

导管架用结构管应变时效试验中 应变量的计算

代绪成¹, 范沥元¹, 张秀荷¹, 侯大震¹, 刘 宏^{1,2}, 田建峰²

(1. 海洋石油工程股份有限公司, 山东 青岛 266520;

2. 海洋石油工程(青岛)有限公司, 山东 青岛 266520)

摘 要: 为了研究实验室卷管工艺模拟应变时效试验中应变变量对试验结果的影响, 基于塑性变形体积不变和应变中性层应变量为零的特征, 对导管架结构管卷管弯曲进行应力应变分析, 推导出应变中性层半径和最大线应变的计算公式, 并与标准计算公式进行对比分析。研究表明: 应变中性层的位置较厚度中心层的位置发生内移, 理论推导公式的最大线应变变量大于标准计算公式的最大线应变变量, 理论公式推导法计算的结果更加趋于实际情况。

关键词: 导管架; 结构管; 应变时效; 应变; 应变中性层

中图分类号: TG115.5

文献标识码: B

DOI: 10.19291/j.cnki.1001-3938.2022.07.005

Strain Calculation of Strain Aging Test for Jacket Structural Pipe

DAI Xucheng¹, FAN Liyuan¹, ZHANG Xiuhe¹, HOU Dazhen¹, LIU Hong^{1,2}, TIAN Jianfeng²

(1. China Offshore Oil Engineering Co., Ltd., Qingdao 266520, Shandong, China;

2. China Offshore Oil Engineering (Qingdao) Co., Ltd., Qingdao 266520, Shandong, China)

Abstract: In order to study the influence of strain variables on the test results in the simulated strain aging test of rolling tube process in the laboratory, based on the characteristics of constancy for volume in plastic deformation and the strain being zero at the location of stress neutral layer, the strain-stress analysis of rolling tube bending for structure tube of jacket was carried out, the formula for the radius of strain neutral layer and the maximum linear strain was established, and compared with the standard calculation formula. The results show that the position of the strain neutral layer moves inward compared with the position of the thickness center layer, and the maximum linear strain derived from the theory is larger than the standard standard calculation formula. The calculation result of the theoretical formula derivation method tends to the actual situation.

Key words: jacket; structural pipe; strain aging; strain; strain neutral layer

1 概 述

应变时效是指金属材料在加工生产过程中产生塑性变形, 在高温时效或长时间室温时效作用下金属材料的强度增加而韧性下降的现象^[1-6]。导管架主要由大直径结构钢管构成, 如图1所示。导管架结构管采用三辊卷板机对钢板进行卷管, 采用埋弧焊进行焊接, 钢板在卷制成管的过程中会产生一定的应变变量, 焊接高温会对周围钢

材产生时效作用, 因此导管架结构管在生产制造过程中必会产生明显的人工应变时效现象。

为了评价卷管工艺产生的应变时效对金属材料性能的影响, 导管架建造过程中需要依据相应的试验标准进行应变时效试验。应变时效试验原理是分别测定钢未经受规定应变和经受规定应变并人工时效后的冲击吸收能量, 采用公式计算出钢的应变时效敏感性系数, 表征钢的应变时效敏感性^[7-8]。

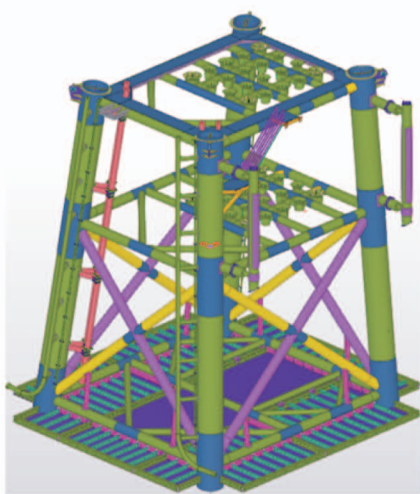


图 1 导管架示意图

根据导管架常用的应变时效试验标准 GS EP STR 201 和 BV NR426—2006, 应变时效试验可采用工程应变时效和实验室模拟两种方法。实验室模拟应变时效试验主要采用实验室设备仪器将被测样品轴向拉伸至规定的最大线应变后进行 250 °C 时效, 工程应变时效试验主要采用相同工艺卷制成品管后再进行 250 °C 时效。工程应变时效试验由于需要卷管、焊接等作业, 存在试验成本高和周期长等缺陷, 因此应变时效试验主要采用实验室模拟试验方法。应变量为实验室模拟应变时效最重要的试验参数, 应变时效试验标准给出的应变量计算公式均将厚度中心层作为应变中性层, 这与现有钢板弯曲过程中应变中性层内移理论相矛盾^[9-12], 因此本研究针对卷管工艺应变量计算进行分析研究。

2 应变量计算假设及方法

2.1 基本假设

根据导管架结构管的卷管工艺参数特点——板的宽度远远大于其厚度, 为了便于应变量的计算, 在计算前做出以下假设: ①平截面假设, 即塑性弯曲后的横截面仍保持平面; ②钢板宽度方向的变形忽略不计, 变形区为平面应变状态; ③材料的等效应力、应变关系符合幂指数假设, 即 $\sigma_s = B\varepsilon_s^n$, B 为不同材料的幂指数, n 为材料硬化指数。

2.2 计算方法

钢板在外载荷作用下发生弯曲, 其外侧发生拉伸变形, 而内侧发生压缩变形。当某一截面处于拉伸变形向压缩变形过渡时, 该截面既不产生拉伸应变也不产生压缩应变, 即为应变中性层 P^[1]。从应变中性层分别向外径和内径延伸, 其应变量为拉应变和压应变, 且应变量为连续性。

应变中性层在弯曲过程中由于应变量为零, 其长度在弯曲过程中保持不变, 因此可作为应变量计算的原始长度。在卷管上取一圆弧段, 圆弧角度为 θ , 管外径为 R_0 , 管内径为 r_0 , 中性层半径为 R_p , 壁厚为 t , 如图 2 所示。

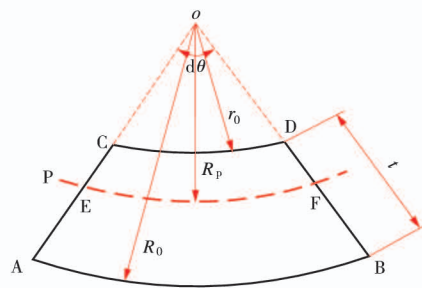


图 2 卷管应变状态模型

应变中性层 P 的长度

$$L_{EF} = \int_0^{360} \frac{2\pi R_p \theta}{360} d\theta \quad (1)$$

沿 AC 横截面外径往内径方向任一位置处的长度

$$l = \int_0^{360} \frac{2\pi (R_0 - t)}{360} d\theta dt \quad (2)$$

线应变量

$$\varepsilon = \int_0^T \frac{2\pi (R_0 - t) - 2\pi R_p}{2\pi R_p} dt = \int_0^T \frac{(R_0 - t) - R_p}{R_p} dt \quad (3)$$

从公式 (3) 中不难看出, 无论是压应变还是拉应变, 均沿着应变中性层具有连续性。依据应变时效试验标准要求, 对于实验室模拟应变时效试验, 取实际工况下的最大应变值。根据公式 (2), 在 $t=0$ 时, 即卷管外表面处, 此时为最大线应变量

$$\varepsilon_{\max} = \frac{L_{AB} - L_{EF}}{L_{EF}} = \frac{2\pi R_0 - 2\pi R_p}{2\pi R_p} = \frac{R_0 - R_p}{R_p} \quad (4)$$

对于管径和壁厚等卷管参数已知的情况下, 从公式 (4) 中可以看出, 最大线应变量计算的核心在于确定中性层半径。

3 中性层理论计算分析

根据材料力学原理, 对受力物体内的一般空间受力状态进行分析, 卷管过程中应变分布情况如图3所示, 分别产生切向、径向和宽度三个方向的主应变^[13], 根据应变定义进行理论推导计算。

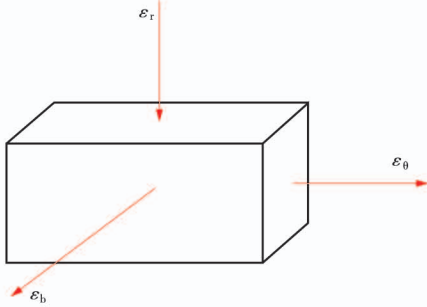


图3 空间主应变状态

根据公式(2)推理, 宽板弯曲时在宽度方向变形近似为零, 其宽度方向应变, 即钢板弯曲可简化为只有切向应变和径向应变的平面应变状态, 其中:

切向应变

$$\varepsilon_{\theta} = \ln \frac{r}{R_p} \quad (5)$$

径向应变

$$\varepsilon_r = \ln \frac{t}{T} \quad (6)$$

由于钢板在卷制弯曲过程中满足金属材料塑性变形时体积保持不变原则, 即

$$\varepsilon_{\theta} + \varepsilon_r + \varepsilon_b = 0 \quad (7)$$

将公式(5)和(6)代入(7)中, 其径向应变, 即

$$\varepsilon_r = -\varepsilon_{\theta} \quad (8)$$

$$\ln \frac{r}{R_p} = -\ln \frac{t}{T} \quad (9)$$

由于卷管过程中金属材料处于两向或三向应力状态, 需采用屈服准则判定所有应力分量。根据米塞斯屈服准则

$$\sigma_{\theta} - \sigma_r = \beta \sigma_s \quad (10)$$

由于宽度方向应变为零, 其应变由空间应变状态变为平面应变状态, β 取值为 $\frac{2}{\sqrt{3}}$, 代入公式(10)中, 则

$$\sigma_{\theta} - \sigma_r = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_s \quad (11)$$

根据米塞斯屈服准则定义的等效应力 σ_s 和 ε_s 等效应变表达式为

$$\sigma_s = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{\theta} - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_b)^2 + (\sigma_b - \sigma_{\theta})^2} \quad (12)$$

$$\varepsilon_s = \sqrt{\frac{2}{3} (\varepsilon_{\theta}^2 + \varepsilon_r^2 + \varepsilon_b^2)} \quad (13)$$

将公式(11)和公式(12)合并后, 得

$$\begin{aligned} \sigma_s &= \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{\theta} - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_b)^2 + (\sigma_b - \sigma_{\theta})^2} \\ &= \frac{\sqrt{3}}{2} (\sigma_{\theta} - \sigma_r) \end{aligned} \quad (14)$$

将公式(8)代入公式(13), 得

$$\varepsilon_s = \frac{2}{\sqrt{3}} \varepsilon_{\theta} = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{r}{R_p} \quad (15)$$

将公式(14)和(15)代入公式(3), 得

$$\frac{\sqrt{3}}{2} (\sigma_{\theta} - \sigma_r) = B \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{r}{R_p} \right)^n \quad (16)$$

将公式(16)整理后得

$$\sigma_{\theta} - \sigma_r = B \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \right)^{n+1} (\pm \ln \frac{r}{R_p})^n \quad (17)$$

其中, 当 $r > R_p$ 时取“+”号, 当 $r < R_p$ 时取“-”号。

卷管平面弯曲的平衡方程式为

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_{\theta} - \sigma_r}{r} = 0 \quad (18)$$

将公式(17)代入公式(18)中, 对 r 积分得

$$\sigma_r = \left(\frac{B}{n+1} \right) \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \right)^{n+1} (\pm \ln \frac{r}{R_p})^n + C \quad (19)$$

式中: C ——积分常数。

在卷管弯曲的外边界上, 当 $r = R_0$ 时, $\sigma_r = 0$, 由公式(19)积分可得

$$\sigma_r = \left(\frac{B}{n+1} \right) \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \right)^{n+1} (\ln \frac{R_0}{R_p})^n + C \quad (20)$$

在卷管弯曲的内边界上, 当 $r = r_0$ 时, $\sigma_r = 0$, 由公式(19)积分可得

$$\sigma_r = \left(\frac{B}{n+1} \right) \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \right)^{n+1} (-\ln \frac{r_0}{R_p})^n + C \quad (21)$$

对于边界条件处等效应力均为0, 因此公式(20)和公式(21)相等, 可得

$$R_p = \sqrt{R_0 r_0} \quad (22)$$

4 应变量计算方法对比分析

4.1 理论公式

依据上述应变中性层理论推导结果,将公式(22)带入公式(4)中,最大线应变计算公式为

$$\varepsilon_{\max} = \frac{R_0 - \sqrt{R_0 r_0}}{\sqrt{R_0 r_0}} \quad (23)$$

4.2 标准公式

应变时效试验常用的标准规范中采用简化公式进行应变量计算,常见的标准规范计算公式参照道达尔公司标准 GS EP STR 201《海洋结构钢材》,标准中明确规定应变量应为冷成型所达到的最大应变量,计算公式为

$$\varepsilon_{\max} = \frac{t}{D_p} \quad (24)$$

式中: t ——钢板厚度, mm;

D_p ——卷管后钢板中心厚度对应的直径。

法国船级社规范 BV NR426《海上钢结构构筑物 and 安装建造规范》中,对于冷成形应变量计算公式为

$$\varepsilon_{\max} = \frac{t}{2r_0 + t} \quad (25)$$

公式(24)和公式(25)的分析推导在标准中均未给出详细的过程,但根据公式中采用厚度中心层等参数,上述公式推导极有可能是基于应变中性层与厚度中心层一致的情况下进行理论推

导。不妨假设上述公式是基于应变中性层为厚度中心层位置,即 $D_p = 2R_p$ 成立,进行简单的反向推导,其公式推导过程如下

最大线应变

$$\varepsilon = \frac{2\pi(R_p + \frac{t}{2}) - 2\pi R_p}{2\pi R_p} \quad (26)$$

将上述公式整理简化,得

$$\varepsilon = \frac{t}{2R_p} = \frac{t}{D_p} \quad (27)$$

同时当厚度中心层和应变中性层一致时,

$R_p = r_0 + \frac{t}{2}$, 代入公式(24)中,得

$$\varepsilon = \frac{t}{2(r_0 + \frac{t}{2})} = \frac{t}{2r_0 + t} \quad (28)$$

推导出来的公式(27)和公式(28)与标准计算公式(24)和公式(25)完全一致,因此,可以确定标准计算公式则是简单的将厚度中心层作为应变中性层简化处理后进行计算。

4.3 计算数据对比

现有的大量理论研究均表明应变中性层在钢板弯曲过程中会产生一定的内移^[9-12],标准计算公式(24)和(25)是简单地将厚度中心层作为应变中性层进行计算,必将导致计算公式(23)、(24)、(25)的计算结果存在一定的差距,以某一导管架项目的卷管工艺参数进行计算对比分析,见表1。

表1 计算结果对比表

序号	R_0 /mm	t /mm	R_0/t	R_p /mm		最大线应变 $\varepsilon_{\max}/\%$		
				标准规范算法	理论推导法	标准规范算法	理论推导法	误差值
1	2 000	20	100	990	989.95	1.01	1.02	0.01
2	1 070	25	43	522.5	522.35	2.39	2.42	0.03
3	406	13	31	196.5	196.39	3.31	3.36	0.05
4	508	21	24	243.5	243.27	4.31	4.41	0.10
5	508	26	20	241	240.65	5.39	5.55	0.16
6	610	32	19	289	288.56	5.54	5.70	0.16
7	457	25	18	216	215.64	5.79	5.96	0.17
8	406	25	16	190.5	190.09	6.56	6.79	0.23

从表1的数据可知,理论推导法计算出的最大线应变大于标准规范算法,且随着卷管外径与壁厚比值越小,两种方法计算出的最大线应变误差值越大。理论推导法计算出的应变中性层位

置小于厚度中心层位置,与板弯曲过程中应变中性层会产生内移的研究理论是一致的,表明理论推导的公式具有一定的科学性和合理性,而采用标准规范算法进行计算存在一定的计算误差。

5 结束语

应变时效试验作为一项评价应变时效现象对金属材料力学性能影响的重要检测内容, 随着我国海洋石油工程装备不断向深水发展, 应变时效试验在海洋石油工程行业逐渐被重视。采用实验室模拟应变时效试验时, 最重要的一项环节就是应变量的计算及试验过程中应变量的控制。

通过对卷管弯曲应力应变分析, 理论推导出最大线应变计算公式, 并与现有标准中应变量计算方法进行对比分析。采用理论公式推导法计算的结果更加趋于实际情况, 也符合应变中性层内移这一普遍认可的研究理论。因此, 本研究推导出的理论公式在卷管工艺应变量计算中更加科学合理, 可在应变时效试验过程中予以推广运用。

参考文献:

- [1] 张才毅, 许中华, 高珊. 40 kg 级高强度低温韧性船板钢的应变时效试验研究[J]. 宝钢技术, 2015(2): 18-22.
- [2] 潘中德, 龚娜, 武会宾. S355 厚规格钢板应变时效行为研究[J]. 热加工工艺, 2017, 46(24): 119-121.
- [3] 温永红, 唐获, 武会宾, 等. F40 级船板钢的应变时效行为[J]. 北京科技大学学报, 2008, 30(11): 1244-1248.
- [4] 侯登义, 徐洪庆, 陈晔. NVB 级船板应变时效敏感性试验[J]. 钢铁钒钛, 2008, 29(1): 34-37.

(上接第 18 页)

- [39] 游东潘. 广西某岩溶塌陷区天然气管道应力分析研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2018.
- [40] 罗利, 马燕, 张永军, 等. 地基沉降作用下埋地聚乙烯管强度失效的数值模拟[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(2): 473-478.
- [41] 李乔楚, 何沙. 基于单元生死技术的岩溶区域 PE 管道应力分析[J]. 应用力学学报, 2021, 38(4): 1512-1522.
- [42] 周敏. 土体沉降和塌陷引起地下管道变形破坏的试验模拟研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2013.
- [43] CHEN Z L, HE W B, BAI X H. Taiyuan underground pipeline testing and analysis of deformation and failure [J]. Applied Mechanics and Materials, 2013(275-277): 1514-1517.
- [44] WANG F, DU Y J, YANG X. Physical modeling on ground responses to tunneling in sand considering the existence of HDPE pipes[J]. Geotechnical Testing Journal, 2015, 38(1): 85-97.
- [45] ZHOU M, WANG F, DU Y J, et al. Laboratory evalua-

- [5] 彭宁琦, 史术华, 罗登, 等. 应变时效对大口径 X80 管线钢拉伸性能的影响[J]. 机械工程材料, 2018, 42(6): 42-45.
- [6] 吴海凤, 郑磊. 预应变量和时效温度对 X80 管线钢性能的影响[J]. 材料热处理技术, 2009, 38(10): 166-169.
- [7] 徐卫星, 徐惟诚, 陆海兵. 预拉伸样坯尺寸对应变时效敏感性试验结果的影响[J]. 理化检验-物理分册, 2017, 53(3): 185-187.
- [8] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 钢的应变时效敏感性试验方法(夏比冲击法): GB/T 4160—2004[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
- [9] 官英平, 赵军. 板料弹塑性弯曲应力应变中性层位置关系探讨[J]. 塑料工程学报, 2002, 9(2): 39-41.
- [10] 张子骞, 杨会林, 田永利. 薄壁管材矫直过程应变中性层偏移模型与分析[J]. 中国机械工程, 2013, 24(10): 1390-1395.
- [11] 邹锡钧, 杨青春. 弯曲件中性层的位于与展开长度的计算[J]. 机械工程师, 1992(4): 11-12.
- [12] 戴宏胜, 龚曙光, 彭炎荣, 等. 宽板塑性弯曲应变增量中性层的分析[J]. 塑性工程学报, 2010, 17(3): 81-84.
- [13] 孙训芳, 方孝淑, 关来泰. 材料力学(1)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.

作者简介: 代绪成 (1985—), 男, 高级工程师, 主要从事金属材料及焊接性能检测分析工作。

收稿日期: 2021-12-17

修改返回日期: 2022-04-07

编辑: 罗 刚

tion of buried high-density polyethylene pipes subjected to localized ground subsidence [J]. Acta Geotechnica, 2019, 14(4): 1081-1099.

- [46] 杨成武. 复杂荷载作用下埋地聚乙烯压力管道的变形特征试验研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- [47] The American Society of Civil Engineers. Guidelines for the seismic design of oil and gas pipeline systems[Z]. New York: American Society of Civil Engineers, 1984.
- [48] American Lifeline Alliance. Guidelines for the design of buried steel pipe[Z]. Washington D. C.: American Society of Civil Engineers, 2001.

作者简介: 李乔楚 (1995—), 男, 汉族, 博士研究生, 现主要从事石油工程管理方向的研究工作。

收稿日期: 2021-12-23

修改返回日期: 2022-02-21

编辑: 袁雪婷