

文章编号: 1001-4322(2004)08-0962-05

激光辐照下充压圆筒变形的相似律问题*

黄晨光, 陈思颖, 段祝平

(中国科学院 力学研究所 工程科学部, 北京 100080)

摘 要: 以充压圆筒在强激光辐照下的变形与破坏响应为研究目标, 首先利用相似分析方法, 主要采用了方程分析法和量纲分析法, 确定了相似准则。然后利用 ANSYS 有限元程序, 模拟了三组几何和物理相似的大小模型。通过对计算结果的分析表明, 满足相似准则的大小模型, 在相应的时间和空间, 相对物理参量是一致的。

关键词: 相似准则; 有限元方法; 量纲分析; 激光破坏

中图分类号: O346.1 **文献标识码:** A

自从 20 世纪 60 年代激光器问世以来, 关于激光与材料和结构相互作用的研究一直是热点问题^[1~11]。在这个庞大的研究体系中, 包含的主要内容有材料在相关条件下的力学性能和热物理性能, 材料的激光耦合性能, 结构的破坏模式, 典型构件在热-力加载下的破坏阈值, 激光破坏的环境效应, 相关的数值模拟技术等等。其中特别重要的是选定靶结构的原型试验和大量的缩比模型试验。这其中就涉及到尺度律 (scaling law) 或者相似准则的问题^[6,7]。在激光诱导的变形与破坏机理研究中, 有关相似准则的问题目前还缺乏系统的探讨, 只有一些初步的工作。例如, 黄晨光等对弹性薄板在长脉冲激光诱导的热冲击下的响应进行了简单的分析^[10], 张榕京等研究了准静态热弹性薄板的主控无量纲参量问题^[11]。另外, 文献中也报道了不同尺度的圆筒在激光辐照下响应的实验和数值研究结果^[8,9], 但是由于缺乏相似准则的分析, 这些结果并不能系统地总结为规律性的结论。客观地讲, 相似分析方法本身是一个相对成熟的科学研究工具, 在 20 世纪 50 年代已经基本定型, 并且在流体力学、空气动力学以及爆炸力学等诸多力学问题上都取得了重大的成就^[12,13]。这也是促使作者进行激光破坏机理相似准则研究的动力之一。

本文中, 首先简单介绍了相似分析法, 然后利用相似分析方法确立了问题的无量纲参量, 在第 4 节中针对提出的相似准则利用有限元方法进行了验证, 最后对有限元计算的结果进行了分析和总结。

1 相似分析简论与问题的提出

从某种意义上说, 科学研究就是探索体系的输入和输出量之间的关系。探索这种量与量之间的关系不外乎数学方法求解和现场试验。但对一些相对复杂的问题, 在数学求解上十分困难, 有时甚至得不出描述问题的基本控制方程, 而直接的试验方法又面临多种客观的局限性, 这时模型试验是极为有效的手段。但是, 如何将模型试验得出的规律推广到原型, 就需要在相似理论的基础上建立正确的模化方法。

力学上的相似应该包括几何相似, 运动相似和动力学相似等。在相似理论中主要由相似三定理作为支撑^[12,13], 此处不再赘述。在相似分析中相似准则的建立是十分关键的, 因为两个物理体系的相似准则 (相似准数) 相同是其相似的必要条件。

相似准则的导出方法有三种, 即定律分析方法, 方程分析法和量纲分析法, 其中后者最为常用。本文综合使用了方程分析法和量纲分析法。

如图 1 所示, 一个充压的圆筒在其中段承受高功率激光的辐照。在高压连续激光辐照下, 充压圆筒的破坏属于典型的热

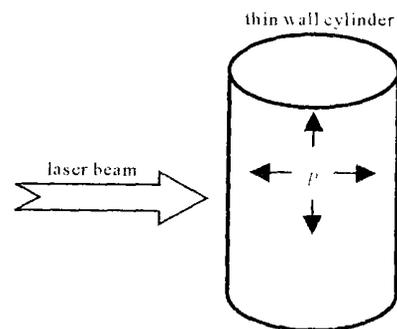


Fig. 1 Sketch map
图 1 模型示意图

* 收稿日期: 2003-10-30; 修订日期: 2004-01-29
基金项目: 国家 863 计划项目资助课题
作者简介: 黄晨光 (1969—), 男, 博士, 副研究员, 从事固体力学、爆炸力学和激光破坏机理研究。

力联合破坏(激光破坏机理领域的分类),对此合适的破坏准则的选取仍然没有定论。但通过大量的试验和相关的数值模拟,人们发现将最大等效塑性应变作为破坏准则是可以接受的。在文献中也有使用等效应力作为破坏判据的,并取得了和试验相对一致的结论^[8,9],因此在本文的分析中,将等效应力和等效塑性应变一起作为输出参量。

2 量纲分析

量纲分析方法的基础是 定理。主要步骤如下:

把表征物理现象的所有量用一般函数的形式表达。在本文的问题中,这些物理量由如下几方面组成。激光相关参数:光斑直径 a ,激光功率密度 I 和辐照时间 t ,靶的激光吸收率 α ;载荷相关参数:内压 p ;尺寸相关参数:圆筒的直径 D ,筒长 L ,壁厚 h ;材料相关参数:杨氏模量 E ,屈服应力 σ_0 ,硬化模量 E' ,Poisson 比 ν ,最大塑性应变 ϵ_f ,软化系数 f ,热膨胀系数 β ,密度 ρ ,比热容 c ,热传导系数 λ ;输出相关的参数:等效应力和等效塑性应变 $\sigma_{eq}, \epsilon_{eq,p}$ 。因此可以给出

$$f(a, I, t, \alpha, p, D, L, h, E, \sigma_0, E', \nu, f, \epsilon_f, \beta, \rho, c, \lambda, \sigma_{eq}, \epsilon_{eq,p}) = 0 \tag{1}$$

写出一般的 项表达式

$$= a^{a_1} I^{a_2} p^{a_3} D^{a_4} L^{a_5} h^{a_6} E^{a_7} \sigma_0^{a_8} E'^{a_9} \nu^{a_{10}} c^{a_{11}} \lambda^{a_{12}} \beta^{a_{13}} \epsilon_f^{a_{14}} t^{a_{15}} \tag{2}$$

各相关物理量的量纲分别为

$$\dim a = L, \dim I = \text{MT}^{-3}, \dim t = T \tag{3}$$

$$\dim p = \text{ML}^{-1}\text{T}^{-2} \tag{4}$$

$$\dim D = L, \dim L = L, \dim h = L \tag{5}$$

$$\dim E = \text{L}^{-1}\text{MT}^{-2}, \dim \sigma_0 = \text{L}^{-1}\text{MT}^{-2}, \dim E' = \text{L}^{-1}\text{MT}^{-2} \tag{6}$$

$$\dim \nu = \text{L}^{-1}, \dim \beta = \text{MT}^{-3}, \dim c = \text{L}^2\text{T}^{-2} \text{K}^{-1}, \dim \lambda = \text{LMT}^{-3} \text{K}^{-1} \tag{7}$$

$$\dim \epsilon_f = \text{L}^{-1}\text{MT}^{-2} \tag{8}$$

无量纲的参数有 $\alpha, f, \epsilon_f, \epsilon_{eq}$ 。

写出量纲等价式,并按照量纲齐次原则求解。

可以得出 $n - k$ 个独立的 项, $k = 4$ 。

本文没有严格的遵循上述的求解步骤,因为涉及到的物理量较多, 项的确定随意性很大。由于对于热传导过程,其基本的控制方程和单值条件是清楚的。可以直接通过对控制方程的分析得出一些无量纲参数,然后作为求解量纲方程的已知条件代入,可以得到如下的相似准则组合。

$$\alpha, f, \epsilon_f, \epsilon_{eq}, p/\sigma_0 \tag{9}$$

$$h/a, D/L, a/L \tag{10}$$

$$\frac{E}{E'} \frac{t}{h^2} \frac{c}{\lambda} \frac{I}{h} \frac{E}{c} \frac{\sigma_0}{E'} \frac{p}{E} \left(\frac{a}{h} \right)^4 \tag{11}$$

应该注意的是, c 在本文中是共同起作用的,这样导致我们获得的无量纲参数形式上比 定理规定的少一项。虽然方程(11)的得出综合采用了方程分析法和量纲分析法,但无量纲参数的组合仍然无法唯一确定。方程(11)是在对物理过程的深入了解基础上提出的,其中的每一个无量纲量均有明确的物理意义,其中最后一个无量纲参量的得出利用了大变形薄板理论,当光斑直径远大于厚度,在内压的作用下,激光辐照区由于软化和周边的压应力会向外突起,忽略光斑区域的曲率半径的影响,得出这个无量纲参数是可以接受的。另外,如果仅仅用 p/E 作为无量纲参数,这个值太小,在一般情况下只有 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 。

如果模型试验使用的材料与原型材料相同,一些仅由材料参数组成的无量纲量便可以忽略,于是

$$\frac{\epsilon_{eq,p}}{\epsilon_f} = f_1 \left[\frac{h}{a}, \frac{D}{L}, \frac{a}{L}, \frac{t}{h^2} \frac{c}{\lambda} \frac{I}{h} \frac{E}{c} \frac{\sigma_0}{E'} \frac{p}{E} \left(\frac{a}{h} \right)^4 \right] \tag{12}$$

$$\frac{\sigma_{eq}}{\sigma_0} = f_2 \left[\frac{h}{a}, \frac{D}{L}, \frac{a}{L}, \frac{t}{h^2} \frac{c}{\lambda} \frac{I}{h} \frac{E}{c} \frac{\sigma_0}{E'} \frac{p}{E} \left(\frac{a}{h} \right)^4 \right] \tag{13}$$

3 有限元计算

为了检验上述的无量纲准则,利用商业程序 ANSYS 对两种几何相似的模型进行了分析。

图 2 显示的是在有限元分析中使用的网格。为了减少计算量,文中取 1/4 圆筒进行分析。我们忽略了圆筒两端的盖板,而在远端施加了轴向应力边界条件来替代(幅值大小由弹性理论确定)。在网格的划分过程中,使用了 1 980 个三维实体单元。此处不采用壳单元的原因在于由于光斑附近存在明显的三维效应,物理量沿厚度方向的分布规律十分重要。在单元和节点的生成过程中,避开了 ANSYS 自带的模型输入等前处理模块,而是利用 APDL 进行编程。通过编程获得了较少的单元数、适当的疏密分布、理想的单元形状和优化的带宽等多种好处。

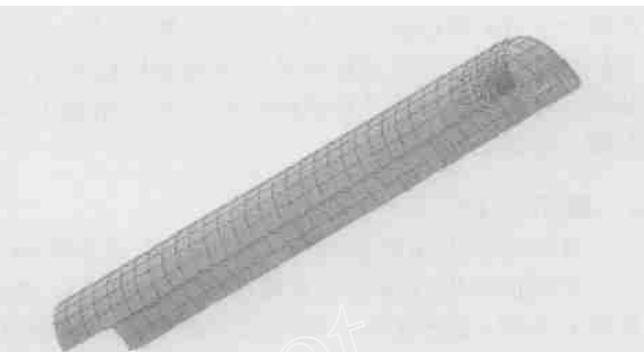


Fig. 2 Mesh of FEM analysis

图 2 分析网格图

下面给出计算中使用的各类参数。文中圆筒的材料为 30CrMnSiA,它较多地用作航空和航天材料,特别是结构部件诸如导弹外壳等。其热传导系数、比热容、杨氏模量、硬化模量、屈服应力和热膨胀系数及其随温度的变化详见表 1。材料的密度为 $7\ 800\text{kg}/\text{m}^3$ 。泊松比取为 0.28。

表 1 30CrMnSiA 几种热物理和力学参量随温度的变化

Table 1 Thermal and mechanical parameters under different temperatures

T/K	$\lambda/(\text{W}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	$c/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	E/GPa	E'/GPa	σ/MPa	$\alpha/(10^{-6}\cdot\text{K}^{-1})$
20	27.63	473.1	201.7	25.50	1 100	11.00
300	30.56	644.7	181.7	20.30	885.0	12.92
500	29.51	766.1	140.0	17.30	673.3	13.90
600	28.76	841.5	90.00	14.80	387.7	14.22
900	24.61	1040.0	33.50	1.800	65.0	12.73

计算中,我们根据前面确定的相似准则,在不改变材料参数的前提下,设计了两个几何相似的体系,大小模型之间的比例为 2。我们相应地调整激光参数,以保证两个体系的物理相似性得到满足。两个模型及对应的激光参数分别为:大尺度模型中 $L = 1\ 088\text{mm}$, $D = 67\text{mm}$, $h = 3.5\text{mm}$, $I = 600\text{W}/\text{cm}^2$, $\tau = 1.0$, $t = 1.0\text{s}$, $a = 32\text{mm}$;小尺度模型中 $L = 544\text{mm}$, $D = 33.5\text{mm}$, $h = 1.75\text{mm}$, $I = 1\ 200\text{W}/\text{cm}^2$, $\tau = 1.0$, $t = 0.25\text{s}$, $a = 16\text{mm}$ 。大小两个模型中的内压均为 70MPa,激光功率在空间上呈高斯分布,时间上认为是均匀的。另外为了数值模拟结果更加有说明力,做了两组其他条件下的大小模型的数值模拟。在这两组模拟中,一组是将激光辐照时间分别改为 1.6s 和 0.4s,很明显这时的大小模型之间仍然是相似的(第二组对比);另一组是在此基础上,将大小模型的内压同时提高到 150MPa,当然大小模型之间的相似性依然存在(第三组对比)。

在利用 ANSYS v5.7 进行有限元数值模拟时,由于直接耦合算法中可使用单元的非线性模拟功能较弱,所以采用的是间接耦合的方式,即计算分为两大步进行:一是单纯的温度场计算,二是将温度计算的结果转化为结构分析的热载荷,加上单值条件和机械载荷后,进行非线性结构计算。这样的近似在本文给定的参数范围和加载条件下是可以接受的。计算采用的机器为 IBM P4 1.6G PC 计算机,每个模型和载荷条件下的计算都可在 5min 以内完成。

4 结果与讨论

图 3 显示的是在第一组大小模型比较中激光辐照时间完成的瞬间圆筒的温度场。从计算结果可以断定,在对应的时间和空间位置上大小模型的温度是基本相同的。在图 3 中两个模型最高点的温度值相差仅 1.4%。图 3(a)为大尺度模型,图 3(b)为小尺度模型,以后各图中均如此。

图 4 和图 5 是第三组对比模拟中,大小模型在相应时间的等效应力和等效塑性应变的分布。在图 4 和 5 中,两个模型对应物理量的大小与分布规律基本是一致的。等效塑性应变的最大值相差约 2%,而等效应力最大值的完全一致有一些巧合,但也是可以理解的,因为等效应力的最大值主要出现在光斑边缘及轴向延伸处。

表 2 中,比较了三组对比模型在激光辐照完成瞬间的主要物理量。这些结果也是利用 ANSYS 程序进行

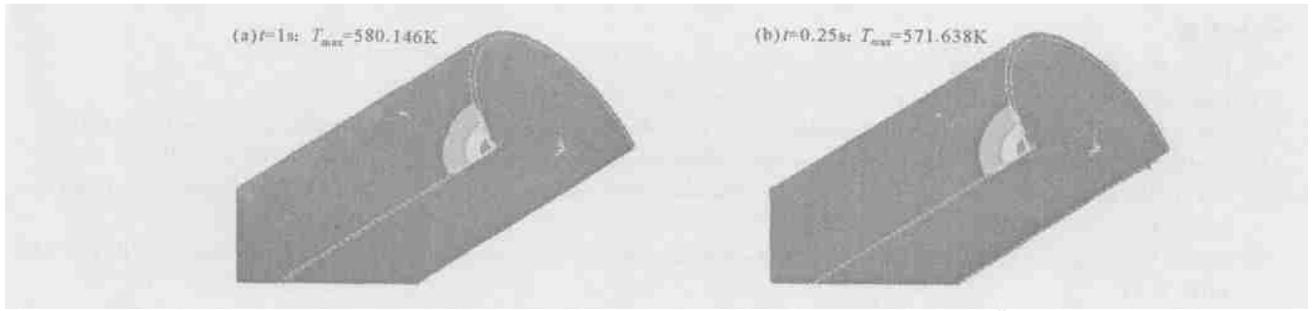


Fig. 3 Distribution of temperature

图 3 温度分布图

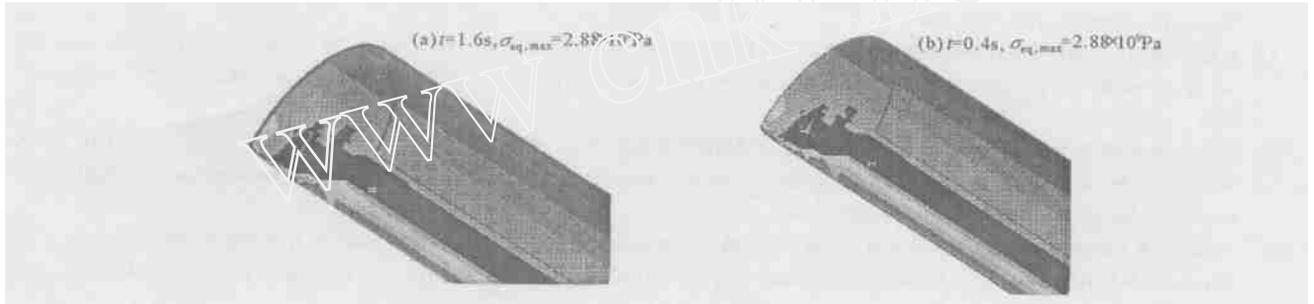


Fig. 4 Distribution of equivalent stress

图 4 等效应力分布图

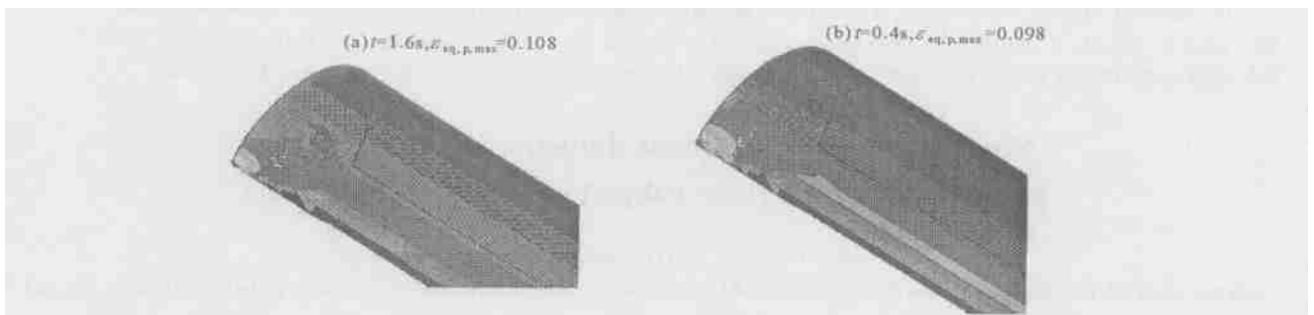


Fig. 5 Distribution of equivalent plastic strain

图 5 等效塑性应变分布图

有限元数值模拟获得的。

表 2 对比模型中各物理量的最大值(有限元方法结果)

Table 2 Physical parameters obtained by FEM simulations

set number	$\sigma_{eq,max}/\text{GPa}$	$\epsilon_{eq,p,max}$	Von	U_x/mm	U_y/mm	U_z/mm	size
1	1.18	0.010 0	0.023 1	0.046 9	0.329	0.621	lager
	1.30	0.009 8	0.022 8	0.022 8	0.165	0.311	small
2	1.22	0.018 9	0.037 4	0.102 0	0.334	0.623	lager
	1.22	0.018 0	0.036 6	0.049 5	0.167	0.311	small
3	2.88	0.108 0	0.172 0	0.186 0	3.650	0.874	lager
	2.88	0.098 5	0.170 0	0.091 8	1.820	0.443	small

表 2 中各物理量均取对应时间圆筒中的最大值,最后一栏表示的是模型的大小,第一栏表示的是不同的对比组别,具体的参数前面有详细的叙述。从表中可以发现大小模型在不同的组别中分别都是相似的,这证明了文中提出的相似准则是可靠的。

参考文献:

- [1] Linder W I. Plasma produced by laser burrs[J]. *Bull Am Phys Soc*, 1962, 7(7):440—441.
- [2] Ready R F. Effects of high-power laser radiation[M]. New York:Academic Press, 1971.
- [3] Von A M. Laser-beam interactions with materials: physics principles and applications[M]. New York: Springer-Verlag Press, 1987.
- [4] Wendlandt B C H. Theoretical studies of the interaction of high-power laser beam and metals[R]. NASA N74 - 16188,1973.
- [5] Kar A, Mazumder J. Two-dimensional model for material damage due to melting and vaporization during laser irradiation[J]. *J Appl Phys*, 1990, 68(8): 3884—3891.
- [6] Latham W P, Beraun J E. Laser effects research and modeling to support high energy laser systems[A]. Proceedings of SPIE[C]. 2001, 4376: 5—14.
- [7] 孙承纬. 强激光与物质相互作用及破坏机理[Z]. 强激光技术分析与评论. 中国工程物理研究院,1989. 224—251. (Sun C W. High intensity laser beam interaction with materials and failure mechanism. Comment and review on high intensity laser technology. Chinese Academy of Engineering Physics, 1989. 224—251)
- [8] 陈裕泽,李思忠. 轴压柱壳在连续波激光辐照下的屈曲破坏[J]. 强激光与粒子束, 1995, 7(3):404—408. (Chen Y Z, Li S Z. Buckling failure of the axially compressed cylindrical shell irradiated by CW CO₂ laser beam. *High Power Laser and Particle Beams*, 1995, 7(3):404—408)
- [9] 赵剑衡,孙承纬,袁永华,等. 激光辐照下冲压圆柱壳爆裂规律的实验研究[J]. 强激光与粒子束,1998, 10(5):196—200. (Zhao J H, Sun C W, Yuan Y H, et al. Experimental study on rupture regulation of inner-pressurized cylindrical shells under laser beam loading. *High Power Laser and Particle Beams*, 1998, 10(5):196—200)
- [10] 黄晨光. 激光辐照下几种金属材料的动态力学性质和结构热-力耦合的变形与破坏[D]. 北京:中国科学院力学研究所,1996. (Huang C G. Dynamics behaviors of metals and thermo-mechanical coupling deformation and failure of structures. Beijing: Institute of Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, 1996)
- [11] 张榕京. 连续激光辐照下受载结构的热-力耦合破坏研究[D]. 北京:中国科学院力学研究所,2000. (Zhang R J. Thermo-mechanical failure of pre-loaded structure irradiated by CW laser beam. Beijing: Institute of Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, 2000)
- [12] Lin C C, Segel L A. Mathematics applied to deterministic problems in the natural sciences[M]. New York: Macmillan, 1974.
- [13] 邱绪光. 实用相似理论[M]. 北京:科学出版社,1988. (Qiu X G. Applied similarity theory. Beijing: Science Press, 1988)

Similarity criterion about deformation and failure of pressurized cylinder subjected to laser irradiation

HUANG Cherr-guang, CHEN Si-ying, DUAN Zhur-ping

(Department of Engineering Sciences, Institute of Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: In this paper, the deformation and failure of a cylinder with inner pressure, which is irradiated by high power continuous wave laser beam, are investigated using the similarity analysis theory and FEM. At first, several dimensionless parameters are presented as the similarity criterion based on the dimensional analysis and equations analysis methods. In order to verify the above criterion, numerical simulations on mechanical responses of different size cylinder, but with the same similarity parameters, are accomplished with the commercial FEM code ANSYS. FEM results demonstrate that main dimensionless physical parameters are invariable at the same dimensionless position and time in different scale models, and prove that the similarity criterion presented in this paper is valid.

Key words: Similarity criterion; Finite element methods (FEM); Dimensional analysis; Laser damage