

激光辐照下充内压柱壳动态爆裂的数值模拟*

颜怡霞, 陈裕泽, 陈刚, 李思忠, 黄西成

(中国工程物理研究院总体工程研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 采用动力有限元显式积分程序, 对承受内压、在侧面受到激光辐照的圆柱壳的热-力学响应进行了数值模拟, 展现了圆柱壳热软化、鼓包和爆裂的动态失效过程。获得的柱壳失效方式与实验现象基本吻合; 还给出了不同内压作用下柱壳的破坏时间, 获得一些定性的认识。

关键词: 固体力学; 爆裂; 有限元; 柱壳; 激光辐照

中图分类号: O346

国标学科代码: 130°1545

文献标志码: A

1 引言

柱壳结构在激光破坏的靶目标中大量应用。当金属壳体在正常的功能状态下承受内压时, 如果受到强激光的辐照, 光斑区及其附近的材料温升、局部热软化, 在热力联合作用下, 将导致结构性局部大变形和整体的爆裂。这种激光辐照靶目标引起的热软化、鼓包和爆裂现象, 属于热力耦合的动力学问题, 研究柱壳在激光辐照下的动力学响应具有较强的应用价值和学术价值。近年来国内学者在这一领域开展了广泛和深入的理论分析与实验研究^[1~3], 有限元分析也获得了一定的进展。但是这类有限元模拟一般仅为找到一个失效点为止, 数值模拟没有描述破坏的整个动态过程。

本文中采用热力耦合的动力有限元程序分析在侧面受激光辐照的预内压柱壳的热力学响应, 展现激光辐照下充内压柱壳的热软化、鼓包及开裂到爆裂的动态失效过程。

2 实验现象简述

李思忠等^[1]针对激光辐照充内压、厚 0.18mm 铝合金柱壳的失效问题展开了实验研究: 柱壳两端由法兰固定, 柱壳上端封顶, 下端开口, 从下端入口处充入氮气, 激光从圆柱壳的侧面入射, 如图 1 所示。光斑半径为 25mm。激光辐照较短时间内, 在光斑区出现鼓包; 当内压达到一定值时, 爆破从试件光斑区的中部开始, 在 1ms 内, 裂纹从中部爆源传至边界形成撕裂, 完成整个柱体的爆破, 如图 2 所示。

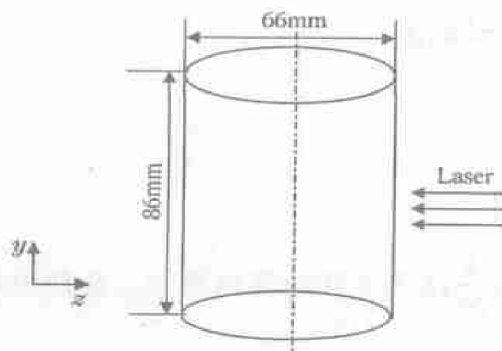


图 1 柱壳结构示意图

Fig. 1 Configuration of cylindrical shell



图 2 实验中柱壳的爆裂

Fig. 2 A cracked specimen

* 收稿日期: 2003-12-08; 修回日期: 2004-03-30

基金项目: 国家高技术研究发展计划项目; 中国工程物理研究院基金项目(42105)

作者简介: 颜怡霞(1973—), 女, 硕士, 助理研究员。

3 计算方法及主要参数

3.1 有限元模型

上述实验现象是结构在力和热载荷联合作用下软化、变形直至失效而丧失承载能力, 对此问题的数值模拟涉及到几何非线性、材料非线性、弹塑性和热传导。如图3所示, 建立三维有限元模型, 共有7506个六面体单元, 15340个节点, 光斑区的单元较密, 单元的最小特征尺寸为1mm。

3.2 计算方法

计算分为两个载荷步, 首先计算出结构在预载下的应力和变形, 然后再分析柱壳在激光辐照下的爆裂失效。实际上, 结构在失效以前的过程是一个准静态过程, 而失效是在瞬间完成的。本文的计算中对结构所承受的初始预载和失效过程均采用显式积分计算^[4]。运用ABAQUS/Explicit的“SMOOTH STEP”施加载荷, 程序将自动用一条一阶导数和二阶导数均平滑的曲线将每一个数据对连接起来, 而且曲线在数据点处的斜率为零。可运用这种类型的加载在尽可能短的时间里进行准静态分析。

考虑柱壳的断裂失效, 计算中采用单元删除的方法模拟柱壳的起裂及裂纹扩展。采用的失效准则为最大等效塑性应变, 即当单元的最大等效塑性应变超过给定的临界值时, 该单元失去作用。此时, 该单元将被删除掉, 结构发生破坏。

采用热力耦合分析方法进行有限元模拟, 本构方程为

$$d\sigma_{ij} = D_{ijkl}(d\epsilon_{kl} - d\epsilon_{kl}^p - d\epsilon_{kl}^t) \quad (1)$$

式中: D_{ijkl} 为弹性本构张量系数; $d\epsilon_{kl}$ 、 $d\epsilon_{kl}^p$ 、 $d\epsilon_{kl}^t$ 分别为总应变、塑性应变和热应变。

在一个时间步中, 温度场的计算采用向前差分时间积分

$$\theta_{(i+1)}^v = \theta_{(i)}^v + \Delta t_{(i+1)} \theta_{(i)}^v \quad (2)$$

运动方程的计算采用中心差分时间积分

$$\begin{aligned} \dot{u}_{(i+1/2)}^N &= \dot{u}_{(i-1/2)}^N + \frac{\Delta t_{(i+1)} + \Delta t_{(i)}}{2} \ddot{u}_{(i)}^N \\ u_{(i+1)}^N &= u_{(i)}^N + \Delta t_{(i+1)} \dot{u}_{(i+1/2)}^N \end{aligned} \quad (3)$$

稳定时间步长

$$\Delta t \leq \min \left[\frac{L_{\min}}{c_d}, \frac{L_{\min}^2}{2\alpha} \right] \quad (4)$$

式中: L_{\min} 为单元的最小特征尺寸; c_d 为介质中的弹性波速; $\alpha = \frac{k}{\rho c}$, k 为介质的导热率, ρ 、 c 分别为介质的密度和比热容。

3.3 主要参数

激光作用时间为秒级, 小于热能沉积及沿厚度方向的热传导和平衡时间, 所以把激光理解为作用在柱壳表面的热源, 其能量先被柱壳光斑区表面所吸收, 一般认为激光光斑的热流分布形式为高斯分布, 即

$$F(r) = F_0 \exp(-2r^2/r_0^2) \quad (5)$$

式中: r_0 为激光光斑的半径; F_0 为激光辐照的峰值功率, $F_0 = 2I_0/(1 - e^{-2})$, I_0 为平均功率密度。

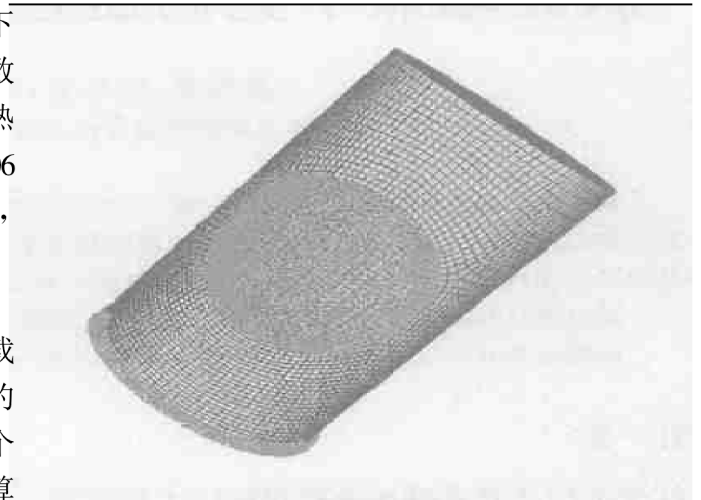


图3 有限元模型
Fig.3 The FE model

根据实验状态, 柱壳在激光辐照下, 其光斑的受热区材料仍然处于固态, 没有固液界面的对流换热问题, 因此其温度场可用各向同性材料的热传导方程来描述

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \Delta^2 T \tag{6}$$

光斑区域的热边界条件为

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \eta F(r) \tag{7}$$

式中: λ 为介质的热传导系数; n 为柱壳光斑表面的外法线方向; η 为柱壳表面的热吸收率。

计算中取 $I_0=4.2\text{W}/\text{mm}^2$, 为了减少计算时间, 计算假设有 50% 的激光能量被柱壳吸收。柱壳其余表面为绝热表面; 柱壳的初始温度为 0°C 。

力边界条件: 柱壳开口端固支。

力载荷条件: 实验中从柱壳下端入口处充入氮气, 以实现充内压, 计算暂不考虑气体作用, 按照实验条件, 对柱壳内表面直接施加压力, $p/p_b=0.8$, 其中 p_b 为通过柱壳内压静爆破实验测得的静爆破压力^[1], $p_b=1.16\text{MPa}$ 。

激光辐照过程中, 金属材料的热、力学性能均随温度的变化而变化, 主要表现在材料的弹性模量、屈服强度及破坏强度降低, 材料性能的变化影响着结构的变形和应力。因此在数值模拟中必须考虑材料的性能参数随温度变化的非线性关系, 计算参数如图 4 所示^[5]。LY12 的密度 $\rho=2.75\times 10^3\text{kg}/\text{m}^3$, 泊松比 $\mu=0.31$ 。

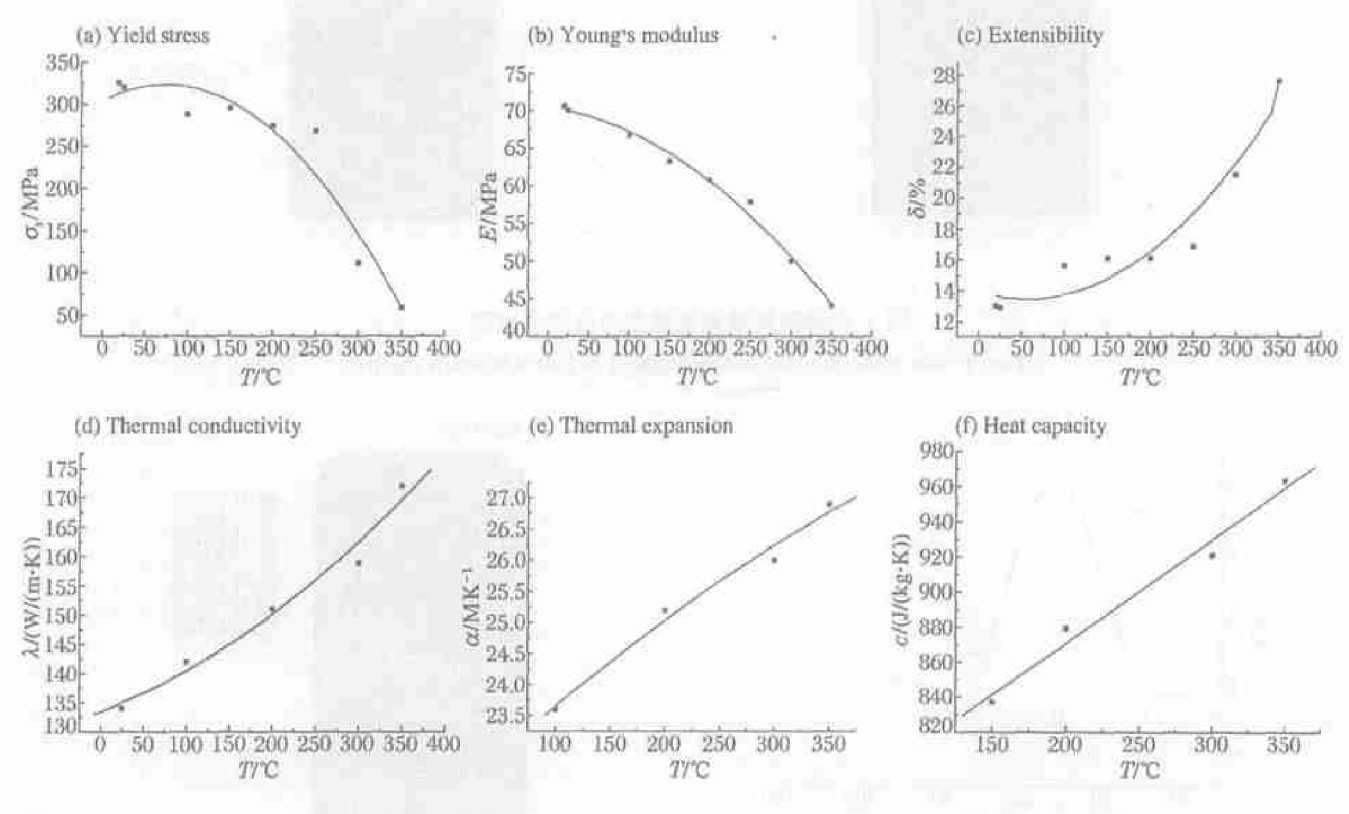


图 4 LY12 材料性能参数随温度变化的拟合曲线

Fig. 4 Material properties of LY12 vs temperature

4 数值模拟结果及分析

图 5 为激光辐照过程中柱壳的温度分布云纹图。由图可见, 柱壳在激光辐照下, 温升发生在光斑区, 温度的最高点出现在光斑的中心处, 且中心区域的温度变化远远大于边缘的温度变化, 这是由激光功率密度的空间高斯分布所决定的。

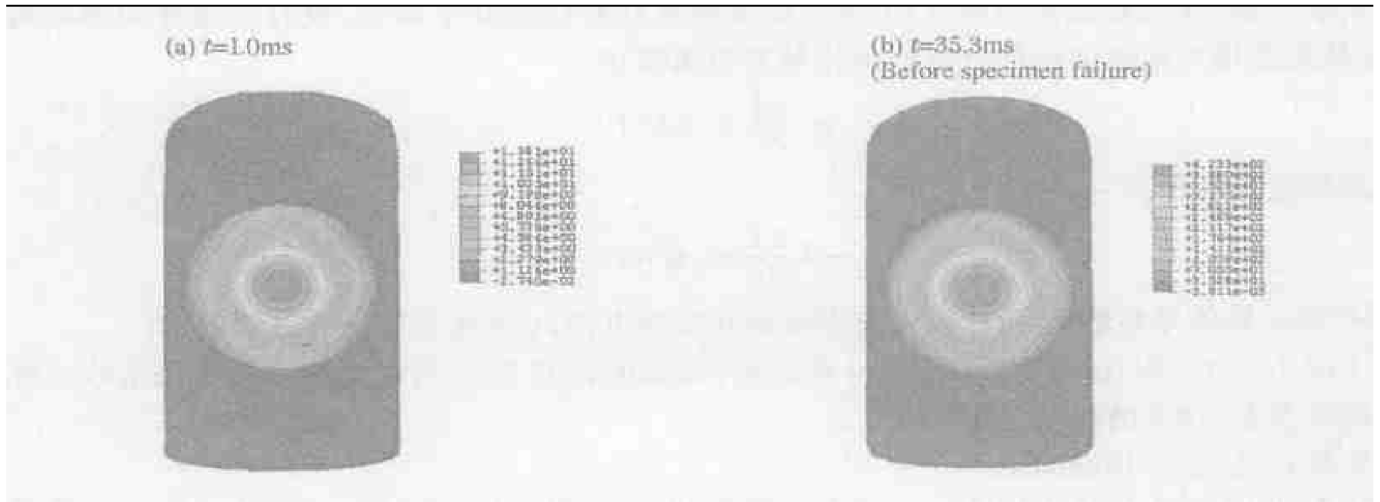


图 5 柱壳的温度分布
Fig.5 The temperature distribution

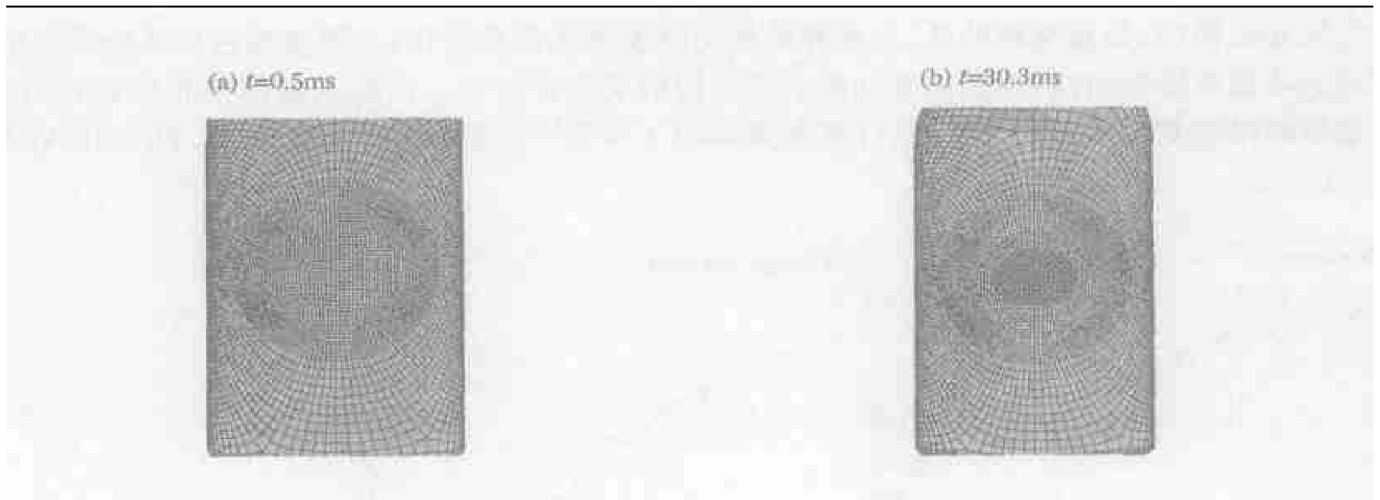


图 6 柱壳破坏前的等效应力分布云纹图
Fig.6 The effective stress distribution before specimen failure

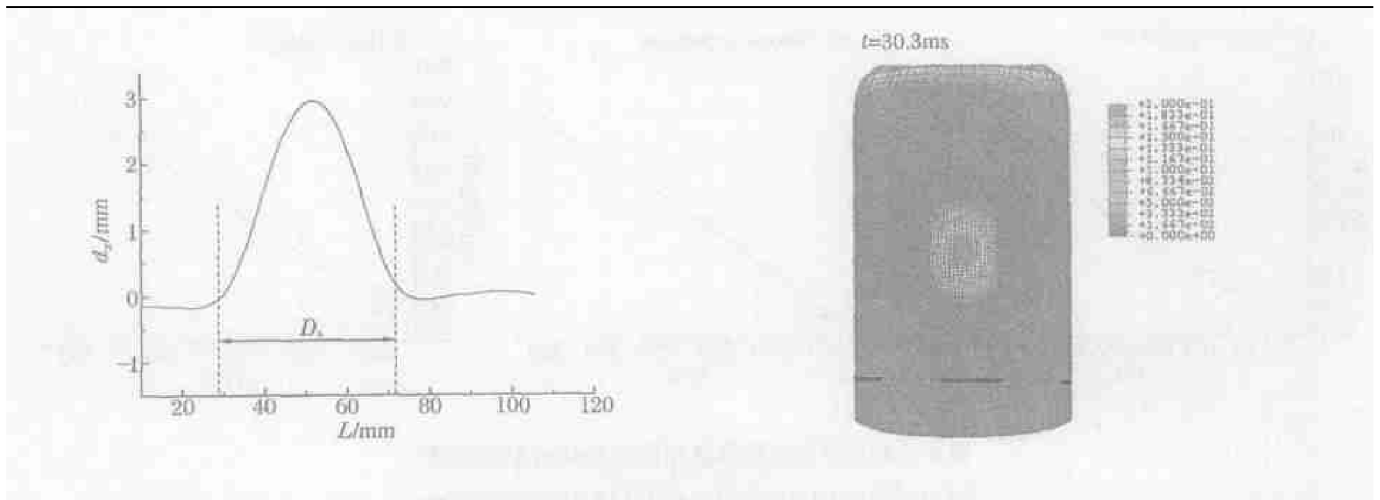


图 7 经光斑中心沿柱壳母线的横向位移
Fig. 7 The lateral displacement on the generating line
across the center of laser spot

图 8 柱壳破坏前的等效塑性应变分布云纹图
Fig. 8 The effective plastic strain distribution
before specimen failure

在激光辐照的初始时刻,柱壳的应力主要是由于柱壳所受的内压所决定的,此时,应力较为均匀,如图 6(a);随着辐照时间的增长,光斑区的温度升高,对柱壳的变形产生越来越大的贡献,材料发生热软

化, 柱壳光斑区出现鼓包, 柱壳中原有的预应力重新分布, 如图 6(b)所示, 柱壳的等效应力最大值不是位于光斑中心而是位于靠近光斑边缘位置, 最大等效应力为 270.5MPa, 光斑中心的应力为 86.2MPa, 低于原有的预应力(120MPa)。图 7 为柱壳开裂前瞬间沿柱壳光斑母线的横向位移分布曲线, 表明光斑区鼓包, 最大位移为 2.6mm。此时, 柱壳最高温度为 423.3℃。当温度达到 300℃后光斑区的材料由中心处产生塑性变形, 且塑性变形的区域逐渐向四周扩展, 光斑中部的塑性应变最大, 如图 8 所示。

图 9 为柱壳开始破坏到完全破坏的形貌特征图。由图可见, 柱壳起裂的位置在光斑中部区域, 裂纹沿柱壳轴向扩展, 最后光斑区的壳壁翻边导致整个柱壳爆裂。与实验现象(见图 2)相比, 柱壳破坏的形式基本吻合。

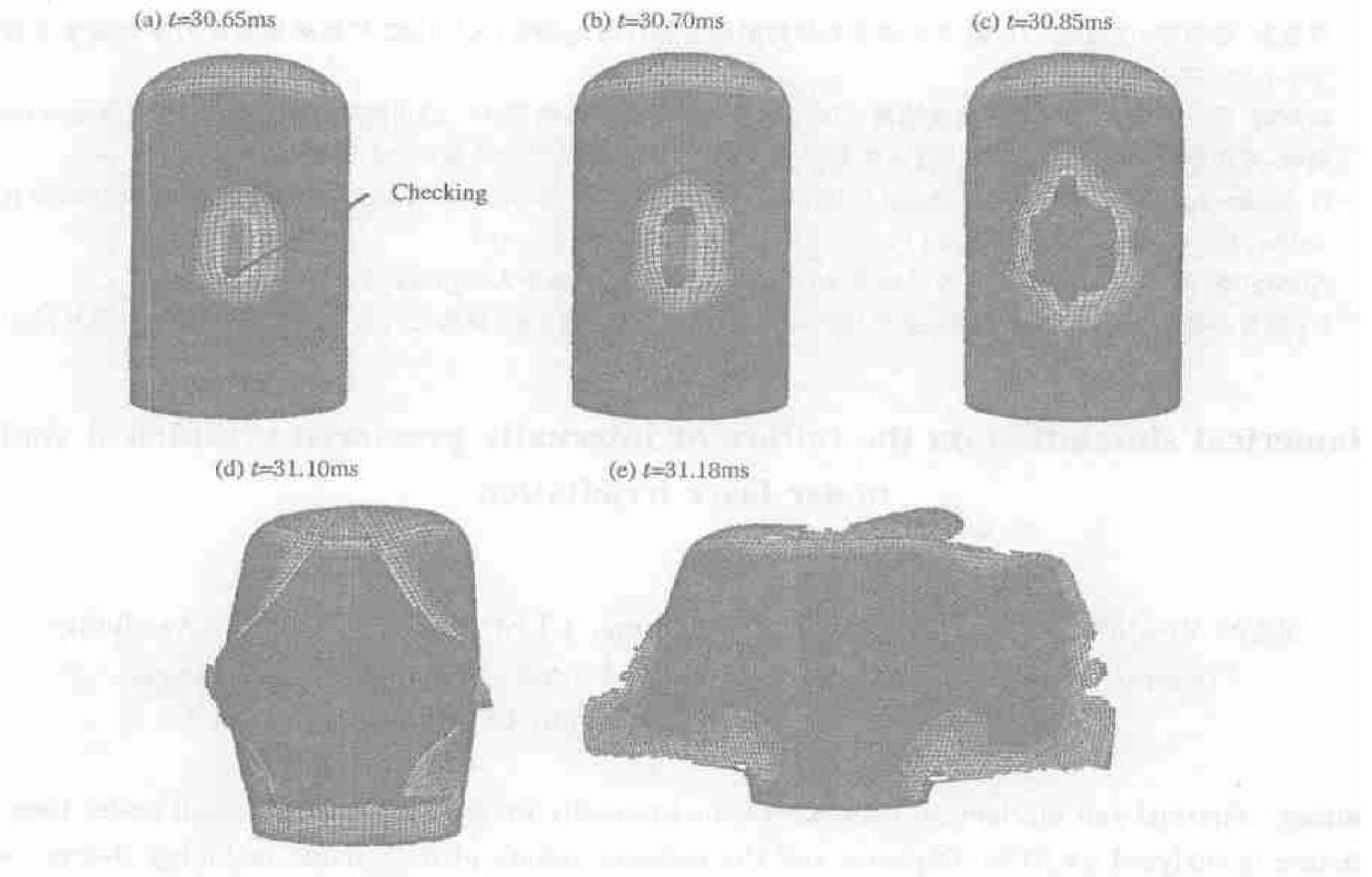


图 9 柱壳起裂、裂纹扩展到爆裂的形貌特征图

Fig. 9 The development of specimen failure

在激光对充压柱壳的破坏中, 内压是造成柱壳破坏的一个重要因素。当内压 p 为 0.40、0.45MPa 时, 柱壳未起裂; 当内压 p 为 0.50、0.60、0.93MPa 时, 起裂时间 t_p 分别为 36.01、36.63、30.65ms。可见, 当压力小于 0.45MPa 时, 柱壳未发生爆裂; 而压力大于 0.5MPa 时, 柱壳开裂, 且压力越大开裂的时间越早。本文中所计算的柱壳开裂时间小于实验测量值(实测的起裂时间为 1.17s), 主要是因为计算中光斑区材料对热能吸收率的取值要比实际情况大得多, 计算目的在于获得定性认识。

5 讨 论

计算表明, 内压柱壳在激光辐照过程中, 在材料热软化和内压两个主要因素作用下会引起应力的重新分配和弹塑性鼓包, 材料失效主要来自大应变的应变控制以及高应力的应力控制, 柱壳失效的具体位置是二者竞争的结果。本文的计算中光斑区边缘应力较大而中心处应变较大, 所反映的失效是由应变控制的现象, 在其它条件下可能出现边缘先起裂或中心和边缘同时起裂的现象。

另外, 本文仅是从热传导的角度对这种实验现象进行了数值模拟, 计算中所取得的参数实验有一定的差距, 例如为节省计算时间, 计算中光斑区的热流密度值取得较大, 这导致光斑区的边界效应和局部

热软化较明显, 计算结果不能完全反映实验的本质。若要准确描述结构在热力联合作用下的破坏与失效机理, 还需要对计算方法(失效判据、单元失效后的处理等)作进一步的研究。

6 结 论

采用动力有限元显式积分程序, 对侧面受到激光辐照、承受内压的圆柱壳的热、力学响应进行了有限元模拟, 主要目的是展现圆柱壳在热力联合作用下的热软化、鼓包和爆裂的动态失效过程, 计算所得到的失效方式与实验现象基本一致。计算方法可以用于类似问题的研究。

参考文献:

- [1] 李思忠, 陈裕泽. 连续波 CO₂ 激光对预应力结构的瞬态破坏效应研究[A]. 1992 年激光的热和力学效应学术会议[C]. 1992: 35—77.
- [2] 赵剑衡. 圆柱壳的内压测量及其在强激光作用下结构变形的数值模拟[D]. 四川绵阳: 中国工程物理研究院, 1995.
- [3] 纪峥, 刘勇刚. 激光束照射下内压柱壳热爆破数值模型[J]. 强激光与粒子束, 1996, 8(1): 99—104.
JI Zheng, LIU Yong-gang. A thermal failure numerical model of internal pressured cylindrical shell under laser irradiating[J]. High Power Laser and Particles Beams, 1996, 8(1): 99—104.
- [4] ABAQUS/Explicit 有限元软件入门指南[M]. 庄茁, 等译. 北京: 清华大学出版社, 1999.
- [5] 《工程材料实用手册》编辑委员会. 工程材料实用手册(第三卷: 铝合金、镁合金)[M]. 北京: 中国标准出版社, 2001.

Numerical simulation on the failure of internally pressured cylindrical shell under laser irradiation

YAN Yi-xia^{*}, CHEN Yu-ze, CHEN Gang, LI Si-zhong, HUANG Xi-cheng
(*Institute of Structural Mechanics, China Academy of Engineering Physics,
Mianyang 621900, Sichuan, China*)

Abstract: Thermal and mechanical response of the internally pressured cylindrical shell under laser irradiation is analyzed by FEM/Explicit, and the dynamic failure phenomenon, including thermal softening, ablation and bursting, are simulated. The failure model of the shell calculated by FEM is agreement well with the experimental observation. The failure time with different internal pressures has been computed.

Key words: solid mechanics; failure; FEM; cylindrical shell; laser irradiating

* Corresponding author: YAN Yi-xia
E-mail address: yyx1978@163.net
Telephone: 0816-2495604