

安全壳中钢衬壳热屈曲问题理论与实验研究 (II) —— 实验部分¹⁾

范钦珊 丁红丽* 徐秉业 陈正新

(清华大学工程力学系, 北京 100084)

*(北京大学力学与工程科学系, 北京 100871)

摘要 钢衬壳热屈曲问题是核工程安全壳设计中的主要问题, 但实验研究方面的文章发表得不多. 文中以 200 兆瓦核电站安全壳中钢衬壳为研究对象, 采用局部 1:1 模型, 测得了钢衬壳热屈曲温度和应变载荷, 给出了钢衬壳屈曲和初始后屈曲过程中挠度和温度关系、以及膜应变和温度关系, 实验测得钢衬壳具有局域屈曲的现象, 实验屈曲载荷与理论结果符合较好.

关键词 钢衬壳, 钢衬壳实验, 屈曲, 热屈曲实验, 安全壳设计

引 言

钢衬壳热屈曲问题, 在实验方面的工作并不多. Kicher 等^[1] 实验研究了小模型钢衬圆柱壳在有锚钉支撑和无锚钉支撑两种情况下的热屈曲问题, 实验钢衬模型尺寸为直径 762mm, 高 762mm 和厚 0.4mm, 给出了屈曲应变. Saito 等^[2] 实验研究了钢衬板的热屈曲问题, 实验模型、加温条件模拟实际工况, 主要研究了钢衬板与混凝土墙中的水蒸气的压力对钢衬板屈曲的影响, 并给出了温度-挠度曲线. 文献 [3] 给出了钢衬环热屈曲温度的实验值.

本文中钢衬壳热屈曲实验是以 200MW 核电站安全壳中钢衬壳为研究对象, 采用局部 1:1 模型, 实验模型径向曲率半径与安全壳直径相同 (18m), 锚钉铆固间距与实际安全壳中相同, 受热条件也模拟实际工况. 实验给出了钢衬壳屈曲温度和应变载荷, 给出了屈曲前后的应变和挠度值随温度的变化情况, 实验发现钢衬壳具有局域屈曲的现象, 其屈曲载荷与理论分析中的高阶屈曲临界载荷符合较好. 研究结果对安全壳中钢衬壳的设计有重要的指导意义.

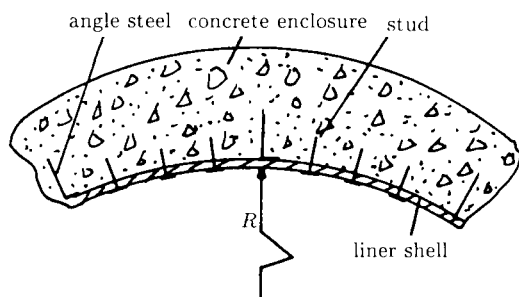


图 1 安全壳与钢衬壳

Fig. 1 Reactor containment and liner

1 实验概述

试件 钢衬材料用冷轧 20 号锅炉钢板, 钢板在试验机上成型后为内半径 18m 的圆柱形钢衬壳, 在离钢衬周边 50mm 处钻有圆孔, 以使用活动锚钉将钢衬壳固定在混凝土实验块上, 实验钢衬壳的厚度分别有 1mm 和 2mm.

1997-01-22 收到.

1) 核工业科学基金和国家教委开放实验室研究基金资助项目.

混凝土实验块由浇注而成,如图 2 所示,在实验块的内表面的中间留有沟槽,以便在钢衬的背面焊贴高温应变片。实验块内表面离周边 50 mm 处有螺丝孔,在实验块周边凸起的边缘的内侧浇注有钢板,用以增大钢衬壳与混凝土壳的接触面积,实验块上凸起的边缘用来加强钢衬的环向和轴向约束,又作为加热试样的保温炉壁。实验块的混凝土标号达到 300#,为了阻止实验块的开裂和加强它对钢衬的约束力,用了 6 根 $\phi 18$ 的钢筋对实验块加强。

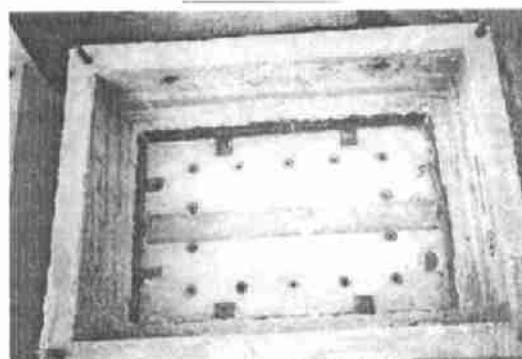


图 2 混凝土实验块

Fig. 2 The experimental model of the concrete enclosure

沿周边紧密设置的活动锚钉的铆固限制钢衬壳的径向挠度,实验块凸起的边缘限制其环向和轴向位移,从而实现钢衬壳的固支边界约束条件,去掉锚钉的限制可实现钢衬壳的简支边界条件。

实验测量 应变测量用的是金属基底焊接式高温应变片和应变仪,应变片可承受最高温度为 300°C ,钢衬正反两面都贴有应变片,如图 3 所示,温度由镍铬-镍铝热电测量,挠度由玻璃棒和百分表测量,玻璃棒穿过多层云母板和加热炉丝骨架与钢衬壳接触,玻璃棒显露在外面的另一端与百分表接触,由百分表读出位移挠度的大小。

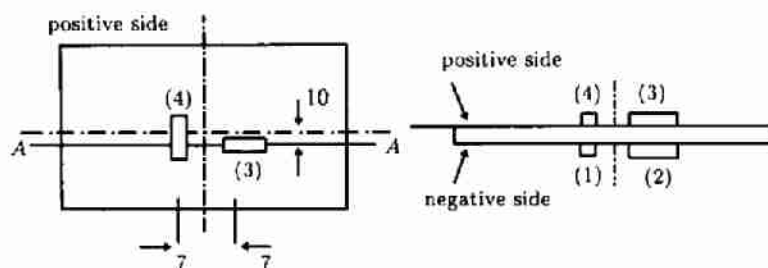


图 3 应变片布置图

Fig. 3 Strain gauge arrangement

加热系统 采用电阻丝加热,炉丝是 7 根 1000 W 的电阻丝,炉丝固定在云母板上使用 7000 W 的变压器控制加热速度。

实验步骤 应变仪调零,测量室温、百分表初始值;缓慢加热,记录应变值和挠度值;出现屈曲现象后,继续加热到挠度值变化缓慢,停止实验,如果温度达到 300°C 仍未出现屈曲现象,也停止实验。

数据处理 为使高温电测更加精确,在恒温箱中逐点测定电阻片与钢衬壳综合热输出应变,用它进行试验应变值的修正,避免工艺的影响、分散度统计平均影响,即实际压应变值 ε 为

$$\varepsilon = \varepsilon_e - \varepsilon_t$$

式中 ε_e 为实验仪器测得的应变值, ε_t 为热输出应变值。

膜应变与弯曲应变由测得的钢衬壳内外表面的应变值计算得到。



图 4 实验模型实物图

Fig. 4 Experimental model of thermal buckling of liner shell

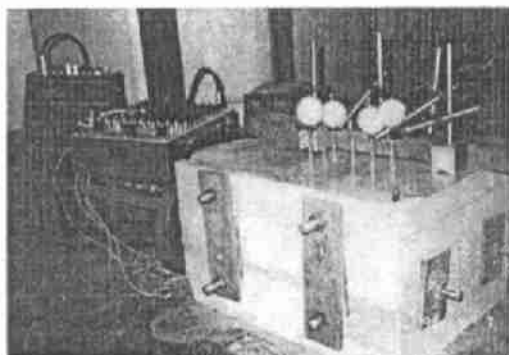


图 5 实验现场图

Fig. 5 Experimental scene

图 4 和图 5 分别给出了实验模型实物图和实验现场图。

2 实验结果和结论

对 1mm 和 2mm 厚钢衬壳分别进行了热屈曲实验, 屈曲温度和应变载荷见表 1。实验发现钢衬壳在屈曲时表现了较强的局域屈曲或高阶屈曲的特性, 即屈曲时整个铆固间距上不是一个大波形, 而是局部范围上的小波形。根据实验测得的挠度值确定屈曲波形, 如果是局域小波形, 由波长确定屈曲波数。

图 6、图 7 分别给出了实验 1 和实验 3 测得的挠度值随温度变化曲线, 从图中看, 开始加热时, 随着温度的升高, 挠度值有微小的变化, 当温度达到屈曲温度时, 钢衬壳发生跳跃, 挠

表 1 实验测得的钢衬壳的屈曲温度、应变、最小应变值和屈曲波数

Table 1 Experimental value of buckling temperature, buckling strain, minimum strain and buckling wave numbers

	Experiment 1	Experiment 2	Experiment 3	Experiment 4
Support spacings (axial, circumferential)/mm	400, 300	400, 300	300, 200	400, 300
Liner thickness/mm	1	1	1	2
Boundary condition	Clamped	Clamped	Clamped	circumferential simple supported, axial free
Buckling temperature/ $^{\circ}\text{C}$	125	125	95	130
Buckling strain/ 10^{-6}	-360	\	\	-533
Minimum buckling strain/ 10^{-6}	-95	\	\	-93
Buckling wavenumbers (axial, circumferential)	3, 3 (Clamped wave)	3, 3 (Clamped wave)	2, 2 (Clamped wave)	1 simple supported wave +2 Clamped waves (axial)

度值迅速增加, 并伴有“啪”的响声, 然后, 挠度值变化缓慢, 直到停止加热为止. 表 2 给出了实验 3 测得的挠度值, 可知, 屈曲瞬时钢衬壳为高阶波形, 跳跃屈曲后为一阶波形.

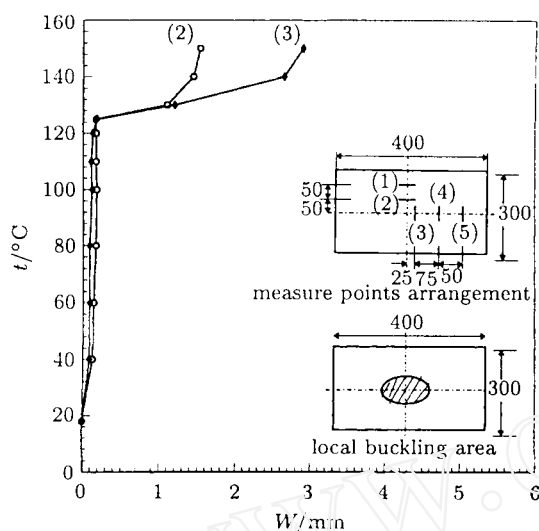


图 6 实验 1 中挠度值随温度变化曲线
Fig.6 The curves of the deflection-temperature obtained in experiment 1

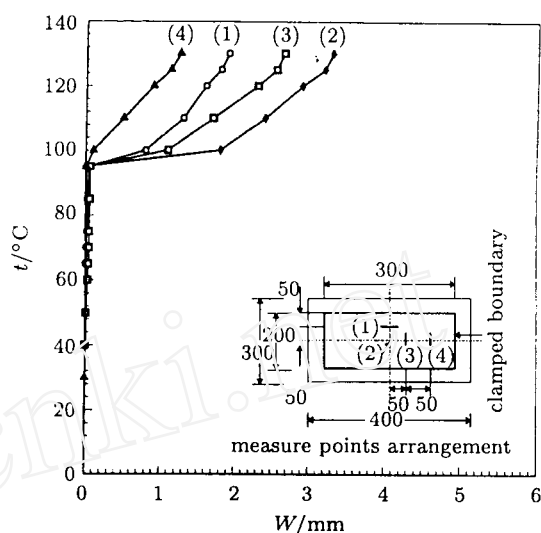


图 7 实验 3 中挠度值随温度变化曲线
Fig.7 The curves of the deflection-temperature obtained in experiment 3

表 2 实验 3 中各测点的挠度值

Table 2 Liner shell deflection value obtained in experiment 3

$t/^{\circ}\text{C}$	15	30	50	60	80	90	95	100	110	120	125	130
1	0	0	0	0	0.01	0.03	0.05	0.8	1.3	1.6	1.8	1.9
2	0	0	0	0	0	0	0	1.8	2.4	2.9	3.2	3.3
3	0	0	0.01	0.03	0.05	0.06	0.06	1.1	1.7	2.3	2.55	2.65
4	0	0	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.1	0.5	0.9	1.13	1.25

图 8 和图 9 分别给出了实验 1 和实验 4 测得的应变值随温度变化的曲线, 从图中看, 开始加热时, 随着温度的升高, 膜应变值呈线性的增加, 当温度达到屈曲温度时, 膜应变值开始迅速减小到最小应变值, 再随着温度的升高, 膜应变值保持不变, 直到停止加热为止. 从波形的变化可知, 屈曲瞬时钢衬壳波形为局域小波形, 跳跃屈曲后变为全域的大波形. 在实验 1 和实验 4 进行后, 钢衬壳又进行了第二次加热过程, 钢衬壳无屈曲现象, 其膜应变随温度的变化也在图 8 和图 9 中给出, 当温度高于屈曲温度后, 两次得到的膜应变值几乎相同.

表 3 给出了实验屈曲温度和应变载荷与理论分析结果的比较. 本文的第一部分给出了理论计算公式, 在理论计算中钢衬壳的尺寸 b 和 L 分别取为实验的环向和轴向铆距, 钢衬壳与混凝土的热膨胀系数之差为 α_t . 表中的屈曲阶数意为: 1 个固支波为 1 阶, 1 个简支波为 0.5 阶. 理论值的屈曲温度和应变载荷是根据实验测出的高阶屈曲阶数计算得出的高阶屈曲临界载荷, 理论值的最小应变值是一阶屈曲阶数的屈曲临界载荷. 由表中的比较结果知, 实验值和理论值符合得较好.

结论与分析 总结 1 mm 和 2 mm 厚钢衬壳热屈曲实验结果, 从测得的应变值和挠度值看,

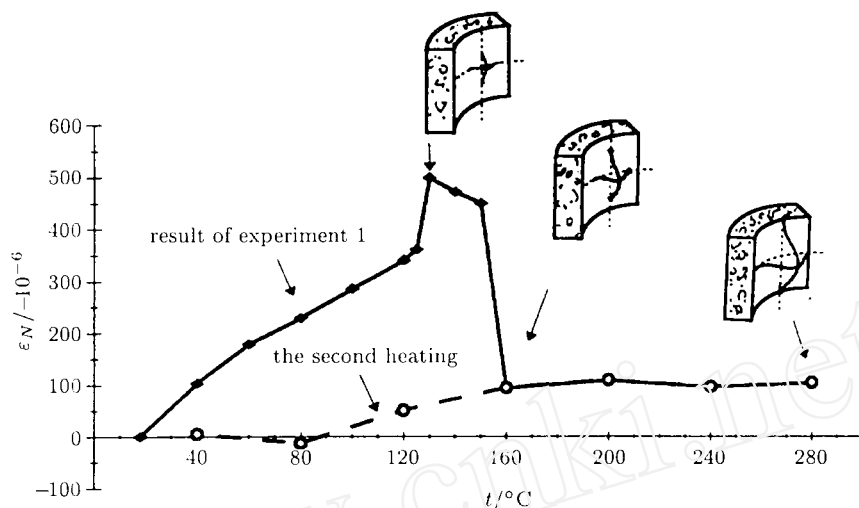


图 8 1mm 厚钢衬壳 (实验 1) 环向膜应变值和屈曲波形随温度变化的情况

Fig.8 The curves of circumferential membrane strain-temperature of 1mm thickness liner shells and the change of buckling wave form with temperature (results of experiment 1)

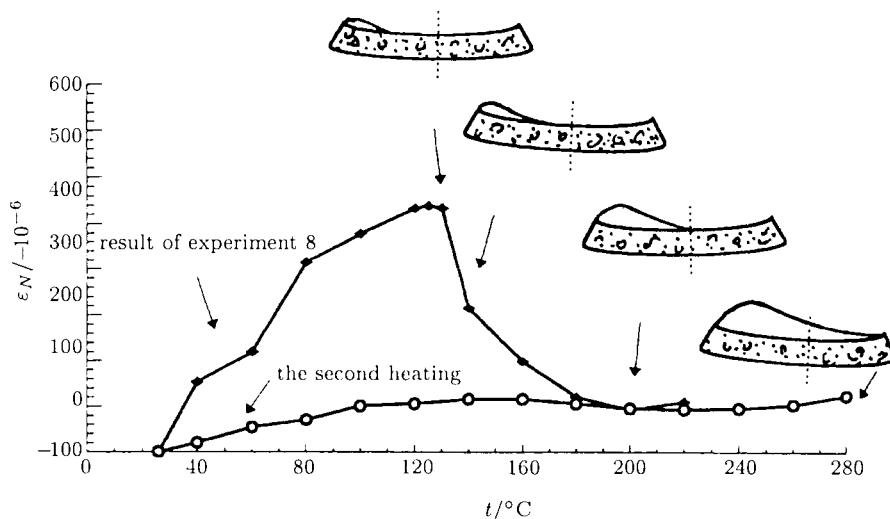


图 9 2mm 厚钢衬壳 (实验 4) 环向膜应变值和屈曲波形随温度变化的情况

Fig. 9 The curves of circumferential membrane strain-temperature of 2 mm thickness liner shells and the change of buckling wave form with temperature (results of experiment 4)

屈曲瞬时膜应变值和挠度值都发生跳跃。跳跃屈曲后膜应变值变化不大, 挠度值变化缓慢。

从实验还可看出, 钢衬壳在屈曲瞬时表现为高阶波形的屈曲, 由实验可大体测得高阶屈曲的阶数。对于相同条件的钢衬壳, 高阶屈曲对应着较高的屈曲温度, 一阶屈曲对应着较低的屈曲温度, 本文实验发现, 钢衬壳不容易在温度较低的一阶波形屈曲而选择高阶屈曲。

文献 [1] 通过小模型钢衬圆柱形壳的热屈曲实验, 得出结论 “钢衬壳不容易在最小屈曲温

表 3 实验值和理论分析结果的比较

Table 3 Comparison of experimental value and theoretical value

	Example 1		Example 2		Example 3	
$b, L/\text{mm}$	400, 300		300, 200		400, 300	
Liner	1		1		2	
thickness/mm						
Boundary	Clamped		Clamped		circumferential simple	
condition			supported, axail free			
N, M	3, 3		2, 2		\, 2.5	
$\alpha_t/^{\circ}\text{C}^{-1}$	3.6×10^{-6}		4.0×10^{-6}		4.6×10^{-5}	
	Experimental	Theoretical	Experimental	Theoretical	Experimental	Theoretical
	value	value	value	value	value	value
Buckling	125	113	95	90	130	124
temperatation/ $^{\circ}\text{C}$						
Buckling	-360	-314	\	\	-533	-508
strain/ 10^{-6}						
Minimum	-95	-85	\	\	-93	-85
buckling						
strain/ 10^{-6}						

度时发生屈曲现象”。文中解释说，是因为钢衬壳的屈曲存在着能量障碍 (energy barrier)，这同本文进行的局部 1 : 1 安全壳模型中的钢衬壳的热屈曲实验得出的实验现象相吻合。

分析本文出现高阶屈曲现象可能有以下几个原因：混凝土壳的支承作用；钢衬壳和混凝土实验块的内表面可能存在着初始缺陷；实验块对钢衬壳边界约束不强；钢衬壳的铆固距离较大；在实验加热过程中未加任何扰动。

如果钢衬壳的铆固距离减小，则发生一阶屈曲的可能性增大，以本文钢衬壳和文献 [3] 钢衬环的实验结果为例：

环向铆固距离为 400mm 钢衬壳，双向约束固支，环向屈曲阶数为 3。

环向铆固距离为 400mm 钢衬壳，单向约束简支，环向屈曲阶数为 2.5。

环向铆固距离为 300mm 钢衬壳，双向约束固支，环向屈曲阶数为 2。

环向铆固距离为 200mm 钢衬环，固支，环向屈曲阶数为 1。

由理论分析得出，铆固距离的减小可大大增加钢衬壳的屈曲温度，但由于存在高阶屈曲问题，单纯的靠减小铆固距离不一定是一种十分经济有效的方法。

如果钢衬壳在升温过程中，受到一微小扰动，可能发生一阶波形的屈曲。如文献 [1] 使用扰动装置使钢衬壳在较小温度时发生屈曲现象，文献 [3] 在升温过程中，加扰动力后，钢衬环发生一阶波形的屈曲。在实际核工程中要注意一些类似于扰动力的外力对钢衬壳的作用，如钢衬壳与混凝土壳之间水蒸气的压力，可能引起钢衬壳在较低的温度下屈曲。

参 考 文 献

1 Kicher Th P, Esselman Th C, Gratzing R.J. Thermal buckling of stud supported liner shells. Second Int Conf on Stru Mech in Reactor Tech, Berlin, 1973, H5/2

2 Saito H, Hirao K. Study on behavior of concrete with steel liner under high-temperature condition. 11th Int Conf on Struc Mech in Reactor Tech, 1991, H03/5

- 3 范钦珊, 付光辉. 安全壳钢衬圆环的热屈曲问题. 清华大学学报, 1996, 36(4) (Fan Qinshan, Fu Guanghui. Thermal buckling analyses of liner rings of reactor containment. *Journal of Qinghua University*, 1996, 36(4) (in Chinese))
- 4 付光辉. 核电站安全壳钢衬环向热屈曲的实验与理论研究. 北京: 清华大学学位论文, 1994 (Fu Guanghui. Theoretical and experimental analyses of thermal buckling of liner rings of reactor containment. Thesis. Beijing: Qinghua University. 1994 (in Chinese))
- 5 丁红丽. 钢衬壳弹性和塑性热屈曲问题的理论与实验研究. 北京: 清华大学博士学位论文, 1996 (Ding Hongli. Theoretical and experimental analyses of thermal buckling and post-buckling problem of liner shells in elastic and plastic range respectively. PhD dissertation. Beijing: Qinghua University. 1996 (in Chinese))

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL ANALYSES OF THERMAL BUCKLING PROBLEMS OF LINER SHELLS (II) ——EXPERIMENTAL PART¹⁾

Fan Qinshan Ding Hongli* Xu Bingye Chen Zhengxin

(Dept. of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

* (Dept. of Mechanics and Engineering Science, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract The buckling problem of the liner shells is a major problem in reactor containment's design, but few experimental results have been published. In this paper, we carry out the experimental research for the local 1:1 models of the 200MW RCCV. Buckling temperature and strain loads of liner shells are given. The relation of temperature and deflection or membrane strain during buckling are also presented. The results show that the liners are easier to buckle in the local area than in the whole area between two studs. The buckling loads obtained by experiments are in good agreement with those obtained by theoretical analyses.

Key words liner shell, liner shell experiment, buckling, thermal buckling experiment, post-buckling, reactor containment's design

Received 22 January 1997.

1) The project supported by the Nuclear Engineering Industry Foundation of China and Research Foundation of the National Education Commission Open Laboratory of China.