文章编号：1000-5773(2005)02-0151-08

强激光辐照下预载柱壳热屈曲失效的数值分析*

王 吉，王肖钧，王 峰，赵 凯

（中国科学技术大学力学与机械工程系，安徽合肥 230026）

摘要：采用有限元方法(ANSYS7.0)和简易的热力耦合本构关系，较系统地数值研究了预载柱壳受激光辐照时的热力响应和热屈曲失效行为，分析了几种壳体在不同预载条件下(轴压或内压)的屈曲模态和屈曲特征值，给出了屈曲模态和热屈曲失效与激光强度、辐照时间、预载条件和壳体几何尺度及形状间的定量或定性关系。计算结果表明：(1) 屈曲失效行为主要集中在激光辐照区内且以径向屈曲为主。(2) 在一定范围内，屈曲特征值与光斑中心点温度近似有线性关系。(3) 激光辐照区内高温引起的材料软化和预载径向变形的耦合作用是柱壳发生热屈曲失效的根本原因，有效提高结构刚度，可使屈曲特征值提高。(4) 壳体形状的改变对内压柱壳有更为明显的影响，其中圆柱形壳体屈曲特征值最大，因此具有较高的安全性。

关键词：激光辐照；圆柱壳；屈曲；有限元

中图分类号：O343.5 **文献标识码**：A

1 引 言

随着国民经济和高科技发展的需要，激光与材料和结构互相作用的研究日益受到国内外学者的重视[1,2]。预载柱壳在航空航天业和高技术武器中有着广泛应用。当预载壳体受到激光辐照时，表面沉积的辐照能量将引起壳体表层材料温度急剧上升，从而导致材料软化、熔融、液化、汽化、甚至电离，其物理过程和热力学行为十分复杂，最终使得结构局部区域发生损伤断裂和热屈曲失效等灾难性后果。因此有关这一课题的研究长期以来受到国内外学者的关注[3~5]。本文试图通过数值模拟计算，研究预载柱壳发生热屈曲的条件以及它与激光强度、光斑大小、预载方式、壳体结构等之间的关系，以便加深人们对结构屈曲本质的理解和认识，更好地为工程结构安全防护和材料优化设计提供科学依据。

2 激光辐照下预载圆柱壳热屈曲失效的数值分析

2.1 模型

2.1.1 几何模型

为了分析预载圆柱壳受激光辐照后的热屈曲失效行为，我们采用ANSYS有限元商用软件，对不同大小的圆柱壳、在不同强度激光辐照下的热力行为，开展了A、B、C、D、E、F等6组算例的数值计算。柱壳厚度取为$\delta=1.8$ mm，其余几何尺寸如表1所示。柱壳被离散成4 674个壳单元，激光作用在壳体表面中部。

2.1.2 光斑区能量分布和激光加载

激光束能量分布一般呈高斯或超高斯分布，即激光功率密度I随中心距r的变化为

* **收稿日期**：2004-03-05；**修回日期**：2004-06-19

基金项目：国家863计划重点实验室激光技术青年科学基金(20010501)；计算物理国家重点实验室资助项目

作者简介：王 吉(1979—)，男，博士研究生.

$$I(r)=I_0\exp\left[-(r/r_0)^{2\beta}\right] \tag{1}$$

r_0 为光束半径，I_0 为最大功率密度，β 为分布指数，计算中设能量分布为高斯分布取 $\beta=1$。

计算时把光斑区不同位置的激光密度以热流形式的面载荷加在壳单元上。另外，激光对不同单元的入射角是变化的，若令单元法线方向和激光束入射方向夹角为 γ，于是，对光斑内单元，所加热流为

$$I(x,y,z)=I(r)\cdot\cos\gamma \tag{2}$$

一般激光器给出的都是平均功率密度 $\bar{I}$，我们可按下面的公式求出最大功率密度

$$I_0=\frac{\bar{I}\,r_0^2}{2\int_0^{r_0} r\exp\left[-(r/r_0)^{2\beta}\right]\mathrm{d}r} \tag{3}$$

取 $\beta=1$，由上式进行积分，可得 $I_0=1.582\bar{I}$。

由于模拟的是理想状态，计算中忽略了热辐射和热对流。此外，假设激光辐照加载中没有光路损失，柱壳试件对激光能量的吸收率为 100%，且完全转化为热能。环境温度为 20 ℃。

表 1 圆柱壳和激光光斑几何参数

Table 1 Geometric parameters of cylindrical shell and laser spot

Parameter	Serial number					
	A	B	C	D	E	F
Diameter of shell D/(mm)	657	657	657	525	525	525
Height of shell H/(mm)	860	860	860	980	980	980
Diameter of laser spot D_s/(mm)	200	150	100	200	150	100

2.1.3 材料参数

本计算中所用试件为硬铝合金 LY12。这是一种可热处理的强化铝合金，经固溶处理，自然时效或人工时效后具有较高的强度。该合金还具有良好的成形能力和机械加工性能，能够获得各种类型的制品，因而它是航天工业中使用最广泛的铝合金。该合金在高温下的软化倾向小，可用作受热部件。

硬铝合金 LY12 的熔点为 696 ℃，计算中被视为弹性体，考虑热软化对材料力学响应的影响，其应力应变行为呈非线性，一般地可表示为

$$\sigma_{ij}=\lambda(T)\varepsilon_{kk}\delta_{ij}+2\mu(T)\varepsilon_{ij}+3\alpha(T-T_0) \tag{4}$$

式中 Lame 系数 λ 和 μ 可通过便于测量的扬氏模量和泊松比求得，热应力部分相对说来比较小，计算时予以忽略。所取材料参数如表 2 所示。其中导热率、密度、泊松比取为常数，比热与扬氏模量则随温度而变。由于高温下材料参数难以测量，故表中 400 ℃以上的材料参数由中低温(0～300 ℃)下的数据外推而得。

表 2 LY12 材料参数

Table 2 Material parameters of LY12

Temperature T/(℃)	Specific heat C/[J/(kg·℃)]	Young's modulus E/(GPa)
20	900	68.0
100	921	64.0
200	1047	54.0
300	1130	42.0
400	1232	33.9
500	1352	24.4
600	1483	15.0
650	1553	10.3

Thermal conductivity λ/[W/(m·℃)]	Density ρ/(kg/m^3)	Poisson ratio
121	2800	0.33

2.2　计算结果

2.2.1　试件 A 的计算结果

(1) 考核计算——结构的静态屈曲

未受激光作用时,我们可以解析地得到理想线弹性圆柱壳轴向受压时的屈曲特征值 P_C

$$P_C = 0.6E(\delta/R) \tag{5}$$

取常温 20 ℃时的 $E=68$ GPa,$\delta=0.0018$ m ,$R=0.3285$ m,可得屈曲特征值的理论解应为 223.56 MPa。

数值计算所得结果为 $P_C=228.5$ MPa,与理论值吻合较好。这说明采用 ANSYS 软件分析柱壳屈曲行为是可行的。

(2) 激光辐照下柱壳温度场的变化

取激光功率为 10 kW,可得 $\bar{I}=10000/[(0.1)^2\pi]=3.183\times10^5$ W/m^2,故 $I_0=5.036\times10^5$ W/m^2。下面给出不同辐照时间下,算例 A 计算所得的圆柱壳的温度场分布。

图 1 中 7 条曲线自上而下分别表示激光光斑中心、轴向距中心 30 mm 处,周向距中心 30 mm 处、轴向距中心 67 mm 处、周向距中心 67 mm 处、轴向距中心 100 mm 处(激光光斑边缘)、周向距中心 100 mm 处(激光光斑边缘),不同时刻的温升计算结果。可见,由于激光束入射角的影响,在离光斑中心相同的距离下,轴向柱壳的温度要比周向略高一点,但相差并不明显。激光辐照 8.9 s 时,柱壳上激光光斑中心的温度达到 693 ℃,接近试件的熔点温度(696 ℃)。

图 2 为受激光辐照 3 s 时,圆柱壳温度场的分布图。可知:激光辐照对温度场的影响主要集中在光斑内和光斑附近,而离光斑中心距离稍远(大于 160 mm)的地方温度几乎没有任何变化。

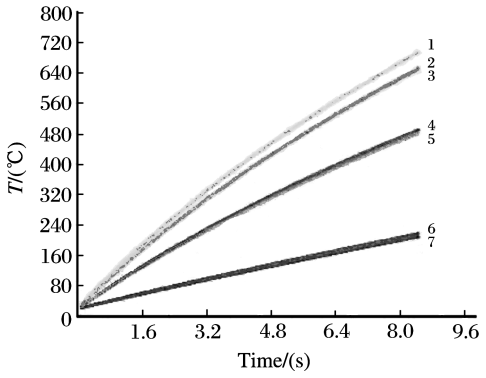


图 1　不同位置点温度时间变化图

Fig. 1　Temperature histories at different positions

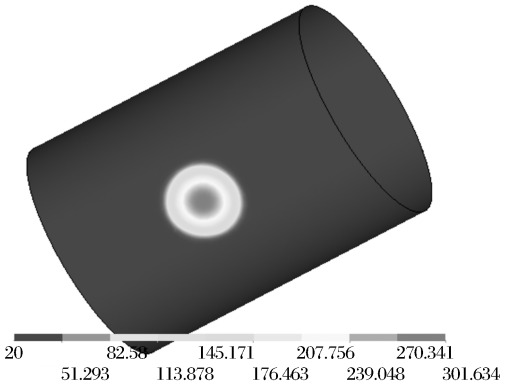


图 2　$t=3$ s 时圆柱壳温度场分布

Fig. 2　Temperature field of cylindrical shell at $t=3$ s

(3) 预载轴压柱壳激光辐照下的屈曲分析

保持激光强度不变,计算不同辐照时间引起柱壳发生热屈曲的临界轴压,即屈曲特征值 P_C,结果如表 3 所示。可见,随着辐照时间增加,光斑区温度不断升高,热软化使得屈曲特征值大幅度下降。

表 3　A 试件计算结果(轴压)

Table 3　Numerical results of specimen A(Axial preloading)

Parameter	Irradiated time t/(s)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	8.9
Maximum temperature T/(℃)	126	217	302	380	452	520	583	642	693
Buckling eigenvalue P_C/(MPa)	227	211	189	170	154	137	120	103	91.1

图 3 表示某一典型算例中发生屈曲失效时的变形图。其中图 3(a)表示径向位移,图 3(b)和图 3(c)表示周向和轴向位移。图中给出的径向最大位移为 0.287 mm,周向最大位移为 0.007 65 mm,轴向最

大位移为 0.002 81 mm。可见圆柱壳的屈曲模态以径向屈曲为主,且变形基本集中于激光辐照区内。随着温度的升高,屈曲失效变形将更集中化。

以不同时刻圆柱壳上最高温度 T(即光斑中心点温度)及其所对应的杨氏模量 E 为横坐标,相应的 P_C 为纵坐标,可以得到图 4、图 5 所示曲线。

可见,除去温度不太高($T\leqslant 150$ ℃)的情况,屈曲临界载荷和光斑中心点温度及其所对应的 E 值近似成线性关系。

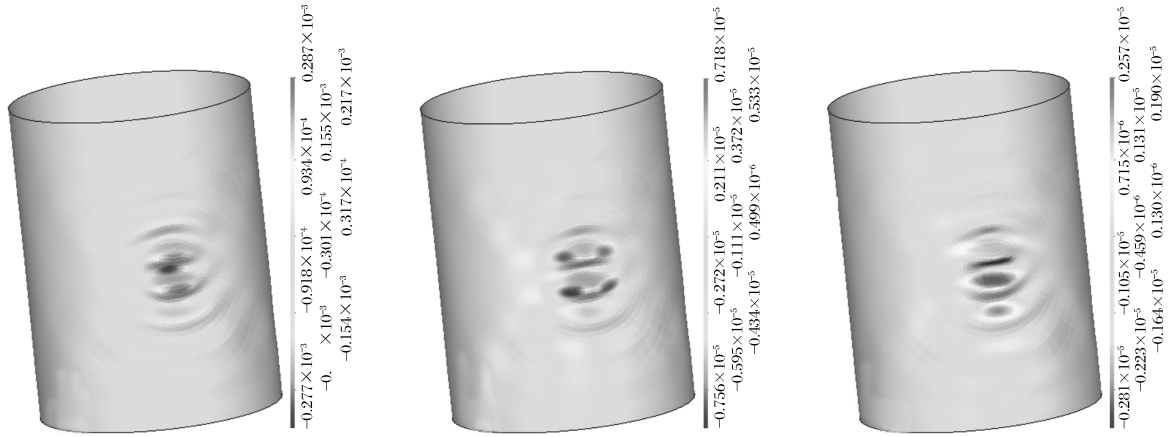


图 3 $t=1$ s 时的屈曲模态图

Fig. 3 Buckling mode at $t=1$ s

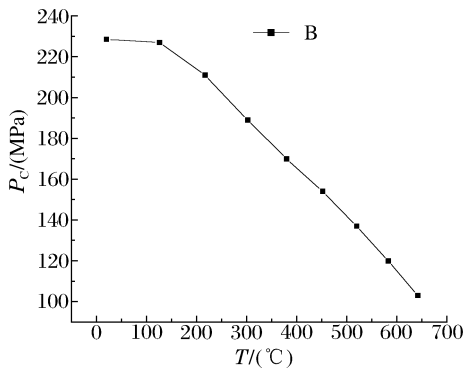


图 4 光斑中心温度 T 与临界载荷 P_C 关系

Fig. 4 Buckling load versus temperature at spot center

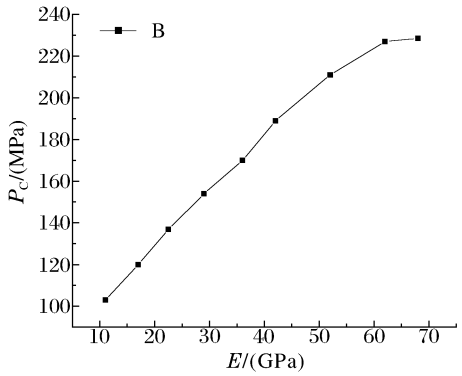


图 5 扬氏模量 E 与临界载荷 P_C 关系

Fig. 5 Young's modulus versus buckling load

(4) 预载内压柱壳激光辐照下的屈曲分析

受内压情况下圆柱壳屈曲模态的改变只是集中在光斑圆心附近很小的区域内,并以径向屈曲为主。在相同激光强度作用下,可以求出不同辐照时间所对应的临界屈曲内压,如表 4 所示。和表 3 结果相比较,显然,激光辐照对受内压预载柱壳的影响比受轴压预载柱壳更为明显。

表 4 A 试件计算结果(内压)

Table 4 Numerical results of specimen A(Internal preloading)

Parameter	Irradiated time t/(s)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	8.9
Maximum temperature T/(℃)	126	217	302	380	452	520	583	642	693
Buckling eigenvalue P_C/(MPa)	366.00	310.10	250.20	212.10	174.00	136.60	102.00	69.61	61.15

同样,如果作 E-P_C 图(图 6)和 T-P_C 图(图 7),可知受内压情况下屈曲临界载荷和柱壳上最高温度及其所对应的 E 值也近似成线性关系。可见,提高材料刚度,不论对受轴压柱壳或是充内压柱壳,都有助于提高结构抗激光辐照的能力。

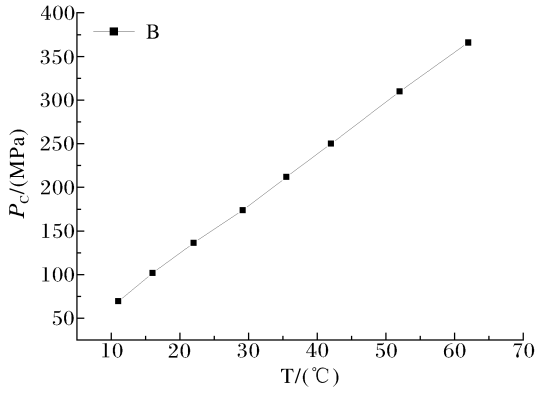


图 6　光斑中心温度 T 与临界载荷 P_C 关系

Fig. 6　Buckling load versus temperature at spot center

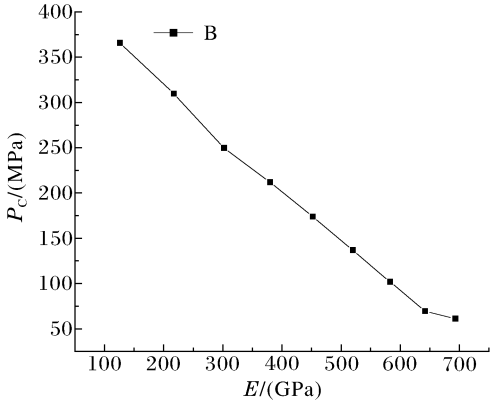


图 7　扬氏模量 E 与临界载荷 P_C 关系

Fig. 7　Young's modulus versus buckling load

2.2.2　其它算例的计算结果

所有算例中激光功率(10 kW)保持不变,分析改变激光光斑尺寸和柱壳内径对柱壳屈曲的影响。

(1) 激光强度对柱壳屈曲的影响

所有算例的计算结果均用光斑中心点温度 T 与屈曲临界载荷 P_C 的曲线关系表示在图 8 和图 9 中。其中实心点(ABC)空心点(DEF)分别表示了两种几何尺寸圆柱壳受不同光斑大小激光辐照下(参见表 1)的热屈曲失效。光斑直径分别为 200 mm(A 和 D)、150 mm(B 和 E)、100 mm(C 和 F),相应的激光平均功率密度分别为 3.183×10^5 W/m^2,5.659×10^5 W/m^2,1.273×10^6 W/m^2。可见,受轴压情况下(图 8),随着光斑尺寸的减小或激光功率密度的提高,柱壳屈曲临界载荷相应有所提高。这说明受轴压柱壳的热屈曲行为与热软化区域有关,减小热软化范围(即减小光斑尺寸),可以提高屈曲临界值。此外,由图 8 还可以看到,随着光斑尺寸的减小,临界屈曲载荷与激光中心点温度间的非线性关系逐渐明显起来。而在受内压情况下(图 9),激光强度的改变对屈曲临界载荷影响不大,并且 T-P_C 之间始终有良好的线性关系。

图 8 中 BC 两线在 150 ℃时相交是由于改变光斑尺寸时引起计算中壳单元的变化而导致的误差。但对整个计算来讲,可以忽略不计。

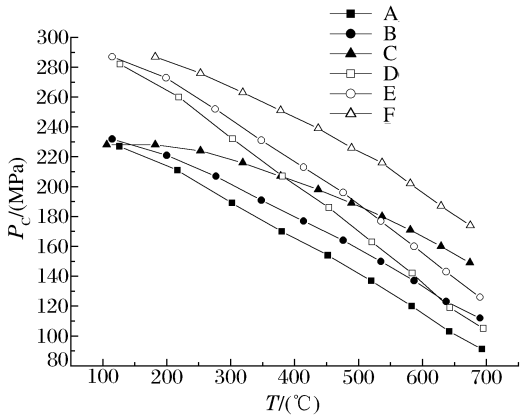


图 8　光斑中心温度 T 与临界载荷 P_C(轴压)关系

Fig. 8　Buckling load versus temperature at spot center (Axially compressed)

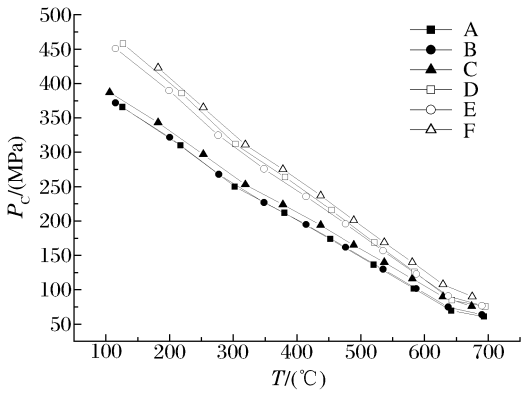


图 9　光斑中心温度 T 与临界载荷 P_C(内压)关系

Fig. 9　Buckling load versus temperature at spot center (Internally compressed)

(2) 圆柱壳内径对柱壳屈曲的影响

同样,从图 8 图 9 可知,受相同激光辐照条件,减小圆柱壳内径(A→D、B→E、C→F)使得屈曲临界载荷(轴压和内压)变大。因此,提高圆柱壳的长径比,可以有效地提高结构的抗激光辐照能力。由图 8、图 9 还可以看到,随着壳体温度的升高,屈曲临界载荷的差值逐渐减小,这一点在受内压情况下更为明显。

3 激光辐照下其它形状预载柱壳热屈曲失效的数值分析

3.1 模型

从园柱壳热屈曲失效的数值分析中看得出:圆柱壳的屈曲模态中,主要以径向屈曲变形为主,且变形集中在光斑辐照区内。物理上这是由于激光辐照引起的温升使光斑区产生缺陷,从而导致屈曲发生。在以下计算中,我们保持光斑中心壳体环线的长度不变,而改变壳体的形状,计算壳体形状的微小变化对屈曲的影响。

图 10 为梯形柱壳,图 11 为酒桶形柱壳,过光斑中心的壳体环线的直径均为 800 mm,改变壳体的顶面和底面直径,使之形状发生变化。

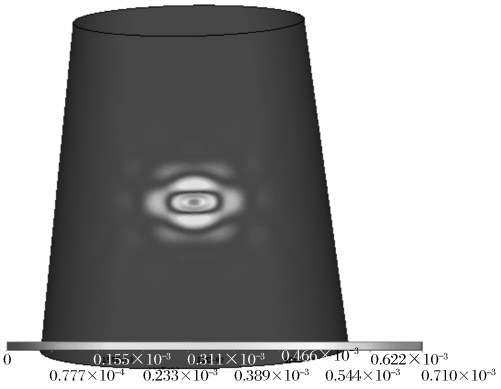


图 10 梯形柱壳几何模型

Fig. 10 Geometric model of trapezoid shell

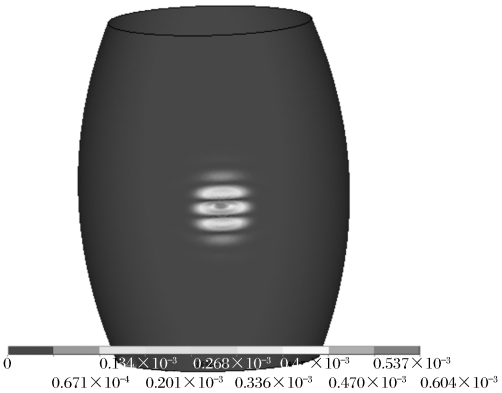


图 11 酒桶形柱壳几何模型

Fig. 11 Geometric model of beer barrel shell

3.2 计算结果

3.2.1 梯形柱壳的计算结果

取激光光斑直径为 150 mm。激光功率为 10 kW, $I_0=8.952\times10^5$ W/m^2,激光辐照时间为 2 s。于是算例中光斑中心处的温升相同。计算时不断增加轴压或内压,直至壳体失稳,此时的轴压或内压即为临界屈曲载荷。由于计算预载轴压时,壳体受载部位(上下两端)的几何尺寸发生变化,为使计算结果具备可比性,故把计算所得的屈曲临界压强载荷 P_C 换算成力载荷 F_C。表 5～表 7 为一组典型算例的计算结果。

表 5 激光辐照 2 s 时梯形柱壳的计算结果

Table 5 Numerical results of trapezoid shell at $t=2$ s

Diameter of top surface/(mm)	300	320	340	360	380	400
Diameter of bottom surface/(mm)	500	480	460	440	420	400
Axial Buckling eigenvalue F_C/(kN)	647.0	666.9	684.1	699.0	711.4	719.2
Internal Buckling eigenvalue P_C/(MPa)	119.1	133.1	147.8	164.7	180.2	191.2

3.2.2 酒桶形柱壳的计算结果

同样取激光光斑直径为 150 mm。激光功率为 10 kW,$I_0=8.952\times10^5$ W/m^2。激光辐照时间为 2 s,光斑中心处的温升相同。

表 6　壳体受轴压,激光辐照 2 s 时酒桶形柱壳的计算结果

Table 6　Numerical results of beer barrel shell at $t=2$ s (Axial preloading)

Diameter of top surface/(mm)	300	320	350	380	400
Axial Buckling eigenvalue F_C/(kN)	661.8	668.7	681.4	700.6	718.0

表 7　壳体受内压,激光辐照 2 s 时酒桶形柱壳的计算结果

Table 7　Numerical results of beer barrel shell at $t=2$ s (Internal preloading)

Diameter of top surface/(mm)	300	330	350	370	380	390	400
Internal Buckling eigenvalue P_C/(MPa)	160.7	161.0	165.1	175.2	181.1	188.5	193.4

3.3　柱壳形状的改变对屈曲的影响

由表 5～表 7 可知,壳体形状的改变引起了预载壳体屈曲临界载荷的变化,这种变化在受内压情况显得更为明显。以梯形柱壳为例,当柱壳顶面半径从 400 mm 降到 300 mm,底面半径由 400 mm 升到 500 mm 时,内压屈曲特征值由 191.2 MPa 下降到 119.1 MPa,降幅达到 37.7%,而同样情况下轴压屈曲特征值由 719.2 kN 下降到 647.0 kN,降幅仅为 10%。对于受预载作用的柱壳而言,在相同辐照条件下,圆柱形壳体屈曲特征值最大,因此具有较高的安全性。

两种壳体的形状对屈曲临界载荷的影响也不完全相同。对于梯形柱壳,随着柱壳顶面半径的减小(或柱壳底面半径的增加),屈曲临界载荷近似成线性变化(见表 5)。而对于酒桶形柱壳,随着顶面半径的减小,屈曲临界载荷下降幅度将变缓(见表 6 和表 7),如在受内压情况下,当顶面半径从 400 mm 下降到 350 mm 时,屈曲特征值下降幅度为 27.4 MPa,而当顶面半径从 350 mm 下降到 300 mm 时,屈曲特征值则只下降 4.4 MPa,特别是当顶面半径小于 330 mm 后,屈曲特征值基本没有变化。

在计算中,由于对于两种形状的柱壳,网格划分存在着一些差异,因此当柱壳趋向于圆柱壳时,计算结果有微小的差异,如受轴压时,两种网格划分所得结果分别为 719.2 kN 和 718.0 kN,其误差仅为 0.167%,这在计算上是允许的。

4　总　结

由上述计算结果和分析,可以得到如下几点有一定参考价值的结论:

(1) 无论是预载轴压还是预载内压,在一定激光辐照强度范围内,屈曲特征值(或屈曲临界载荷)与壳体受激光辐照区域的最高温度或其对应的杨氏模量 E 间近似有线性关系。

(2) 激光辐照区内高温引起的材料软化和预载径向变形的耦合作用是圆柱壳发生热屈曲失效的根本原因。有效的提高结构刚度,可使屈曲特征值提高。

(3) 圆柱壳的屈曲模态与加载方式有一定关系,并以径向屈曲模态为主。

(4) 受轴压情况下,屈曲特征值受激光辐照光斑大小(或激光强度)影响比较大,而受内压时对此并不敏感。

(5) 数值计算表明,壳体形状的改变对内压柱壳有更为明显的影响,其中,圆柱形壳体屈曲特征值最大,因此具有较高的安全性。

References:

[1] Zhao J H, Zhang G R, Liu X F. A Numerical Simulation to the Deformation of an Internally Pressured Cylinder Tank under Intensive Laser Irradiation [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 1996, 10(4): 262－268. (in Chinese)
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.

[2] Chen Y Z. Thermodynamic Failure of the Structures Irradiated by Laser Beam with Low Power Density [J]. Explosion and Shock Waves, 1996, 16(2): 149. (in Chinese)

陈裕泽.低功率密度激光辐照结构的热动力失效[J].爆炸与冲击,1996,16(2):149.

[3] Li Y C,Zhang G. The Failure of Shells Subjected to Internal Pressure and Irradiated by CW CO_2 Laser Beam [R]. AIAA-94-2461,1994.

[4] Chen Y,Li S. Buckling Failure of Axially Precompressed Cylindrical Shell Irradiated by CW CO_2 Laser Beam [R]. AIAA-93-3231,1993.

[5] Ji Z,Liu Y G. A Thermal Failure Numerical Model of Internally Pressured Cylinder Shell under Laser Irradiation [J]. High Power Laser and Particle Beams,1996,8(1):99－104. (in Chinese)
纪 峥,刘永刚.激光束照射下内压柱壳的热爆破数值模拟[J].强激光与粒子束,1996,8(1):99－104.

Numerical Simulations on Buckling Failure of Preloaded Cylindrical Shell Irradiated by High Power Laser Beam

WANG Ji,WANG Xiao-Jun,WANG Feng,ZHAO Kai

(*University of Science and Technology of China*,*Hefei* 230026,*China*)

Abstract: With finite-element software ANSYS 7.0 and simple thermal-mechanical coupling constitutive relations,the buckling failure of preloaded shell irradiated by high power laser beam was studied by numerical simulations. Buckling mode and buckling critical loading were analysed for different preloading conditions. The influences of laser intensity, beam irradiation time, preloading conditions, shape and geometric parameters of shell on the buckling mode were discussed. The numerical results showed that:(1) the buckling deformation of the shell was concentrated on the area of laser spot and the radial buckling was the main buckling mode,(2) a linear relationship between buckling eigenvalue and the maximum temperature at the center of laser spot was approached,(3) the buckling failure of shell was attributed to the coupling effect of the material softenning and the radial deformation in the laser spot,and hence to raise the stiffness of the material would enhance the ability of anti-irradiation of structure substantially,(4) the effect was more obvious under internal preloading for different shapes of shell,and the cylindrical shell had larger buckling eigenvalue and higher security.

Key words: cylindrical shell;buckling;finite element;irradiated by high power laser beam

《高压物理学报》征订启事

《高压物理学报》是我国高压物理领域唯一的专业性学术刊物,在国内外公开发行。《高压物理学报》力求及时报道高压物理学科基础理论和应用研究方面具有创新性、高水平、有重要意义的研究成果,读者对象为国内外科技工作者。《高压物理学报》刊载内容为动态及静态高压技术,人工合成新材料,高温高压下材料的力学、光、电、磁等特性以及物质微观结构的研究,动态及静态高压研究中的测试技术,高温高压下的相变,高温高压物态方程等。

自1987年创刊以来,《高压物理学报》取得了较大的成就。2001年,《高压物理学报》被科技部和国家新闻出版总署评为“中国期刊方阵”双效期刊。国际主要检索系统“EI Compendex”和“CA”一直收录《高压物理学报》文章。由北京高校图书馆期刊工作研究会和北京大学图书馆编著的《中文核心期刊要目总览》连续四版把《高压物理学报》列为物理学类核心期刊(北京大学出版社,1992年、1996年、2000年、2004年)。据中国科学引文数据库公布的“2000年影响因子最高的中国科技期刊300名排行榜”显示,《高压物理学报》影响因子为0.3627,全国排名第94名,列物理类期刊第3名。

《高压物理学报》为季刊,国际16开本(A4),每年3、6、9、12月5日出版。国内读者可直接在当地邮局订阅,邮发代号:62－132;或随时向编辑部订阅。

地 址:四川省绵阳市919信箱110分箱《高压物理学报》编辑部,邮政编码:621900

电子邮件:gaoya@caep.ac.cn; gywl@chinajournal.net.cn (征订、投稿、咨询)

电 话:(0816)2490042;传真:(0816)2282695

邮发代号:62－132; 价格:10元/本, 40元/年。

《高压物理学报》编辑部