

基于损伤理论的单层厚壁圆筒自增强弹塑性交界面半径 R_c 的确定

林玉娟 关志超 贾晶晶

(东北石油大学, 大庆 163318)

摘要 在自增强技术中, 确定最佳弹塑性界面半径是关键。在利用自增强理论设计计算超高压容器时, 最佳自增强处理压力、最佳弹塑性界面半径是主要的参数。分别采用理想弹塑性模型和损伤模型对三种不同规格的厚壁圆筒进行了计算, 并与同参数的理想弹塑性模型和实际测得的弹塑性交界面半径值进行了对比, 从而说明给出的基于损失的厚壁圆筒弹塑性交界面半径计算思路是正确的, 为将来准确预测和控制自增强容器残余应力, 提供了理论依据。

关键词 超高压容器 自增强 最佳弹塑性界面

中图法分类号 O346.5; 文献标志码 A

超高压圆筒的自增强, 是指圆筒制成长后投入运行之前进行加压处理, 此压力要超过圆筒内壁初始屈服压力, 使筒体内壁出现塑性变形, 形成一定厚度的塑性层; 而其余部分仍保持弹性状态, 成为弹性层。保持该压力一段时间后卸压, 筒体塑性部分(内层)因有残余变形而不能恢复到原来位置。外层材料的弹性层收缩, 使已产生塑性变形的内层产生压缩残余应力, 而外层弹性层因收缩受到阻碍而产生拉应力。容器投入运行承受操作内压时, 由内压引起的拉伸应力与内壁压缩残余应力相叠加, 使本来应力最大的内壁应力值得以降低, 而外壁材料的拉伸残余应力与工作应力叠加后, 应力水平增高, 因而筒体沿壁厚方向的应力分布变得均匀。这种利用容器自身弹塑性变形产生预加应力, 从而提高承载能力的方法称为“自增强”(Autofrettage), 日本称之为“自紧”^[1]。

自增强圆筒的最大优点是施加工作内压后, 应力最大的内壁应力降低了, 应力分布变得比较均

匀, 全部应力维持在弹性范围内, 弹性操作范围扩大, 弹性承载能力提高。特别是当工作压力比内壁屈服压力高时, 自增强处理更成为必要的手段。自增强的另一个突出优点是, 圆筒内壁存在压缩残余应力。操作时将使内壁平均应力降低, 疲劳强度显著提高。在自增强技术中, 确定最佳弹塑性截面半径是关键。

1 损伤自增强分析

自增强圆筒在得到压缩残余应力而使厚壁圆筒产生自增强的同时, 不可避免地对容器造成了损伤^[2]。

超高压容器产生自增强效应的机理与陶瓷微裂纹增韧的机理是相同的。超高压容器经自增强处理时, 在反应器器壁内产生大量的位错, 这些位错的存在导致材料发生损伤, 同时产生部分次裂纹(这些裂纹较客观裂纹小些), 在卸载后就形成稳定的裂纹残存在材料中, 在外力的作用下, 这些稳定的次裂纹将失稳扩展, 而在裂纹周围形成诱发的更细小的裂纹, 这些细小裂纹形成的微裂纹区, 对于次裂纹形成屏蔽, 从而导致材料非线性的应力-应变关系^[3]。虽然材料受到损伤, 但并没有丧失承载能力, 当卸载后, 损伤是不可逆的, 产生的损伤残存在

材料中。

本论文鉴于材料损伤增韧的机理,应用损伤力学知识,从损伤力学角度建立超高压容器自增强损伤理论模型。

2 基于损伤理论的超高压容器自增强相关参数计算公式

在利用自增强理论设计计算超高压容器时,最佳自增强处理压力、最佳弹性界面半径是主要的参数。根据损伤理论,这几个主要参数的计算公式如下:

自增强损伤压力:

$$P_A = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}(1-D_c)} \left[1 - \frac{R_c^2}{R_o^2} + 2 \ln \frac{R_c}{R_i} \right] \quad (1)$$

临界损伤半径:

$$R_c = \sqrt{\frac{\sqrt{3}\varepsilon_{lo}E(1-D_c)R_o^2}{2(1-\mu)\sigma_s}} \quad (2)$$

式中: R_i 、 R_o 、 R_c —厚壁圆筒内半径、外半径、弹性区域损伤区交界面半径;

σ_s —材料的屈服强度;

E 、 μ —材料的弹性模量、泊松比;

D_c —临界损伤变量;

D_r 、 D_t —厚壁圆筒径向、环向临界损伤变量,由式(3)计算:

$$\begin{cases} D_t = 1 - (-0.0007r^2 + 0.0468r + 0.0872) \left(\frac{P}{602} \right)^{0.0513r-1.695} \\ D_r = 1 - 0.97(-0.0007r^2 + 0.0468r + 0.0872) \left(\frac{P}{602} \right)^{0.0513r-1.695} \end{cases} \quad (3)$$

ε_{lo} —容器外壁面的环向应变,由下式计算:

$$\varepsilon_{lo} = \frac{1}{E} \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}(1-D_c)} \frac{R_c^2}{R_o^2} [2 - 2\mu] \quad (4)$$

3 设计计算实例

3.1 主要尺寸及性能参数

某化工厂聚乙烯生产装置是典型的超高压容器,该容器采用的是自增强技术,材料为25Cr2MoV,屈服极限为 $\sigma_s = 715$ MPa,强度极限为 $\sigma_b = 821$ MPa,其结构见图1。

表1 最佳弹性界面半径的理论计算结果

计算依据	计算公式	计算说明	计算结果
理想弹塑性模型 ^[4]	$P_i = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} \left(1 - \frac{r_c^2}{R_o^2} + 2 \ln \frac{r_c}{R_i} \right)$	P_i 为自增强处理压力,分别取 602 MPa、515 MPa、500 MPa	对应的 R_c 计算结果分别为 34.723 6 mm、27.855 26 mm、26.951 35 mm
损伤模型	$P_A = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}(1-D_c)} \left[1 - \frac{R_c^2}{R_o^2} + 2 \ln \frac{R_c}{R_i} \right]$	P_A 为损伤处理压力,分别取 602 MPa、515 MPa、500 MPa	对应的 R_c 计算结果分别为 34.345 2 mm、27.608 3 mm、26.808 7 mm
实测值 ^[5]		处理压力分别取:602 MPa、515 MPa、500 MPa	对应的 R_c 实测结果分别为 34.2 mm、27.8 mm、27.2 mm

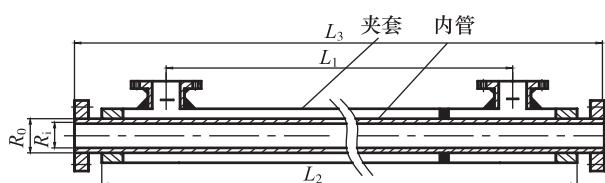


图1 聚乙烯超高压容器的结构简图

3.2 容器的弹性界面半径分析

3.2.1 理论计算

分别采用理想弹塑性模型和损伤模型对三种不同规格的厚壁圆筒进行了计算,其内半径分别为 19.96 mm、19.95 mm、20.09 mm,外半径分别为 43.1 mm、42.98 mm、43.08 mm。其计算依据和结果见表1。

3.1.2 结果分析

从上面表1可以看出,在自增强压力不变的情况下,基于损失的厚壁圆筒的弹塑性交界面半径与实测值的误差分别为:0.425%、0.69%、1.151%,理想弹塑性模型计算得到的结果与实测值的误差分别为1.53%、0.20%、0.914%。由此可以看出,在自增强压力不变的情况下,基于损失的厚壁圆筒的弹塑性交界面半径计算结果与实测值更接近,其误差均在1.5%以内。

4 结论

本文利用基于损伤自增强模型计算超高压反应管的弹塑性交界面半径,并与同参数的理想弹塑性模型和实际测得的弹塑性交界面半径值进行了

对比,从表1中可以看出自增强损伤力学模型得到的弹塑性交界面半径数值的误差最小,同理想弹塑性模型相比其计算的计算精度有所提高。从而说明本论文给出的基于损失的厚壁圆筒弹塑性交界面半径计算思路是正确的,为将来准确预测和控制自增强容器残余应力,提供了理论依据。

参 考 文 献

- 潘祖仁. 化工和石油化工概论. 北京:中国石化出版社,1995
- 刘长海. 超高压管式反应器安全工程中损失问题的研究. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2003
- 郑修麟. 金属疲劳的定量理论. 西安:西北工业大学出版社. 1994: 1—6
- 邵国华. 超高压容器设计. 上海:上海科学技术出版社,1984
- 潘秉智,朱瑞东,苏红军. 自增强理论与实验研究(I). 大庆石油学院学报,1990;12(1):14—16

To Determine Radius R_c of Self-reinforced and Elastic-plastic Interface which Belongs to Single and Thick Cylinder Based on Damage Theory

LIN Yu-juan, GUAN Zhi-chao, JIA Jing-jing

(Northeast Petroleum University, Daqing 163318, P. R. China)

[Abstract] The key in the self-reinforced technology is determined the best radius of elastic-plastic interface. When high pressure vessel was designed and calculated in the use of the self-reinforced theory, the best pressure which was done with self-reinforced and the best radius of elastic-plastic interface were the main parameters. Three different kinds of thick cylinders using ideal plastic material model and damage model are calculated. And which compared with the ideal elastic-plastic model and the actually measured radius of elastic-plastic interface with the same parameters. Therefore, the ideal that to determine radius of self-reinforced and elastic-plastic interface which belongs to single and thick cylinder based on damage theory is right. The idea provides a theoretical basis for predicting and controlling residual stress of self-reinforced vessel.

[Key words] high pressure vessel self-reinforced best elastic-plastic interface