

工艺参数对自由推压缩径管坯残余应力的影响

刘 超^{1,2}, 吴 娜³, 杨志安⁴, 张士强³

(1. 唐山学院 交通与车辆工程系, 河北 唐山 063000;

2. 唐山学院 河北省智能装备数字化设计及过程仿真重点实验室, 河北 唐山 063000;

3. 苏州城市学院 智能制造与智慧交通学院, 江苏 苏州 215104; 4. 唐山亚特专用汽车有限公司, 河北 唐山 063000)

摘要: 针对自由推压缩径管坯弯曲疲劳寿命降低以及缩径时出现端部轴向开裂的问题, 通过分析自由推压缩径的变形过程, 揭示出缩径后已变形区内、外表面层存在较大的残余应力。使用有限元软件 ABAQUS 模拟了管坯的 3 道次自由推压缩径过程, 给出已变形区内轴向、周向及径向残余应力沿长度方向、壁厚方向的分布规律, 并分析了摩擦因数、缩径凹模出口圆角半径、缩径次数以及管坯的初始壁厚对缩径后残余应力的影响。对管坯进行了 3 道次缩径试验, 实测了几何参数的变化, 实测结果与有限元模拟值吻合, 试验中发现第 3 次缩径时管坯出现了轴向开裂现象, 证明了管坯内的周向残余拉应力值大于材料的强度极限。

关键词: 自由推压缩径; 残余应力; 轴向开裂; 摩擦因数; 变形不均匀

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.04.013

中图分类号: TG316

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 04-0095-08

Influence of process parameters on residual stress of tube blank in free pushing diameter-reducing

Liu Chao^{1,2}, Wu Na³, Yang Zhian⁴, Zhang Shiqiang³

(1. Department of Transportation and Vehicle Engineering, Tangshan University, Tangshan 063000, China;

2. Key Laboratory of Intelligent Equipment Digital Design and Process Simulation of Hebei Province, Tangshan University, Tangshan 063000, China; 3. College of Intelligent Manufacturing and Intelligent Transportation, Suzhou City University,

Suzhou 215104, China; 4. Tangshan Yate Special Vehicle Co., Ltd., Tangshan 063000, China)

Abstract: For the problems of reduced bending fatigue life of free pushing diameter-reducing for tube blanks and axial cracking at the end when the diameter was reduced, the deformation process of the free pushing diameter-reducing was analyzed, and it was revealed that there was a large residual stress in the inner and outer surface layers of the deformed area after the diameter was reduced. Therefore, the three-pass free pushing diameter-reducing process of tube blank was simulated by finite element software ABAQUS, and the distribution laws of the residual stress for the axial, circumferential and radial directions in the deformed area along the length direction and the wall thickness direction were obtained. Furthermore, the influences of friction coefficient, outlet radius of diameter-reducing die, diameter-reducing times and initial wall thickness of tube blank on the residual stress after diameter-reducing were analyzed. Finally, three-pass diameter-reducing tests were carried out on the tube blank, and the geometric parameter changes were measured, and the measured results were in good agreement with the finite element simulation values. It is found that the axial cracking occurs in the third diameter-reducing, which proves that the circumferential residual tensile stress is greater than the strength limit of material.

Key words: free pushing diameter-reducing; residual stress; axial cracking; friction coefficient; uneven deformation

自由推压缩径因具有模具结构简单、单次缩径

变形量大、生产效率高等优势, 已经被广泛用于飞机、汽车、工程机械、动力机械中管件的制造。关于缩径的研究, 多数学者关注缩径力及缩径后的变形。早期学者主要应用主应力法给出了缩径力的表达式, 并分析了缩径工艺参数对变形的影响, 并认为缩径后的管坯内部无应力或存在很小的应力^[1]。彭俊阳等^[2]选取不同直径的管坯进行了不同缩径系数的试验, 研究了缩径过程中壁厚分布以及最大轴向力的变化规律, 确定了最大缩径力以及极限缩径

收稿日期: 2022-05-06; 修订日期: 2022-08-19

基金项目: 唐山市科技计划项目 (21130206D); 河北省特种运载装备重点实验室开放基金课题; 市级应用基础研究和人才培养专项 (22130211G)

作者简介: 刘 超 (1982-), 男, 博士, 讲师

E-mail: 33430794@qq.com

通信作者: 吴 娜 (1980-), 女, 博士, 副教授

E-mail: wunn@tsc.edu.cn

系数。陈国强^[3]对管坯进行了 4 道次缩径, 实测了不同摩擦因数下的几何参量, 试验结果表明管坯伸长的同时壁厚增厚。缩径管坯的端部直径大于直臂均匀区的直径, 即存在翘曲现象^[4], 可通过在缩径凹模尾部设置校形凹模以消除端部翘曲^[5]。

本文作者近期在胀压成形汽车桥壳预成形大变形缩径时发现: 缩径后管件的弯曲疲劳寿命并未由于缩径变形强化而提高, 反而低于初始母材的寿命; 部分管坯缩径时, 端部出现轴向开裂现象。缩径后管坯弯曲疲劳寿命低于初始母材的寿命, 同时管件端部存在翘曲等变形, 说明管坯存在一定的残余应力, 其主要源于变形的不均匀。李连进等^[6]运用有限元数值模拟了无缝钢管轧制定径过程中管坯内部的残余应力, 结果表明: 残余应力随着定径压下量的增加成比例上升, 高温定径的残余应力显著小于常温定径的残余应力。张琦等^[7]使用 ABAQUS 软件研究了轴拉伸加工过程中, 塑性变形对管内的残余应力的调控方法, 分析了不同拉伸率、不同加工情况对管坯残余应力的影响。Sadok L 等^[8]分析了钢管缩口的变形过程, 并实际测量了管坯变形的不均匀性, 结果表明, 在钢管内表面出现了最大应变。Hirsch T K 等^[9]揭示了管坯的残余应力是由于缩径管坯的变形不均匀性造成的。Gattmah J 等^[10]研究了固定芯棒拉拔的管坯残余应力, 测量了管坯外表面残余应力, 表明管坯外表面为周向拉应力、内表面为周向压应力。Vollert F 等^[11]研究了无芯棒拉拔和固定芯棒拉拔两种工艺对于钢管残余应力的影响规律, 结果表明, 两种工艺作用下管坯的内、外表面均存在周向和轴向残余应力。刘恒等^[12]针对管坯自由推压缩径的残余应力状态进行了分析, 使用 X 射线衍射法进行了试验测量, 试验与分析结果相吻合。

大变形自由推压缩径时, 管坯存在复杂的残余应力, 且缩径工艺参数对于残余应力有重要的影响, 但工艺参数对于大变形自由推压缩径管坯残余应力的影响规律, 尚未见相关的文献报道。本文通过分析大变形自由推压缩径变形过程, 分析了变形区内存在的残余应力的状态, 并通过有限元模拟给出残余应力的分布规律以及主要工艺参数对残余应力的影响。

1 自由推压缩径变形残余应力分析

初始外半径为 r_0 、初始壁厚为 t_0 的管坯在自由推压缩径后, 管坯内壁处于自由状态, 外半径减至 r_m (小于凹模内径 r)、壁厚增加至 t_1 , 缩径凹模的

半锥角为 α , 锥面与缩径凹模出口处的圆角半径为 R_a , 如图 1 所示。根据管坯的变形特征将缩径管坯分为 5 个区域: 传力区 I、入口弯曲区 II、缩径区 III、出口弯曲区 IV、已变形区 V 和翘曲区 VI。在传力区 I, 质点近似处于单向压应力 σ_p 状态; 在入口弯曲区 II, 周向残余应力 σ_θ 、径向 (即壁厚方向) 残余应力 σ_n 均为压应力, 轴向残余应力 σ_p 在管坯的外表面侧为拉应力、在管坯的内表面侧为压应力; 在缩径区 III, 质点处于三向压应力状态, 其中周向残余压应力的绝对值最大; 在出口弯曲区 IV, 金属的变形以轴向弯曲为主, 管坯的外表面侧受到轴向压应力, 引起轴向压缩变形, 内表面侧受到轴向拉应力, 引起轴向伸长变形; 在已变形区 V, 管坯不受模具的约束, 管坯内、外表面的金属沿轴向产生与弯曲变形相反的变形回弹, 相当于在外表面层加上轴向拉应力, 在内表面层加上轴向压应力, 导致外表面层存在轴向残余拉应力 σ_p 、内表面层存在轴向残余压应力 σ_p ; 在翘曲区 VI, 由于管坯内表面层的轴向伸长大于外表面层, 端部向上翘曲, 存在剪切变形, 导致单元体下表面存在自左向右的剪切应力 τ 、右表面存在自上向下的剪切应力 τ 、左表面存在自下向上的剪切应力 τ 。下面重点分析已变形区 V 内的残余应力状态。

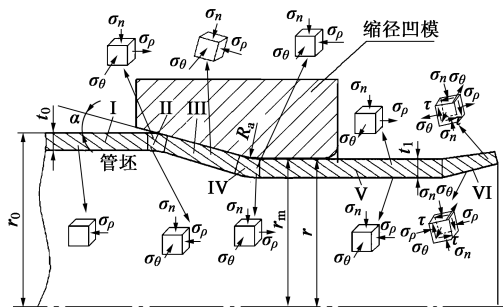


图 1 自由推压缩径管坯力学模型

Fig. 1 Mechanical model of tube blank for free pushing diameter-reducing

(1) 轴向残余应力 σ_p

在出口弯曲区, 金属材料发生了轴向弯曲变形, 外表面层金属缩短、内表面层金属伸长, 金属经由出口弯曲区流出后, 金属不再受外力作用, 管坯内、外表面层金属沿轴向产生与弯曲变形相反的变形回弹, 使轴向伸长变形较小的外表面层金属伸长、轴向残余伸长变形较大的内表面层金属缩短, 导致外表面层存在轴向残余拉应力、内表面层存在轴向残余压应力, 而且从出口弯曲区到管坯端部, 轴向残余应力的数值逐渐减小至零。若缩径凹模与管坯之间的摩

擦因数较大, 导致管坯外表面金属受到较大的轴向压应力, 其缩短变形增大, 内、外层金属变形不均匀性进一步增大, 缩径产生的残余应力可能加大。

在出口弯曲区Ⅳ截取微单元体, 如图2所示。 R_i 为出口弯曲区的最大内径, R_e 为出口弯曲区的最小内径, 弯曲之前的轴向方向与弯曲之后的轴向方向之间的夹角为 α , $d\alpha$ 为微单元体所成夹角, 弯曲前管坯壁厚为 t_a 。假设变形前微单元体径向截面垂直于管坯表面, 则变形后微单元体径向截面亦垂直于管坯表面。反向弯曲时, 管坯外表面与缩径凹模出口处的圆角贴合。

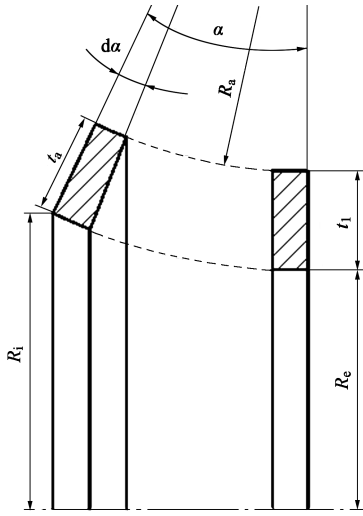


图2 出口弯曲区微单元体变形示意图

Fig. 2 Deformation schematic diagram of micro unit in outlet bending zone

出口弯曲区Ⅳ内表面金属各向应变为:

$$\varepsilon_\rho = \varepsilon_{\rho i} - \ln \frac{R_a}{R_a + t_a} \quad (1)$$

$$\varepsilon_\theta = \ln \frac{R_e + t_1}{R_i + \frac{t_a}{\cos \alpha}} \quad (2)$$

$$\varepsilon_n = -(\varepsilon_\rho + \varepsilon_\theta) \quad (3)$$

式中: ε_ρ 为单元体内表面轴向应变; $\varepsilon_{\rho i}$ 为单元体外表面轴向应变; ε_θ 为单元体内表面周向应变; ε_n 为单元体内表面径向应变。

由式(1)可知, 反向弯曲变形阶段, 管坯内、外层金属的轴向延展变形不同, 缩径凹模出口圆角半径 R_a 越大, 内、外层轴向延展变形差异越小, 变形不均匀性越小, 存留的残余应力值越小。

(2) 径向(壁厚方向)残余应力 σ_n

在缩径区Ⅲ, 管坯外表面与缩径凹模型腔接触

引起外表面金属受到径向残余压应力 σ_n 的作用, 在内表面处降至零; 在出口弯曲区Ⅳ, 轴向弯曲引起金属材料在径向产生附加的压应力, 致使管坯内的径向残余压应力数值增加, 而且在管坯外表面附近达到最大值。由于缩径后管坯内表面的轴向伸长量大于外表面, 致使在已变形区的端部内表面侧金属带动外表面侧金属产生向外的弯曲即翘曲, 使得径向残余压应力 σ_n 的最大值向内表面层转移。

(3) 周向残余应力 σ_θ

在已变形区内截取轴向长度为 dl 、周向夹角为 $d\beta$ 的基元体, 包含管坯外表面的微元体1和包括管坯内表面的微元体2, 如图3所示。微元体1外层的周向曲率半径为 r_1 、轴向曲率半径为 $r_{\rho 1}$, 厚度为 $t_1/2$, 周向残余应力为 $\sigma_{\theta 1}$, 轴向受到轴向残余拉应力 $\sigma_{\rho 1}$ 的作用, 内层受到径向残余压应力 $\sigma_{n 1}$ 的作用; 微元体2内层的周向曲率半径为 $r_1 - t_1/2$ 、轴向曲率半径为 $r_{\rho 2}$, 厚度为 $t_1/2$, 周向残余应力为 $\sigma_{\theta 2}$, 轴向受到轴向残余压应力 $\sigma_{\rho 2}$ 的作用, 外层受到径向残余压应力 $\sigma_{n 2}$ 的作用。

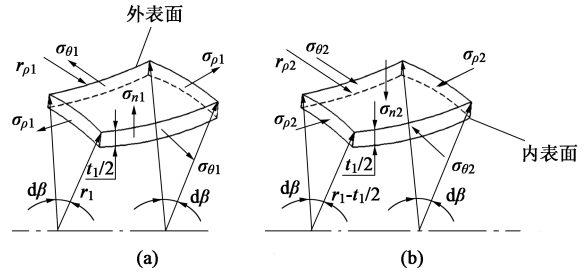


图3 微元体受力分析

(a) 微元体1 (b) 微元体2

Fig. 3 Force analysis of micro units

(a) Micro unit 1 (b) Micro unit 2

针对微元体1, 由径向的受力平衡条件(图3中所标示方向的应力分量均按正值处理)得到:

$$\frac{\sigma_{\theta 1}}{r_1} = \frac{\sigma_{n 1}}{t_1/2} + \frac{\sigma_{\rho 1}}{r_{\rho 1}} \quad (4)$$

同样道理, 根据微元体2径向的力平衡条件, 得到:

$$\frac{\sigma_{\theta 2}}{r_1 - t_1/2} = \frac{\sigma_{n 2}}{t_1/2} + \frac{\sigma_{\rho 2}}{r_{\rho 2}} \quad (5)$$

在已变形区的直臂部分, 轴向曲率半径趋近无穷大, 式(4)、式(5)可简化为:

$$\sigma_{\theta 1} = \frac{r_1}{t_1/2} \sigma_{n 1} \quad (6)$$

$$\sigma_{\theta 2} = \frac{r_1 - t_1/2}{t_1/2} \sigma_{n 2} \quad (7)$$

由此可知,微元体 1 的周向残余应力 $\sigma_{\theta 1}$ 取决于其内层的径向残余应力 σ_{r1} 和外层的周向曲率半径 r_1 , σ_{r1} 为残余压应力,则 $\sigma_{\theta 1}$ 为残余拉应力,而且 $\sigma_{\theta 1}$ 与 r_1 成正比、与 t_1 成反比,较大的壁厚 t_1 有可能使周向残余应力 $\sigma_{\theta 1}$ 较小;微元体 2 的周向残余应力 $\sigma_{\theta 2}$ 取决于其外层的径向残余应力 σ_{r2} 和内层的周向曲率半径 $(r_1 - t_1/2)$, σ_{r2} 为残余压应力,则 $\sigma_{\theta 2}$ 为残余压应力,而且 $\sigma_{\theta 2}$ 与 $(r_1 - t_1/2)$ 成正比,较大的壁厚 t_1 有可能使周向残余应力 $\sigma_{\theta 2}$ 较小。

2 自由推压缩径有限元模拟

2.1 缩径工艺简介

选取初始外径为 $\Phi 102$ mm、壁厚为 5.5 mm、长度为 565 mm 的 Q345B 无缝钢管,保留中间长度为 300 mm 的部分不变形,对其两端进行 3 次缩径,缩径锥形凹模的内径(管坯缩径后的理论外径)分别为 $\Phi 92$ 、 $\Phi 83$ 和 $\Phi 75$ mm,半锥角均为 18° ,如图 4 所示,其中, $t_1 \sim t_3$ 分别为第 1 次~第 3 次缩径后的管坯壁厚, $L_0 \sim L_3$ 分别为初始管坯、第 1 次~第 3 次缩径后的管坯的总长度。管坯的屈服强度 R_{eL} 为 350 MPa,抗拉强度 R_m 为 510 MPa,单向拉伸的均匀伸长率 A 为 25%,硬化指数 n 为 0.19,弹性模量为 210 GPa,泊松比为 0.3,材料的真实应力 σ 和真实应变 ε 关系用式 (8) 表示:

$$\sigma = 650\varepsilon^{0.2} \quad (8)$$

2.2 有限元模型的建立

应用 ABAQUS 软件对管坯缩径过程进行数值模拟。由于管坯以及缩径模具均属于轴对称结构,模拟时建立管坯与模具的 1/4 有限元模型,如图 5 所示,网格采用四面体单元,壁厚方向上网格单元的层数为 7 层,周向上的单元长度设为 1 mm,轴向上的单元长度设为 1 mm。缩径时的摩擦因数 f 选为 0.10,缩径凹模出口圆角半径为 20 mm。

2.3 模拟结果及分析

2.3.1 管坯的几何参数变化

经过 3 次缩径后,管坯长度由 565 mm 依次增加至 574.8、585.7 和 595.6 mm,壁厚由 5.50 mm 依次增加至 6.00、6.45 和 6.81 mm,各道次的壁厚增加率分别为 9.09%、7.50% 和 5.58%。缩径后,已变形区直臂部分的外径依次为 $\Phi 90.76$ 、 $\Phi 81.61$ 和 $\Phi 74.04$ mm,分别较缩径凹模内径小 1.24、1.39 和 0.96 mm;端部均存在向外的翘曲,最外端的外径分别为 $\Phi 91.83$ 、 $\Phi 81.68$ 和 $\Phi 74.08$ mm,端部的

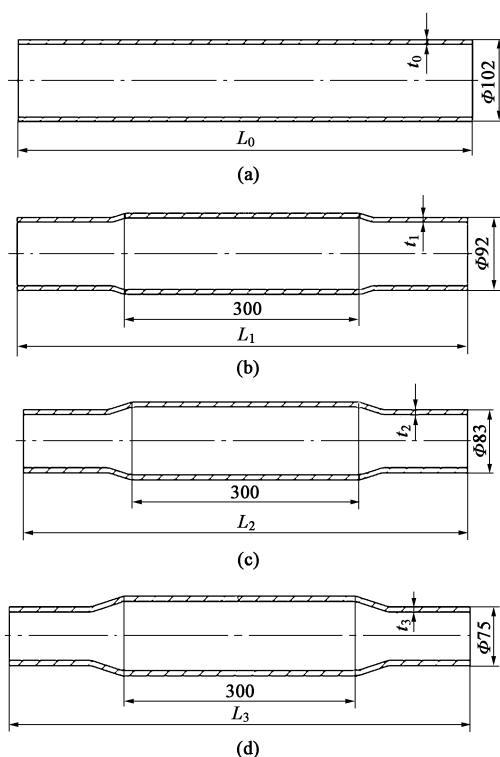


图 4 缩径工艺简图

(a) 初始管坯 (b) 第 1 次缩径后的管坯
(c) 第 2 次缩径后的管坯 (d) 第 3 次缩径后的管坯

Fig. 4 Schematic diagrams of diameter-reducing progress

(a) Initial tube blank

(b) Tube blank after the first diameter-reduction

(c) Tube blank after the second diameter-reduction

(d) Tube blank after the third diameter-reduction

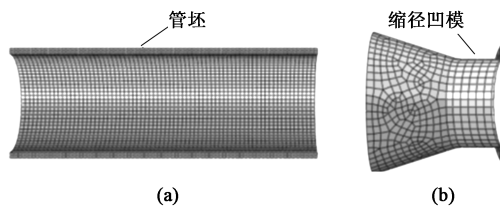


图 5 缩径管坯 (a) 与模具 (b) 的有限元模型

Fig. 5 Finite element models of diameter-reducing tube blank (a) and die (b)

翘曲值逐渐减小。

2.3.2 缩径后的残余应力

(1) 轴向、周向残余应力

以第 1 次缩径为例,阐述缩径过程中已变形区内的残余应力状态。第 1 次缩径结束时,管坯已变形区内的轴向残余应力、周向残余应力云图如图 6 所示。

在管坯直臂部分与出口弯曲区圆角相交处截取第 1 截面,再向管坯端部等间距截取 12 个横截面,其中第 11 截面位于直臂部分与翘曲部分的过渡处,

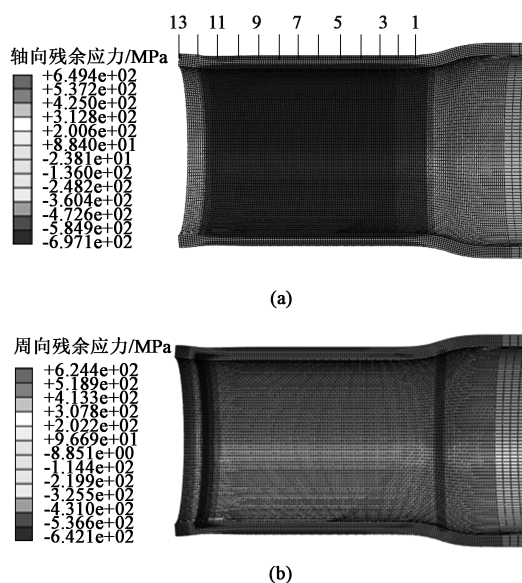


图6 管坯已变形区内的轴向和周向残余应力

(a) 轴向残余应力 (b) 周向残余应力

Fig. 6 Axial and circumferential residual stress in deformed area of tube blank

(a) Axial residual stress (b) Circumferential residual stress

第13截面位于端部。在内表面至外表面的8层有限元网格层上,分别选取在横截面或比邻横截面的7个单元节点,测量各节点上的轴向残余应力、周向残余应力,并绘制成曲线,如图7所示。图7中横轴上的数字代表每个截面的编号,随着编号的增加,截面位置越靠近管端区域。各截面壁厚方向上的质点位置(节点)以沿内表面向外表面方向增加的壁厚百分比表示(内表面为0、外表面为 t ,质点间隔为 $t/7$)。

由轴向残余应力的分布情况可知:在已变形区的直臂部分,轴向残余应力在 t (外表面)~ $4t/7$ 之间为拉应力,在 $3t/7$ ~ 0 之间为压应力,位于 $5t/7$ 和 $2t/7$ 位置处的残余应力数值较大。在第1截面上,外表面的残余拉应力值为583.76 MPa,内表面的残余压应力值为-597.56 MPa,残余应力极值出现在 $5t/7$ 和 $2t/7$ 处,分别为632.81和-681.28 MPa;第1截面~第3截面,外表面的残余拉应力逐渐增加至593.57 MPa并趋于稳定,内表面的残余压应力逐渐增加至-596.82 MPa并趋于稳定, $5t/7$ 和 $2t/7$ 处的残余应力分别稳定于635.25和-685.31 MPa;在第11截面后,各处的轴向残余应力快速减小至零。

由周向残余应力的分布情况可知:在已变形区的直臂部分, t ~ $5t/7$ 之间的周向残余应力为拉应力, $4t/7$ ~ 0 之间的为压应力, $6t/7$ 和 $3t/7$ 处的残余应力数值较大。在第1截面~第11截面,周向残

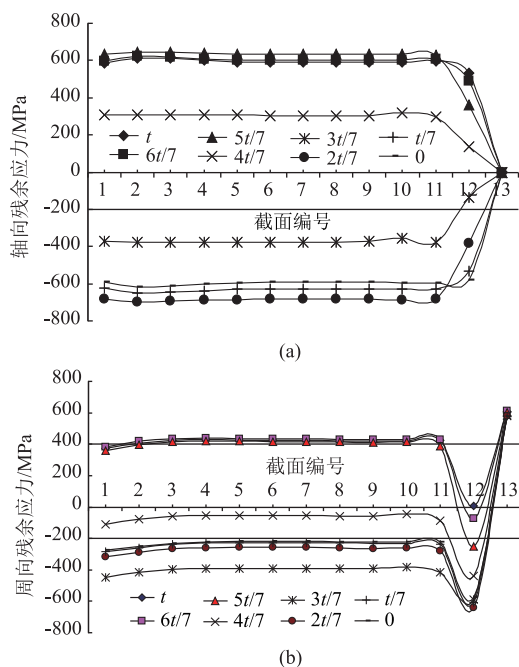


图7 缩径管坯内轴向和周向残余应力分布曲线

(a) 轴向残余应力 (b) 周向残余应力

Fig. 7 Distribution curves of axial and circumferential residual stresses in diameter-reducing tube blank

(a) Axial residual stress (b) Circumferential residual stress

余应力在外表面稳定在425 MPa左右、在内表面稳定在-220 MPa左右、在 $6t/7$ 处的周向残余应力为733 MPa、在 $3t/7$ 处的周向残余应力为-393 MPa;在第11截面~第12截面,外表面的周向残余应力快速降至0,内表面的周向残余压应力快速增加至-574.62 MPa, $6t/7$ 处的残余应力由429.63 MPa变至-72.22 MPa, $3t/7$ 处的残余应力由-417.52 MPa变至-588.33 MPa;在第12截面~第13截面,外表面的周向残余应力快速增加至608.64 MPa,内表面的残余应力由-574.62 MPa快速变化至576.54 MPa, $6t/7$ 和 $3t/7$ 两处的残余应力快速变化至611.24和579.32 MPa。

(2) 径向残余应力

为了揭示径向残余应力的分布,测量第1截面、第7截面、第11截面、第13截面上内表面至外表面各质点的径向残余应力,并绘制成曲线,如图8所示。由图8可知:在第1截面上,径向残余应力最大值为-14.07 MPa,位于 $6t/7$ 处,从 $6t/7$ 处至内表面,径向残余应力下降至零;在第7截面上,径向残余应力最大值为-22.73 MPa,位于 $5t/7$ 处,从 $5t/7$ 至内表面,径向残余应力下降至零;在第11截面上,径向残余应力的最大值减小至-13.49 MPa,移动到 $2t/7$ 处;在第13截面(位于

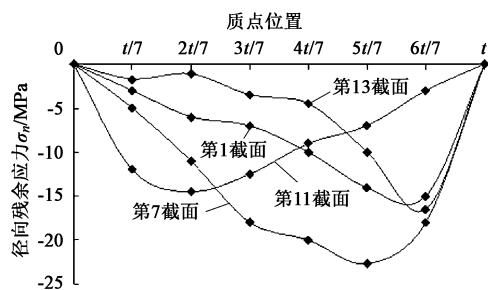


图 8 各截面径向残余应力图

Fig. 8 Radial residual stress diagram of each section

端部) 上, 径向残余应力最大值位于 $6t/7$ 处, 其值为 -16.08 MPa, 由此至内表面, 径向残余应力逐渐下降至零。

2.3.3 模拟结果分析

(1) 直臂部分

缩径后, 在管坯已变形区内, 直臂等径区壁厚方向相同位置的质点的各向残余应力数值在轴向上基本稳定。管坯金属内层 (管坯中径至内表面) 的轴向伸长量大于管坯外层 (管坯中径至外表面) 的轴向伸长量, 受弹性回弹的作用, 轴向残余应力呈现“外拉内压” (外层的轴向残余应力为拉应力, 内层的轴向残余应力为压应力) 状态, 外层残余应力数值大于内层; 周向残余应力亦呈现“外拉内压”状态, 其中压应力层向外扩大至 $4t/7$ 处。缩径后, 管件直臂部分存在“外拉内压”状态且数值较大的残余应力, 这是缩径后管坯弯曲疲劳寿命低于初始母材的寿命的主要原因。

(2) 翘曲区

管坯轴向不均匀变形造成翘曲现象, 且在端部产生刚体旋转, 管端亦发生周向变形, 进入翘曲区后各处周向残余应力迅速进入拉应力状态, 周向残余拉应力极值出现于端部, 该处内、外层较大的周向残余拉应力是造成管坯端部轴向开裂的主要原因。

3 工艺参数对残余应力的影响

3.1 摩擦因数对残余应力的影响

针对第 1 次缩径, 设定缩径凹模与管坯之间的摩擦因数 f 分别为 0.15 和 0.20, 进行缩径过程的模拟, 结果表明: 随着摩擦因数 f 由 0.10 增加至 0.15、0.20, 在直臂等径区中部第 7 截面上, 外表面的轴向残余应力由 563.48 MPa 增加至 573.41 和 579.78 MPa, 周向残余应力由 391.36 MPa 增加至

401.63 和 406.14 MPa, 内表面的轴向残余应力则由 -599.15 MPa 逐渐增大至 -605.39 和 -616.35 MPa, 周向残余应力由 -257.15 MPa 略增加至 -258.28 和 -258.39 MPa。

3.2 缩径凹模出口圆角半径对残余应力的影响

针对第 1 次缩径, 设定缩径凹模出口的圆角半径为 50、80 和 110 mm, 进行缩径过程的模拟, 测量截面选取第 7 截面 (直臂等径区中部) 与第 13 截面 (端部)。

从表 1 中的数据可以看出: 随着缩径凹模出口的圆角半径由 20 mm 增加至 50、80 和 110 mm, 在等径区第 7 截面上, 外表面的轴向残余应力由 633.74 MPa 减少至 593.09、540.69 和 496.60 MPa, 周向残余应力由 375.52 MPa 减少至 318.92、309.75 和 253.55 MPa; 内表面的轴向残余应力则由 -674.41 MPa 减小至 -624.70 、 -570.91 和 -523.57 MPa, 周向残余应力由 -433.15 MPa 减少至 -408.66 、 -386.26 和 -379.34 MPa。

表 1 缩径后管坯等径区的残余应力值 (MPa)

Table 1 Values of residual stress in isometric region of tube blank after diameter-reduction (MPa)

圆角半径/ mm	轴向残余应力		周向残余应力	
	外表面	内表面	外表面	内表面
20	633.74	-674.41	375.52	-433.15
50	593.09	-624.70	318.92	-408.66
80	540.69	-570.91	309.745	-386.26
110	496.60	-523.57	253.55	-379.34

由表 2 可知: 随着缩径凹模出口的圆角半径的增加, 管坯端部外表面的周向残余应力由 592.68 MPa 减少为 525.42、388.76 和 352.99 MPa, 内表面的周向残余应力则由 556.21 MPa 逐渐减小至 486.55、429.48 和 308.50 MPa。通过增加缩径凹模出口的圆角半径, 可以有效地降低管坯端部内、外表面的周向残余应力。

表 2 缩径后管坯端部周向残余应力值 (MPa)

Table 2 Values of circumferential residual stress at end of tube blank after diameter-reduction (MPa)

圆角半径/mm	外表面残余应力	内表面残余应力
20	592.68	556.21
50	525.42	486.55
80	388.76	429.48
110	352.99	308.50

3.3 管坯初始壁厚对残余应力的影响

针对第1次缩径, 设定初始管坯壁厚等于4.5和6.5 mm, 进行缩径过程的模拟。模拟结果表明: 随着初始壁厚由4.5 mm增加至5.5和6.5 mm, 在第7截面上, 外表面的周向残余应力由408.01 MPa略减小至396.78和393.57 MPa, 内表面的周向应力由-256.37 MPa逐渐减少至-246.59和-240.75 MPa, 管坯端部的残余应力值基本不变。

3.4 缩径次数对残余应力的影响

随着缩径次数的增加, 变形不均匀性逐渐增大, 且管坯材料逐渐硬化, 其残余应力值逐渐增大。针对初始壁厚为5.5 mm的管坯进行3次缩径, 摩擦因数 $f=0.10$, 缩径凹模出口的圆角半径为20 mm。模拟结果表明: 3次缩径中, 第13截面上的外表面周向残余应力值依次增加为549.25、603.76和608.09 MPa, 内表面的周向残余应力依次增加为505.14、531.56和533.43 MPa。

4 缩径试验

选取初始外径为 $\Phi 102$ mm、壁厚为5.5 mm、长度为565 mm的20无缝钢管管坯20支, 对其两端进行3次缩径, 保留中间长度320 mm的部分不变形, 缩径凹模的半锥角均为 18° , 内径分别为 $\Phi 92$ 、 $\Phi 83$ 和 $\Phi 75$ mm, 缩径凹模出口的圆角半径为30 mm。缩径过程中, 管坯与缩径凹模之间采用润滑脂润滑。缩径后管坯试件的形状如图9所示。

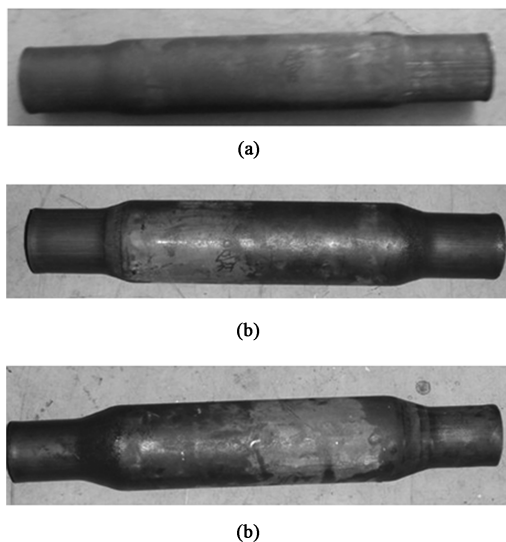


图9 3次缩径后的试件

(a) 第1次缩径 (b) 第2次缩径 (c) 第3次缩径

Fig. 9 Specimens after three times of diameter-reduction

(a) The first diameter-reduction (b) The second diameter-reduction

(c) The third diameter-reduction

测量各次缩径后的几何参量, 结果表明: 管坯经过3次缩径, 平均长度由565 mm增加至575.2、585.8和595.2 mm; 已变形区直臂部分的壁厚由初始的5.40 mm依次增加至5.84、6.23和6.55 mm, 增厚率依次为8.15%、6.85%和5.14%; 直臂部分的外径由 $\Phi 102$ mm减小至 $\Phi 90.35$ 、 $\Phi 81.33$ 和 $\Phi 73.38$ mm, 分别较相应的缩径凹模内径小1.65、1.67和1.62 mm; 3次缩径的管坯端部均存在翘曲现象, 端部外径依次为 $\Phi 92.01$ 、 $\Phi 82.52$ 和 $\Phi 74.21$ mm, 分别较直臂部分外径大1.67、1.19和0.83 mm。由此可知, 试验测量值与有限元模拟值基本吻合。

在第3次缩径时, 有两件管坯沿端部产生轴向开裂, 如图10所示, 证明了缩径后管坯内部存在周向残余拉应力, 而且拉应力的值大于材料的强度极限。



图10 端部开裂管件

Fig. 10 Tube part with cracked ends

5 结论

(1) 通过自由推压缩径的变形分析, 揭示出缩径后管坯已变形区内的外表面存在数值较大的轴向和周向残余拉应力, 管坯内表面存在数值较大的轴向和周向残余压应力。

(2) 通过管坯缩径过程的数值模拟, 给出了管坯已变形区内残余应力的分布规律以及工艺参数对残余应力的影响: 随着摩擦因数的增加, 管坯外表面的残余拉应力和内表面残余压应力增加; 随着缩径凹模出口圆角半径的增加, 管坯内、外表面各向的残余应力数值均减小; 随着管坯初始壁厚的增加, 周向残余应力随之减小; 随着缩径次数的增加, 管坯端部的周向残余拉应力增大。

(3) 对管坯进行了3次缩径试验, 实测的几何参量变化值与有限元模拟值吻合, 试验中发现第3次缩径管坯出现了轴向开裂现象, 证明了管坯内的

周向残余拉应力值大于材料的强度极限,验证了有限元模拟的可靠性。

参考文献:

- [1] 王连东. 回转壳体正负成形理论及汽车桥壳胀形工艺的研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2001.
Wang L D. Study on Positive-negative Forming Theory of Revolving Shell and Bulging Technology of Automobile Axle Housings [D]. Qinghuangdao: Yanshan University, 2001.
- [2] 彭俊阳, 付渊, 王勇, 等. 缩径过程中的壁厚变化实验 [J]. 塑性工程学报, 2012, 19 (3): 60-63.
Peng J Y, Fu Y, Wang Y, et al. Experimental investigation on thickness changes during necking process [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2012, 19 (3): 60-63.
- [3] 陈国强. 小型汽车桥壳半滑动式液压胀形工艺研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2014.
Chen G Q. Study on the Technology of Half-sliding Hydroforming of Light Automobile Axle Housings [D]. Qinghuangdao: Yanshan University, 2014.
- [4] 王连东, 赵石岩, 高鹏飞, 等. 管坯推压缩径端部翘曲机理及其影响因素分析 [J]. 塑性工程学报, 2005, 12 (3): 76-79.
Wang L D, Zhao S Y, Gao P F, et al. Analysis of buckling in push sinking and its influence factor [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2005, 12 (3): 76-79.
- [5] 王连东, 崔亚平, 王建国, 等. 胀压成形汽车桥壳用缩径模具 [P]. 中国: ZL201210348509.6, 2012-12-19.
Wang L D, Cui Y P, Wang J G, et al. Reducing die for expanding and pressing automobile axle housing [P]. China: ZL201210348509.6, 2012-12-19.
- [6] 李连进, 胡广大. 无缝钢管定径过程中的压下量和温度对残余应力分布的影响 [J]. 塑性工程学报, 2007, 14 (5): 111-115.
- [7] 张琦, 徐宏图, 田天泰, 等. 细长轴预拉伸残余应力分析及加工变形控制研究 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (4): 180-184.
Zhang Q, Xu H T, Tian T T, et al. Research on pre-stretching residual stress analysis and machining deformation control of slender shaft [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (4): 180-184.
- [8] Sadok L, Kusiak J, Packo M, et al. State of strain in the tube sinking process [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1996, 60 (1/4): 161-166.
- [9] Hirsch T K, Silva R A, Menezes N R. Characterization of local residual stress inhomogeneities in combined wire drawing processes of AISI 1045 steel bars [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 70 (1/4): 661-668.
- [10] Gattmah J, Ozturk F, Orhan S. Experimental and finite element analysis of residual stresses in cold tube drawing process with a fixed mandrel for AISI 1010 steel tube [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 93 (1/4): 1229-1241.
- [11] Vollert F, Luchiner M, Schusters, et al. Experimental and numerical analyses of residual stresses induced by tube drawing [J]. Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 2018, 53 (5): 364-375.
- [12] 刘恒, 王连东, 王晓迪, 等. 管坯大变形自由推压缩径残余应力的研究 [J]. 中国机械工程, 2021, 32 (11): 1354-1360.
Liu H, Wang L D, Wang X D, et al. Study on the residual stress of large deformation free pushing diameter-reducing tube blanks [J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32 (11): 1354-1360.

关于中国机械工程学会塑性工程分会发展会员的通知

中国机械工程学会塑性工程(锻压)分会成立于1963年,是全国性的锻压科学技术工作者的学术性社会团体,是依法登记的法人社团。经本会理事会研究决定:凡承认本会章程并符合条件者,可申请为本会会员。

会员的权利与义务: 1. 颁发个人/团体会员证书及铜牌,铜牌由秘书处统一制作并颁发,可申请定制; 2. 参加本学会组织的年会会议费可享受适当优惠; 3. 优先参加本会组织举办的国内外有关学术活动和其他活动; 4. 优先获得本会的有关学术资料,免费获赠全年学会会刊《锻压技术》杂志; 5. 在学会网站主页进行企业宣传、logo链接; 6. 享有本会的选举权、被选举权和表决权; 7. 接受本会委托,进行论证、评议、咨询等工作; 8. 享有入会、退会的自由。

申请手续: 提交入会申请表。申请个人会员,需填写《个人会员入会申请表》,同时提交“个人身份证复印件”、“一寸免冠照片两张”。申请团体会员,需填写《团体会员入会申请表》,同时提交“法人登记证书复印件”。材料均需一式一份寄至学会秘书处,并以电子邮件方式将表格发送至我会邮箱;也可登陆学会网站,进行在线注册。经审批通过后,将及时通知申请单位或个人。会员缴纳会费后正式登记,由学会秘书处颁发会员证书。

地 址: 北京市海淀区学清路18号707室塑性工程分会 **联系人:** 李佳盈、秦思晓、周 林、金 红

电 话: 010-62912592 **传 真:** 010-62912592 **邮 箱:** duanya@cmes.org **网 址:** http://www.cstp-cmes.org.cn

中国机械工程学会塑性工程分会