

材料与成形性能

1Cr18Ni9Ti 不锈钢管滞后回弹的黏弹塑性建模 和有限元模拟

刘贺, 鄂大辛

(北京理工大学 材料学院, 北京 10081)

摘要: **目的** 研究 1Cr18Ni9Ti 不锈钢管在单轴拉伸和回转牵引弯曲卸载后的滞后回弹现象, 利用有限元软件进行滞后回弹结果的预测。 **方法** 通过系列单轴拉伸和应力松弛试验得到 1Cr18Ni9Ti 不锈钢管黏弹塑性材料参数, 采用双耗散黏弹塑性材料模型在有限元 ABAQUS 软件进行拉伸和回转弯曲卸载后滞后回弹的模拟预测, 并与试验结果对比。 **结果** 利用该黏弹塑性材料模型预测得到的滞后回弹变化趋势与试验值吻合较好, 数值上接近试验值。 **结论** 基于双耗散黏弹塑性材料模型进行滞后回弹的建模, 在瞬时回弹后, 弹塑性组合单元和黏弹性组合单元中存在相反的残余应力, 从而驱动材料持续发生黏弹性变形, 可能是产生滞后回弹的原因。有限元分析中考虑了加载过程中的黏性响应, 其预测结果更加接近实际。

关键词: 1Cr18Ni9Ti 管; 滞后回弹; 双耗散黏弹塑性模型; 有限元模拟

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2015.06.010

中图分类号: TG115.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2015)06-0065-05

Modeling and Finite-element Simulation of Time-dependent Springback of 1Cr18Ni9Ti Stainless Steel Tubes Based on Elasto-viscoplasticity

LIU He, E Da-xin

(School of Materials Science and Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

ABSTRACT: To investigate the time-dependent springback of 1Cr18Ni9Ti stainless steel tubes under tension and rotary bending, and to predict it by FEM. The two-layer viscoplasticity model which is available in the finite-element analysis software ABAQUS is applied. Parameters of this model are obtained based on the results of a series of uniaxial tension and stress relaxation tests carried out at different strain rates. The time-dependent springback quantities of tubes are simulated by ABAQUS based on this elasto-viscoplasticity model. It's revealed that simulated time-dependent springback law and quantities are close to the experimental data. Based on this elasto-viscoplasticity material model, it seems that the reverse residual stress appeared in the elastic-plastic network and visco-elastic network caused the time-dependent springback. Then numerical results are in good agreement with experimental results with this model by taking account of the viscous behaviors in the forming process.

KEY WORDS: 1Cr18Ni9Ti tube; time-dependent springback; two-layer viscoplasticity model; finite-element simulation

收稿日期: 2015-09-18

基金项目: 国家自然科学基金(51175044)

作者简介: 刘贺(1991—), 男, 河南周口人, 硕士生, 主要研究方向为金属板、管塑性成形、滞后回弹及有限元分析。

通讯作者: 鄂大辛(1957—), 男, 满族, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为塑性理论、成形工艺及模具设计。

大量试验发现金属塑性成形后的回弹由卸载即刻产生的瞬时回弹和随时间延长逐渐发生的滞后回弹两部分组成,滞后回弹是汽车车身“较劲”焊装、微成形构件和陀螺装配体形位误差,以及航空航天高压流体输送管线畸形导致液压系统控制紊乱甚至产生爆泄等的潜在隐患的原因^[1],因此,对这种尚未被清楚认知的新的变形现象进行研究,具有非常重要的工程意义。

Wagoner 等人^[2]通过铝板的拉弯试验,发现铝合金板拉伸弯曲并卸载后的形状随放置时间延长而变化。Lim 等人^[3]研究了若干种汽车用钢板的滞后回弹现象发现,DQSK,AKDQ 和 HSLA 钢无滞后回弹现象,而 DP600,DP800,DP980 和 TRIP780 等高强度钢有较明显的滞后回弹。其后,Wang 等人^[4]通过试验和模拟,研究了四种铝合金的滞后回弹行为,结果表明截至卸载 15 个月后,滞后回弹占总回弹量的比例最大可达 18%,并得出这种滞后的应力回复现象不太可能是金属的滞弹性的结果,而更可能与应力驱动的常温下的蠕变有关的观点。通过“残余应力驱动蠕变”模型,将弹塑性材料模型在卸载后替换为蠕变材料模型进行滞后回弹的模拟,其得到的结果约是实测值的 2 倍。E 等人^[5]之前的研究发现 1Cr18Ni9Ti 不锈钢管回转牵引弯曲滞后回弹现象明显,占总回弹角度的占比较大,并通过弹塑性理论推导出滞后回弹角度预测方法。孙帅等人^[6]基于黏弹性理论拟合了典型汽车用板材的滞后回弹规律,具有较好的拟合优度。

1Cr18Ni9Ti 不锈钢管室温拉伸即表现出黏性特征^[7],与弹塑性变形量相比不够明显,往往被忽略,但在考虑与时间和加载历程有关的滞后回弹时,单凭黏弹性理论或弹塑性理论进行分析,会引起较大的误差。为揭示 1Cr18Ni9Ti 管滞后回弹变形规律,提高成形精密性和尺寸稳定性,基于试验及黏弹性力学理论,提出黏弹塑性材料模型,对试验结果进行拟合并处理得到相应的黏弹塑性材料参数。采用上述材料模型及有限元分析软件 ABAQUS 对管材拉伸和回转牵引弯曲后的滞后回弹现象进行模拟预测。

1 1Cr18Ni9Ti 不锈钢管变形试验

1.1 单轴拉伸试验

1Cr18Ni9Ti 不锈钢管轴向拉伸、应力松弛和滞后回弹试验在 DWD-100E 电子万能试验机上进行,管段试样长度 $L_0 = 160$ mm,外径 $d_0 = 6$ mm,壁厚 $t_0 = 1$

mm,从同一根管上取样。为尽可能保证单轴拉伸过程中管材的单向应力状态,试样两端加以 30 mm 长的金属塞头^[8],并使用 50 mm 引伸计采集变形和滞后回弹数据。

1.2 回转牵引弯曲试验

截取长度为 300 mm 的 1Cr18Ni9Ti 管段试样进行回转牵引弯曲试验,试验设备为 NC-38 型数控弯管机,相对弯曲半径 $R/d = 3$,弯曲速度为 $30(^{\circ})/s$,弯曲角度为 180° 。在卸载 10 s 到 60 d 时间内,参考铝板拉弯滞后回弹测量方法^[9],分别描下关键时刻弯曲试样两直边的内轮廓 3 次,扫描得到弯管轮廓的数字图像,利用 Photoshop 软件处理后,测量计算得到滞后回弹角度的平均值。

2 双耗散黏弹塑性材料模型 (Two-layer viscoplasticity model)

双耗散黏弹塑性材料模型最初由 Kichenin^[10] 等人提出,常用于兼有明显时间依赖行为和塑性行为表现的材料建模,又称双层黏弹塑性模型,其已经集成在有限元分析软件 ABAQUS 中^[11],并在部分金属和非金属材料的模拟中取得良好的结果^[12-13]。其一维材料模型由弹塑性组合单元和黏弹性 (Maxwell 模型) 组合单元并联而成,如图 1 所示。黏弹性模型的总应变由弹簧应变和阻尼器应变相加而得,应变作用导致瞬时应力,当保持应变时应力将不断减小,随着时间无限增加,可使应力衰减至零,因此,能够反映材料的率相关及时间相关的行为,而弹塑性组合单元则能表征材料的瞬时响应和永久变形,其中 K_p , K_v 分别是弹塑性组合单元和黏弹性组合单元的弹性模量, σ_y 是初始屈服强度, H' 是硬化系数, A , n 是 Norton-Hoff 模型黏弹性材料常数。

采用各向同性弹性和多线性硬化规律,在 2 个单

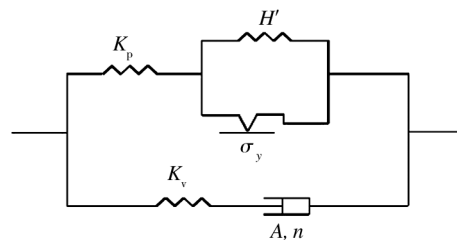


图 1 一维双耗散黏弹塑性材料模型

Fig. 1 One-dimensional idealization of the two-layer viscoplasticity model

元中泊松比保持一致。弹塑性组合单元中的应力可以写为:

$$\begin{cases} \sigma_p = K_p \varepsilon & \sigma_p \leq \sigma_y \\ \sigma_p = K_p \varepsilon + H' \left(\varepsilon - \frac{\sigma_y}{K_p} \right) & \sigma_p \geq \sigma_y \end{cases}$$

假设黏弹性组合单元的力学行为符合 Norton-Hoff 指数型率法则,即:

$$\dot{\varepsilon} = A \sigma_v^n$$

其中, σ_v 为黏弹性组合单元中的应力或叫过应力,上式变形得:

$$\sigma_v = A^{-\frac{1}{n}} \dot{\varepsilon}^{\frac{1}{n}}$$

即为黏弹性组合单元的本构关系。假设弹塑性组合单元和黏弹性组合单元相互独立,模型的总应力 σ 为弹塑性组合单元应力 σ_p 和黏弹性组合单元应力 σ_v 之和,即:

$$\sigma = \sigma_p + \sigma_v$$

双耗散黏弹塑性材料模型覆盖了弹性、塑性和黏性变形,弹性变形在弹塑性组合单元和黏弹性组合单元中均发生,在 ABAQUS 中引入参数 f 来定义黏弹性组合单元与总弹性模量(瞬态弹性模量)的比值:

$$f = \frac{K_v}{K_p + K_v}$$

3 材料模型参数的确定和建模

3.1 双耗散黏弹塑性材料参数的确定

为了获取 1Cr18Ni9Ti 管上述弹性模量 K_p, K_v , 初始屈服应力 σ_y 及 Norton-Hoff 常数 A, n , 首先进行应变率分别为 $\dot{\varepsilon} = 10^{-4}, 10^{-3}, 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 的单轴拉伸试验, 其应力应变曲线如图 2 所示。为了获得初始屈服强度以及理论静态拉伸曲线, 采用 $\dot{\varepsilon} = 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 进行工程应变分别为 $\varepsilon = 5\%, 10\%, 15\%$ 的应力松弛试验, 松弛时间 $t = 4 \text{ h}$ 。将应力松弛试验结果进行多阶指数拟合并外推所得最终松弛应力近似为该应变条件下的静态拉伸应力值, 通过上述不同应变率拉伸和应力松弛试验结果, 进行插值计算, 近似得到如图 2 所示 1Cr18Ni9Ti 管理论静态变形时的应力应变曲线, 并认为对应于不同 $\dot{\varepsilon}$ 的单轴拉伸应力经过松弛最终将达到理论静态拉伸曲线上的应力水平, 由该理论静态拉伸曲线处理得到初始屈服强度 σ_y 和理论静态拉伸塑性应力应变数据。

图 2 还显示出不同 $\dot{\varepsilon}$ 拉伸时管材硬化趋势基本一致, 即黏弹性组合单元中的过应力变化不大。为获

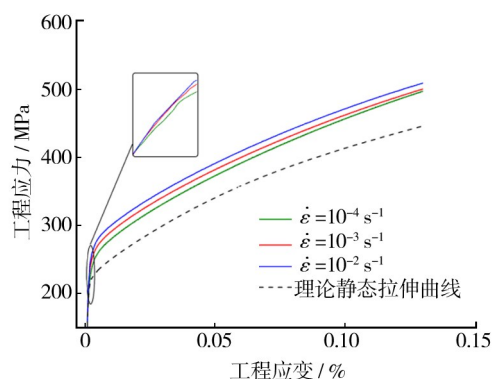


图 2 1Cr18Ni9Ti 管不同应变率下单轴拉伸应力-应变曲线
Fig. 2 Test strain-stress results of uniaxial tension at different strain rates

得黏弹性组合单元中的材料参数 A, n , 提取 $\varepsilon = 10\%$ 时不同 $\dot{\varepsilon}$ 对应的过应力, 利用 Norton-Hoff 公式进行拟合, 结果如下:

$$\dot{\varepsilon} = 2.3722 \times 10^{-26} \times \sigma_v^{13.4684}$$

模型的瞬态弹性模量 ($K_p + K_v$) 可通过较高应变率下单向拉伸初始弹性阶段的试验数据拟合获得。通过图 2 中的局部放大可以看出, 在弹性阶段中、后期的应力应变曲线斜率发生明显的降低, 其降低值随着应变率 $\dot{\varepsilon}$ 的降低依次为: 39, 64, 72 GPa。相比之下, $\dot{\varepsilon} = 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 时更接近于静态拉伸, 因而近似取其拉伸曲线斜率的降低值为 K_v 。最终确定材料黏弹塑性参数如下: $A = 2.3722 \times 10^{-26}$, $n = 13.4684$, $K_p + K_v = 185 \text{ GPa}$, $\nu = 0.3$, $\sigma_y = 221 \text{ MPa}$, $f = 0.39 \text{ mm/min}$ 。

3.2 拉伸和弯曲滞后回弹的模拟

基于上述双耗散黏弹塑性材料模型, 利用 ABAQUS 对 1Cr18Ni9Ti 不锈钢管拉伸和回转牵引弯曲后的滞后回弹进行模拟^[14-16]。弯曲有限元模型如图 3 所示, 管材采用 C3D8I 三维实体非协调单元, 并采用各向同性强化法则和 Von-Mises 屈服准则。滞后回弹的模拟分为成形和卸载回弹两步, 材料的黏弹塑

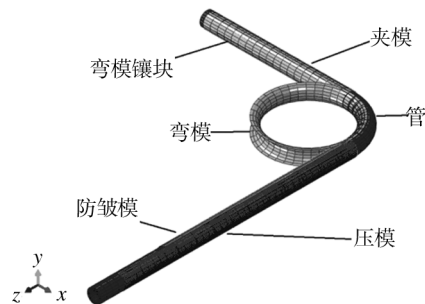


图 3 1Cr18Ni9Ti 管回转牵引弯曲有限元模型
Fig. 3 Computational model of the 1Cr18Ni9Ti tube

性在两个分析步中始终体现并且连续变化,分析均采用隐式求解算法。

4 结果与讨论

4.1 1Cr18Ni9Ti 管拉伸变形的滞后回弹

为了操作方便,将拉伸卸载 10 s 后的回弹记为滞后回弹,应变率 $\dot{\varepsilon} = 2.5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 、工程应变 $\varepsilon = 5\%$ 、 15% 、 25% 的 3 组试验及有限元模拟的滞后回弹变形-时间曲线如图 4 所示。可以看出,拉伸变形量较小($\varepsilon = 5\%$)时滞后回弹测试值与有限元模拟结果偏差较大,而拉伸至中等应变水平($\varepsilon = 15\%$)时,测试值与有限元模拟结果吻合良好。

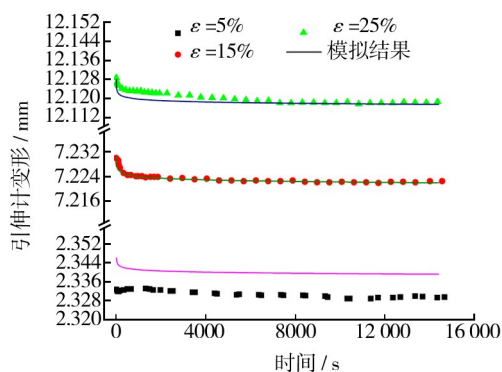


图 4 不同变形量滞后回弹的试验和有限元模拟结果

Fig. 4 Simulated and experimental results of time-dependent springback at different strain

由图 4 还可看出,随着预变形量增大,滞后回弹曲线的下降趋势有所增大。利用引伸计测得 4 h 内滞后回弹量分别达到 0.0032, 0.0079, 0.010 mm, 与模拟所得 0.0068, 0.0074, 0.0087 mm 相比,在中高预变形量时,二者比较接近。

有限元模型中典型节点的应力-时间变化曲线如图 5 所示,由于材料模型中弹塑性组合单元的弹性变形大于黏弹性组合单元的弹性变形量,前者的弹性变形量不能完全卸载,导致黏弹性组合单元受压,驱动其持续产生不可逆黏性变形,即滞后回弹。

4.2 1Cr18Ni9Ti 管回转牵引弯曲的滞后回弹

图 6 为 1Cr18Ni9Ti 管弯曲滞后回弹角在 60 d 时间内变化的试验测试和有限元模拟结果,二者的变化趋势基本一致,与拉伸结果类似,卸载即刻发生瞬时弹性回复之后,弯管单元内部仍残存有反向残余应力,促使先期滞后回弹以相对较快的速度发展,随着

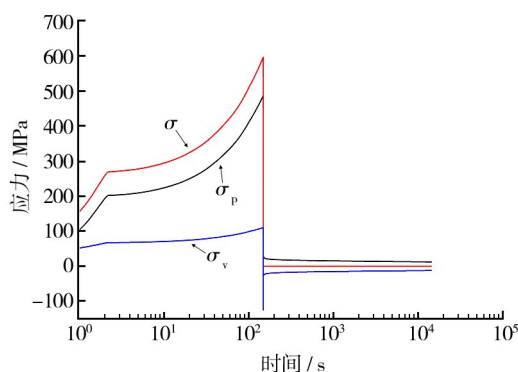


图 5 单轴拉伸模拟中节点应力-时间变化曲线

Fig. 5 Simulated uniaxial tensile stress-time curves of a typical node

黏弹性变形的发生,残余应力明显降低的同时,回弹开始进入极缓慢的发展阶段。试验测得的滞后回弹量达到 0.73° , 模拟结果为 0.53° , 其误差与材料等向强化假设和相关参数的近似有关。由图还可看出,改变材料黏弹性组合单元弹性模量占比 f 值对对对滞后回弹的模拟结果影响显著,总滞后回弹量随 f 值增大而增大。

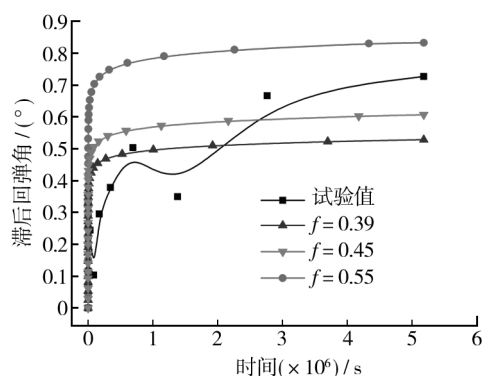


图 6 1Cr18Ni9Ti 管回转牵引弯曲滞后回弹角试验和模拟结果

Fig. 6 Simulated and experimental time-dependent springback angles of 1Cr18Ni9Ti tube after rotary bending

5 结论

1) 采用双耗散黏弹塑性材料模型对试验分析的结果表明,管材塑性变形卸载发生瞬时回弹后,弹塑性组合单元中的弹性变形回复并不充分,在黏弹性组合单元中的残余压缩应力驱动其继续变形,应是滞后回弹的产生原因之一。

2) 黏弹性应变率近似为过应力的 n 次幂函数,对于 1Cr18Ni9Ti, 远大于 1, 滞后回弹阶段,过应力进一步衰减使应变率迅速降低,表现为滞后回弹的发展速度迅速降低。

3) 材料参数 对滞后回弹影响显著,有限元模拟结果表明随着 值的增大,弹塑性组合单元和黏弹性组合单元中的残余应力值越大,总的滞后回弹量呈增大的趋势越显著。

参考文献:

- [1] 陈吉生. 典型管板弯曲回弹与滞后回弹的试验及有限元分析[D]. 北京:北京理工大学,2012.
CHEN Ji-sheng. Experiments and Finite Element Analysis on Springback and Time-dependent Springback of Typical Tube and Sheet under Bending[D]. Beijing:Beijing Institute of Technology,2012.
- [2] WAGONER R H, CARDEN W D, CARDEN W P, et al. Springback after Drawing and Bending of Metal Sheets[J]. Intelligent Processing and Manufacturing of Materials, 1997,1:1—10.
- [3] LIM H, LEE M G, SUNG J H. Time-dependent Springback of Advanced High Strength Steels[J]. International Journal of Plasticity,2012,29(2):42—59.
- [4] WANG J F, WAGONER R H, CARDEN W D, et al. Creep and Anelasticity in the Springback of Aluminum[J]. International Journal of Plasticity,2004,20(12):2209—2232.
- [5] E Da-xin, LIU Ya-fei. Springback and Time-dependent Springback of 1Cr18Ni9Ti Stainless Steel Tubes under Bending[J]. Materials & Design,2010,31(3):1256—1261.
- [6] 孙帅,鄂大辛,李悦,等. 典型汽车用板变形滞后回弹的试验及本构建模[J]. 汽车工艺与材料,2014,12:51—54.
SUN Shuai, E Da-xin, LI Yue, et al. Experiment and Modeling of Time-dependent Springback of Typical Automobile Steel Steel Sheets[J]. Automobile Technology & material, 2014,12:51—54.
- [7] 杨显杰,高庆,蔡力勋. 1Cr18Ni9Ti 不锈钢单轴变形行为的试验研究[J]. 西南交通大学学报,1994,29(2):131—135.
YANG Xian-jie, GAO Qing, CAI Li-xun. Experimental Research on the Uniaxial Deformation Behavior of 1Cr18Ni9Ti Stainless Steel[J]. Journal of Southwest Jiaotong University. 1994,29(2):131—135.
- [8] 刘娟,鄂大辛,张敬文. 小直径薄壁管直接拉伸方法研究[J]. 实验技术与管理,2012,29(3):56—58.
LIU Juan, E Da-xin, ZHANG Jing-wen. Study on Tensile Method of Thin-walled Tube with Small Diameter[J]. Experimental Technology and Management,2012,29(3):56—58.
- [9] CARDEN W D, GENG L M, MATLOCK D K, et al. Measurement of Springback[J]. International Journal of Mechanical Sciences,2002,44(1):79—101.
- [10] KICHENIN J, DANG K V, BOYTARDK. Finite-element Simulation of a New Two-dissipative Mechanisms Model for Bulk Medium-density Polyethylene[J]. Journal of Materials Science,1996,31(6):1653—1661.
- [11] ABAQUS inc. Abaqus Analysis User's Guide Version 6. 14 [K]. 2014.
- [12] LUKASZF, GUNTHERB. Modelling the High-temperature Longitudinal Fatigue Behaviour of Metal Matrix Composites (SiC/Ti-6242): Nonlinear Time-dependent Matrix Behaviour[J]. International Journal of Fatigue,2008,30(2):268—276.
- [13] SOLASI R, ZOU Y, HUANGX, et al. A Time and Hydration Dependent Viscoplastic Model for Polyelectrolyte Membranes in Fuel Cells[J]. Mechanics of Time-Dependent Materials, 2008,12(1):15—30.
- [14] 陈吉生,鄂大辛,张敬文. 材料模型对 1Cr18Ni9Ti 管材拉伸有限元仿真的影响[J]. 精密成形工程,2012,4(4):10—12.
CHEN Ji-sheng, E Da-xin, ZHANG Jing-wen. Effects of Material Models on Finite Element Simulation for Uniaxial Tension of 1Cr18Ni9Ti Tube[J]. Journal of Netshape Forming Engineering,2012,4(4):10—12.
- [15] 詹梅,杨合,栗振斌. 管材数控弯曲回弹规律的有限元分析[J]. 材料科学与工艺,2004,12(4):349—352.
ZHAN Mei, YANG He, LI Zhen-bin. FEM Numerical Analysis of Springback Law of NC Tube Bending[J]. Materials Science & Technology,2004,12(4):349—352.
- [16] E Da-xin, HE Hua-hui, LIU Xiao-yi, et al. Experimental Study and Finite Element Analysis of Spring-back Deformation in Tube Bending[J]. International Journal of Minerals Metallurgy & Materials,2009,16(2):177—183.