

# 弯管不同位置横截面畸变的有限元模拟及试验

## FE Simulation and Test for the Deformation of Tubes' Different Cross-sections

北京理工大学材料科学与工程学院 鄂大辛 张小昂 古涛  
中国航天科技集团首都航天机械公司 李廷民 田鑫

**[摘要]** 利用有限元方法对弯管横截面形状变化进行了模拟分析和试验验证。指出了较大弯管横截面变化产生在弯曲中心角附近,较小的变化产生在弯、直管相切处。弯管横截面长轴变化率的有限元计算偏差较大,其原因与管材和弯模实际匹配的误差有关。

**关键词:** 弯管横截面畸变 有限元模拟 弯曲角度

**[ABSTRACT]** By using the finite element method, the simulation analysis and test verification on the tubes' cross-section deformation are carried out. It is pointed out that the change of tubes' larger cross-section occurs nearby bending center corner and the change of smaller one takes place in tubes' tangent segment. After the finite element calculation, there is large deviation in change-ratio of long axis on the cross-section, actual the reason is caused by the error of the match between tubes and dies.

**Keywords:** Deformation of the tubes' cross-section Finite element simulation Bending angle

随着管材弯曲构件在航空、航天、船舶及汽车制造领域中的广泛应用,管材弯曲成形研究显得越发重要。为了研究管材弯曲成形性及其变形规律,需要足够的试验数据给以佐证,但由于管材弯曲成形过程复杂,管型测量手段相对落后,导致实际弯曲试验数据难以形成较好的规律性<sup>[1]</sup>。为了尽可能节省大量弯曲试验所耗费的人力、物力及其不可避免的重复性工作,开展了管材弯曲成形的有限元模拟分析<sup>[2-3]</sup>。针对小直径薄壁管材无芯弯曲过程中的诸多变形现象,特别是阻碍管材精确弯曲成形的诸多变形缺陷进行了相应的理论和试验研究<sup>[4-7]</sup>。本文主要介绍弯曲角度对弯管横截面形状变化影响的有限元分析结果,关于弯曲回弹及壁厚变形等问题不在此讨论。

## 1 试验条件及有限元建模

### 1.1 管材弯曲试验条件

根据小直径薄壁管弯曲的生产现状,采用多种试验管材,与本文有关的为1Cr18Ni9Ti管材。管外径 $d_0$ 分别为6mm、8mm、10mm、12mm,管壁厚 $t_0$ 为1mm。弯曲试验在手动弯管机上进行,部分试验利用VB100HP数控弯管机完成。试验前对管材严格筛选,特别对管外径做多点、多方向测量并记录,弯曲成形后用角度仪和万能显微测试仪器测量。

### 1.2 有限元建模

有限元模拟所用参数与管材弯曲试验条件相同。其中,1Cr18Ni9Ti管材的密度 $\rho=7900\text{kg/m}^3$ ,弹性模量 $E=198\text{GPa}$ ,切线模量 $E_t=763\text{MPa}$ ,屈服强度 $\sigma_s=310\text{MPa}$ ,泊松比 $\nu=0.26$ 。材料模型选用双线性各向同性硬化模型(BISO)。为提高计算速度,管材采用壳单元,弯模、压模和导向块简化为刚体,并划分为较大网格单元,有限元模型如图1所示。

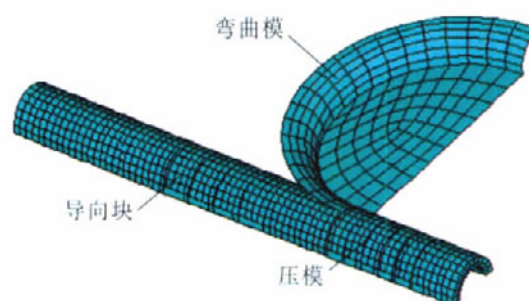


图1 管材弯曲的有限元模型  
Fig.1 FE model of tube bending

## 2 有限元模拟分析

### 2.1 管材弯曲过程中的横截面形状变化

管材在外弯矩作用下弯曲时,弯曲外侧管壁产生弯曲切线方向拉伸变形,管壁变薄的同时,还可能产生弯曲径向和弯管横截面圆周方向的变形或位移。因此,弯管横截面将产生一定程度的形状变化,在工程中称之为椭圆畸变或扁平化变形<sup>[6]</sup>。弯管横截面形状变化是影响管材弯曲成形质量和应用的重要成形缺陷之一,其评定标准因应用领域不同而有所不同。在

液体输送管道工程中,弯管横截面畸变导致局部压力损失和流量不稳定性增大。而对于压力容器来说,例如在锅炉用管道工程中,过大的弯管横截面畸变极易产生长期运行后的弯管开裂等事故。因此,研究管材弯曲后横截面形状变化既有理论意义,又有实际工程应用价值。

图2所示为1Cr18Ni9Ti管弯曲180°后的有限元模拟切片,管外径 $d_0=10\text{mm}$ ,管壁厚 $t_0=1\text{mm}$ ,相对弯曲半径 $R/d_0=2.5$ ,切片在弯曲中心角上沿半径方向截取。

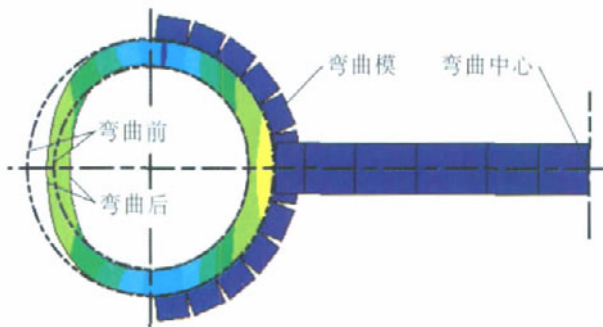


图2 弯管横截面形状变化的有限元模拟结果  
Fig.2 FE simulation result of shape changing in tube's cross-section

由图2可以明显看出,弯曲外侧管壁不仅因切向拉伸而有所变薄,而且横截面圆周材料均产生了不同程度的径向位移,弯管横截面已经失去原有的圆形形状。弯曲内侧管壁受到弯模工作表面的刚性约束仍然保持与弯模同一外形形状,但切向压缩导致管壁有所增厚。实际上,如果变形条件进一步恶化,内侧管壁切向压缩量过大,将会发生失稳起皱,甚至引起管壁反向凸起而脱离弯模工作表面。

### 2.2 弯曲角度对弯管横截面畸变的影响

管材回转牵引弯曲,是随着弯曲角 $\theta$ 增加,管壁材料沿弯曲方向逐渐变形的过程。通常认为已经弯曲成形的弯管部分将不再产生变形,但由于弯曲力必须通过已弯曲管壁传递给正在产生变形的变形区,在传递弯曲力的过程中,已弯曲部分可能还会产生一定量的变形。为了考察弯管横截面形状变化与弯曲角 $\theta$ 的相关关系,在弯曲至180°的弯管有限元模拟状态下,分别按等角度切片并连同等效应变分布值示于图3中。

由有限元切片图中可以看到,弯管两端与直管段相切的部位,横截面形状变化很小,而弯曲中心两侧可以明显看出弯管横截面发生了形状畸变,弯曲内侧基本保持为圆弧形,而弯曲外侧发生了扁平变化。

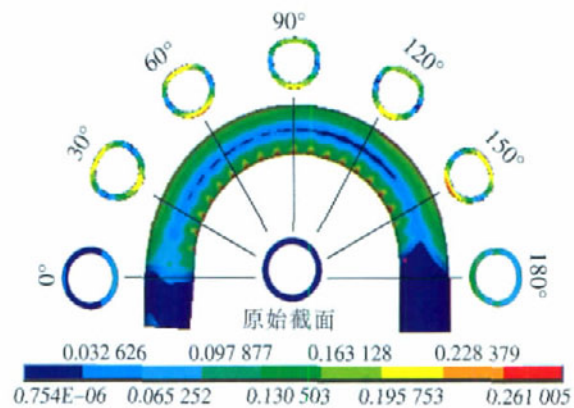


图3 弯管不同角度横截面切片的有限元模拟结果  
Fig.3 FE simulation result of tube's cross-sectional slices at different angles

从各切片等效应变 $\varepsilon$ 的分布状态可以看到,弯曲起始端的直、弯管切点附近 $\varepsilon$ 较小,由于变形扩散,终弯侧部分直管段也显示出一定的变形量。同一切片的弯曲内侧, $\varepsilon$ 略大于弯曲外侧,在垂直于弯曲平面的管中心轴附近, $\varepsilon$ 明显减小而处于弹性变形阶段。另外,从 $\varepsilon$ 分布情况来看,弯曲起始端的 $\varepsilon$ 值明显大于终止端,而且起始端弯管横截面也产生了微小的形状变化。

### 3 试验验证

为了验证有限元模拟结果,将完全相同变形条件下的弯曲试件利用线切割切片进行比较测量,并示于图4中。

弯曲试件的切片结果与有限元模拟相似,横截面畸变随弯曲角 $\theta$ 的变化而不同。弯曲中段弯管横截面形状变化量明显较大,其中弯曲角 $\theta=90^\circ$ 的切片扁平变形最大。利用R规测量弯曲内侧管形,发现与标准圆弧之间存在一定偏差,认为是由于弯模内凹槽固有的形状误差和弯曲后产生的回弹变形所致。



图4 弯管试件的横截面切片  
Fig.4 Tube's cross-sectional slices of test piece

在管材弯曲生产中,通常利用长轴变化率 $\phi_{ch}$ 、短轴变化率 $\phi_d$ 和椭圆率 $\phi$ 来衡量管材弯曲成形后横截面的形状变化程度,即

$$\phi_{ch} = \frac{d_{max} - d_0}{d_0}, \quad (1)$$

$$\phi_d = \frac{d_0 - d_{min}}{d_0}, \quad (2)$$

$$\phi = \frac{d_{max} - d_{min}}{d_0}, \quad (3)$$

式中, $d_{max}$ 为弯管横截面最大外径; $d_{min}$ 为弯管横截面最小外径; $d_0$ 为管外径。

将相同弯曲角度上的弯管切片测量值和有限元计算值经过上述计算后示于图5中。可以明显看出,弯管横截面形状变化率的有限元计算值小于试验测量值,但分布趋势基本相同。不论实测值或有限元计算值,较大形状变化率均产生在弯曲中央附近,并且弯曲中心偏向起弯侧的弯管横截面变化率相对较大。

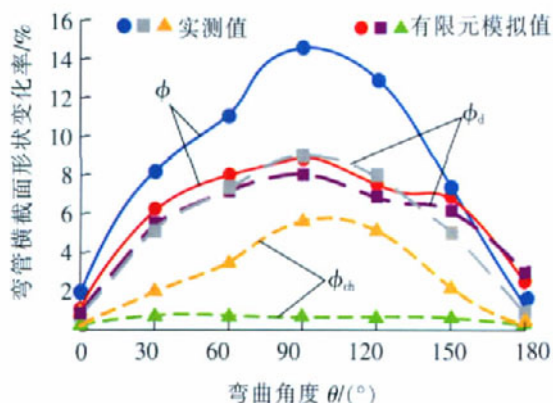


图5 不同弯曲位置的弯管横截面形状变化率  
Fig.5 Variation rate of tube's cross-sectional shape in different bending positions

与实际弯曲测量值相比,有限元计算的弯管横截面长轴变化率 $\phi_{ch}$ 、短轴变化率 $\phi_d$ 和椭圆率 $\phi$ 均比较小。特别是有限元计算值 $\phi_{ch,max} < 0.8\%$ ,与实际弯曲测试值相差很大,经分析认为是由于有限元模拟中管材外表面与弯模工作表面处于理想匹配状态,弯模设置刚性较强,管壁材料沿垂直于弯曲平面方向的位移和变形非常小,并且在整个弯曲线上, $\phi_{ch}$ 值几乎不随弯曲角度 $\theta$ 变化。而实际弯曲成形时,考虑到管材外径的制造公差,必须使弯模凹槽的横截面半径大于通用管材外半径的上偏差,并且弯曲过程中弯模可能发生一定量的弹性变形。实际弯曲成形时,在弯曲内、外侧

切向力合力作用下管材首先靠向弯模凹槽表面,在垂直于弯曲平面方向上产生位移和变形<sup>[8]</sup>,因此, $\phi_{ch}$ 的实测值大于有限元计算结果。

短轴变化率 $\phi_d$ 的有限元计算结果与实际弯曲测试值非常接近, $\phi_{d,max}$ 在8%左右,并且都产生在弯曲中心。短轴变化率的有限元计算结果与实测值吻合,说明排除管材与弯模形状尺寸之间匹配的影响因素,有限元模拟所用参数及变形条件相对正确。

椭圆率或称扁平率 $\phi$ 的有限元计算值与实测值相差较大,可从计算公式(1)、(2)及(3)的结构得到说明,即由 $\phi = \phi_{ch} + \phi_d$ 可知,完全是由于上述 $\phi_{ch}$ 的计算误差引起的。实际上,对于流体输送用弯管来说,长、短轴变化率特别是短轴变化率更为实用。

## 4 结论

(1)有限元模拟与实际管材弯曲试验结果都证明了弯管横截面形状变化较大部位产生在弯曲中心角附近,并且在弯管两端与直管段相切部位也产生了一定的横截面形状变化,这从另一个角度证明了管材弯曲成形时,变形区不仅限于弯曲成形管段,而且存在向非弯曲区过渡的倾向。

(2)弯管横截面长轴变化率的有限元计算与实际弯曲试验测试值存在很大误差,其产生原因与实际管材和弯模凹槽横截面半径及形状之间存在偏差有关。为了进一步提高有限元模拟精度,必须考虑管材与弯模的实际匹配状态。

## 参 考 文 献

- [1] 余同希,章亮焱.塑性弯曲理论及其应用.北京:科学出版社,1992.
- [2] 古涛,鄂大辛,任颖,等.管材弯曲壁厚变形的有限元模拟与试验分析.模具工业,2006(4):17-20.
- [3] 何花卉,鄂大辛,胡新平,等.管材弯曲成形中横截面畸变的试验及有限元分析.现代制造工程,2006(11):40-42.
- [4] 鄂大辛,宁汝新,胡新平,等.管材弯曲中壁厚变化引起横截面畸变的试验研究.航空制造技术,2005(12):60-63.
- [5] 鄂大辛,宁汝新,古涛.弯管横截面畸变的试验与分析.兵工学报,2006(7):698-701.
- [6] 鄂大辛,宁汝新,唐承统,等.管材的回转牵引弯曲试验及回弹分析.北京理工大学学报,2006,26(5):410-412,432.
- [7] 鄂大辛,宁汝新.管材无芯弯曲中最小相对弯曲半径的研究.机械工程学报,2007(5):219-222.
- [8] 鄂大辛.管无芯弯曲中塑性变形规律的研究.塑性工程学报,2006(1):5-12.

(责编 未艾)