

主管道材料微试样液压鼓胀拘束度影响研究*

STUDY ON THE INFLUENCE OF HYDRAULIC BULGING RESTRAINT INTENSITY ON MICROSAMPLE OF MAIN PIPELINE MATERIAL

王春辉** 安英辉***

(大亚湾核电运营管理有限责任公司, 深圳 518000)

WANG ChunHui AN YingHui

(Daya Bay Nuclear Power Operations and Management Co., Ltd., Shenzhen 518000, China)

摘要 以原始态主管道材料的3种微试样厚度(0.4 mm、0.5 mm和0.6 mm)以及3种倒角半径(0.5 mm、0.8 mm和1.0 mm)为研究对象,进行液压鼓胀试验拘束度影响分析,构建屈服强度、抗拉强度以及液压鼓胀延伸率关联模型,研究屈服强度和抗拉强度的拟合误差以及液压鼓胀延伸率分散性。结果表明,随着微试样厚度的逐步增加,峰值载荷明显增加,而峰值位移普遍降低,但整体曲线趋势变化较小;随着微试样倒角半径的逐步减小,峰值位移明显降低;微试样厚度0.5 mm和倒角半径1.0 mm的试样测试稳定性最佳。

关键词 液压鼓胀 拘束度 屈服强度 抗拉强度 倒角半径

中图分类号 TB302

Abstract Three kinds of micro-sample thicknesses (0.4 mm, 0.5 mm and 0.6 mm) and three kinds of chamfer radii (0.5 mm, 0.8 mm and 1.0 mm) of the original main pipe material were taken as the research objects to analyze the influence of restraint intensity in hydraulic bulging test, and to build a correlation model of yield strength, tensile strength and hydraulic bulging elongation. The fitting error of yield strength and tensile strength and the dispersion of hydraulic bulging elongation were studied. The results show that with the gradual increase of microspecimen thickness, the peak load increases obviously, while the peak displacement generally decreases, but the overall curve trend changes little. With the gradual decrease of the microsample chamfer radius, the peak displacement decreases obviously. The test stability is best under the test conditions of microsample thickness 0.5 mm and chamfer radius 1.0 mm.

Key words Hydraulic bulging; Restraint intensity; Yield strength; Tensile strength; Chamfer radius

Corresponding author: WANG ChunHui, E-mail: wang-chunhui@cgnpc.com.cn

Manuscript received 20231010, in revised form 20231120.

0 引言

在压水堆核电厂(Pressurized Water Reactor, PWR)中,主管道是核电厂的重要屏障,一旦其出现破口,含有放射性物质的冷却剂出现泄漏,就会给核电厂带来巨大的安全问题。因此,保持主管道结构的完整性十分重要。随着核电厂运行时间的增加,主管道的断裂韧性逐渐下降,一旦突破断裂韧性限值,主管道的结构完整性将受到严重威胁。因此,需要定期对主管道材料性能进行检测。传统的检测方法为取样试验和无损检测。无损检测只能检测材料的均匀性,无法定量给出材料的力学性能。传统的取样试验需

要从主管道或留样中截取标准尺寸试样。核电厂建造初期主管道材料留样数目有限,而从在役主管道上截取标准尺寸的试样则会造成主管道损伤,这就造成了主管道材料在役断裂数据难以获取的问题。为解决这一问题,自20世纪80年代以来,国内外学者对微试样测试技术展开了大量研究^[1-3]。微试样测试技术主要包括小冲杆试验^[4-6]、球形压痕测试^[7]和液压鼓胀测试^[8-10]。小冲杆试验和球形压痕测试与试样的非均匀接触钢珠会影响测试的准确性。因此,具有均匀载荷的液压鼓胀测试成为了核电主管道力学性能测试的主要方法。

近年来,国内外研究学者发现液压鼓胀的影响因

*20231010收到初稿,20231120收到修改稿。

**王春辉,男,1985年生,安徽蒙城人,汉族,大亚湾核电运营管理有限责任公司高级工程师,主要研究方向为微小试样测试及评价。

***安英辉,男,1979年生,河北石家庄人,汉族,大亚湾核电运营管理有限责任公司高级工程师,主要研究方向为微小试样测试及评价。

素较为复杂。马昀晟^[11]采用数值模拟的方法研究了试样厚度对液压鼓胀试验的影响,研究发现,随着试样厚度的增大,载荷-位移曲线整体向上偏移。顾丽琴^[12]通过数值模拟发现,不仅试样厚度会对试样的最大压力的估算产生很大的影响,而且厚度的非线性也是不可忽略的。

综上所述,现有的研究主要集中在通过数值模拟的方法研究试样厚度对液压鼓胀试验的影响。因此,本文采用试验方法研究微试样厚度和倒角半径对液压鼓胀的影响,获得最佳试验微试样厚度和倒角半径,以便后期开展不同热老化时间下微试样液压鼓胀试验及断裂韧性关联模型构建。

1 试验原理和材料

液压鼓胀试验方法原理如图 1 所示。采用高压油驱动试样变形,试验过程记录油压与试样最高点位移得出压力-位移曲线,对压力-位移曲线进行求解获得试样材料的力学性能。

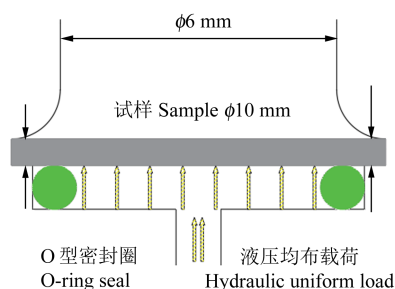


图 1 液压鼓胀试验原理示意图

Fig. 1 Principle diagram of hydraulic bulging test

为比较试样厚度和倒角半径对液压鼓胀试验的影响,选取 3 种试样厚度(0.4 mm、0.5 mm 和 0.6 mm)以及 3 种倒角半径(0.5 mm、0.8 mm 和 1.0 mm)共 9 种工况进行液压鼓胀试验,各试验工况命名如表 1 所示。

表 1 液压鼓胀试验工况

Tab. 1 Hydraulic bulging test conditions

试样编号 Number of sample	试样厚度 Thickness of sample/mm	倒角半径 Chamfer radius/mm
A ₁	0.4	0.5
A ₂	0.4	0.8
A ₃	0.4	1.0
B ₁	0.5	0.5
B ₂	0.5	0.8
B ₃	0.5	1.0
C ₁	0.6	0.5
C ₂	0.6	0.8
C ₃	0.6	1.0

2 试验结果与分析讨论

2.1 拘束度对挠度-载荷曲线的影响

图 2 为不同微试样厚度及倒角半径下原始态主管道材料液压鼓胀试验典型挠度-载荷曲线。由图 2 可知,随着微试样厚度增加,峰值载荷明显增加,而峰值位移普遍降低,但是整体曲线趋势变化较小。另一方面,倒角半径越小,峰值位移明显越低。如过度降低倒角半径将会导致液压鼓胀微试样边缘破裂可能性增大;而倒角半径过大,则会导致上、下夹具与试样接触面积较小、咬合力较低,最终导致试样脱离。因此,需要找到微试样最优倒角半径。

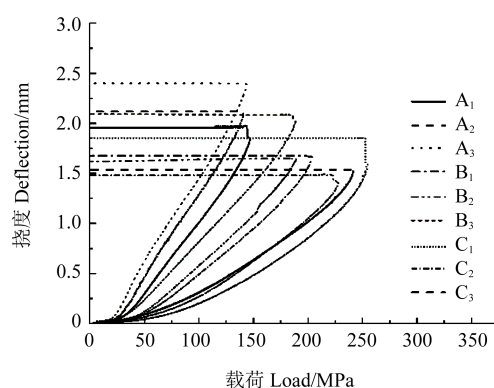


图 2 不同微试样厚度及倒角半径下典型挠度-载荷曲线

Fig. 2 Typical load-deflection curves under different microsample thicknesses and chamfer radius

2.2 拘束度对屈服强度估算的影响

如图 3 所示,基于受均布载荷的固支圆板模型,将材料假设为理想塑性材料,推导圆平板固支边界附近形成塑性铰时的极限载荷(屈服载荷),从而得到材料的屈服强度。

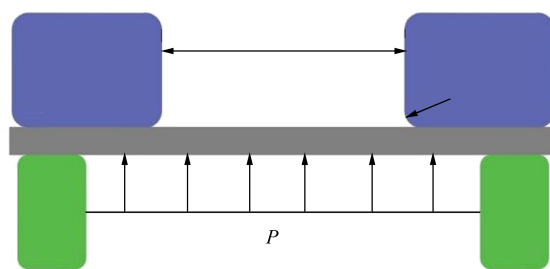


图 3 受均布载荷的固支圆板模型

Fig. 3 Model of fixed round plate under uniform distribution load

根据塑性变形理论,受均布载荷的固支圆板的屈服载荷可通过两倍斜率方法来确定,具体方法如下:

1) 对圆形试样进行液压鼓胀试验,获得挠度(位移)-载荷曲线,如图 4 所示。

2) 根据挠度-载荷曲线计算挠度-载荷曲线弹性段的斜率。在图 4 上经过原点作两倍线弹性段斜率射线,与挠度-载荷曲线相交于一点,该点对应的载荷即

为极限载荷。

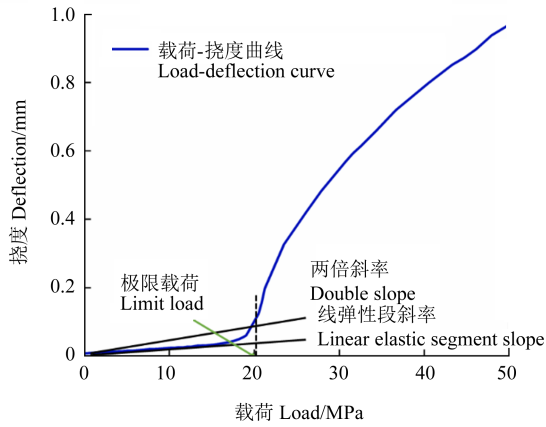


图4 极限载荷的确定

Fig. 4 Determination of limit load

根据受均匀载荷固支圆板模型,有

$$P_L = \alpha \sigma_Y \left(\frac{t_0}{D + 2r} \right)^2 \quad (1)$$

式中, P_L 为极限载荷; σ_Y 为屈服强度; t_0 为试样厚度; D 为上夹具直径; r 为夹具倒角半径。根据 von-Mises 屈服准则, α 取值为 12.18。将由挠度-载荷曲线确定的极限载荷代入式(1)可获得材料的屈服强度。

由上述方法拟合获得不同微试样厚度、倒角半径的屈服强度,并与同批次主管道材料标准拉伸试样测试所得屈服强度进行对比分析获得拟合误差,如图5所示。由图5可知,不同微试样厚度、倒角半径拟合获得的屈服强度与标准值的拟合误差较小,除了 C_1 试样的拟合误差为 25.37%,其余微试样均处于 $\pm 20\%$ 的误差范围内,表明通过液压鼓胀试验获取的材料屈服强

$$f(h, z, r) = [P - \pi(r + z)^2] / \{ 2\pi [\sin(2 \arctan \frac{r - h + z}{r + h + z}) - 1] [\frac{h}{2} - r + \frac{(r + z)^2}{2h}]^2 - P \} \quad (5)$$

$$P = \pi r(r + z) \left(\frac{\pi}{2} - 2 \arctan \frac{r - h + z}{r + h + z} \right) + \pi r^2 [\sin(2 \arctan \frac{r - h + z}{r + h + z}) - 1] \quad (6)$$

式中, h_c 为失稳挠度; h 为试样挠度; r 为夹具倒角半径; P 为实时载荷; $z = D/2$, 其中 D 为上夹具直径; $R = \frac{h}{2} - r + \frac{(r + z)^2}{2h}$ 。由上述方法拟合获得不同微试样厚度、倒角半径的抗拉强度,并与同批次主管道材料标准拉伸试样测试所得抗拉强度进行对比分析获得拟合误差,如图6所示。

由图6可知, A组试样(厚度 0.4 mm)和 B组试样(厚度 0.5 mm)液压鼓胀试验测试拟合获得的抗拉强度与标准值的拟合误差较小,大部分处于 $\pm 20\%$ 的误差范围内,因此可以通过调整液压鼓胀试验参数,有效提高液压鼓胀试验拟合关联抗拉强度的准确性。

度具有较高的可信度和可行性; B_3 试样的拟合误差最小,为 -2.4%。因此,针对屈服强度拟合关联,微试样厚度 0.5 mm 和倒角半径 1.0 mm 为最佳试验微试样厚度和倒角半径。

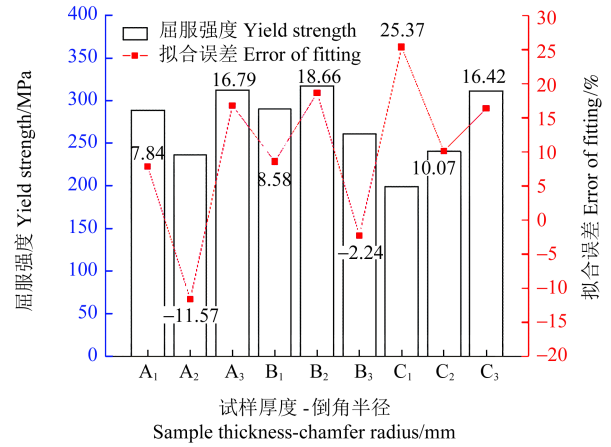


图5 原始态主管道材料屈服强度

Fig. 5 Yield strength of original state main pipe material

2.3 拘束度对抗拉强度估算的影响研究

首先,由压力-位移曲线计算得出塑性失稳载荷 P_c ,其应满足

$$\frac{dP_c}{dh_c} = KP_c \quad (2)$$

$$K = \frac{1}{h} - \frac{2(h - z)}{h^2 + r^2 + z^2 - 2r(h - z)} \quad (3)$$

基于塑性失稳载荷 P_c 估算抗拉强度

$$\sigma_m = \frac{P_c R}{2f(h_c, z, r)t_0} \quad (4)$$

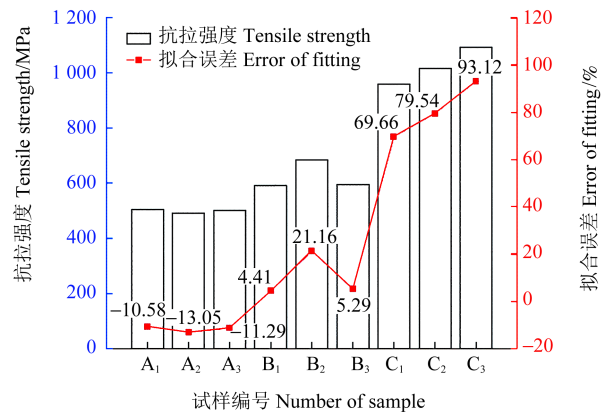


图6 原始态主管道材料抗拉强度

Fig. 6 Tensile strength of original state main pipe material

此外, B_1 试样和 B_3 试样两组的抗拉强度拟合误差小于 $\pm 10\%$, 而 B_2 试样的抗拉强度拟合误差超过 $\pm 10\%$, 数据波动较大、测试稳定性较低。因此,综合屈服强度和抗拉强度拟合误差,并考虑到倒角半径较低将导致液

压鼓胀试样边缘破裂可能性增大(倒角半径过大,会导致上、下夹具与试样接触面积较小、咬合力较低,最终导致试样脱离),对于主管道材料建议采用微试样厚度0.5 mm和倒角半径1.0 mm的试样开展液压鼓胀试验,以拟合主管道材料拉伸性能。

2.4 拘束度对抗拉强度估算的影响研究

如图7所示,将完成试验的试样从中间切开,以获取变形后的截面延伸率。该部分研究依据的模型基于以下两个假设:

1) 试验过程中厚度不变。

2) 标距选取 $D + 2r$ 。

需要注意的是,由于液压鼓胀延伸率和拉伸试验延伸率的物理意义和受力状态存在明显差异,因此此处不做关联,仅通过判断液压鼓胀延伸率的分散性,获取最佳的试验参数。

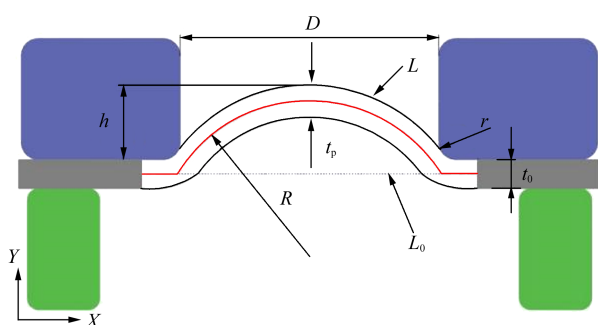


图7 液压鼓胀延伸率测量几何模型

Fig. 7 Hydraulic bulging elongation measurement geometric model

原始标距(虚线)

$$L_0 = D + 2r \quad (7)$$

变形后的长度(实线)

$$L = 2(R + r) \left(\frac{\pi}{2} - \theta \right) \quad (8)$$

则液压鼓胀试验的等效延伸率

$$e = \frac{L - L_0}{L_0} \quad (9)$$

根据图7, X方向和Y方向的长度守恒可得

$$\theta = 2 \arctan \frac{D/2 + r - h}{D/2 + r + h} \quad (10)$$

将式(10)代入式(9),可得

$$e = \left\{ \left(\frac{\pi}{2} - \theta \right) \left[h + \frac{(2r + D)^2}{4h} \right] \right\} / (2r + D) - 1 \quad (11)$$

根据上述方法拟合获得不同微试样厚度、倒角半径的延伸率,并分析不同试样延伸率的标准差,分析结果如图8所示。

由图8可知, A组试样(试样厚度0.4 mm)的液压鼓胀延伸率标准差较大,不同倒角半径测试分散性较大; C组试样(试样厚度0.6 mm)的不同倒角半径液

压鼓胀延伸率均值分散性较大; B组试样(试样厚度0.5 mm)的液压鼓胀延伸率标准差较小,不同倒角半径测试分散性较小,因此建议采用0.5 mm微试样厚度开展液压鼓胀试验。

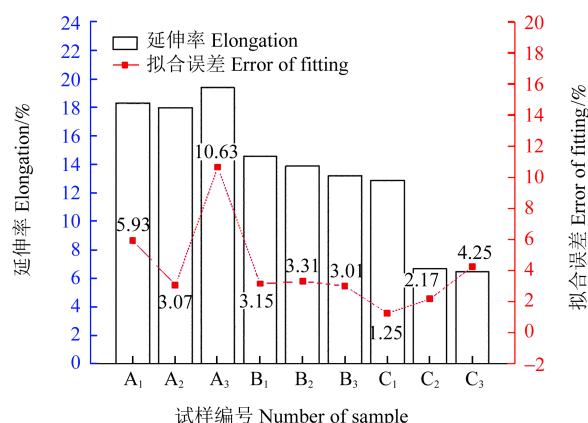


图8 原始态主管道材料液压鼓胀延伸率

Fig. 8 Hydraulic bulging elongation of the original state main pipe material

3 结论

针对原始态主管道材料,本文选取3种微试样厚度(0.4 mm、0.5 mm和0.6 mm)以及3种倒角半径(0.5 mm、0.8 mm和1.0 mm)试样开展液压鼓胀试验,进行微试样液压鼓胀试验拘束度影响分析,得出结论:

1) 随着微试样厚度逐步增加,峰值载荷明显增加,而峰值位移普遍降低,但是整体曲线趋势变化较小;随着微试样倒角半径逐步减小,峰值位移明显降低。

2) 微试样厚度0.5 mm和倒角半径1.0 mm的试样屈服强度与标准值的拟合误差最小,为-2.4%。

3) 综合屈服强度和抗拉强度的拟合误差,以及液压鼓胀延伸率分散性,微试样厚度0.5 mm和倒角半径1.0 mm的试样测试稳定性最佳。

参考文献(References)

- [1] BAIK J M, KAMEDA J, BUCK O. Small punch test evaluation of intergranular embrittlement of an alloy steel [J]. Scripta Metallurgica, 1983, 17(12): 1443-1447.
- [2] SHINDO Y, NARITA F, HORIGUCHI K, et al. Electric fracture and polarization switching properties of piezoelectric ceramic PZT studied by the modified small punch test [J]. Acta Materialia, 2003, 51(16): 4773-4782.
- [3] NAMBU T, SHIMIZU K, MATSUMOTO Y, et al. Enhanced hydrogen embrittlement of Pd-coated niobium metal membrane detected by in situ small punch test under hydrogen permeation [J]. Journal

- of Alloys and Compounds, 2007, 446: 588-592.
- [4] 关凯书, 王志文, 徐 彤, 等. 小冲杆试验方法标准化研究(二): 材料室温拉伸性能的确定[J]. 压力容器, 2010, 27(8): 40-46.
GUAN KaiShu, WANG ZhiWen, XU Tong, et al. Study on standardization of small punch test(2): tensile properties at room temperature[J]. Pressure Vessel Technology, 2010, 27(8): 40-46(In Chinese).
- [5] 王武琳, 徐 彤, 钟继如, 等. 尺寸效应对小冲杆试验方法评价拉伸性能的影响[J]. 机械强度, 2023, 45(2): 305-312.
WANG WuLin, XU Tong, ZHONG JiRu, et al. Influence of size effect on evaluation of tensile properties using small punch test[J]. Journal of Mechanical Strength, 2023, 45(2): 305-312(In Chinese).
- [6] 韩 浩, 关凯书, 李建卫, 等. 小冲杆试验参数的有限元分析[J]. 机械强度, 2004, 26(4): 455-459.
HAN Hao, GUAN KaiShu, LI JianWei, et al. FEM analysis of experimental parameters of the small punch test[J]. Journal of Mechanical Strength, 2004, 26(4): 455-459(In Chinese).
- [7] YAMAMOTO T, KURISHITA H, MATSUSHIMA T, et al. Development of innovative indentation system and its application to cyclic ball indentation test for small-sized specimens[J]. Journal of Nuclear Materials, 1996, 239: 219-227.
- [8] 朱兴来, 徐 彤, 凌 祥, 等. 基于液压鼓胀试验确定微试样的材料性能[J]. 塑性工程学报, 2014, 21(3): 116-121.
ZHU XingLai, XU Tong, LING Xiang, et al. Determination of material property by hydraulic bulging test[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2014, 21(3): 116-121(In Chinese).
- [9] 向文欣, 祁 爽, 刘晓坤, 等. 基于能量中值等效原理的液压鼓胀毫微测试技术研究[J]. 装备环境工程, 2022, 19(1): 113-117.
XIANG WenXin, QI Shuang, LIU XiaoKun, et al. Research on nano measurement technology of hydraulic bulging based on mean-value energy equivalence[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(1): 113-117(In Chinese).
- [10] 邹建胜, 王汉奎, 凌 祥, 等. 液压鼓胀试验技术和小冲孔试验技术对比研究[J]. 石油化工设备, 2018, 47(6): 1-8.
ZOU JianSheng, WANG HanKui, LING Xiang, et al. Technical comparative study of hydraulic bulge test and the small punch test[J]. Petro-Chemical Equipment, 2018, 47(6): 1-8(In Chinese).
- [11] 马昀晟. 微型试样液压鼓胀法测试材料力学性能的研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2013: 1-71.
MA YunSheng. The research on mechanical properties of materials by miniature-specimen hydraulic bulge method[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2013: 1-71(In Chinese).
- [12] 顾丽琴. 正拱型爆破片爆破压力的数值模拟研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2009: 1-60.
GU LiQin. Study on numerical simulation of bursting pressure of arch type bursting disc[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2009: 1-60(In Chinese).