

文章编号:1001-4888(2010)01-0073-08

含有初始凹陷圆柱壳稳定承载能力的实验研究与数值计算^{*}

龚友根¹, 贺玲凤²

(1. 广州民航职业技术学院 机务工程系, 广东广州 510403;
2. 华南理工大学 土木与交通学院, 广东广州 510640)

摘要: 对含有初始轴对称凹陷的圆柱壳在轴向载荷作用下的稳定承载能力进行了研究。首先, 通过实验研究, 得到了不同凹陷参数及不同壳长条件下的临界载荷。同时, 不考虑凹陷成形过程, 仅把凹陷部分当做结构的不规则变化时, 对含有凹陷圆柱壳建立三维有限元模型进行稳定性分析。在分析中考虑了初始缺陷(圆柱壳成形加工中的不平直度、椭圆度、初始弯曲等因素引起)幅值 $f_0 = 0.1t$ 和 $f_0 = 0.2t$ (t 为壳体壁厚), 得到了不同凹陷参数及不同壳长的临界载荷。结果表明: 含有凹陷圆柱壳稳定承载能力对初始缺陷不太敏感, 即: 初始缺陷与凹陷相比, 对稳定承载能力的影响极小。数值计算结果与实验结果吻合较好, 共同给出了含有初始轴对称凹陷圆柱壳的承载能力随凹陷幅值、长度及圆柱壳长度的变化而改变的规律。

关键词: 凹陷圆柱壳; 稳定承载能力; 实验研究; 数值计算

中图分类号: O344.3 **文献标识码:** A

0 引言

壳体特别是圆柱壳结构广泛应用于工程中, 圆柱壳结构的稳定性分析引起了人们的极大关注并且对结构的稳定性理论起了重要的作用。随着航空、航天和原子能利用等的飞速发展, 壳体结构稳定性问题的研究意义也愈来愈明显, 轴压圆柱壳的屈曲失稳问题一直是壳体稳定性中最为活跃的课题之一。半个世纪以来, 针对不同几何形状以及不同加载情况的圆柱壳失稳行为, 学者们进行了大量的研究^[1-8]。

薄壳稳定性理论的研究在考虑初始缺陷对于薄壳稳定性影响方面有着迅速的进展。因为实际工程结构总是不可避免地存在着各种各样的初始缺陷(几何形状偏差、载荷偏心等)。因此, 研究具有初始缺陷的薄壳稳定性理论是建立能应用于实际工程薄壳结构的稳定性设计准则的理论基础^[9]。

实际工程中的圆柱壳除了包含一些小的任意分散的缺陷如裂纹、不平直度、椭圆度等外, 在制造、运输等过程中还会产生缺陷。几何形状、结构形式、材料性能以及加载方式等缺陷对结构的承载能力有重要的影响, 含有初始缺陷的圆柱薄壳, 其初始缺陷对圆柱壳的稳定承载能力极为不利^[10-11]。

在实际生产过程中, 为了满足产品要求, 经常需要对圆柱壳某一局部位置的圆周部位进行径向挤压以形成初始轴对称凹陷(凹陷形状为抛物线), 如图 1 所示。凹陷的存在大大降低了圆柱壳的承载能力, 并且凹陷沿径向深度(幅值) W_0 、纵向长度 L_0 、圆柱壳长度 L 不同, 其稳定承载能力也不相同, 这样就给制造加工过程中确定含有凹陷圆柱壳的临界载荷带来了困难。因此, 研究含有初始凹陷圆柱壳的稳定

* 收稿日期: 2009-07-06; 修订日期: 2009-11-16

通讯作者: 贺玲凤(1961—), 女, 教授、博士生导师, 主要研究方向是实验力学、工程结构测试技术。E-mail: lfhe@scut.edu.cn

承载能力是非常有必要的。

1 实验研究

1.1 实验方法概述

为了研究不同凹陷幅值、凹陷长度及圆柱壳长度下含有初始凹陷圆柱壳的稳定承载能力,本次实验选用了凹陷幅值分别为 $W_0=0.5\text{mm}, 1\text{mm}, 1.5\text{mm}, 2\text{mm}$ 和 2.5mm 、凹陷长度 $L_0=5\text{mm}$ 、圆柱壳长度 $L=150\text{mm}$;凹陷幅值 $W_0=1\text{mm}$ 、凹陷长度分别为 $L_0=3\text{mm}, 3.5\text{mm}, 4\text{mm}, 4.5\text{mm}$ 和 5mm 、圆柱壳长度 $L=150\text{mm}$;凹陷幅值 $W_0=1\text{mm}$ 、凹陷长度 $L_0=5\text{mm}$ 、圆柱壳长度分别为 $L=130\text{mm}, 135\text{mm}, 140\text{mm}, 145\text{mm}$ 和 150mm 共 13 组试件进行轴压实验。试件为黄铜材料的圆柱壳,图 2 给出了实验中所用部分试件的实物照片。实验中试件长度为 L , 直径 $D=14\text{mm}$, 壁厚 $t=0.5\text{mm}$, 凹陷形状为抛物线,其纵向长度为 L_0 ,在径向方向的幅值为 W_0 ,凹陷上端距离圆柱壳口部的长度 $L_1=11\text{mm}$,如图 3 所示。

含有初始凹陷圆柱壳的承载实验是在 Instron 试验机上完成的,该试验机的最大载荷为 50kN ,在实验过程中,机架向下的移动速度为 25mm/min 。为了保证实验台的平整,实验开始前在平台上垫有平直的钢板。图 4 为实验中所用的试验机。

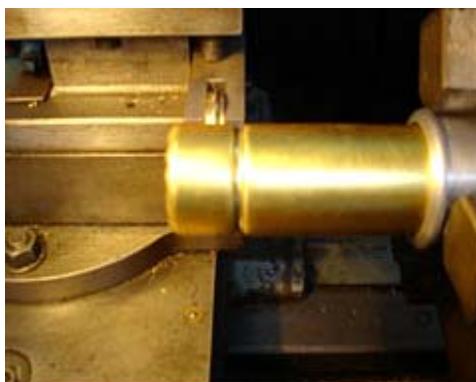


图 1 凹陷塑性挤压成形
Fig. 1 Plastic crush for dent



图 2 实验中所用的部分试件
Fig. 2 Parts of cylindrical shells
used in experiment

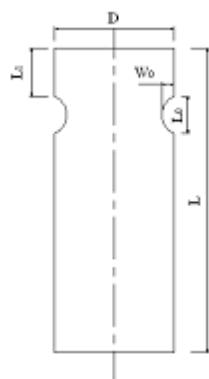


图 3 周向轴对称凹陷及相关尺寸
Fig. 3 Circumferential axisymmetric dent
and relevant dimension



图 4 实验装置
Fig. 4 Experimental equipment

由单向静力拉伸实验给出材料常数为:杨氏模量 $E=101\text{GPa}$,泊松比 $\mu=0.33$,屈服应力 $\sigma_s=250\text{MPa}$,抗拉强度 $\sigma_b=365\text{MPa}$ 。图 5 为材料的拉伸应力—应变曲线。

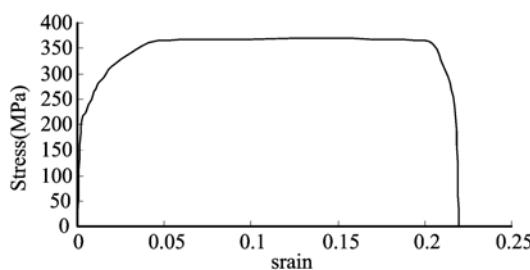


图 5 材料的拉伸曲线

Fig. 5 Tensile curve of material of cylindrical shell



图 6 轴向载荷作用下,实验中部分试件的失稳形式

Fig. 6 Buckling mode of parts of cylindrical shells with initial dent used in experiment under axial load

1.2 实验结果与分析

1.2.1 轴向载荷作用下,试件失稳形态

在轴向载荷作用下,试件发生变形。表 1 给出了实验中试件在轴向载荷作用下,含有凹陷圆柱壳试件的失稳形态。图 6 给出了实验中部分试件的失稳形式。

表 1 轴向载荷作用下,含有凹陷圆柱壳试件的失稳形态

Tab. 1 Buckling mode of cylindrical shell with initial dent under axial load

编号	试件尺寸			失稳形态描述
	凹陷幅值(mm)	凹陷长度(mm)	壳长度(mm)	
1	0.5	5	150	凹陷被压扁,凹陷末端有突起
2	1	5	150	凹陷被压扁,凹陷末端有突起
3	1.5	5	150	凹陷被压扁,凹陷末端有突起
4	2	5	150	凹陷被压扁,凹陷末端有突起
5	2.5	5	150	凹陷被压扁,凹陷末端有突起
6	1	3	150	凹陷被压扁,凹陷末端有突起
7	1	3.5	150	凹陷被压扁,凹陷末端有突起
8	1	4	150	凹陷被压扁,凹陷末端有突起
9	1	4.5	150	凹陷被压扁,凹陷末端有突起
10	1	5	130	凹陷被压扁,凹陷末端有突起
11	1	5	135	凹陷被压扁,凹陷末端有突起
12	1	5	140	凹陷被压扁,凹陷末端有突起
13	1	5	145	凹陷被压扁,凹陷末端有突起

从表 1 可以看出,含有凹陷圆柱壳在轴向载荷作用下,并不会在壳体纵向方向上出现一系列的失稳波形,而仅仅是在凹陷周围发生局部失稳破坏,凹陷部分被压扁,凹陷末端周围有突起。

1.2.2 不同参数对试件临界载荷 F_c 的影响

1) 凹陷幅值 W_0 对试件临界载荷 F_c 的影响

轴向载荷作用下,含有凹陷圆柱壳的临界载荷随着凹陷幅值的变化规律如表 2 所示。

由表 2 可知,当凹陷长度 L_0 、圆柱壳长度 L 一定,含有凹陷圆柱壳的临界载荷随着凹陷幅值的增加而显著减小,圆柱壳的承载能力随之减弱;凹陷幅值从 0.5mm 增加到 2.5mm 时,临界载荷下降了 63.4%,临界载荷对凹陷幅值的变化敏感。

表2 不同凹陷幅值下的临界载荷

Tab. 2 Critical load under different amplitude value of dent

试件编号	W_0 (mm)	L_0 (mm)	L (mm)	F_{cr} (N)
1	0.5	5	150	5431.3
2	1			3426.6
3	1.5			2708.3
4	2			2279.2
5	2.5			1986.5

2) 圆柱壳长度 L 对试件临界载荷 F_{cr} 的影响

轴向载荷作用下,含有凹陷圆柱壳的临界载荷随着圆柱壳长度的变化规律如表3所示。

表3 不同长度时的临界载荷

Tab. 3 Critical load under different length of cylindrical shell

编号	W_0 (mm)	L (mm)	L_0 (mm)	F_{cr} (N)
6	1	130	5	3458.2
7		135		3452.4
8		140		3443.1
9		145		3437.3
10		150		3426.6

从表3可看出,当凹陷幅值 W_0 、凹陷长度 L_0 一定时,试件长度从130mm增加到150mm时,含有凹陷圆柱壳的临界载荷变化幅度不大,只下降了0.91%,试件的临界载荷 F_{cr} 随着圆柱壳长度 L 的增大而逐渐减小,其承载能力逐渐减弱。

3) 凹陷长度 L_0 对试件临界载荷 F_{cr} 的影响

轴向载荷作用下,含有凹陷圆柱壳的临界载荷随着凹陷长度的变化规律如表4所示。

表4 凹陷长度变化时的临界载荷

Tab. 4 Critical load under different length of dent

编号	W_0 (mm)	L (mm)	L_0 (mm)	F_{cr} (N)
11	1	150	3	3209.3
12			3.5	3264.4
13			4	3308.5
14			4.5	3357.1
15			5	3426.6

由表4可知,当凹陷幅值 W_0 、试件长度 L 一定,凹陷长度从3mm增加到5mm时,含有凹陷圆柱壳的临界载荷增加了6.8%,相对于凹陷幅值,临界载荷对凹陷长度的变化不敏感;试件的临界载荷 F_{cr} 随着凹陷长度 L_0 的增大而变大,试件的承载能力随之增强。

2 数值计算

在圆柱壳初始缺陷幅值的选取方面,本文根据相关文献选取了初始缺陷幅值 $f_0 = 0.1t$ 和 $f_0 = 0.2f^{[12-13]}$ (t 为壳体厚度)两种情形对含有凹陷圆柱壳的稳定承载能力进行讨论。

由于在三维模型下模拟凹陷成形过程的复杂性,因此,本文并没有对圆柱壳凹陷成形过程进行分

析,忽略了凹陷部分的成形,而仅仅把凹陷部分当作结构的不规则变化,其厚度近似等于壳体壁厚。

2.1 数值计算步骤

含有初始凹陷圆柱壳模型是在 ANSYS 中通过调整参数而直接建立的,模型采用的是 Shell181 单元,该单元有四个节点,每个节点有六个自由度,即沿 X、Y、Z 方向的移动自由度和转动自由度。Shell181 单元支持线性、大扭转、大变形和变厚度非线性分析。有限元模型见图 7,表 5 给出了有限元模型的相关尺寸。由于本文研究重点是含有凹陷圆柱壳发生较大塑性变形后的行为,所以要给出圆柱壳的塑性应力—应变曲线,因此采用单向静力拉伸实验给出圆柱壳的材料属性,使用多线性等向强化(MISO)来表示应力—应变曲线模拟强化效应。在前处理网格划分部分,把凹陷部分圆弧及凹陷末端上下各 3mm 的轮廓线的网格大小设置为 0.5mm,圆周部分的网格划分为 15 等份,其余部分的网格大小设置为 1.5mm。在分析中,选定初始缺陷幅值 $f_0=0.1t$ 和 $f_0=0.2t$ 作为缺陷因子来进行讨论,当轴向载荷作用于含有初始凹陷圆柱壳口部时,壳底部固定,口部仅有轴向自由度。

表 5 有限元模型参数
Tab. 5 Parameters of finite element model

L(mm)	t(mm)	R(mm)	L_o (mm)	L_d (mm)
130~150	0.5	14	3~5	11

2.2 数值计算结果与分析

2.2.1 轴向载荷作用下,含有凹陷圆柱壳的失稳模态

在轴向载荷作用下,含有凹陷圆柱壳发生变形,图 8、9 给出了初始缺陷幅值分别为 $f_0=0.1t$ 和 $f_0=0.2t$ (t 为壁厚)两种情形下,含有凹陷圆柱壳塑性屈曲模态,从图中可知,两种情形下,含有凹陷圆柱壳的屈曲模态基本一致:含有初始凹陷圆柱壳在轴向载荷作用下壳体部分并不会出现一系列的失稳波形,而只是在凹陷周围发生局部破坏,这与实验结果吻合。这是因为相比初始缺陷,壳体含有的凹陷对结构的影响更大。

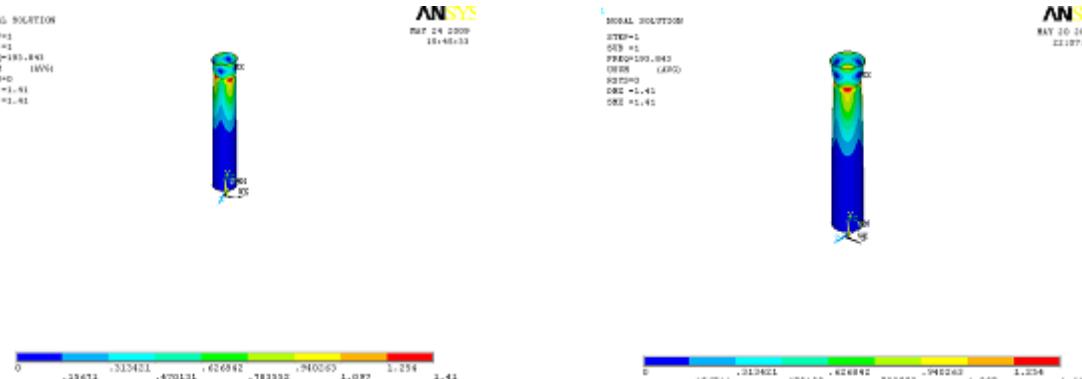


图 8 圆柱壳塑性屈曲模态($f_0=0.1t$)

Fig. 8 Plastic buckling mode of cylindrical shell ($f_0=0.1t$)

图 9 圆柱壳塑性屈曲模态($f_0=0.2t$)

Fig. 9 Plastic buckling mode of cylindrical shell ($f_0=0.2t$)

2.2.2 不同参数对模型临界载荷的影响

1) 凹陷幅值 W_0 对临界载荷 F_{cr} 的影响

当圆柱壳模型长度 $L=150\text{mm}$ 、凹陷长度 $L_0=5\text{mm}$ 时, 临界载荷 F_{cr} 随凹陷幅值 W_0 的变化规律如表 6 所示。

表 6 临界载荷 F_{cr} 随凹陷幅值 W_0 的变化

Tab. 6 Critical load F_{cr} under different amplitude value of dent W_0

编号	$W_0(\text{mm})$	$L_0(\text{mm})$	$L(\text{mm})$	$F_{cr}(\text{N})$ ($f_0=0.1t$)	$F_{cr}(\text{N})$ ($f_0=0.2t$)	$F_{cr}(\text{N})$ (实验值)
1	0.5	5	150	5899.5	5826.6	5431.3
2	1			4098.6	4102.1	3426.6
3	1.5			3153.4	3151.8	2708.3
4	2			2786.4	2785.5	2279.2
5	2.5			2410.3	2409.8	1986.5

从表 6 可看出, 在圆柱壳长度 L 、凹陷纵向长度 L_0 一定时, 当凹陷幅值 W_0 从 0.5mm 增加到 2.5mm 时, 临界载荷 F_{cr} 逐渐减小, 减小幅度为 59.1% ($f_0=0.1t$) 和 58.6% ($f_0=0.2t$), 其承载能力明显减弱, 临界载荷对凹陷幅值敏感。相比实验结果, 数值计算得到的临界载荷偏高。这极有可能是因为在径向挤压形成凹陷过程中, 凹陷部分发生塑性变形, 凹陷部位形成应力集中, 降低了结构的刚度, 减弱了结构的承载能力。因为实验中凹陷是挤压成型, 而数值分析中仅仅把凹陷部分作为结构的不规则变化来考虑的, 所以导致数值结果比实验结果要偏高。在初始缺陷幅值为 $f_0=0.1t$ 和 $f_0=0.2t$ 两种情形下, 含有凹陷圆柱壳的临界载荷变化幅度很小, 凹陷幅值 W_0 从 0.5mm 增加到 2.5mm 时, 两者对应的临界载荷分别减小了 1.2% , 0.085% , 0.05% , 0.03% 和 0.02% , 凹陷幅值越大, 初始缺陷幅值对其临界载荷的影响越小, 可以忽略不计。

2) 圆柱壳长度 L 对临界载荷 F_{cr} 的影响

当凹陷长度 $L_0=5\text{mm}$, 凹陷幅值 $W_0=1\text{mm}$ 时, 临界载荷 F_{cr} 随模型长度 L 的变化规律见表 7。

表 7 圆柱壳长度变化时的临界载荷

Tab. 7 Critical load F_{cr} under different length of cylindrical shell L

编号	$W_0(\text{mm})$	$L_0(\text{mm})$	$L(\text{mm})$	$F_{cr}(\text{N})$ ($f_0=0.1t$)	$F_{cr}(\text{N})$ ($f_0=0.2t$)	$F_{cr}(\text{N})$ (实验值)
6	1	5	130	4128.5	4123.2	3458.2
7			135	4123.7	4118.6	3452.4
8			140	4118.2	4115.6	3443.1
9			145	4112.0	4109.7	3437.3
10			150	4098.6	4102.1	3426.6

从表 7 可以看出, 当凹陷幅值 W_0 一定时, 临界载荷 F_{cr} 随圆柱壳长度 L 的变化是单调递减的。当圆柱壳长度从 130mm 增加到 150mm , 临界载荷分别下降了 0.72% ($f_0=0.1t$) 和 0.51% ($f_0=0.2t$); 相比凹陷幅值, 临界载荷对圆柱壳长度变化不敏感, 数值计算结果比实验结果偏高, 原因如前所述。在初始缺陷幅值 $f_0=0.1t$ 和 $f_0=0.2t$ 两种情形下, 当 W_0 、 L_0 一定, L 从 130mm 增加到 150mm , 含有凹陷圆柱壳的临界载荷变化幅度很小, 最大只有 0.13% , 最小为 0.058% 。

3) 凹陷长度 L_0 对临界载荷 F_{cr} 的影响

当凹陷幅值 $W_0=1\text{mm}$, 圆柱壳长度 $L=150\text{mm}$ 时, 临界载荷 F_{cr} 随凹陷长度 L_0 的变化规律如表 8 所示。

表 8 凹陷长度变化时的临界载荷
Tab. 8 Critical load under different length of dent

编号	W_0 (mm)	L_0 (mm)	L (mm)	F_σ (N) ($f_0 = 0.1t$)	F_σ (N) ($f_0 = 0.2t$)	F_σ (N) (实验值)
11	1	150	3	3517.1	3516.8	3209.3
12			3.5	3634.8	3632.8	3264.4
13			4	3786.5	3777.1	3308.5
14			4.5	3933.8	3916.7	3357.1
15			5	4098.6	4102.1	3426.6

由表 8 可知, 凹陷幅值 W_0 一定、试件长度 L 一定时, 试件的临界载荷 F_σ 随着凹陷长度 L_0 的增大而变大, 当凹陷长度从 3mm 增加到 5mm 时, 临界载荷分别增加了 16.5% ($f_0 = 0.1t$) 和 16.6% ($f_0 = 0.2t$)。由此可知, 当凹陷截面变化愈缓慢, 含有凹陷圆柱壳的承载能力愈强。相比凹陷幅值, 临界载荷对圆柱壳长度变化不敏感。在初始缺陷幅值为 $f_0 = 0.1t$ 和 $f_0 = 0.2t$ 两种情形下, 当 W_0 、 L 一定, L_0 从 3mm 增加到 5mm 时, 含有凹陷圆柱壳的临界载荷变化幅度很小, 最大只有 0.4%。

3 结论

本文通过对含有初始凹陷圆柱壳的稳定承载能力所进行的实验研究及数值计算, 可得出以下结论:

- 1) 含有凹陷圆柱壳的临界载荷 F_σ 随着凹陷幅值 W_0 的增大而逐渐减小, 且变化幅度很大, 相应的承载能力随之显著减弱。
- 2) 含有凹陷圆柱壳的临界载荷 F_σ 随着长度 L 的增大而减小, 变化幅度不大, 其承载能力随之减弱。
- 3) 含有凹陷圆柱壳的临界载荷 F_σ 随着凹陷纵向长度 L_0 的增大而逐渐变大, 试件的承载能力随之逐渐增强。
- 4) 含有凹陷圆柱壳的承载能力对凹陷幅值最敏感, 凹陷长度次之, 对圆柱壳的长度最不敏感。
- 5) 相比初始凹陷, 初始缺陷对含有凹陷圆柱壳的稳定承载能力的影响可以忽略不计。

参考文献:

- [1] Roth R S, Klosner J M. Nonlinear response of cylindrical shells with imperfections subjected to dynamic axial loads [J]. AIAA Paper, New York, 1964, 18(3): 64—76.
- [2] Budiansky B, Hutchinson J W. Dynamic buckling of imperfection sensitive structures[C]. Proceedings of the 11th international congress of Applied Mechanics, Munich, West Germany, 1964.
- [3] Hutchinson J W, Budiansky B. Dynamic buckling estimates[J]. AIAA Journal, 1966, 10(4): 525—530.
- [4] Tamura Y S, Babcock C D. Dynamic stability of cylindrical shells under step loading[J]. ASME Trans, J of Applied Mechanics, 1975, 42(2): 190—194.
- [5] Lindberg H E, Herbert R E. Dynamic buckling of a thin cylindrical shell under axial impact[J]. ASME Trans, J Appl Mech, 1966, 33(1): 105—112.
- [6] Florence A L, Goodier J N. Dynamic plastic buckling of cylindrical shells in sustained axial compressive flow[J]. ASME Trans, J Appl Mech, 1968, 35(1): 80—86.
- [7] Zimcik D G, Tennyson R C. Stability of circular cylindrical shells under transient axial impulsive loading[J]. AIAA Journal, 1980, 18(6): 691—699.
- [8] Ulo Lepik. On plastic buckling of cylindrical shells struck axially with a mass[J]. Int J Nonlinear Mechanics, 1998, 33(2): 235—246.
- [9] 周承倜. 薄壳弹塑性稳定性理论[M]. 北京: 国防工业出版社, 1929: 28—35 (Zhou Chengti. Elastic and plastic stability theory of thin shell[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1929: 28—35 (in Chinese))

- [10] Rotter J M, Teng J G. Elastic stability of cylindrical shells with weld depressions[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1989, 115(5): 1244—1263.
- [11] Donnell L H, Tsien H S. The buckling of thin shells under axial compression[J]. J Aeronaut. Sci., 1941, 35(8): 303—312.
- [12] 谢祚水,王自力,吴剑国. 潜艇结构分析[M]. 武汉:华中科技大学出版社, 2004:70—87(Xie Zuoshui, Wang Zili, Wu Jianguo. Submarine structural analysis[M]. WuHan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2004:70—87(in Chinese))
- [13] 王林,李峰,田冀峰. 初始缺陷对耐压圆柱壳结构极限承载力的影响[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2009, 23(1):1—4(Wang Lin, Li Feng, Tian Jifeng. Effects of Initial Defects to The Limit Load of Pressure Cylinder Shell[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2009, 23(1):1—4 (in Chinese))

Experimental Study and Numerical Calculation of Stability and Load-Carrying Capacity of Cylindrical Shell with Initial Dent

GONG You-gen¹, HE Ling-feng²

(1. Department of the Aircraft Maintenance Engineering, Guangzhou Civil Aviation College, Guangdong 510403, China;

2. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Study of the stability and load-carrying capacity of a cylindrical shell with initial axisymmetric dent under uniform axial compression was carried out. Through experimental investigation, the critical loads for different dent lengths and different cylindrical shell lengths were obtained. At the same time, the dent was just regarded as an irregular change of whole structure regardless of the process of dent formation, a 3-dimensional finite element model was established to analyze the stability of cylindrical shell with initial dent. Taking into account the initial defects such as non-flatness, ellipticity and initial bending formed in fabrication, under the initial defect amplitudes $f_0 = 0.1t$ and $f_0 = 0.2t$, respectively (t is the cylindrical shell thickness), the critical loads were obtained for different dent amplitudes, longitudinal lengths and cylindrical shell lengths. Results show that the effect of initial defect on the stability and carrying capacity of cylindrical shell with initial defects is inconspicuous relative to the initial dent. Experimental and numerical simulation results are in good agreement and both of them provide a regulation describing the relations among the load-carrying capacity and the dent amplitude and length and the cylindrical shell length.

Keywords: cylindrical shell with initial dent; load-carrying capacity; experimental study; numerical calculation