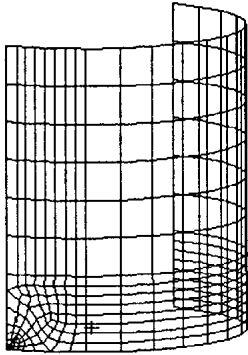


图2 四分之一圆柱壳单元划分示意图
Fig.2 Element mesh of quarter cylindrical shell

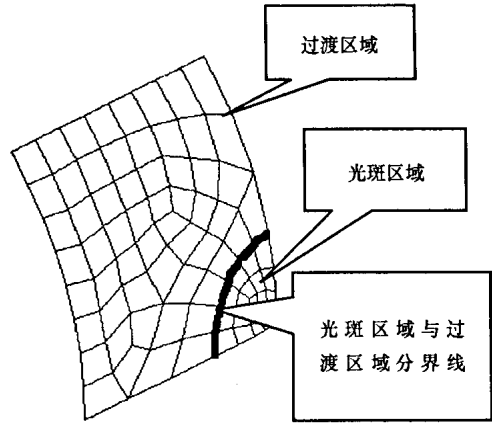


图3 光斑区域及过渡区域单元划分示意图
Fig.3 Element mesh of the laser irradiated area and transitional area

随着外层壳体厚度的增加, 内层壳体温度会降低, 如图4所示。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小。同样由图中3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, 外层壳体在轴向和环向方向的热量传输也增加, 致使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小, 这说明在一定时间段内, 外层壳体的高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0.5mm时, 其热传导系数从7.79W/(m·K) 变到77.9W/(m·K), 引起内层壳体光斑中心的温升从253°C降低到230°C。

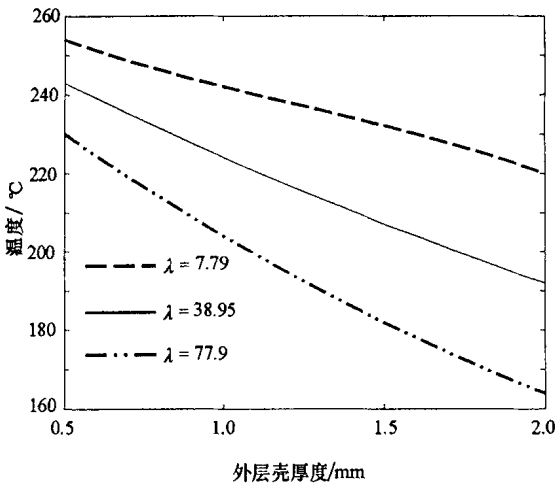


图4 热传导系数不同时内层壳体光斑中心处温度随外层壳厚度的变化($t = 10s$)
Fig.4 Temperature variation vs thickness in the center of the laser irradiated area at various thermal conductivity

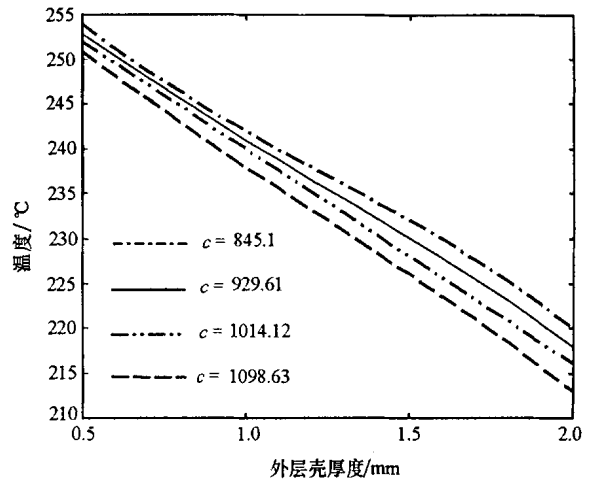


图5 比热不同时内层壳体光斑中心处温度随外层壳厚度的变化($t = 10s$)
Fig.5 Temperature variation vs thickness in the center of the laser irradiated area at various specific

(2) 分别取外层壳体厚度为0.5mm, 1mm, 1.5mm, 2mm, 比热为845.1J/(kg·K), 929.61J/(kg·K), 1014.12J/(kg·K), 1098.63J/(kg·K), 保持热传导系数为7.79W/(m·K), 计算内层壳体的温度场。结果表明随着外层壳体厚度的增加, 内层壳体的温升幅度减小, 如图5所示, 原因与图4相同。而当外层壳厚度一定时, 内层壳光斑中心的温度随外层壳体比热的减小而增加。这是因为随着外层壳体比热的增加, 升高相同的温度, 外层壳体吸收的热量增多, 致使传输到内层壳体的热量减少, 从而使内层壳体的温升

幅度减小。

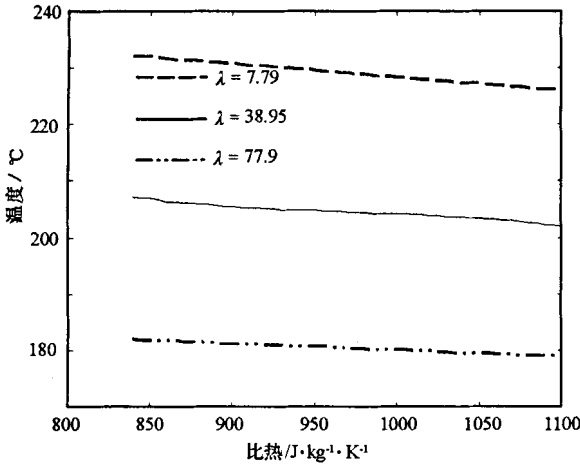


图 6 热传导系数不同时内层壳体光斑中心处温度随外层壳比热的变化 ($t = 10s$)

Fig. 6 Temperature variation vs specific in the center of the laser irradiated area at various thermal conductivity

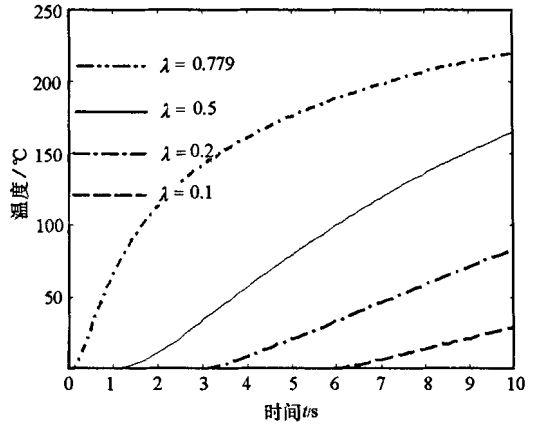


图 7 热传导系数不同时内层壳体光斑中心处温升效应 ($t = 10s$)

Fig. 7 Temperature variation vs time in the center of the laser irradiated area at various thermal conductivity

图 6 还给出了外层壳体厚度一定 (1.5mm) 而比热和热传导系数不同时, 内层壳体光斑中心在激光辐照 10s 后的温升情况。结果表明, 随着外层壳体比热的增加, 内层壳体的温升幅度减小, 但 3 条曲线的斜率不尽相同。当外层壳体的热传导系数较小时, 随其比热的增大, 内层壳体的温升幅度减小较多。而当外层壳体的热传导系数较大时, 内层壳体的温升幅度受其比热的影响较小。

图 7 和图 8 分别给出了比热为 $845.1 J/(kg \cdot K)$, 厚度为 2mm 时, 外层壳体取不同热传导系数时内层壳体的温升效应随时间的变化和激光辐照 10s 后柱壳沿环向的温升情况。由图 7 可知, 当热传导系数 ($\lambda < 0.779$) 很小时, 例如, 当 λ 为 $0.1 W/(m \cdot K)$ 和 $0.2 W/(m \cdot K)$ 时, 内层壳体的温升分别延迟了 6.5 s 和 3.2 s。此时材料的热导率很低, 传热速度很慢, 致使内层壳体的温升出现延迟滞后现象, 并且这种现象随外层壳体厚度的增加或其比热的增加会更加明显; 在内层壳体有温升响应后, 相同时间内随着外层壳体热传导系数 ($\lambda < 0.779$) 的增加, 传输到内层壳体的热量增加, 因此内层壳体光斑中心处温升也随之升高 (此时, 外层壳体沿轴向和环向的热量传输可忽略, 只集中向径向传热, 可视为一维传热问题来处理)。从图 8 中可以看出, 在相同时间内, 随着外层壳体热传导系数 ($\lambda > 0.779$) 的增加, 内层壳体光斑中心处温升随之降低, 而光斑区域外温升幅度稍有增大。这是因为当热传导系数较大时, 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变快, 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 (例如当 $\lambda = 38.95 W/(m \cdot K)$ 时, 在激光束照射 10s 时, 沿环向方向可传到 80° , 此时需视为三维传热问题来处理)。综合来说, 就内层壳体而言, 外层壳体的热传导系数过大或过小均会有效减少内层壳体的温升效应, $\lambda = 0.779$ 是其分界点, 这是一维分析模型不能得到的结论。

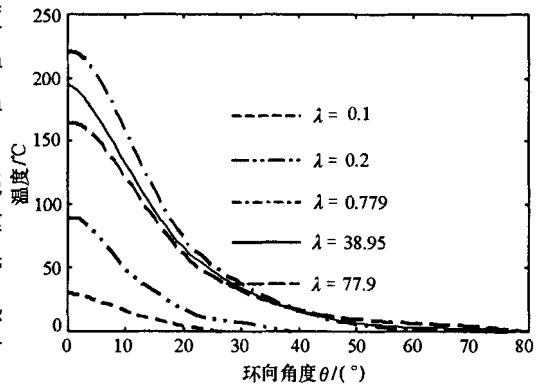


图 8 热传导系数不同时内层壳体光斑区温度随环向角度的变化 ($t = 10s$)

Fig. 8 Temperature variation vs angle near laser spot at various thermal conductivity

而对于单层铝合金壳体,激光束只需辐照 0.91s,光斑中心的温升就可达到 265℃。如果在单层铝合金壳体外面再加一层厚度为 0.5mm,热传导系数为 0.779W/(m·K),比热为 845.1J/(kg·K)的隔热材料,同样功率大小的激光束需辐照 10s,内层铝合金壳体光斑中心的温升才能达到 253℃,由此可见隔热层对内层壳体的隔热作用。另外,当考虑壳体本身与外界环境的传热以及内层的热损耗特性与层间热阻时,内层铝合金壳体的温升幅度将会减小。

4 内层圆柱壳材料特性温度相关时温升效应分析

在一般情况下,典型金属材料材料参数均会随温度的变化而变化,而前面的计算没有考虑这种变化对温升效应的影响。本节将考虑内层圆柱壳材料参数的温度相关性对温升效应的影响,计算中取内层圆柱壳材料参数比热、热传导系数随温度的变化如表 1 所示。

表 1 比热、热传导系数随温度的变化

Tab. 1 Thermal conductivity and specific heat varying with temperature

温度(℃)	25	100	200	300	400
热传导系数(W/(m·K))	117.6	121.8	126	130.2	134.4
比热(kJ/(kg·K))	882	924	1008	1050	1092

为了确定内层圆柱壳材料的比热、热传导系数随温度的变化对温度场的影响,取外层圆柱壳的热传导系数为 0.779W/(m·K),比热为 845.1J/(kg·K),厚度为 1mm 进行双层壳体温度场分析,与不考虑内层圆柱壳材料比热、热传导系数随温度的变化时相比,光斑中心处的温度大约升高了 7%。

5 结论

(1) 外层壳体的热传导系数对内层壳体的温度场影响最大,且存在一个热传导系数分界点,当外层壳体的热传导系数高于或低于这一分界点时,内层壳体的温升幅度均会减小;同时还发现当热传导系数很小时,内层壳体的温升会出现延迟滞后现象。

(2) 当考虑内层壳体材料的比热、热传导系数随温度变化的特性时,内层壳体光斑中心处的温升幅度大约上升 7%。

(3) 在一定范围内,外层壳体的比热对内层壳体的温度场影响较小。

综上所述,隔热层的存在有效地缓解了内层壳体温度的上升,从而为导弹的抗激光加固提供了理论依据。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 纪峥,邓可顺,喻永声. 内压柱壳在激光束照射下热爆破数值模拟[J]. 应用力学学报, 2000, 17(1): 23-28.
- [3] Ji Z, Deng K, et al. Numerical Modeling of a Thermal Destruction of a Cylindrical Shells with Internal Pre-pressure under Laser Irradiation[J]. Computers & Structures, 1999, 71: 359-370.
- [4] Deng K, Ji Z, Davies A W, Williams F W. Thermo-buckling Failure of Axially Pre-compressed Cylindrical Shells Irradiated by Laser Beam [J]. AIAA Journal, 2000, 38(10): 1789-1794.
- [5] 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.
- [6] 漆海滨,李文煜. 强激光束对运动物体的加热[J]. 红外与激光工程, 1999, 28(1): 33-35.
- [7] 强希文,张建泉. 强激光辐照半导体材料的温升及热应力损伤的理论研究[J]. 中国激光, 2000, 8(8).
- [8] 强希文. 强激光与靶材相互作用的力学效应研究[J]. 激光与红外, 2000, 30(3): 141-144.