

激光辐照转动充压圆柱壳体热力学效应*

丁 升¹, 王建国^{1,2}, 刘 峰¹, 束庆邦¹, 王玉恒¹

(1. 西北核技术研究所, 西安 710024; 2. 西安交通大学 微波与光通信研究所, 西安 710049)

摘 要: 采用有限元计算方法对激光辐照下转动充压壳体的热力学问题进行了较为全面的数值计算, 获得了激光辐照下转动内压圆柱壳壁上的温升、应力、应变、位移分布等物理图像, 为进一步分析转动充压圆柱壳体在激光辐照下的破坏与失效奠定了基础。提出的解决数值计算中移动热流载荷问题的双时间步长法, 可以有效提高计算效率, 同时提高计算精度。研究结果表明, 对于给定的壳体结构, 其损伤阈值时间主要取决于靶面激光强度与壳体旋转频率; 在辐照过程中, 损伤最先出现在最初受激光辐照的区域。

关键词: 激光辐照; 热力耦合; 转动壳体; 屈服比; 双时间步长法

中图分类号: TN241 **文献标识码:** A

激光辐照热力耦合效应是近年来非常令人关注的研究课题, 在激光加工、材料改性、结构成型、航空航天、船舶等领域, 应用十分广泛。在这些应用中, 很多问题都涉及到移动光斑问题, 比如激光加工中的切割和焊接, 结构成型中激光扫描改变板材的形状等。另外, 激光辐照热力耦合效应研究中时常会遇到移动载荷问题^[1-3]。本文重点考虑激光辐照转动内压圆柱壳体的热力耦合问题, 这方面的研究结果报道较少, 王伟平等^[1]曾对重复频率激光辐照转动金属壳的加热进行过实验与理论研究, 给出了温度的变化历程, 但没有涉及到力学行为。最近, 袁红等^[2-3]分别分析了激光辐照旋转柱壳热和力的问题, 但由于采用了热力解耦的方法计算, 没有给出随时间变化的力学过程。

为解决计算效率与计算精度问题, 提出了解决数值计算中移动热流载荷问题的双时间步长法, 极大地提高了计算效率, 同时提高了计算精度。在此基础上, 采用热和力直接耦合的计算方法, 利用多层壳有限单元, 对强激光辐照转动充压圆柱壳体的热力耦合过程进行了比较全面的数值模拟, 给出了力学参量随时间变化的物理图像。

1 移动热流载荷的处理

在激光辐照材料或结构的热力耦合研究中, 激光作为重要的载荷条件, 其作用范围、作用时间以及功率的大小都会直接影响到最终效应。数值计算过程中时间和空间存在离散问题, 载荷的作用范围、作用时间以及载荷的大小与实际物理过程有一定偏差, 这些都直接影响到数值结果的可信度, 对于移动载荷, 影响尤为显著。

激光辐照转动圆柱壳体侧面时, 壳体表面上一定区域内的点周期性地出入光束辐照范围, 在一个较小的时间段内, 辐照区域内各点所受到的激光辐照量是不相同的。设数值计算中的时间步长为 Δt , 由于 Δt 是数值计算中最小的时间单位, 计算过程无法处理 Δt 内热载荷的变化, 只能将激光热载荷集中加载在光束沿运动方向的弦长范围内, 且作用时间相同。事实上, 由于光束与受照物体的相对运动, 在 Δt 时间内激光在辐照区域内各点的驻留时间不尽相同, 而且在此时间段内激光沿运动方向的辐照范围会超出光束沿运动方向的弦长, 超出的多少由 Δt 的大小决定, Δt 越小, 超出的范围越小, 激光热流加载也就越符合实际物理过程, 这就要求计算中的时间步长越小越好, 但这样会大大增加计算量, 从而大大降低计算效率, 给数值计算带来很大困难。

为此, 本文提出了一种利用主时间步长与子时间步长相结合的双时间步长法, 即计算中采用主时间步长 Δt , 在一个主时间步长内又取若干个子时间步长 $\Delta t'$, 对每一个空间点的热流载荷单独进行计算。当 $\Delta t'$ 累加至 Δt 时, 将各点的累加载荷代入边界条件进行热力耦合计算。相对于本文的双时间步长法, 我们称传统方法为单时间步长法。由于在每一个子时间步长内仅仅对激光热流载荷进行运算, 基本不影响整个热力过程的计算量, 因此, $\Delta t'$ 可以取得很小, 其结果接近于实际物理过程, 保证了计算精度。

* 收稿日期: 2006-02-10; 修订日期: 2006-09-17

基金项目: 国防科技基础研究基金资助课题

作者简介: 丁 升(1966—), 男, 副研究员, 博士生, 主要从事脉冲辐照热力耦合效应理论研究; nintding@163.com。

对于一个时间子步 i , 可以得到某一点上的能量密度 Q_i , 在 Δt 内该点上的能量密度为

$$Q' = \sum_i Q_i \quad (1)$$

由于计算中要求激光辐照边界条件必须为热流边界, 即激光能量密度需要转换为功率密度

$$W' = \sum_i Q_i / \Delta t \quad (2)$$

这就是计算中实际加载的热流边界值, 它将载荷作用时间的差异转换为载荷量的差异, 方便了计算。

2 热力耦合数值计算

激光辐照内压壳体的计算可采用耦合法和解耦法^[4]。为得到随时间变化的热力学过程, 本文采用耦合法对激光辐照转动内压圆柱薄壳的热力耦合问题进行了有限元计算。为提高计算效率, 采用了多层 2 维壳单元模型, 与 3 维体单元模型相比, 其优点是用较少的计算量可得到壳体不同厚度上的更多计算结果, 缺点是无法得到壳体壁面法向结果。

材料的力学性能通常随材料的温度变化而变化。激光辐照热力耦合问题涉及的温度范围很大, 因此必须考虑材料性能的温度效应。本文计算中引入了温升对材料性能的影响^[5-6]。在这种情况下, 计算输出的一些力学参量已不再具有绝对意义, 必须结合具体温度才能给出准确判断, 给数据分析带来不便。为方便计算结果分析, 快捷判断激光辐照下壳体材料的屈服情况, 根据塑性力学的基本法则引入屈服比 χ , 定义为 von Mises 等效应力与随温度变化的初始屈服应力的比值

$$\chi = \sigma_{\text{eq}} / [\sigma_{s0}(T)] \quad (3)$$

式中: $\sigma_{s0}(T)$ 为材料随温度变化的初始屈服应力, 一般由实验测量给出; σ_{eq} 为 von Mises 等效应力^[7]。(3) 式的力学意义是: 当 $\chi=1$ 时, 等效应力等于材料的初始屈服应力, 材料开始进入塑性变形。因此, 分析计算结果时, 根据 χ 的数值, 很容易地判断壳体材料的屈服情况。

图 1 是简化计算模型示意图, 30CrMnSiA 钢质圆柱壳体外半径 R 为 10 cm, 高度为 40 cm, 壳体壁厚为 1.5 mm, 内部充压 8 MPa, 绕中心轴沿顺时针方向旋转。为模拟两端带封头的密封充压壳体, 在柱壳上下两端施加一定大小的拉力载荷, 根据此模型的弹性力学解析理论, 该拉力的大小应该使壳壁内的平均轴向应力为由内压产生的壳壁内平均环向应力的一半。

设激光为轴对称高斯光束, 有效激光峰值功率密度 $\alpha I_0 \approx 0.8 \text{ kW} \cdot \text{cm}^{-2}$, 辐照时间 7 s, 则

$$I = I_0 \exp(-2r^2/r_0^2) \quad (4)$$

式中: I_0 为光轴处激光功率密度; r_0 为光束半径; r 为光束内任一点距光轴的距离。

计算中取壳体初始温度为 20 °C, 有限元计算采用 2 维四边形多层壳单元, 沿壁厚方向平均分为 5 层, 即每一层的厚度为 0.3 mm。由于壳体转动速率很低, 由壳体转动带来的附加惯性力相对于壳体内压很小, 可以忽略不计。因此, 为计算方便, 设壳体静止, 光束以相同的频率绕壳体反方向旋转。激光能量以热流形式施加于壳体外壁面, 同时考虑了由柱壳曲率引起的余弦加载效应。为保证计算精度, 提高计算效率, 采用双时间步长法处理热流载荷。计算中考虑到与实际物理过程的一致性, 首先计算内压壳体的力学过程, 结果稳定后再施加热流载荷, 激光辐照结束后, 撤出热流载荷, 继续计算至预定时刻。

3 计算结果与分析

为比较单时间步长法与双时间步长法在计算精度、计算效率方面的差异, 首先采用两种方法分别计算、比较了热流加载双时间步长法与单时间步长法在温度、应力、位移等方面的计算结果。然后对激光辐照转动壳体的热力效应进行了较全面的数值计算, 光束半径 r_0 分别取 10.00, 5.00, 2.50 和 1.25 cm, 在分析结果时以 R/r_0 的数值予以区别, 壳体转动频率分别取 0.25, 0.50, 1.00, 2.00 和 4.00 Hz, 总计算时间为 8.0 s, 其中前 0.2 s 进行内压壳体的纯力学分析, 接下来的 7.0 s 进行激光热载荷作用下壳体的热力分析。在激光辐照结束

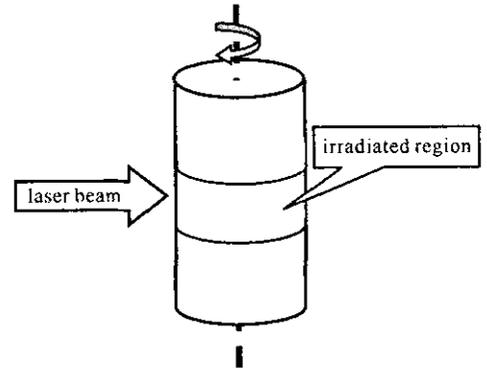


Fig. 1 Rotating cylindrical shell irradiated by laser beam

图 1 激光辐照转动圆柱壳体示意图

后,再进行 0.8 s 热力分析。对于较低的转动频率,除幅值不同外,计算结果基本相似。因此,除非特别注明,以下结果均以转动频率 1 Hz 为例进行分析。

3.1 单双时间步长法的比较

按双时间步长法计算时,取主时间步长 0.05 s,子时间步长取为主时间步长的 1/100;按单时间步长法计算时,取时间步长为 0.05,0.04 和 0.02 s,计算总时间为 2.0 s,其中激光辐照 1.8 s,前 0.2 s 未加载激光热流。沿环向分布的壳体表面温度的比较如图 2 所示,可以看出,利用双时间步长法计算得到的结果曲线平滑,数据变化稳定(图 2(c)实线),而利用单时间步长法计算时,在时间步长与双时间步长法的主时间步长相等时,给出的结果起伏性很大(图 2(a)),只有在时间步长很小时,结果才比较接近双时间步长法的计算结果(图 2(c)),但曲线仍然不平滑。计算结果表明,除非时间步长取得很小,否则采用单时间步长法得到的结果较难满足精度要求,而采用双时间步长法处理热流动载可以在时间步长较大的情况下给出较高精度的计算结果。

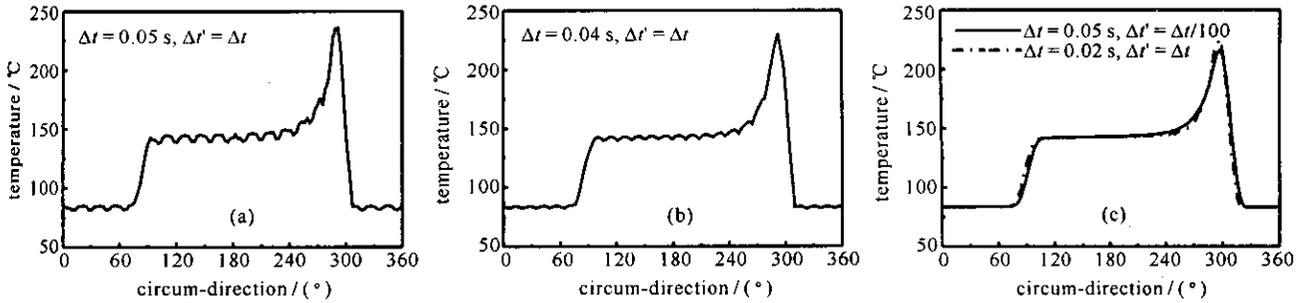


Fig. 2 Comparison of temperatures on the surface of shell

图 2 表面温度比较

计算工作在 HP 工作站上完成,计算机的内存为 4GB,64 位 Linux 操作系统,采用双 Xeon 处理器并行计算。表 1 给出了计算所需 CPU 时间的比较。从表中可以看出,时间步长相同时,两种方法所需 CPU 时间差异很小。从单时间步长法计算所需 CPU 时间看,Δt=0.02 s 时所花费的 CPU 时间为 Δt=0.05 s 时的 2.5 倍,而结果仍然不很令人满意。由此可见,采用双时间步长法单独处理移动热流载荷可以提高数倍计算效率,在复杂问题计算时表现得尤为明显。

表 1 CPU 时间比较

Table 1 Comparison of CPU times

| double time step method | | single time step method | | | |
|-------------------------|---------|-------------------------|--------|--------|--------|
| main time step/s | 0.05 | time step/s | 0.05 | 0.04 | 0.02 |
| time sub-step/s | 0.000 5 | | | | |
| CPU1 time/s | 310.94 | CPU1 time/s | 289.12 | 375.30 | 740.70 |
| CPU2 time/s | 307.14 | CPU2 time/s | 291.76 | 361.40 | 732.13 |

3.2 温度

图 3(a)给出了 3.6 s(以激光加载时刻为零时计,下同)时光斑中心轨迹线(即通过光斑中心的圆柱周向)上不同壁厚处的温度分布(零时光斑中心放置在约 90°的位置,角度增加的方向为光斑相对运动方向,下同),图中两条竖直实线标出了该时刻光斑位置。由计算结果可以看出,刚刚进入辐照区的点的温度最低,即将离开辐照区的点的温度达到最高,这是由激光在这些点上的驻留时间决定的。结果还显示出了温度在厚度方向上的平衡过程,随着离开辐照区时间的增加,壳体前表面温度逐渐降低,后表面温度逐渐升高,不同厚度上的温度曲线逐渐靠拢,直至重合,达到前后表面温度平衡。平衡后温度沿环向的分布基本呈一直线,在光斑较小的情况下直线发生倾斜(图 3(b)),这是由横向热传导引起的,倾斜的大小由该物理过程的热扩散长度决定。随着壳体的旋转,温度曲线保持一个基本不变的波形向前推移,在一个转动周期结束时呈现出一个特殊波形(图 3(c)),这一特殊波形并不能代表整个辐照过程的特性。如果此时激光辐照结束,由于热传导的原因,不同厚度上的温度曲线逐渐靠拢,最后演变为一重合的直线,然后一起整体缓慢下降。

图 4 是 3.6 s 时不同壳体壁厚处温度沿轴线方向的分布曲线,虽然激光功率密度是高斯分布,但沿轴向的温度分布并非高斯分布。图 5 显示了光斑中心处温度变化的时程曲线,可以明显看出温度上升的阶梯效应。图中还显示了不同光斑半径带来的差异和横向热传导的影响。

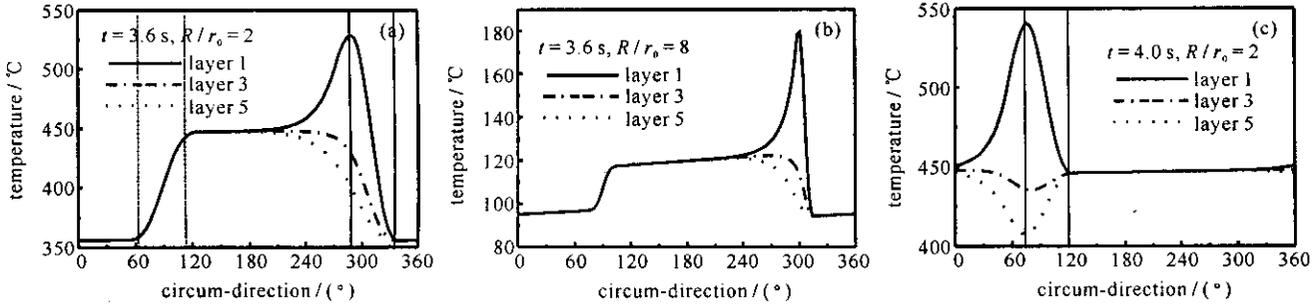


Fig. 3 Temperature along circum-direction for different wall thickness

图 3 不同壁厚上的温度沿环向的分布

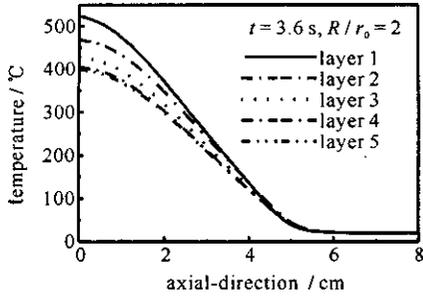


Fig. 4 Temperature along axis direction for different wall thickness

图 4 不同壁厚上的温度沿轴向的分布

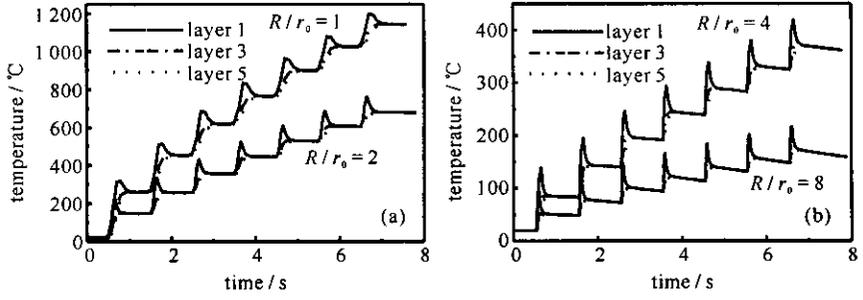


Fig. 5 Temperature history for different wall thickness

图 5 不同壁厚上的温度变化历程

3.3 应力应变

图 6 和 7 分别给出了环向应力与轴向应力沿壳体环向与轴向的分布。可以看出,在激光辐照时不同壁厚处的应力差异很大,激光辐照面的应力变小,内层的应力变大,产生应力集中。这是因为激光加载会使壳体表层材料的温度升高,在达到热平衡之前就产生压缩热应力,抵消了由于内压产生的拉应力,从而使总体应力减小。在内压作用下,为维持整个系统的力学平衡,内层壳壁的应力必然增加,以补偿外层应力的减小。随着前后表面的热平衡过程,这种应力差异越来越小,直至稳定,此时外表面应力大于内表面应力,这是由于壳体局部受热变形,在内压作用下向外凸起所致,是“鼓包”效应的力学体现。由于在一个较长的时间内光束扫过了壳体的整个环向,应力在光斑轴向边缘的集中变得很小(其大小由激光在该轴线上的作用时间决定)(图 7),这与激光辐照静止内压壳体不同。从图中还可以看出,在同一位置,环向应力大于同一厚度处的轴向应力。由此可以判断,壳体的破坏一般取决于环向应力的分布,激光辐照处 von Mises 应力的极大值出现在壳体的内层,这说明壳体的塑性变形最先发生在壳体内层材料上。图 9 给出了环向应变沿环向分布的情况,环向弹性应变的变化规律基本与环向应力一致,热应变则仅依赖于温度的变化,二者之和便是环向总应变。由于该时刻壳体材料未达到屈服状态,因此不存在塑性应变。

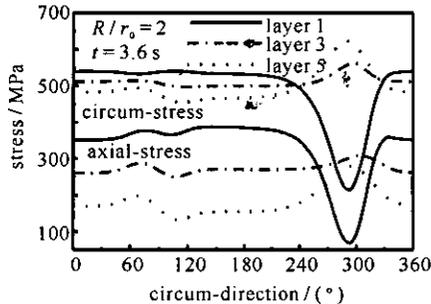


Fig. 6 Stress along circum-direction for different wall thickness

图 6 不同壁厚上的应力沿环向的分布

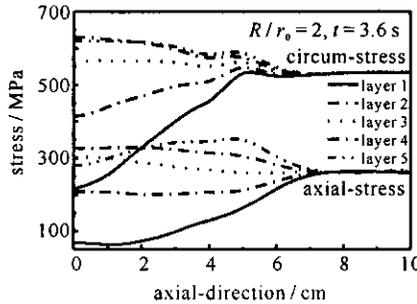


Fig. 7 Stress along axis-direction for different wall thickness

图 7 不同壁厚上的应力沿轴向的分布

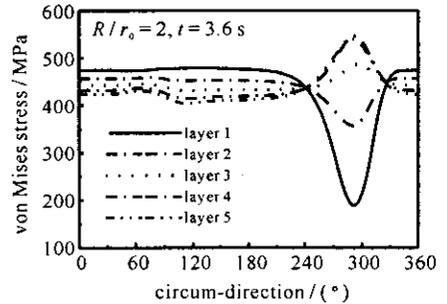


Fig. 8 Von Mises stress along axis-direction for different wall thickness

图 8 不同壁厚上的等效应力沿环向的分布

3.4 位移

被辐照区域温度升高导致该部分壳体材料承载能力下降,在内压的作用下该区域会向外凸起,产生径向位移。图 10 给出了辐照过程中位移的变化图像。从图中可以看出,温度越高,径向位移越大。图 11 给出了同一

轴线上辐照区域中心线、边缘及外部区域上点的径向位移变化历程,激光经过该轴线时光斑中心处位移变化最大。可明显看出,当位移即将增加时,必然会有一个减小的过程,这是由前面点的位移增加引起的扰动,当该点进入辐照区后位移会迅速增加,同时会对后面点位移产生扰动,这种扰动会随着壳体的转动一直向前推进,同时沿轴线方向一直蔓延到离辐照区较远的位置。

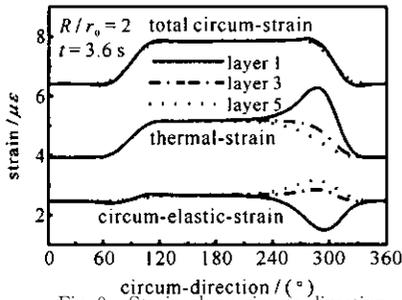


Fig. 9 Strain along circum-direction

图 9 不同壁厚上的应变沿环向的分布

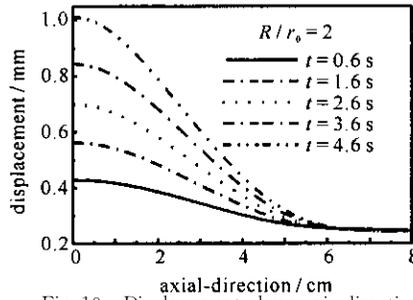


Fig. 10 Displacement along axis direction

图 10 不同时刻的位移沿轴向的分布

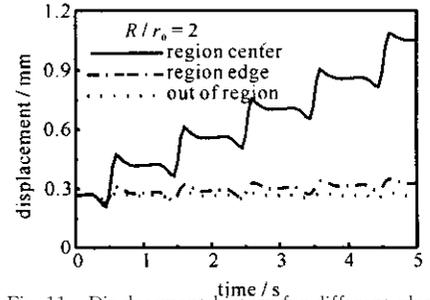


Fig. 11 Displacement history for different place

图 11 不同位置的位移随时间的变化

3.5 屈服比

图 12 给出光斑中心屈服比沿环向的变化。从图中可以看出,受激光辐照时表面屈服比变小,温度平衡过程中逐渐变大,这主要是由于应力减小造成的,而屈服强度随温度升高而减小带来的屈服比的增加并不足以弥补这种减小。图 13 表示屈服比沿轴向的变化,它同样显示受激光辐照时光斑中心处壳体内层材料的屈服比最大,由此可以判断壳体材料的屈服最先出现在壳体内层。图 14 是光斑中心屈服比随时间的变化过程,可以看出,约在 5 s 以后屈服比超过 1,壳体材料发生塑性变形,图中也给出了塑性应变。

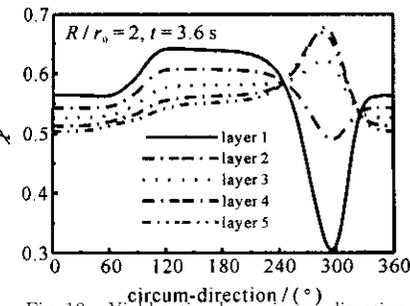


Fig. 12 Yield ratio along circum-direction

for different wall thickness

图 12 不同壁厚上的屈服比沿环向的变化

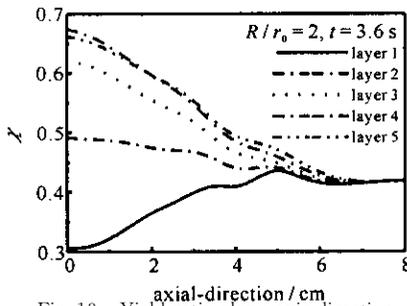


Fig. 13 Yield ratio along axis-direction

for different wall thickness

图 13 不同壁厚上的屈服比沿轴向的变化

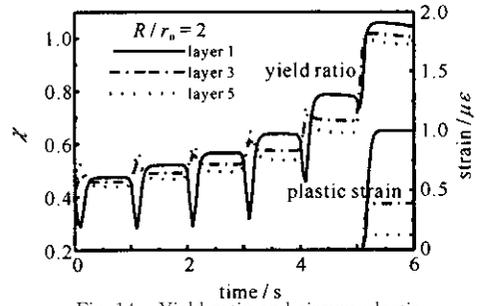


Fig. 14 Yield ratio and circum plastic strain for different wall thickness

图 14 不同壁厚上的屈服比及塑性应变

3.6 不同旋转频率的比较

不同旋转频率的计算结果基本上相似,本文只给出简单比较。图 15 显示了旋转频率对温度的影响。旋转频率越低,最大温升越大。对于整周期辐照,最后的平衡温度不受旋转频率的影响。图 16 是不同旋转频率下屈服比时间历程的比较。在转动频率低的情况下,单个周期内激光在壳体上的驻留时间长,壳体表面材料温升较大,增大了内层材料应力集中,直接导致内层材料屈服比增大,因此旋转频率越低,最大屈服比越大。由此可见,在相同的条件下,壳体转动频率越低,壳体越容易破坏。

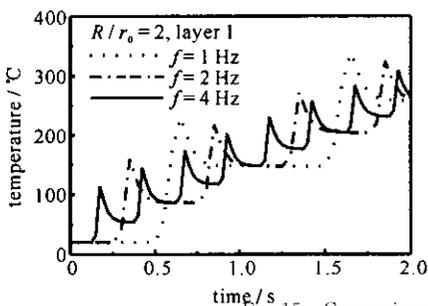


Fig. 15 Comparison of temperature history

for different rotating frequency

图 15 不同壳体转动频率下温升历程比较

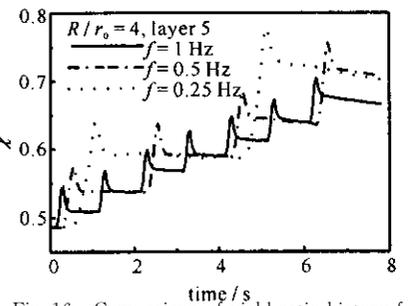
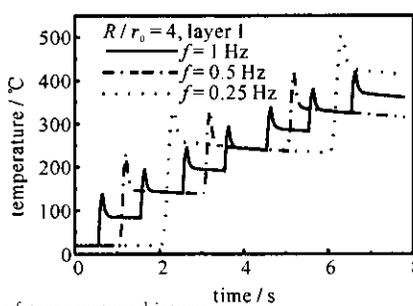


Fig. 16 Comparison of yield ratio history for

different rotating frequency

图 16 不同壳体转动频率下屈服比历程比较

4 结 论

本文采用有限元计算软件对较低频率转动的充压圆柱壳体侧面受到连续激光辐照时的热力学问题进行了较为全面的数值计算,分析了此类问题的热力学特性,为进一步分析转动充压圆柱壳体在连续激光辐照下的破坏与失效奠定了基础。提出的解决数值计算中移动热流载荷问题的双时间步长法,可以有效提高计算效率,同时也提高了计算精度。

对于激光光束与目标之间存在相对运动的问题,采用耦合法可给出随时间变化的热力学过程;随着激光辐照周期的增加,各物理量变化的总体趋势呈阶梯状增加;计算结果显示在激光辐照过程中壳体不同壁厚处的物理量变化规律并不一致,且存在较大差异,因此,壳体不同壁厚处的物理量变化不容忽视;在壳体几何参数与载荷参数相同的情况下,激光辐照转动薄壁壳体的破坏依赖于壳体转动频率,壳体旋转频率越低,破坏就越容易发生;在辐照过程中,最初受激光辐照的区域最先破坏,且破坏点在初始光斑内竞争产生。利用本文定义的屈服比可以很方便地判断结构与材料的屈服状况。

参考文献:

- [1] 王伟平,唐小松,桂元珍,等. 激光对旋转金属壳的加热研究[J]. 应用激光, 2001, **21**(5):319-321. (Wang W P, Tang X S, Gui Y Z, et al. Laser thermal effects on rotating metal shell. *Applied Laser*, 2001, **21**(5):319-321)
- [2] 袁红,赵剑衡,谭福利,等. 激光辐照下旋转柱壳温度场的数值模拟[J]. 强激光与粒子束, 2005, **17**(5):681-684. (Yuan H, Zhao J H, Tan F L, et al. Numerical simulation of the temperature distribution on a cylindrical shell under laser irradiation. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(5):681-684)
- [3] 袁红,赵剑衡,谭福利,等. 激光辐照下静止及旋转充压柱壳结构变形的对比分析[J]. 强激光与粒子束, 2005, **17**(11):1660-1663. (Yuan H, Zhao J H, Tan F L, et al. Contrastive analysis on deformation of internally pressured static and rotating cylinder shells irradiated by laser. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(11):1660-1663)
- [4] 孙承伟. 激光辐照效应[M]. 北京:国防工业出版社,2002. (Sun C W. Effects induced by laser beam. Beijing: National Defense Industry Press, 2002)
- [5] 赵剑衡,章冠人,刘绪发. 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. (Zhao J H, Zhang G R, Liu X F. Numerical simulation to the deformation of an internally pressured cylinder tank under intensive laser irradiation. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 1996, **10**(4):262-268)
- [6] 赵剑衡,章冠人,刘绪发. 激光辐照下柱壳温度场的数值模拟研究[J]. 高压物理学报, 1996, **10**(1):44-49. (Zhao J H, Zhang G R, Liu X F. Numerical simulation of the temperature distribution on a tank-wall under an intensive laser loading. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 1996, **10**(1):44-49)
- [7] 王勖成. 有限单元法[M]. 北京:清华大学出版社,2003. (Wang X C. Finite element method. Beijing: Tsinghua University Press, 2003)

Thermal-mechanical effects on rotating internally pressured cylindrical shell irradiated by laser beam

DING Sheng¹, WANG Jian-guo^{1,2}, LIU Feng¹, SHU Qing-bang¹, WANG Yu-heng¹

(1. Northwest Institute of Nuclear Technology, P.O. Box 69-12, Xi'an 710024, China;

2. Institute of Microwave and Optical Communication, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The thermal-mechanical effects on rotating internally pressured cylindrical shell irradiated by the laser beam have been calculated by using finite element method, and the physical parameters are obtained, such as temperature, stress, strain, and displacement of the shell wall. The double time step method, which includes one main time step and many sub time steps, is presented. This method can overcome the difficulty in the numerical calculation of the moving heat-flux loads. Some examples indicate that the double time step method can improve the calculation precision and efficiency. The numerical results show that the damage-threshold time of rotating internally pressured cylindrical shell depends closely on the rotating frequency and the power density of the laser beam, and the cracked point occurs first in the initial laser-hit region.

Key words: Laser irradiation; Thermal-mechanical coupling; Rotating shell; Yield ratio; Double time step method