

稳态温度场下自增强残余应力松弛模型研究

林玉霞¹, 刘康林¹, 林为江²

(1 福州大学化学化工学院, 福建 福州 350002; 2 中石化福建石油分公司, 福建 福州 350003)

摘要: 针对高压聚乙烯反应管自增强残余应力在温度影响下的松弛现象, 运用金属材料的蠕变理论和弹性力学理论, 建立了稳态温度场作用下剩余自增强残余应力的理论预测模型. 该模型的计算结果和实验结果吻合.

关键词: 自增强; 残余应力; 松弛; 稳态温度场

中图分类号: O344.3

文献标识码: A

A theoretical model of autofrettage residual stress relaxation in homogeneous temperature field

LN Yu-xia¹, LU Kang-lin¹, LN Wei-jiang²

(1. College of Chemistry and Chemical Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350002, China)

2. Fujian Branch of China Petroleum and Chemical Corporation, Fuzhou, Fujian 350003, China)

Abstract In the present paper, the autofrettage residual stress relaxation of the high pressure tubular reactor in homogeneous temperature field is studied theoretically. A theoretical model of remaining autofrettage residual stress in homogeneous temperature field is developed based on creep theory and the theory of elastic mechanics of metal materials. The calculated results by means of the model are in excellent agreement with the experimental ones.

Keywords autofrettage; residual stress; relaxation; homogeneous temperature field

超高压容器所受压力高, 其安全运行状况直接关系到生产厂家的产值、利润以及人身和财产安全, 为提高其承载能力, 工程上广泛采用自增强处理技术, 以在容器内壁附近形成有益的预压缩应力 (也称自增强残余应力). 然而, 在自增强容器使用过程中, 这一有益的预压缩应力会发生松弛现象, 从而降低超高压容器的承载能力. 因此, 工程上非常关注自增强残余应力的松弛规律及其预测^[1-3]. 鉴于影响在役自增强容器残余应力松弛的因素主要有温度和压力, 本文旨在以高压聚乙烯反应器为对象, 从蠕变角度研究稳态温度场中自增强圆筒残余应力的衰减规律.

1 自增强残余应力松弛的理论模型

1.1 基本假设

1) 自增强圆筒在加热过程中, 当量总应变保持不变, 且为常数.

2) 卸除自增强压力后, 圆筒内壁残余应力不发生“反向屈服”, 即自增强残余应力是弹性的, 符合广义虎克定律.

3) 自增强圆筒的残余应力与操作状态的温差应力叠加后的综合应力也不发生“反向屈服”, 即综合应力也为弹性的.

收稿日期: 2005-07-27

作者简介: 林玉霞 (1969-), 女, 硕士, 讲师.

基金项目: 福州大学科技发展基金资助项目 (XKJ(QD) - 0107)

1.2 自增强残余应力松弛过程中的应力应变状态

由弹性理论可知,圆筒中的当量应力和应变为:

$$\bar{\sigma} = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{[(\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_\theta)^2]} \tag{1}$$

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{[(\varepsilon_\theta - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_r)^2 + (\varepsilon_r - \varepsilon_\theta)^2]} \tag{2}$$

式中: $\bar{\sigma}$ 、 $\bar{\varepsilon}$ 分别为当量应力和当量应变; σ_r 、 σ_θ 、 σ_z 为圆筒的径向、周向、轴向温差应力; ε_r 、 ε_θ 、 ε_z 为圆筒的径向、周向、轴向应变.

利用上述当量应力、应变的概念和广义虎克定律,可得弹性状态下的应力 - 应变关系式:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{2(1+\mu)}{3E} \bar{\sigma} \tag{3}$$

式中: E 、 μ 分别为材料的弹性模量和泊松比.

根据基本假设,圆筒的初始残余应力和初始残余应变均为弹性,故其初始残余应力与初始应变遵循下式:

$$\bar{\varepsilon}_0 = \frac{2(1+\mu)}{3E} \bar{\sigma}_0 \tag{4}$$

式中: $\bar{\sigma}_0$ 、 $\bar{\varepsilon}_0$ 分别为初始时 ($t = 0$) 的相当残余应力和相当残余应变.

当圆筒在温度场中加热到某一时刻时,金属材料的微观组织便发生变化,使一部分弹性应变转换为非弹性应变,并且转换量随着加温时间的增加而逐渐增加,但筒体材料单元的总应变不变,即

$$\bar{\varepsilon} = \bar{\varepsilon}_e + \bar{\varepsilon}_c = \text{const} \tag{5}$$

式中: $\bar{\varepsilon}_e$ 、 $\bar{\varepsilon}_c$ 分别为圆筒加热到某一温度时的相当塑性应变和相当弹性应变.所以,筒体中的弹性应变要随着时间的增加而减少.

$$\bar{\varepsilon}_e = \frac{2(1+\mu)}{3E} \bar{\sigma} \tag{6}$$

由式 (6)可知,筒体中的残余应力随弹性应变的减少而减少,即残余应力要随时间的增加而逐渐松弛.

1.3 自增强圆筒中应变与时间、应力、温度的关系

在稳态温度场中,自增强圆筒材料的应力松弛主要源于蠕变现象.而在恒应力作用下,金属材料的蠕变曲线形状与作用温度密切相关.根据金属熔点温度 T_m 的大小,可将蠕变分为 3 种,即低温蠕变 ($T \leq 0.25T_m$),中温蠕变 ($0.25T_m < T < 0.5T_m$) 和高温蠕变 ($T \geq 0.5T_m$).对高压聚乙烯反应管而言,其所用材料的熔点温度远高于正常工作温度,如 30CrNiMo8 钢的熔点温度 $T_m = 1750\text{K}$,反应管的工作温度 $T = 613\text{K}$, $0.25T_m \leq T < 0.5T_m$,反应器材料处于中温蠕变状态;此外,由于反应管内壁残余应力为压应力.因此,反应管在正常工作时的蠕变,可看作低应力作用下的蠕变,其蠕变规律可用下式表示^[4]:

$$\bar{\varepsilon}_c = b_0(\bar{\sigma})^m \ln(t+1) + \varepsilon_0 \tag{7}$$

式中: b_0 、 m 为与温度、材料有关的常数,可由蠕变实验数据确定; ε_0 为瞬时蠕变; t 为加温时间.

1.4 剩余自增强残余应力的计算模型

由式 (5)、式 (6)、式 (7) 可得:

$$b_0(\bar{\sigma})^m \ln(t+1) + \varepsilon_0 + \frac{2(1+\mu)}{3E} \bar{\sigma} = \text{const} \tag{8}$$

考虑初始条件:

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}_0 \quad (t = 0)$$

则式 (8) 可改写为:

$$b_0(\bar{\sigma})^m \ln(t+1) + \frac{2(1+\mu)}{3E} \bar{\sigma} = \frac{2(1+\mu)}{3E} \bar{\sigma}_0 \tag{9}$$

式 (9)即为剩余自增强残余应力的理论算式, 它反映了自增强残余应力松弛的规律. 由此式可进一步得到开式和闭式厚壁圆筒中的剩余残余应力算式.

开式圆筒:

$$b_0 | (\bar{\sigma})_{r=R_i} |^m \ln(t+1) + \frac{2(1+\mu)}{3E} | (\bar{\sigma})_{r=R_i} | = \frac{2(1+\mu)}{3E} | (\bar{\sigma}_{00})_{r=R_i} | \quad (10)$$

闭式圆筒:

$$b_0 | (\bar{\sigma})_{r=R_i} |^m \ln(t+1) + \frac{2(1+\mu)}{3E} | (\bar{\sigma})_{r=R_i} | = \frac{2(1+\mu)}{3E} \times \frac{\sqrt{3}}{2} | (\bar{\sigma}_{00})_{r=R_i} | \quad (11)$$

式中: $\bar{\sigma}_{00}$ 为初始时圆筒的周向残余应力; R_i, r 分别为圆筒内壁半径、圆筒的半径. 由式 (9) ~ 式 (11) 可估算出反应器工作一定时间 t 后, 圆筒内壁的周向残余应力值.

2 算例

文献 [5]给出了 25Cr2M oV 钢制自增强圆筒在 340 °C 的稳态温度场中残余应力的松弛试验数据. 其方法是将试件在加热炉中加热到 340 °C, 并保持到规定的时间, 取出空冷, 进行镗削测量残余应力. 然后将剩余的部分再加热到 340 °C, 依次反复进行. 得到的自增强筒体内壁面周向残余应力试验值见表 1.

表 1 自增强管残余应力松弛试验值

Tab 1 Experimental values on the relaxation of residual stress in autofrettaged tube

t / h	0	5	26	100	315
σ / MPa	430.1	361.2	344.5	338.8	318.4

在 340 °C 的稳态温度场中, 25Cr2M oV 材料的 $E = 2.1 \times 10^5 MPa$, 圆筒内壁初始残余应力为 $-400 MPa$, $\mu = 0.291$. 30CrNiMo8 钢在 340 °C 的稳态温度场中的 $b_0 = 4.9038 \times 10^{-28}$, $m = 6.5^{6j}$, 此时 30CrNiMo8 钢的 $\sigma_s = 765 MPa$ 而 25Cr2M oV 钢的 $\sigma_s = 715 MPa$. 近似取 $b_0 = 4.9038 \times 10^{-28}$, $m = 6.5$. 因圆筒为开式圆筒, 故由式 (10) 得到不同加温时间的残余应力松弛情况如图 1 所示.

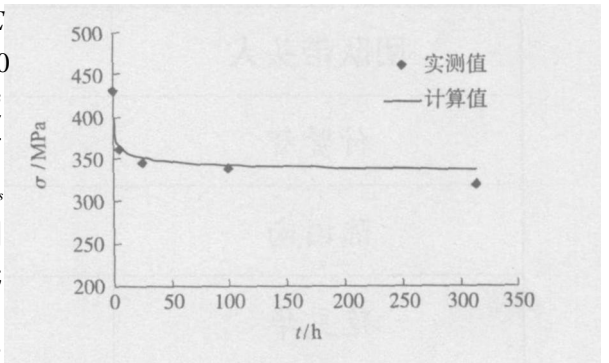


图 1 稳态温度场中自增强残余应力松弛曲线

Fig 1 Curve of relaxation of autofrettaged residual stress in homogeneous temperature field

图 1 表明, 计算曲线与试验值吻合较好. 模型求得的稳态温度场下剩余残余应力值与试验值很接近, 模型计算与试验数据的最大误差为 6.99%, 满足工程计算所要求的精度. 此外, 由图 1 可知, 稳态温度场中自增强残余应力计算值的变化规律为: 在开始短时间里, 残余应力松弛非常快, 而后松弛速度随时间逐渐变慢, 直至趋于趋向稳定. 符合残余应力的松弛规律.

3 结语

针对高压聚乙烯反应管正常工作条件下的平均温度和壁内应力水平, 运用金属材料的蠕变理论和弹性力学理论, 得到了稳态温度场作用下厚壁圆筒剩余自增强残余应力的理论算式, 并同试验结果进行了对比. 结果表明, 理论计算值与实测值吻合良好, 最大误差为 6.99%, 满足工程计算所要求的精度.

参考文献:

[1] 薛青利, 林玉霞. 高压聚乙烯反应管自增强残余应力松弛研究 [J]. 石油机械, 2003, 31(1): 1- 4

[2] Huang X B, Cui W C. Experimental study on relaxation of residual stresses in tubular reactor of high pressure polyethylene in service [J]. 船舶力学, 2003, 7(3): 98- 106

[3] 林玉霞, 刘康林, 薛青利. 自增强残余应力松弛的试验研究 [J]. 福州大学学报: 自然科学版, 2002, 30(3): 331 - 334

[4] 杜秀菊, 朱瑞东, 潘秉智. 自增强管残余应力在温度场中的松弛规律及其计算 [J]. 石油化工设备, 1995, 24(3): 3 - 7.

[5] 张永弘, 黄小平, 潘秉智. 压力容器断裂与疲劳控制设计 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1997.

[6] 杜秀菊. 30CrNiMo8超高压聚乙烯反应管残余应力松弛的实验研究 [D]. 大庆: 大庆石油学院, 1999.

接福建省教育厅 [闽教科 (2006) 36 号] 文件通知, 我校有 4 支科研团队入选“福建省高等学校科技创新团队培育计划”。

团队带头人	研究方向
付贤智	光催化基础与应用研究
陈国南	食品安全分析与检测技术
范更华	图论及其应用
王钦敏	空间数据挖掘与信息共享