

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2016.04.006

管道未焊透缺陷安全尺寸的评价研究

王飞¹, 许根富¹, 吴晋桃¹, 陈涛¹, 狄艳敏²

(1. 杭州市特种设备检测研究院, 浙江 杭州 310051;
2. 辽阳市锅炉压力容器检验研究所, 辽宁 辽阳 111004)

摘要: 未焊透是压力管道焊接接头常见缺陷之一, 严重时会导致管道的承载能力明显降低, 进而引发严重的安全事故。目前我国的《在用工业管道定期检验规程》中对未焊透管道的定级是很保守的, 为了减少对未焊透缺陷的返修, 文章采用非线性有限元分析的方法, 通过简化未焊透管道的影响因素, 并研究在不同载荷工况下管道失效模式与缺陷尺寸的关系, 获得了未焊透管道的极限载荷曲线簇; 再运用塑性力学分析方法对有限元分析结果进行筛选, 得到了焊接缺陷的安全尺寸; 最终通过试验验证极限载荷数值分析结果的合理性。研究结果表明含有超标焊接缺陷(如未焊透)的管道不通过复杂应力计算和安全评定即可在保证安全前提下最大限度地使用。

关键词: 压力管道; 未焊透缺陷; 极限载荷; 非线性分析; 安全尺寸; 免于评定

中图分类号: U173.9 文献标志码: A 文章编号: 1005-2895(2016)04-0027-06

Study on Safety Depth of Piping Containing Incomplete Welding

WANG Fei¹, XU Genfu¹, WU Jintao¹, CHEN Tao¹, DI Yanmin²

(1. Hangzhou Special Equipment Inspection and Research Institute, Hangzhou 310015, China;
2. Liaoyang Study of Boiler and Pressure Vessel Inspection, Liaoyang, Liaoning 111004, China)

Abstract: Incomplete welding defect is one of the common defects in the welded joint of the pressure pipeline, which can lead to a significant reduction in the carrying capacity of the pipeline, which can further result in serious safety accidents. Aiming at the conservation and localization for dividing grade of incomplete welding defect, the nonlinear finite element analysis method was applied in the paper to simplify influencing factors of incomplete welding, the limit internal pressure and ultimate moment with incomplete welding depth, ring to the variation of the length and other factors were further studied, to get the limit load curve clusters; The new margin depth had been obtained and the grade scope of dividing grade of incomplete welding defects in 'Regular inspect criterion for in-service industrial pipelines' was verified. The results of this research and analysis can provide reference to the safety assessment of pressure piping containing incomplete welding defects.

Key words: pressure pipe; incomplete welding defects; limit load; nonlinear analysis; margin size; safety assessment

我国的工业领域, 工业压力管道的分布和应用极广, 是一类具有潜在危险性的特种设备。但由于现场施工技术限制与监督管理不足等因素, 在用工业管道的焊接接头中普遍存在着未焊透缺陷^[1], 该类缺陷的存在对管道系统的安全构成了潜在的安全隐患^[2]。未焊透缺陷通常是一种不连续缺陷, 是在焊接过程中由于组焊施工条件较差等原因形成的, 未焊透的焊口

形态复杂且不规则, 极易引发安全事故^[3]。

根据我国《在用工业管道定期检验规程》中的规定, 对定为4级的未焊透缺陷即为不合格, 需要停止使用, 而大量的工程实例表明^[4]该定级方法是较为保守的。因此, 本文针对《在用工业管道定期检验规程》中未焊透缺陷的定级进行研究, 借助有限元分析和塑性力学的方法, 采用在弯矩、内压组合作用下基于极限载

收稿日期: 2016-03-15; 修回日期: 2016-05-10

基金项目: 国家质量监督检验检疫总局科技计划项目(2014QK158); 浙江省质监系统科技计划项目(20150236)。

作者简介: 王飞(1983), 男, 内蒙古丰镇人, 硕士, 工程师, 主要从事压力容器及管道等特种设备检验及相关科研工作。E-mail: 37845466@qq.com

荷的塑性失效分析,从而扩大了管道中所允许存在的未焊透缺陷尺寸,增强了《在用工业管道定期检验规程》的科学性和有效性^[5]。

1 物理模型及计算分析

1.1 物理模型

本文所研究的管道材料为 S30408 不锈钢。采用试验方法获得该材料真实的多线性属性,用于未焊透管道焊接接头模型的有限元分析。物理模型的结构如图 1 所示,为了便于计算和分析,模型中的未焊透接头结构设置为等深且边缘为矩形的形状。考虑到物理模型边界约束对计算结果的影响,在建模时将所分析的压力管道模型的长度设置为该管道半径的 3 倍以上。

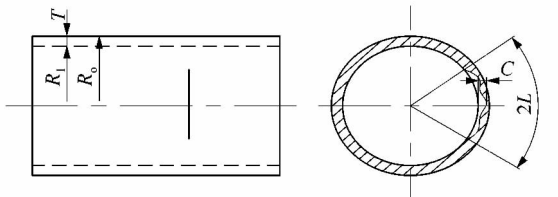


图 1 未焊透缺陷示意图

Figure 1 Schematic diagram of characterization of incomplete welding defects

本方案采用 SOLID95 单元和 SOLID45 单元混合配置的方法对实体模型进行离散化处理^[6],为确保计算结果的精确性,将缺陷附近网格采用了加密处理手段,网格划分结果如图 2 所示。

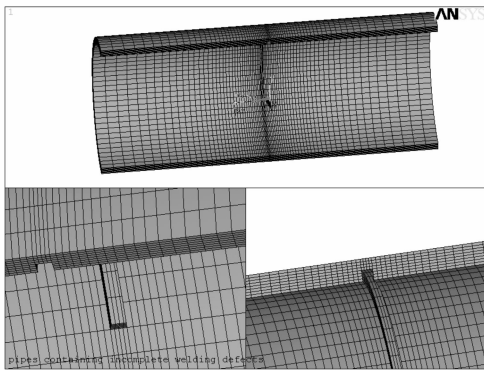


图 2 有限元模型整体及缺陷局部网格分布

Figure 2 Mesh of finite element model

1.2 载荷及约束条件

本文研究了含焊接缺陷管道的 3 种工况,分别为管道承受单一内部压力、单一弯矩及内部压力和弯矩联合作用,加载及约束形式见表 1。内压通过管道内表面压力和端部轴向拉力的施加模拟,弯矩施加则借助 MPC185 单元,通过管道模型外部的辅助平面将弯矩载荷施加到管道的端面上。

表 1 载荷与约束条件

Table 1 Load and constraint conditions

载荷类型	加载	边界约束
单一内压	内压、模型左端等效轴向力	$X=0, Y=0$ 面对称约束; $Z=0$ 面全部自由度
单一弯矩	模型左端等效纯弯矩	$X=0, Y=0$ 面对称约束; $Z=0$ 约束面全部自由度
内压、弯矩联合	内压、模型单侧轴向力 + 弯矩	$X=0, Y=0$ 面对称约束; $Z=0$ 面全部自由度

1.3 计算方案

本文研究的管道规格为 $\varnothing 89 \times 4$,并考虑了各种不同程度的焊缝根部未焊透缺陷。由于绝大多数管道对接接头焊缝间隙为 2 mm,因此取未焊透缺陷的轴向宽度为 2 mm。通过采用无量纲参数定义未焊透缺陷的大小^[7],其环向长度为 $\theta = L/\pi R_i$ 、深度为 $c = C/T$ 。 P_L, M_L 分别为含缺陷管道的极限内压和极限弯矩,无量纲极限内压和极限弯矩分别是 $p = P_L/P_{L0}, m = M_L/M_{L0}$ 。其中, $P_{L0} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_f \ln \frac{R_o}{R_i}$,为管道在单一内压作用下

的极限内压理论值; $M_{L0} = 4\sigma_f(R_o^3 - R_i^3)/3$,为管道在单一弯矩作用下的极限弯矩理论值^[8],其中 $R_{p0.2}, R_m$ 分别为管道所用材料的标准屈服强度和抗拉强度下限值,公式中的流变应力 $\sigma_f = (R_{p0.2} + R_m)/2$ ^[9]。

本文分析了以下 3 种无量纲参数工况下不同缺陷尺寸的塑性极限载荷^[9]:①无量纲弯矩和内压比值 $n = m/p$,分别取值为 0, 0.4, 0.8, 1.5 和 ∞ ;②未焊透周向长度 θ ,取值为 0.10, 0.25, 0.50, 0.75 和 1.00;③未焊透深度 c ,取值为 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6 和 0.7。以上 3 个参数共组成了 175 个数值计算模型,通过 ANSYS 软件计算获得未焊透管道极限载荷的有限元解数据组。

2 未焊透管道的失效模式分析

2.1 纯内压作用下

图 3 为未焊透深度 $c = 0.6$ 的整圈未焊透管道持续加载到极限内压 25.8 MPa 时 Tresca 等效应力分布图。根据加载过程中塑性区的变化发现最先发生屈服的是未焊透内表面,随着继续加载,塑性区沿着模型内表面和壁厚方向扩展,最终整体屈服。

在单一内压的作用下,塑性区变化过程与未焊透环向尺寸 θ 关系不大,且管道的失效模式以整体破坏为主。数值模拟结果显示,当管道达到承载极限时并没有发生明显鼓胀,此时未焊透缺陷对管道承载的影响主要是净截面削弱。

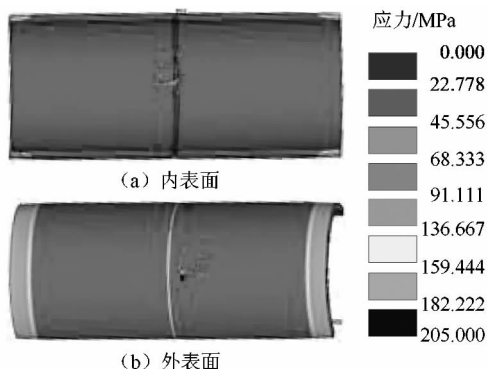


图3 单一内压下管道内、外表面应力分布图

Figure 3 Stress distribution under internal pressure

2.2 纯弯矩作用下

图4是缺陷深度 $c=0.6$ 的二分之一圈未焊透管道持续加载到极限弯矩 $3.6\text{ kN}\cdot\text{m}$ 时 Tresca 等效应力分布图。数值模拟结果显示,随着加载的进行,焊接缺陷中心处率先屈服,塑性区随载荷增加不断增大,最终使管道未焊透区域局部失效。

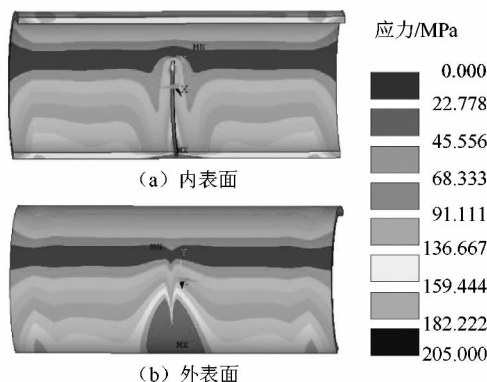


图4 单一弯矩下管道内、外表面应力分布图

Figure 4 Stress distribution under bending moment

通过对计算结果的分析可以得,在单一弯矩作用下当缺陷深度较浅时,失效模式以整体失效为主;而当缺陷较深时,管道的失效模式则为缺陷处局部失效。

2.3 联合载荷作用下

对所有计算结果进行统计分析得知,在内压和弯矩联合作用下的失效模式较为复杂,但有如下规律:

1) 当未焊透缺陷的深度较浅($c \leq 0.4$)时,整体失效是管道的主要失效模式,且缺陷尺寸对极限载荷影响不大;

2) 当未焊透缺陷较深($c > 0.4$)时,缺陷处的局部失效成为管道的主要失效模式(见图5),此时未焊透深度对极限载荷影响明显。而且随着弯矩在联合载荷中比例的增加,未焊透尺寸对管道承载能力的影响也在增加。

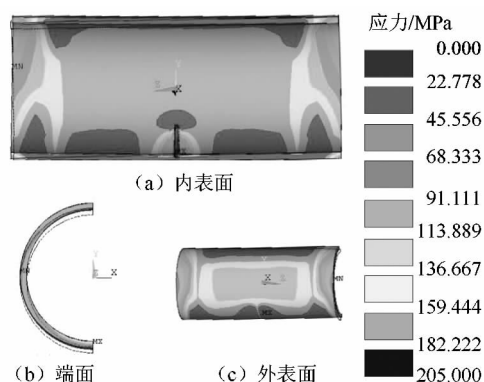


图5 联合载荷下管道内外表面及端面应力分布图

Figure 5 Stress distribution under combined load

2.4 有限元极限载荷曲线簇的获得

将各种载荷工况下得出的含有特定焊接缺陷尺寸的管道极限载荷数值综合反映在同一曲线图中,构成极限载荷曲线簇(见图6),得出如下结论:

1) 焊接缺陷深度相同或者接近时的极限载荷曲线基本重合,而缺陷深度尺寸差别较大的曲线簇之间则距离明显。这说明影响极限载荷的主要因素是缺陷深度 c ,而环向尺寸 θ 对极限载荷基本没有影响,极限载荷的大小与加载特性无关。

2) 当焊接缺陷的深度 $c \leq 0.4$ 时,内压—弯矩曲线接近椭圆形;而当焊接缺陷的深度 $c > 0.4$ 时,内压—弯矩曲线接近直线,该现象也说明了焊接缺陷的深度是影响管道总体承载能力的主要因素。

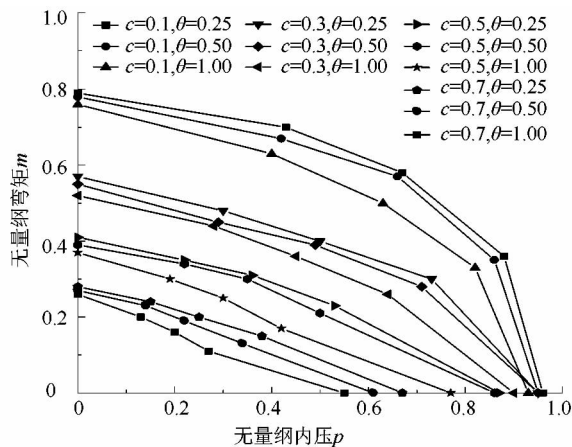


图6 内压+弯矩联合作用下的极限载荷曲线簇

Figure 6 Limit load curve under combined load

3 未焊透管道缺陷的安全尺寸建立

3.1 极限载荷的安全控制

通过以上分析得知塑性失效是含未焊透缺陷管道的主要失效模式,因此在确定焊接缺陷(未焊透)是否可以保留的判定条件时,将塑性极限载荷作为主要的

考虑因素。在内压和弯矩联合作用下(见图7),若管道缺陷处所承受的内压和弯矩值(P, M)处于极限载荷曲线之下则认为该缺陷安全,这就是利用极限载荷控制缺陷安全尺寸的原则。

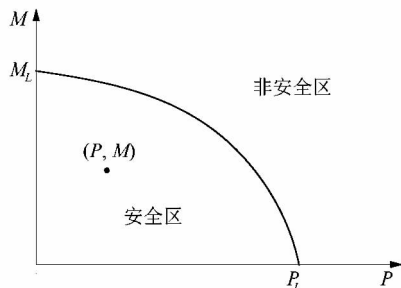


图7 极限载荷控制示意图

Figure 7 Schematic diagram of limit load control

3.2 未焊透免于评定条件的建立

免于安全评定建立的目的是在不进行安全评定条件下所能获得的未焊透允许最大值,因为若进行安全评定则需要复杂的管系应力分析和计算,工作繁杂且推广难度大,因此建立一种避免复杂计算的确定安全尺寸的方法是非常必要的。本文通过对缺陷应力最大处(危险点)进行塑性力学分析,认为当危险点达到屈服状态而管道未达到极限载荷时,可认为该焊接缺陷是可以保留且免于安全评定。

假设含焊接缺陷的管道外、内径为 R_o 和 R_i , 径比为 K , 厚度为 T , σ_p 和 σ_M 分别为内压和弯矩载荷引起的应力值,对危险点受力单元在屈服状态进行应力分析(如图8)。

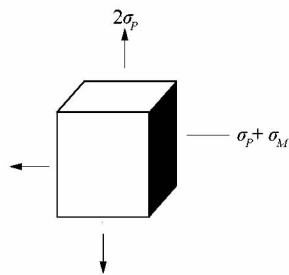


图8 危险点受力模型图

Figure 8 Stress model at risk of defects

根据塑性力学薄壁管道径向压力为零则有: $\sigma_1 = \sigma_p + \sigma_M, \sigma_2 = 2\sigma_p, \sigma_3 = 0$ 。根据 Tresca 屈服准则 $\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_s$, 可得: $\sigma_p + \sigma_M = R_{p0.2}$ 。

其中由内压引起的轴向应力:

$$\sigma_p = \frac{P_L R_o}{2T} = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{\ln K}{K^2 - 1} \sigma_f p。$$

弯矩引起的轴向应力:

$$\sigma_M = \frac{M_L}{W_e} = \frac{4m\sigma_f(R_o^3 - R_i^3)/3}{\pi R_o^3(1 - K^{-4})/4}。$$

式中 W_e 为管道截面抗弯模量。将 σ_p, σ_M 代入屈服准则中得到无量纲极限载荷参数 m 和 p 的关系式:

$$m = \frac{3\pi R_{p0.2}}{8(R_{p0.2} + R_m)} \frac{K^4 - 1}{K(K^3 - 1)} - \frac{\sqrt{3}\pi}{8} \frac{(K^2 + 1)\ln K}{K(K^3 - 1)} p。 \quad (1)$$

考虑到工程中管道所承载内压一般均不大于其极限载荷的一半,并将模型 $\varnothing 89 \times 4$ 材料为 S30408 钢管特性数据代入公式(1)得:

$$m = 0.43 - 0.4p (p \leq 0.5)。 \quad (2)$$

公式(2)为管道的设计允许载荷线,从公式(2)可以看出 m 与 p 呈线性关系,当管道载荷达到设计允许最大内压时管道能够承载最大弯矩值。

3.3 含未焊透管道免于评定的安全尺寸

为了建立未焊透管道免于评定的安全尺寸,本文把计算获得的极限载荷曲线簇与设计允许载荷线进行对比。如果某一缺陷的极限载荷曲线位于设计允许载荷线以上,则认为该缺陷管道在正常承载范围内均不会达到其极限承载能力,因此该缺陷是允许存在的,且该条件成立的前提是管道的设计需符合法规标准。

将同一未焊透长度极限载荷曲线簇与设计允许载荷线进行对比作图(见图9),选取极限载荷曲线位于设计允许载荷线以上的缺陷尺寸,从而获得未焊透管道免于评定的安全尺寸,如表2所示。

表2 未焊透免于评定的安全尺寸

Table 2 Margin size of defects mm	
环向长度 θ	允许深度 c
≤ 0.25	0.5
$(0.25, 0.75]$	0.4
$(0.75, 1.00]$	0.3

3.4 极限载荷试验验证

容限尺寸建立得是否准确主要取决于管道模型极限载荷计算的准确性,为了更好地满足工程安全使用,本文对极限载荷的计算结果进行了验证性试验。通过自行设计的管道载荷施加系统可以进行管道极限内压和极限弯矩的测试(见图10)。该测试装置可对管道进行纯内压、纯弯矩和内压+弯矩联合载荷3种模式的加载,利用应变测试仪获得管道的载荷—应变曲线,进而得到其塑性极限载荷,并与 ANSYS 计算结果进行比较。极限载荷的测试点为有限元计算结果中的应变极值点,并采用型号为 BE120-2CA 的 A 级精度应变花(多个应变片),灵敏系数为 2.14 ± 0.01 。

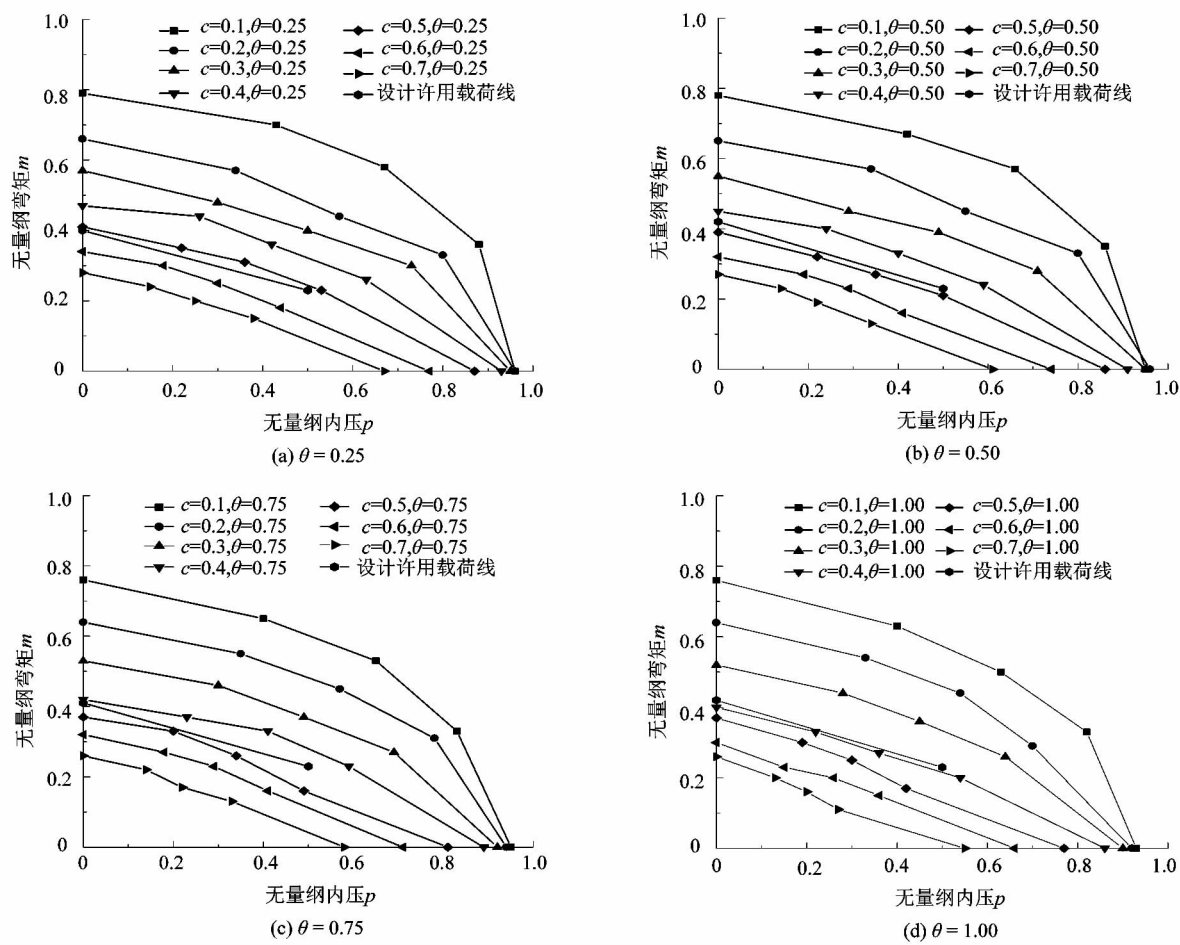


图9 未焊透管道的极限载荷线与设计允许载荷线比较

Figure 9 Comparison of limit load curve and design allowable load line



图10 试验加载装置示意图

Figure 10 Schematic diagram of test loading device

通过试验测试了4组含有未焊透缺陷的管道模型,将实测极限载荷与ANSYS计算结果对比,可以看出两者误差均在10%以内(见表3)。说明在有限元分析过程中的模型建立、网格划分、施加载荷等是可靠的,且有限元计算结果较为准确,满足工程使用。

表3 模型尺寸及试验结果

Table 3 Model size and test results

编号	未焊透尺寸		实测极限载荷		数值计算极限载荷		误差/ %
	$\theta/^{\circ}$	C/mm	内压/ MPa	弯矩/ ($\text{kN} \cdot \text{m}$)	内压/ MPa	弯矩/ ($\text{kN} \cdot \text{m}$)	
1	0.5	2.0	32.4		33.9		4.6
2	1.0	1.2	35.5		38.5		8.5
3	0.5	2.0		3.9		4.2	7.7
4	1.0	1.2		5.5		5.7	3.6

注:误差=(有限元计算值-实测值)/实测值。

4 结论

本文对不同未焊透尺寸的管道为研究对象,利用商业有限元分析软件ANSYS对该物理模型进行数值分析从而获得极限载荷计算结果,系统地考虑了未焊透深度和环向长度对管道失效模式的影响,获得以下研究结果:

- 1) 整体失效是单一内压载荷作用下含未焊透缺陷 (下转第37页)