

文章编号:1673-5005(2008)06-0125-04

膨胀管残余应力及其分布

唐 明^{1,2}, 金有海¹, 于桂杰¹, 许 霞¹

(1. 中国石油大学 机电工程学院, 山东 东营 257061; 2. 胜利石油管理局 钻井工艺研究院, 山东 东营 257017)

摘要:膨胀管残余应力是影响膨胀管抗挤毁能力的一个重要因素。根据膨胀管的膨胀特点,用大变形理论提出了膨胀管内、外圆柱表面具有不同方向的残余应力观点,通过全应力释放试验并借助于电测的试验方法测量了膨胀管内、外表面的残余应力,利用曲杆理论分析了膨胀管轴截面的应力分布形式。结果表明,膨胀管轴截面残余应力呈双曲线分布,膨胀管外表面的压残余应力小于内表面的拉残余应力。

关键词:膨胀管; 残余应力; 大变形; 曲杆理论

中图分类号:TE 931 **文献标识码:**A

Residual stress in expansion casing and its distribution

TANG Ming^{1,2}, JIN You-hai¹, YU Gui-jie¹, XU Xia¹

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering in China University of Petroleum, Dongying 257061, China;

2. Drilling Technology Research Institute of Shengli Petroleum Administration, Dongying 257017, China)

Abstract: The residual stress in expansion casing is one of important factors affecting its collapse resistance. According to the characteristics of the casing, using the large deformation theory, a standpoint was put forward that residual stress has a dissimilar direction inside the cylinder of the expansion casing and outside. The residual stresses of the inside and outside were measured by total stress-release and electrical test method, and the style of the residual stress distribution of the axial section was presented by curved rods theory. The results show that the style is hyperbola. The press residual stress of the expansion casing outside is smaller than the pull residual stress inside.

Key words: expansion casing; residual stress; large deformation; curved bar theory

膨胀管钻井技术是近年来钻井领域出现的一项重大的新兴技术^[1],已于2006年被国家列为“863”计划。在膨胀管研究领域,众多资料都涉及到膨胀管的残余应力问题^[2-5],而且一致认为残余应力对膨胀管的抗外挤内压能力有很大的影响^[5-8],这种影响与残余应力的方向有直接关系,一般认为压残余应力将降低膨胀管的抗外挤能力,而拉残余应力有利于提高抗外挤能力^[7]。虽然在进行应力分析时一般把膨胀管看作薄壁管,其轴截面上的应力看作均布应力^[9],但是在分析膨胀管残余应力对抗外挤内压强度的影响时^[2,5,10],不考虑膨胀管轴截面上的应力分布(应力的方向问题),仅笼统地认为残余应力具有均布性,这不利于正确分析残余应力对抗外挤

内压能力的影响。笔者用平面曲杆理论^[9]分析膨胀管轴截面上的应力分布,通过试验方法测定膨胀管内外表面的实际残余应力。

1 膨胀管的变形与残余应力定性分析

根据膨胀管的变形特点,对膨胀管的变形作基本假设如下:

- (1) 膨胀管的内、外圆面同心,为理想圆形;
- (2) 膨胀管的壁厚均匀等厚;
- (3) 膨胀管均匀无杂质、各向同性;
- (4) 膨胀管的轴截面在变形前后始终保持为平面。

膨胀管的变形属于大塑性变形,在以上的基本

收稿日期:2008-01-23

基金项目:国家“863”计划项目(2006AA06A105)

作者简介:唐明(1969-),男(汉族),四川营山人,高级工程师,博士研究生,从事石油机械与完井技术工程研究工作。

假设条件下,膨胀管在等径位置的变形是相同的。根据资料^[11],对于图1(r_1 为套管内半径, r_2 为套管外半径, p 为套管内压)所示的膨胀管,其周向应力 σ_θ 为

$$\sigma_\theta = \frac{r_1^2 p}{r_2^2 - r_1^2} \left(1 + \frac{r_2^2}{r^2} \right). \quad (1)$$

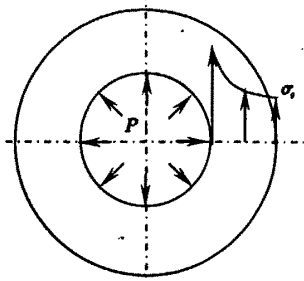


图1 膨胀管的周向应力

Fig.1 Circumferential stress of expansion casing

很明显,周向应力 σ_θ 的最大值发生在膨胀管的内表面,而且是拉应力,因此,随着内压力的增加,首先进入塑性变形的是内圆面而后依次达到外圆面。弹塑性应力状态的应力、应变关系曲线如图2所示。膨胀管的变形属于大变形^[3,10],其塑性变形发生在强化阶段,即图2中的CD段,从内表面到外表面依次进入强化阶段的某一位置。设内表面在外力作用下的应力达到了图2所示的A点对应的应力 σ_A ,则根据膨胀管内外表面应力的相对关系(式(1)),外表面的应力 σ_B 对应图2的B点应该在A点以下的某一个位置上,所以内、外表面的应力差为

$$\Delta\sigma = \sigma_A - \sigma_B. \quad (2)$$

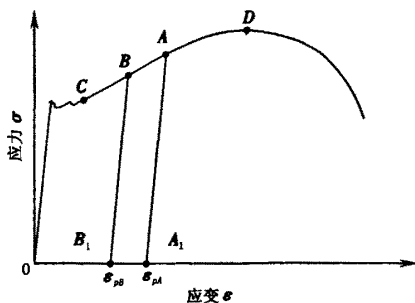


图2 弹塑性应力状态下应力、应变曲线

Fig.2 Stress-strain curve in elastic-plastic stress status

膨胀后内、外表面所对应的弹性应变为

$$\varepsilon_{eA} = \frac{\sigma_A}{E}, \varepsilon_{eB} = \frac{\sigma_B}{E}. \quad (3)$$

如图2,设A、B两点的塑性应变为 ε_{pA} 、 ε_{pB} (对

应内、外表面的塑性变形),则膨胀管内、外圆面上各点的总应变为

$$\varepsilon_A = \varepsilon_{eA} + \varepsilon_{pA}, \varepsilon_B = \varepsilon_{eB} + \varepsilon_{pB}, \quad (4)$$

而且 $\varepsilon_A > \varepsilon_B$,由此可见,膨胀管内、外圆面的变形不同,内表面变形大,外表面变形小。

在壁厚范围内,根据变形的协调性,膨胀管从内表面到外表面各点的应变在 ε_A 、 ε_B 之间是连续的。

当膨胀管的内压力 p 消失后,由于弹性,膨胀管的弹性变形具有恢复的趋势,而塑性变形将保留在膨胀管中。由于内表面的弹性应变大于外表面弹性变形,在弹性变形恢复的过程中,外表面的弹性变形首先恢复,内表面的弹性变形要全部恢复,必然受到从外表面到内表面某个位置的阻碍,根据第4条假设,要保持轴截面为平面,在无内压力前提下,在轴截面内某一个圆柱面(该圆柱面叫中性柱面)到外表面的圆筒对内圆面恢复弹性变形起阻碍作用,由此内表面到中性柱面的弹性变形不可能完全恢复而成为拉应力。根据平面假设,中性柱面到外表面必然产生压应力,因此膨胀管内、外表面的周向残余应力必然一个是拉应力,一个是压应力。根据变形的协调性,内、外表面的残余应力必然是连续变化的,而且,外表面残余应力总是压应力,内表面残余应力总是拉残余应力。

2 膨胀管残余应力及其测量

残余应力的测量技术始于20世纪30年代^[12-13],测量方法大致可分为两大类,即具有一定损伤性的机械释放测量法和非破坏性无损的物理测量法。机械测量法包括:分割全释放法、逐层剥层法、盲孔法、切环环槽法、钻阶梯孔法、套取芯棒法、内孔直接贴片法以及释放管孔周向应变测量法。物理测量法主要包括:X射线衍射法、磁性法、超声波法以及固有应变法。由于膨胀管的特殊性,如果在其工作状态进行测量,不仅没有必要,而且测量难度很大,几乎无法测量。根据膨胀管膨胀的可重复性,可以根据实际膨胀管的几何尺寸、材质、膨胀量,做成试件,用简单的测量方法——完全释放应力法测量试件外表面的残余应力,以此为依据分析轴截面的残余应力分布。

采用完全释放应力法,借助于电测法测量膨胀管内、外圆面的残余应力 σ_{r1} 、 σ_{r0} ,然后用材料力学的方法确定膨胀管轴截面的应力分布。具体方法如下:

截取一定长度的膨胀管,在内外表面中间位置周向贴应变片,在线切割机沿轴截面方向将膨胀

套管切割出一个有限宽度的长条(割缝,见图 3),测量膨胀管外表面残余周向应变 $\varepsilon_{\theta 0}$ 、内表面残余周向应变 $\varepsilon_{\theta 1}$ 和应力释放后的内、外直径。

电测法测量的内、外表面残余应力为

$$\begin{cases} \sigma_{\theta 0} = -E\varepsilon_{\theta 0}, \\ \sigma_{\theta 1} = -E\varepsilon_{\theta 1}. \end{cases} \quad (5)$$

膨胀管残余应力释放前后外径变化,确定外表面的残余应力^[2] $\sigma_{\theta 0}$ 为

$$\sigma_{\theta 0} = \frac{Et}{1-\mu^2} \left(\frac{1}{D_0} - \frac{1}{D_t} \right). \quad (6)$$

式中, $\varepsilon_{\theta 0}$, $\varepsilon_{\theta 1}$ 分别为外、内表面残余应变; E 为弹性模量, MPa (取 $E=200$ GPa); t 为钢管壁厚, mm; μ 为泊松系数 (取 $\mu=0.3$); D_0 为膨胀管外径, mm; D_t 为残余应力释放后的钢管外径, mm。

式(5)中的负号表示电测所获得的应变是正应变时,对应位置的应力为压应力,应力的方向和实际测量的方向相反。式(6)表示用几何法计算^[2] 的膨胀管外表面的残余应力。

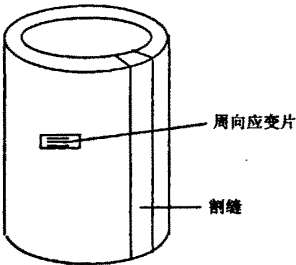


图 3 释放应力-电测法示意图
Fig. 3 Diagram of releasing stress-electric method

两种计算方式可以用其一。

利用电测法测量了膨胀管在应力释放后的内、外表面的应变和应力释放前后外径、壁厚尺寸,测量结果见表 1。

表 1 残余应力释放后的应变值及释放前后膨胀管外径平均值

Table 1 Strain after residual stress releasing, the average diameter before and after residual stress releasing of expansion casing

试件 编号	内壁应变	外壁应变	外径平均值/mm		壁厚 t/mm
	$\varepsilon_{\theta 1}/\mu\text{m}$	$\varepsilon_{\theta 0}/\mu\text{m}$	释放前 D_0	释放后 D_t	
1-1	-987	915	120.04	118.27	6.62
1-2	-962	910	119.99	118.24	6.60
2-1	-970	910	119.97	118.20	6.60
2-2	-960	905	119.97	118.18	6.58

根据式(5)和式(6)计算的内、外表面残余应力

见表 2。

由表 2 可以看出,膨胀管的内、外表面残余应力的方向相反,内表面为拉应力,外表面为压应力,与定性分析结果一致。

表 2 内、外表面残余应力对比
Table 2 The contrast between residual stress inside and outside surface

试件 编号	残余应力 σ/MPa			两种方法的 相对误差 $e/\%$
	内表面 ⁽¹⁾	外表面 ⁽¹⁾	外表面 ⁽²⁾	
1-1	197	-183	-186	2
1-2	192	-182	-182	0
2-1	194	-182	-185	2
2-2	192	-181	-184	2

注:上角(1)代表式(5)计算结果,(2)代表式(6)计算结果。

3 残余应力分布

根据膨胀管的特点,其内部的残余应力属于平面应力状态,所以在分析轴截面上的应力分布时,取单位宽度的一个圆环。

设单位宽度的膨胀管内、外半径为 r_1 , r_2 , 中径为 r_0 , 中性层的曲率半径为 $r^{[10]}$ (图 4), 则圆环平均半径(中径)为

$$r_0 = (r_1 + r_2)/2. \quad (7)$$

圆环中性柱面的曲率半径 r (中性轴半径)为

$$r = (r_2 - r_1) \ln^{-1} \frac{r_2}{r_1}. \quad (8)$$

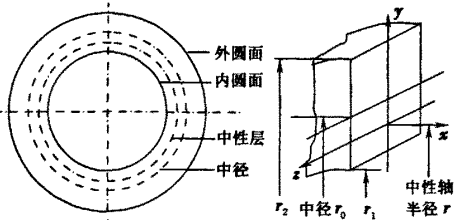


图 4 单位宽度圆环示意图

Fig. 4 Diagram of circle in unit width

用电测法或几何法测得圆环外表面的残余应力 $\sigma_{\theta 0}$, 根据平面曲杆理论^[10], 相当于在单位宽度圆环轴截面上作用一个弯矩 $M_{\theta 0}$ (相当弯矩), $M_{\theta 0}$ 为

$$M_{\theta 0} = \frac{(r_0 - r)r_2 A}{r_2 - r} \sigma_{\theta 0}. \quad (9)$$

式中, A 为单位宽度膨胀管轴截面的面积, m^2 。

相当弯矩 $M_{\theta 0}$ 的方向和表面残余应力 $\sigma_{\theta 0}$ 的方向相对应, 如果表面残余应力 $\sigma_{\theta 0}$ 是图 5 的方向, 则相当应力 $M_{\theta 0}$ 的方向也是图 5 的方向。

由此, 相当弯矩 $M_{\theta 0}$ 引起的膨胀管轴截面上的

残余应力 σ_r 为

$$\sigma_r = \frac{\gamma}{r + \gamma} \frac{r_2}{r_2 - r} \sigma_{r0} \quad (10)$$

根据式(10),膨胀管轴截面上的残余应力呈双曲线分布,而且从外圆面到内圆面残余应力的方向由压应力逐渐过渡到拉应力(反之亦然)。根据平面假设,在外圆面到内圆面之间总存在一个层面的残余应力为零。如果外圆面的残余应力是压应力,内圆面的残余应力一定是拉应力,其分布见图5。

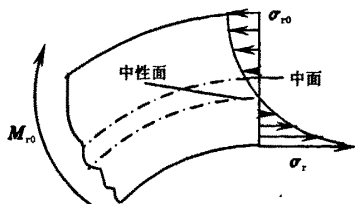


图5 残余应力分布

Fig.5 Distribution of residual stress

4 结 论

(1) 膨胀管内、外表面的残余应力的方向和大小不同,残余应力的分布呈双曲线分布。

(2) 膨胀管的残余应力外表面总是压残余应力,内表面总是拉残余应力;膨胀管的拉残余应力总是大于压残余应力。

(3) 分析膨胀管抗外挤内压能力时应考虑膨胀管外表面残余压应力和内表面残余拉应力的影响,而不应该仅考虑残余平均应力。

参考文献:

- [1] 杨进,龚龙祥,付建红,等.膨胀套管的弹塑性理论分析[J].石油勘探技术,2006,34(3):32-34.
YANG Jin, GONG Long-xiang, FU Jian-hong, et al. The elastic-plastic theoretic analysis of the expandable casing [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2006, 34(3): 32-34.
- [2] 魏学志,唐昭平,徐尚义.套管残余应力研究[J].天津冶金,2001(103)(增刊):16-18.
WEI Xue-zhi, TANG Zhao-ping, XU Shang-yi. The residual stress investigation of casing[J]. Tianjin Metallurgy, 2001(103)(sup): 16-18.
- [3] 张建兵,韩建增,陈建初,等.膨胀套管中的残余应力问题[J].石油钻采工艺,2005,27(2):18-20.

ZHANG Jian-bing, HAN Jian-zeng, CHEN Jian-chu, et al. Question of residual stress in expansion casing[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2005, 27(2): 18-20.

- [4] American Petroleum Institute. API SPEC 5CT[S]. 1998.
- [5] 杨勇,张毅,高智海,等.国产高抗挤套管残余应力初探[J].钢管,1998,27(6):1-5.
YANG Yong, ZHANG Yi, GAO Zhi-hai, et al. Discussion on residual stress of home-made super anti-crash casing[J]. Steel Pipe, 1998, 27(6): 1-5.
- [6] TAIL R B, PRESS J. An experimental study of the residual stresses and their alleviation in tube to tube-sheet welds of industrial boilers[J]. Engineering Failure Analysis, 2001, 8(1): 15-27.
- [7] 张洁,李连进,屠浩,等.残余应力对石油套管承载能力的影响分析[J].天津理工学院学报,2004,20(4): 11-21.
ZHANG Jie, LI Lian-jin, TU Hao, et al. Analyse the influence of the residual stress on the casing pipe's loading ability[J]. Journal of Tianjin Institute of Technology, 2004, 20(4): 11-21.
- [8] 李连进.套管的残余应力对抗挤强度的影响[J].重型机械,2005(1):19-22.
LI Lian-jin. Study on collapsing strength of casing pipe on the residual stress[J]. Heavy Machinery, 2005(1): 19-22.
- [9] 吕英民,陈海亮,仇伟德.材料力学[M].东营:石油大学出版社,1994.
- [10] 张建兵,王长宁,袁孟嘉. API J55 套管的膨胀性能分析[J].天然气工业,2006(2):88-91.
ZHANG Jian-bing, WANG Chang-ning, YUAN Meng-jia. Analysis on swelling property of API J55 casing [J]. Natural Gas Industry, 2006(2): 88-91.
- [11] 杨桂通.弹塑性力学[M].北京:人民教育出版社,1980.
- [12] 林丽华,陈立功,顾明元.残余应力测量技术现状及其发展动向[J].机械,1998(5):46-49.
LIN Li-hua, CHEN Li-gong, GU Ming-yuan. The status of measurement technology on residual stress and its development trend[J]. Machinery, 1998(5): 46-49.
- [13] 徐忠根,沈祖炎.残余应力的测定方法[J].华南建设学院西院学报,1994(2):60-66.
XU Zhong-gen, SHEN Zu-yan. The determining method of residual stress[J]. Journal of South China Construction University, 1994(2): 60-66.

(编辑 沈玉英)