

# 含缺陷 Inconel 690 蒸汽发生器传热管的 强度及堵管准则研究

惠 虎<sup>1</sup>, 李培宁<sup>1</sup>, 唐 毅<sup>2</sup>, 聂 勇<sup>2</sup>, 刘鸿运<sup>2</sup>, 李思源<sup>2</sup>

(1. 华东理工大学 化工机械研究所, 上海 200237; 2. 核动力运行研究所, 湖北 武汉 430223)

**摘要:**针对缺陷对传热管强度的影响以及传热管判废准则问题展开研究, 研制了适用于小管径蒸汽发生器传热管极限载荷及爆破压测试的实验装置, 对含体积型缺陷及面型缺陷的 Inconel 690 蒸汽发生器传热管进行了实验研究, 并采用有限元法对极限载荷及爆破压进行了估算。在此基础上, 研究了传热管的堵管准则, 提出了两级评定方法。该评定方法可根据缺陷的深度、轴向及环向长度来综合评价。

**关键词:**缺陷; 蒸汽发生器传热管; 强度; 堵管准则

**中图分类号:** O346.1      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-6931(2008)S1-0634-07

## Study of Strength and Plugging Criteria for Inconel 690 Steam Generator Tubes With Flaw

HUI Hu<sup>1</sup>, LI Pei-ning<sup>1</sup>, TANG Yi<sup>2</sup>, NIE Yong<sup>2</sup>, LIU Hong-yun<sup>2</sup>, LI Si-yuan<sup>2</sup>

(1. East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China;

2. Research Institute of Nuclear Power Operation, Wuhan 430223, China)

**Abstract:** In this paper, the effect of flaw on the strength of steam generator (SG) tubes and the plugging criteria were studied. The test device used for measuring plastic limited load and bursting pressure of small diameter tubes was developed and experiments of Inconel 690 SG tubes with local wall thinning and crack flaws were carried out, meanwhile, finite element method was used to estimate plastic limited load and bursting pressure. Based on these methods, a new plugging criteria for SG tubes with two-level assessment was proposed. In this criteria, the thickness, longitudinal length and circumferential length of flaw were synthetically used to assess the safety of SG tubes.

**Key words:** flaw; steam generator tube; strength; plugging criteria

蒸汽发生器是核电厂的关键设备之一, 一回路的冷却剂与二回路中的水在此通过传热管进行热量交换<sup>[1]</sup>。传热管的局部腐蚀及机械磨

损是导致其承压能力降低而破裂的原因。传热管遭受腐蚀及机械磨损的主要类型包括: 一次侧的应力腐蚀、二次侧的应力腐蚀/晶界腐蚀、

点蚀、凹痕,耗蚀、微振磨损、机械损伤等<sup>[2]</sup>。这些缺陷的存在,势必对传热管的强度造成一定的影响,对于缺陷对传热管强度的影响以及缺陷尺寸发展到多大就应判废进而进行堵管工作等问题,目前我国尚无相应的规范,检验单位主要参照国外相关规范,当检验到的缺陷深度达到壁厚的 40% 时便判废<sup>[3]</sup>,但对于这个规定的技术内幕并不十分清楚。为此,针对缺陷对传热管强度的影响以及传热管判废准则问题开展了研究计划。

在该研究计划中,以 Inconel 690 蒸汽发生器传热管为研究对象,综合运用实验及有限元研究手段,对含面型及体积型缺陷的蒸汽发生器传热管进行系统研究,给出缺陷对结构强度的影响规律。

### 1 实验装置及含典型缺陷传热管实验

为对无缺陷及含缺陷的蒸汽发生器传热管进行强度实验研究,专门研制了适合传热管极限载荷及爆破压测试的实验装置,测试系统的试验原理如图 1 所示。采用两级加压高压泵,在油路上装有压力表及压力传感器,压力信号由压力传感器通过数据采集卡传至计算机,位移传感器用于测试传热管外壁的径向位移。对于有缺陷的传热管,位移传感器测试缺陷中心位置的径向位移,位移信号由位移传感器通过数据采集卡传至计算机,在计算机内通过自编的数据采集程序将采集到的压力及位移数值存于数据库内,并同时压力及位移数值实时地显示在计算机屏幕上二维坐标系内。试验装置系统实物如图 2 所示,图 3 为位移测试装置。

所采用的传热管为 Inconel 690 传热管,规格为  $\phi 19.05 \text{ mm} \times 1.09 \text{ mm}$ ,测试得到的力学性能列于表 1。

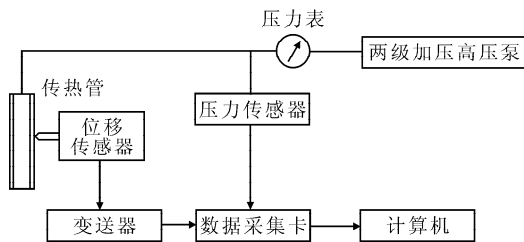


图 1 试验测试原理  
Fig. 1 Principle of test

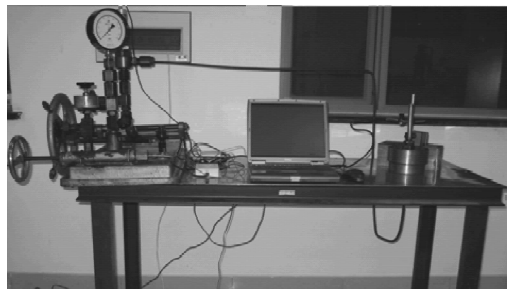


图 2 试验装置系统实物  
Fig. 2 Test system photo



图 3 位移测试装置  
Fig. 3 Displacement test device

表 1 Inconel 690 合金传热管室温及高温强度测试结果

Table 1 Strength test results of Inconel 690 SG tube at room and elevated temperture

温度/°C	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa
20	291,291,295	718, >645, >659,742,743,745
300	260	558
327	273,272	>583, >494

根据调研情况,加工了如图 4~7 所示的几种缺陷形式。图 4 所示的缺陷从正面投影看为矩形,简称为矩形缺陷,主要模拟传热管与支撑板间的微振磨损引起的传热管缺陷。图 5 为椭圆形凹坑缺陷形式,主要模拟传热管腐蚀凹坑缺陷。图 6 为环向 1 圈体积形缺陷,主要模拟磨损引起的传热管环向 1 圈缺陷。为研究缺陷规则化,设计加工了如图 7 所示瓦片状缺陷。此外,还加工了如图 8、9 所示带轴的向裂纹及周向裂纹的传热管。

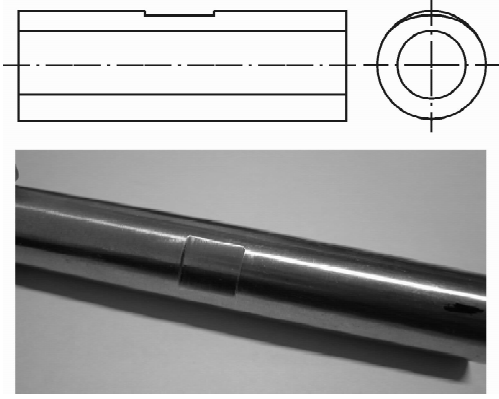


图4 含矩形缺陷的传热管  
Fig. 4 SG tube with rectangle-like defect

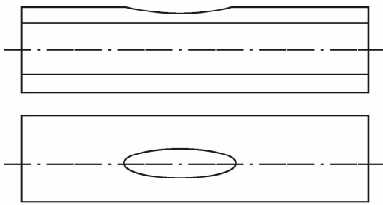


图5 椭球形凹坑形缺陷的传热管  
Fig. 5 SG tube with ellipse-ball-like defect



图6 含环向1圈缺陷的传热管  
Fig. 6 SG tube with whole loop defect

采用研制的小高压爆破实验装置对无缺陷及上述含缺陷蒸汽发生器传热管进行研究,无缺陷传热管的压力-位移曲线如图10所示。采用ASME推荐的2倍弹性斜率方法求得其极限载荷为37.3 MPa,当接近爆破压时,为防止

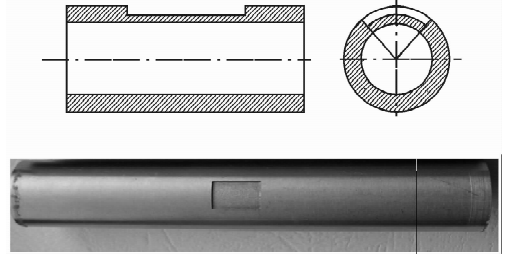


图7 含瓦片状缺陷的传热管  
Fig. 7 SG tube with tile-like defect

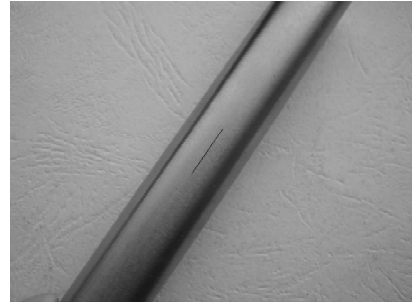


图8 含轴向裂纹缺陷的传热管  
Fig. 8 SG tube with axial crack defect



图9 含环向裂纹缺的传热管  
Fig. 9 SG tube with circumference crack defect

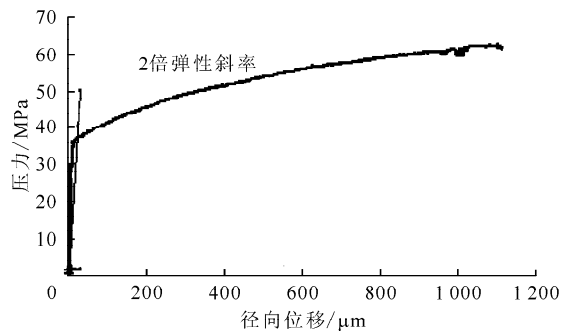


图10 无缺陷传热管压力-位移曲线  
Fig. 10 Pressure-displacement curve of SG tube without defect

高压液体喷出损坏位移传感器,此时拆除位移传感器,不再记录压力-位移曲线,仅记录压力信号,得到无缺陷传热管的爆破压为 67 MPa。其它实验数据列于表 2。

## 2 有限元数值模拟及缺陷对传热管强度影响规律

实际的传热管凹坑缺陷形状、尺寸千差万别,不可能对每一缺陷形式、缺陷尺寸都进行有限元分析或试验研究。为此,采用如图 7 所示的瓦片状缺陷对缺陷进行规则化,缺陷的深度可用无量纲  $Z/T$  表示( $Z$  为缺陷深度, $T$  为传热管壁厚),缺陷的轴向长度用无量纲  $X/\sqrt{RT}$  表示( $X$  为缺陷长度, $R$  为传热管半径),缺陷的环向长度用无量纲  $\theta/\pi$  表示( $\theta$  为

缺陷周向半角)。

材料取为理想弹性-塑性材料,其中,流变应力取为屈服强度及抗拉强度的一半,即  $\sigma_t = (\sigma_s + \sigma_b)/2 = (291 + 742)/2 = 516.5$  MPa,采用程序发散法计算的极限载荷列于表 3。从表 3 可看出,对于含体积型缺陷的传热管,绝大多数试样计算值小于试验值,对于评价结果,这相对是安全和保守的。

为研究体积型缺陷各尺寸对传热管极限载荷的影响,进行了大量有限元计算,研究规则化后的含体积型缺陷传热管在  $Z/T = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ , 缺陷轴向半长  $X = 2, 4, 6, 8, 10$  mm, 缺陷环向半角  $\theta$  分别为  $6^\circ, 12.25^\circ, 22.5^\circ, 45^\circ, 180^\circ$  各种组合情况下常温极限载荷解,结果示于图 11~14。在图 11~14 中,将含缺陷结构

表 2 含缺陷传热管的试验数据  
Table 2 Test results of SG tube with defect

试样编号	环向角度/ $^\circ$	轴向长度/mm	深度/%	极限载荷/MPa	爆破压/MPa	爆破压/ 极限载荷	备注
无缺陷	0	0	0	37.3	67	1.80	无缺陷传热管
	0	0	0	37.3	67	1.80	无缺陷传热管
	0	0	0	38.06	66.99	1.76	无缺陷传热管
1	70	12	42.4	—	56.81	—	矩形(偏心车)
2	70	12	39.3	29.21	59.25	2.03	矩形(偏心车)
3	38.6	12	48.1	27.38	56.74	2.07	弧形(线切割)
4	43.2	12	52.8	24.41	52.76	2.16	弧形(线切割)
5	57.8	10.4	39.3	35.29	67.19	1.90	不规则凹坑
6	33.6	10.5	23.1	34.18	67.53	1.98	椭球凹坑形状
10	360	4	49.6	29.07	62.41	2.02	环向 1 圈缺陷
11	360	4	50.3	30.89	62.53	2.02	环向 1 圈缺陷
12	360	7.94	52.3	24.66	55.14	2.24	环向 1 圈缺陷
13	360	7.94	54.4	24.22	54.20	2.24	环向 1 圈缺陷
14	360	8.05	62.9	20.17	49.29	2.44	环向 1 圈缺陷
15	360	7.9	68.5	19.47	42.4	2.18	环向 1 圈缺陷
16	360	7.92	72	17.10	40.66	2.38	环向 1 圈缺陷
17	360	11.9	51.4	23.19	49.74	2.14	环向 1 圈缺陷
18	360	12	52.3	24.65	48.97	1.97	环向 1 圈缺陷
19	52	16.04	64.2	17.76	47.36	2.67	椭球凹坑形状
20	52	16.06	64.2	22.02	49.89	2.27	椭球凹坑形状
21	47.2	12	49.3	23.89	46.8	1.96	瓦片状缺陷
22	47.5	12	51.9	19.12	44	2.30	瓦片状缺陷
23	110	11.98	34.9	29.92	55.97	1.87	偏心切割
24	0	12.6	27.5	37.56	62	1.65	轴向裂纹
25	0	12.78	27.5	29.91	60.26	2.01	轴向裂纹
26	0	17.46	33.0	40.55	61.45	1.52	轴向裂纹
27	360	0	49.1	36.93	67.09	1.82	环向 1 圈裂纹
28	0	12.44	13.9	37.7	66.38	1.76	轴向裂纹
29	82.7	9.88	45.0	30.4	59.4	1.95	矩形(偏心车)

表3 各试样缺陷规则后的  
极限载荷有限元计算值

Table 3 Finite element calculation of plastic  
limited load of SG tube with regular defect

试样	试验爆破压/ MPa	缺陷规则化后极限载荷	
		程序发散/MPa	与试验值的相对偏差/%
2	59.25	51.19	-13.6
3	56.74	45.14	-20.4
4	52.76	39.09	-25.9
5	67.19	55.17	-17.9
6	67.53	59.66	-11.7
10	62.41	53.25	-14.7
11	62.53	53.18	-15.0
12	55.14	43.22	-21.6
13	54.20	43.60	-19.6
14	49.29	36.01	-26.9
15	42.4	32.68	-22.9
16	40.66	29.62	-27.2
17	49.74	39.83	-19.9
18	48.97	39.72	-18.9
19	47.36	34.38	-27.4
20	49.89	34.38	-31.1
21	46.8	47.64	1.8
22	44	44.71	1.6
23	55.97	53.69	-4.1

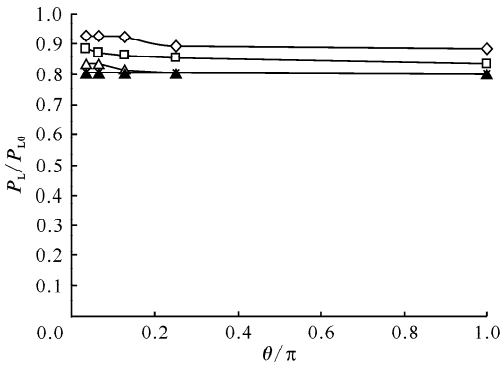


图11  $Z/T=0.2$  时极限载荷相对比值  
随环向角度的变化

Fig. 11 Plastic limit load

vs. circumferential length at  $Z/T=0.2$

- ◇——轴向半长为 2 mm; □——轴向半长为 4 mm;  
△——轴向半长为 6 mm; ×——轴向半长为 8 mm;  
▲——轴向半长为 10 mm

的极限载荷 ( $P_L$ ) 除以无缺陷传热管的极限载荷 ( $P_{L0}$ , 该种传热管常温下  $P_{L0}$  为 41.1 MPa) 作为纵坐标, 以无量纲  $\theta/\pi$  作为横坐标, 从所得结果可看出:

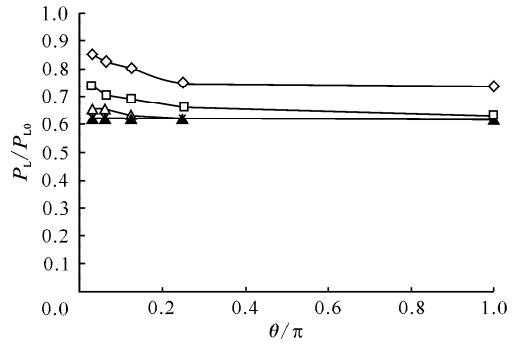


图12  $Z/T=0.4$  时极限载荷相对比值  
随环向角度的变化

Fig. 12 Plastic limit load

vs. circumferential length at  $Z/T=0.4$

- ◇——轴向半长为 2 mm; □——轴向半长为 4 mm;  
△——轴向半长为 6 mm; ×——轴向半长为 8 mm;  
▲——轴向半长为 10 mm

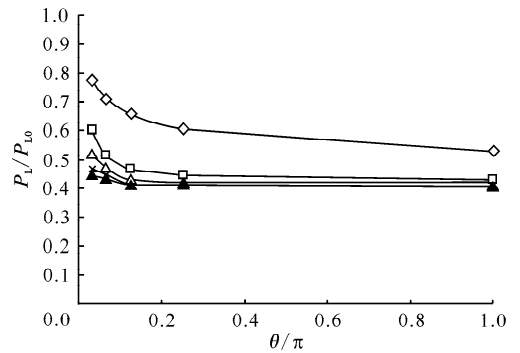


图13  $Z/T=0.6$  时极限载荷相对比值  
随环向角度的变化

Fig. 13 Plastic limit load

vs. circumferential length at  $Z/T=0.6$

- ◇——轴向半长为 2 mm; □——轴向半长为 4 mm;  
△——轴向半长为 6 mm; ×——轴向半长为 8 mm;  
▲——轴向半长为 10 mm

1) 体积型缺陷的深度是影响传热管极限载荷最主要的因素, 当缺陷深度增加 20% 时, 极限载荷最小降低 7%, 最大达 35%, 降低幅度还与缺陷轴向尺寸和环向尺寸相关, 在相同的缺陷轴向尺寸和环向尺寸且缺陷深度增加 20% 时, 极限载荷大部分降低 20% 左右;

2) 体积型缺陷的轴向长度也是影响传热管极限载荷的一个重要因素, 当缺陷环向尺寸相对较窄时, 缺陷轴向尺寸对极限载荷的影响较显著;

3) 体积型缺陷的环向尺寸对极限载荷也

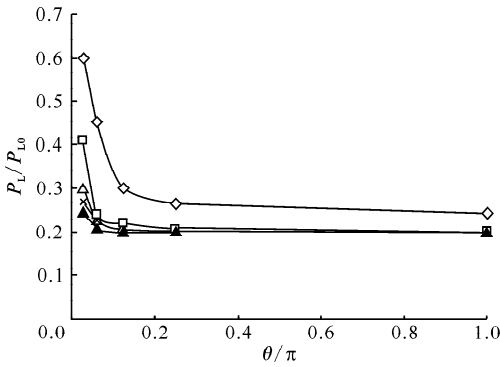


图 14 Z/T=0.8 时极限载荷相对比值  
随环向角度变化的情况

Fig. 14 Plastic limit load

vs. circumferential length at Z/T=0.8

- ◇——轴向半长为 2 mm; □——轴向半长为 4 mm;
- △——轴向半长为 6 mm; ×——轴向半长为 8 mm;
- ▲——轴向半长为 10 mm

有影响,在绝大多数含缺陷评定规范如 ASME B31. G 规范中均未体现,对于本研究的传热管体积型缺陷,当缺陷深度较浅( $Z/T \leq 0.2$ )时,环向尺寸对传热管极限载荷的影响较小,当缺陷深度增大( $Z/T \geq 0.4$ )时,环向尺寸对传热管极限载荷的影响也增加,对绝大多数体积型缺陷,主要在  $\theta/\pi \leq 0.25$  的区域影响较为显著,当  $\theta/\pi > 0.25$  时,环向尺寸对极限载荷的影响已不明显。

### 3 Inconel 690 传热管堵管准则

无论是按“规则设计”还是分析设计,在进行壁厚设计时均留有足够的安全裕度,而对于在役含缺陷的传热管,德国以爆破压作为基准,正常工况下取 3 倍的安全系数,事故工况下取 1.4 倍的安全系数,以此计算得到的压力大于许用压力即认为缺陷是可接受的。本研究也采用此种处理方法:对于正常工况,即传热管内外压差为 10 MPa 时,取 3 倍的安全系数;对于事故工况,即传热管仅有内压 15.5 MPa 时,取 1.4 倍的安全系数,即爆破压大于  $\max(10 \times 3, 15.5 \times 1.4) = 30$  MPa 时,便认为含缺陷的传热管是安全的。

由于上述实验及有限元分析均按常温状态下进行,需将计算的含缺陷传热管常温下的极限载荷折算成高温下的极限载荷,折算

公式如下:

$$P_{L, \text{高温}} = P_{L, \text{常温}} \times \frac{\sigma_{s, \text{高温}}}{\sigma_{s, \text{常温}}} \quad (1)$$

当 Z/T 大于 0.6 时,仅当缺陷在轴向尺寸很短时才能满足上述条件。本工作认为,当 Z/T 大于 0.6 时,如果再考虑到检验结果的不准确性、传热管壁厚的负偏差等因素,很可能就超出安全的范围,因此,建议此时应考虑堵管。

当 Z/T 为 0.45~0.6 时,含缺陷传热管的极限载荷能否满足要求,要同时考虑缺陷的轴向及环向尺寸,对于缺陷深度、轴向尺寸一定时,环向尺寸越大,其爆破压越小,对于环向 1 圈的缺陷,则是最小的,如果环向为 1 圈缺陷的爆破压大于 30 MPa,则相同缺陷深度及轴向尺寸下其它环向尺寸的缺陷也一定大于 30 MPa,则一定也是安全的。

根据上述原则,以 Z/T 作为横坐标,以无量纲参量  $X/\sqrt{RT}$  (此参量反应了缺陷在轴向的影响) 为纵坐标,建立传热管一级评定曲线(图 15)。图中,线 AB、BCD、DE、EF 所包围的面积为安全区,当  $X/\sqrt{RT} > 8$  时,按  $X/\sqrt{RT} = 8$  来处理,当评定点落在此安全区域内(包括在边界线上),便认为传热管是安全的。DE 曲线为:  $X/\sqrt{RT} = 64.17 \times (Z/B)^2 - 76.10 \times (Z/B) + 23.16$ ; CG 曲线为:  $X/\sqrt{RT} = 141.17 \times (Z/B)^2 - 166.14(Z/B) + 50.57$ 。将两曲线上的数据列于表 4。

当评定点落在图中安全区及阴影区之外时,便认为传热管是非安全的,需考虑堵管。

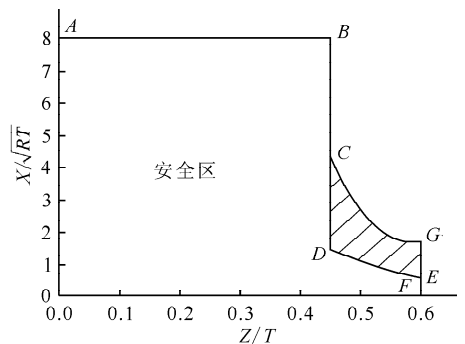


图 15 含体积型缺陷传热管一级评定图

Fig. 15 First-class assessment of SG tube with wall thinning defect

表4 CG及DE曲线上各点数据  
Table 4 Data on curves of CG and DE

Z/T	$X/\sqrt{RT}$	
	CG 曲线	DE 曲线
0.45	4.40	1.91
0.475	3.50	1.49
0.5	2.79	1.15
0.525	2.26	0.89
0.55	1.90	0.72
0.575	1.71	0.62
0.6	1.70	0.60

当评定点落在图中阴影区时,还需考虑缺陷的环向尺寸,图16以无量纲参量 $\theta/\pi$ ( $\theta$ 为缺陷环向半角)为横坐标、 $X/\sqrt{RT}$ 为纵坐标,给出了含体积型缺陷传热管的二级评定图,图中暂时先给出 $Z/T=0.475, 0.5, 0.6$ 的评定曲线。以 $Z/T=0.475, X/\sqrt{RT}=2$ 为例,在一级评定曲线中该评定点落在阴影区,则在二级评定图中 $Z/T=0.475$ 曲线可得到, $X/\sqrt{RT}=2$ 时所对应的 $\theta/\pi=0.25$ ,此即表明,当 $\theta/\pi \leq 0.25$ 时,缺陷评定可通过,而当 $\theta/\pi > 0.25$ 时,缺陷评定不能通过。也即在二级评定图中,对于每一 $Z/T$ ,都应有一评定曲线,当评定点落在对应曲线左下方时,表明能够通过安全评定,当评定点落在对应曲线右上方时,表明不能通过安全评定。

由于不可能在图中给出 $Z/T$ 为 $0.45 \sim$

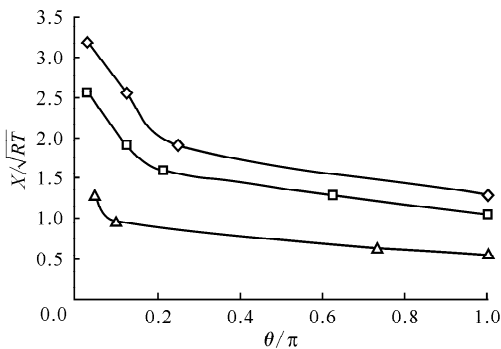


图16 含体积型缺陷传热管二级评定图

Fig. 16 Second-class assessment of SG tube with wall thinning defect

◇— $Z/T=0.475$ ; □— $Z/T=0.5$ ; △— $Z/T=0.6$

0.6的所有曲线,仅能给出几条具代表性的,其它曲线需采用内插方法得到。

#### 4 结论及展望

1) 开发了适用于传热管极限载荷测试及爆破试验的小高压爆破装置,成功实现了无缺陷及有缺陷传热管的极限载荷测试。

2) 对传热管进行了有限元数值分析,对比了传热管试验及数值模拟结果,在此基础上给出了缺陷规则化表征的方法。计算结果表明,采用缺陷规则化后的有限元计算结果比试验值小,是偏于安全的。

3) 详细研究了体积型缺陷各尺寸对传热管极限载荷的影响。

4) 针对 Inconel 690 合金  $\phi 19.05 \text{ mm} \times 1.09 \text{ mm}$  规格的传热管,给出了两级缺陷评定方法,该方法可在现有检测手段及方法下使用,为进一步挖掘含缺陷的传热管潜力做好了技术储备。

5) 本研究课题是以 Inconel 690 合金  $\phi 19.05 \text{ mm} \times 1.09 \text{ mm}$  规格的传热管为研究对象进行研究的,内容涉及材料力学性能测试、极限载荷及爆破试验研究,有限元分析等大量工作,其研究手段、思路及方法也适合于研究 Inconel 800 合金及 316L 合金传热管的研究。由于目前并无这两种材料的基本力学性能及试样,因此,这些工作可在今后予以完善。

#### 参考文献:

- [1] 陈国平. 蒸汽发生器传热管检查及寿命管理[J]. 核电工程与技术, 1999, 12(3): 22-27.  
CHEN Guoping. Steam generator tube inspection and its life management [J]. Nucl Power Eng Technol, 1999, 12(3): 22-27 (in Chinese).
- [2] 丁勋森. 压水反应堆蒸汽发生器传热管材料[J]. 核电工程与技术, 2000, 13(4): 37-42.  
DING Xunsen. Steam generator tubing materials of PRW [J]. Nucl Power Eng Technol, 2000, 13(4): 37-42 (in Chinese).
- [3] ASME boiler and pressure vessel code section III, Division 1: Nuclear Power Plant Components [S]. New York: ASME, 2001.