

厚壁管温热缩口与管壁增厚的数值模拟研究

张亚, 徐春国, 任广升, 任伟伟, 郭永强, 陈钰金, 郑建, 万松

(北京机电研究所, 北京 100083)

摘要: **目的** 主要研究厚壁管两端同时温、热锥形缩口工艺的特点, 以及缩口过程不同工艺参数对壁厚增厚的影响。 **方法** 通过选择合理的材料模型与热力耦合等温度场模拟参数, 建立了有限元模型, 使用 DEFORM 体积成形软件对厚壁管两端同时温热缩口工艺进行了分析, 探究了温、热缩口两种条件下应力应变分布特点。 **结果** 模拟实验获得了管材缩口系数、模具半锥角、 t/d_0 值、摩擦因子、成形温度等工艺参数, 在温、热两种条件下对壁厚增厚量的影响曲线。 **结论** 管材缩口过程具有典型的变形阶段: 入锥弯曲阶段、反弯曲阶段和缩口稳定阶段; 管材高温下缩口变形特点为周向、轴向的压缩变形和径向的增厚变形; 厚壁管缩口的增厚变形量随着模具半锥角的增大和缩口系数的减小而增大, 同时受摩擦因子、成形温度、管材壁厚的影响较大。研究结果为管材缩口壁厚增厚工艺提供了基础技术数据。

关键词: 管材; 热缩口; 壁厚增厚; 有限元分析

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2014.04.003

中图分类号: TG376.5

文献标识码: A

文章编号: 1674-6457(2014)04-0012-07

Numerical Modelling Study on Warm-Hot Necking and Wall Thickening of Thick-Walled Tubes

ZHANG Ya, XU Chun-guo, REN Guang-sheng, REN Wei-wei,

GUO Yong-qiang, CHEN Yu-jin, ZHENG Jian, WAN Song

(Beijing Research Institute of Mechanical & Electrical Technology, Beijing 100083, China)

ABSTRACT: Objective This study mainly focused on the characteristics of cone-shaped necking process under warm or hot conditions of the thick-walled tubes at both ends, and the impact of different process parameters on the wall thickening. **Methods** Through choosing reasonable temperature field simulation parameters such as material model and thermomechanical coupling, etc, a finite element model was built. Based on the DEFORM bulk forming software, the simultaneous warm-hot necking process at both ends of the thick-walled tubes was analyzed, and study was carried out on the strain-stress distribution characteristics under warm or hot conditions. **Results** The influence curves for the impact of factors such as tube necking coefficient, half cone angle of mold, t/d_0 value, friction factor and forming temperature on wall thickening amount were obtained from simulation experiments under warm or hot conditions. **Conclusion** Tube necking process had typical deformation phases, including cone bending stage, anti-bending stage and stable necking stage. The characteristics of tube necking deformation under hot conditions were circumferential, axial compression deformation and radial thickening

收稿日期: 2014-05-03

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)计划(2012AAK10B05)

作者简介: 张亚(1989—), 男, 江苏徐州人, 硕士生, 主要研究方向为精密回转变形。

deformation. With the increase of cone angle of mold, and the decrease of necking coefficient, the thickening amount of thick-walled tubes increased, besides, the thickening amount was influenced by friction factor, mold temperature and wall thickness of the pipe. The research results provided basic technical data for the thickening of the wall thickness of the tube necking process.

KEY WORDS: tube material; hot necking; tube wall thickening; finite element analysis

管材加工具有成形稳定、产品轻量化、强韧化、精密净形化、高附加值和易于成形精密复杂制品等优点,广泛应用于石油、汽车、航空航天、国防工业等重要场合,因此管材的塑性加工技术成为先进塑性加工和高效、节材、节能、高端绿色制造的重要发展方向^[1-2]。缩口工艺是冲压基本成形工艺之一,长期以来,国内外对薄壁管冷缩口成形工艺的坯料计算^[3]、缩口力^[4-5]、极限缩口系数^[6]等参数进行了较为系统的研究,近年来管材的多道次缩口、旋压缩口、偏心缩口等工艺也有所研究^[7-9];而对温、热下厚壁管缩口工艺的基础性研究较少。例如:挂车后桥主轴整体成形工艺是典型的缩口增厚产品(如图1),近年来挂车后桥主轴整体挤压成形工艺,具有工序较少、成形和热处理一致性好、流线连续、疲劳

强度高、成本低等优点,成为挂车后桥主轴成形的重要发展方向。其中,获得车轴终成形件所需的壁厚分布是整体挤压成形的核心,所以管材的壁厚增厚技术是该工艺的关键技术之一。现有的文献对厚壁管温、热两端同时缩口成形壁厚增厚的基础性研究很少,目前对缩口壁厚增厚成形工艺变形与增厚量的控制主要通过试错法,凭借经验确定。

文中通过有限元数值模拟的方法,对两端同时温、热锥形缩口工艺的应力应变规律进行全面分析,对材料模型进行了探讨,考虑了温度和变形的耦合过程,获得了主要工艺参数对壁厚增厚的影响曲线,对温、热缩口壁厚增厚相关产品的工艺设计提供了基础技术依据,使塑性加工由过去的依靠经验知识向综合模型分析、柔性化、最优化方向发展。

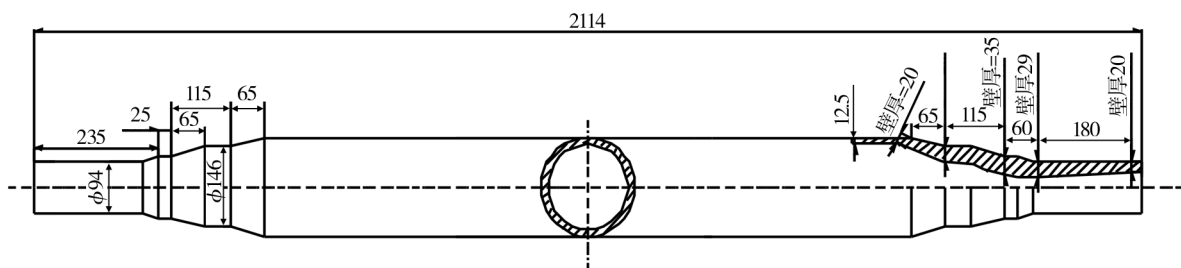


图1 13 t 挂车后桥主轴

Fig. 1 Rare axle of 13 t trailer

1 模拟实验条件

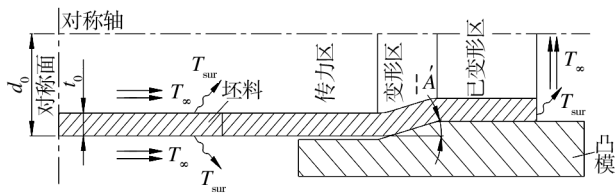
1.1 模拟基本参数

如图2所示,该问题属于轴对称问题,采用 DEFORM-2D 软件模拟,根据 13 t 车轴管坯尺寸,同时考虑模拟缩口工艺范围,确定管坯的模拟几何尺寸为 $\phi 178 \text{ mm} \times \phi 153 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$ (壁厚 $t_0 = 12.5 \text{ mm}$)。考查缩口变形的因素主要有:成形温度、缩口系数、模具半锥角、摩擦因子、管材壁厚等,模拟基

本参数选取如下:材料密度 $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$,泊松比 $\nu = 0.3$,弹性模量随温度的变化曲线由 DEFORM 材料库中 AISI5120 定义,采用 Newton-Raphson 模拟迭代算法。

1.2 热模拟边界条件设定

研究过程考虑温度场耦合模拟,塑性变形过程的传热问题属于含内热源的非稳态热传导问题,变形体的瞬态温度场 $T(x, y, z, t)$ 在直角坐标系满足热扩散方程(式(1))。对流换热满足牛顿冷却公式,辐射换热遵循斯蒂芬-玻尔兹曼定律^[10]。



d_0 为原始管坯直径; t_0 为原始管坯壁厚; α 为模具半锥角; T_{∞} 为流体温度; T_{sur} 为表面温度

图2 厚壁管两端同时缩口模拟示意图

Fig. 2 Schematic of simultaneous necking of thick-walled tube at both ends

表1 有限元模拟温度场模拟条件

Table 1 Finite element simulation of temperature field conditions

对流换热系数 $/(N \cdot (s \cdot mm \cdot ^\circ C)^{-1})$	接触换热系数 $/(N \cdot (s \cdot mm \cdot ^\circ C)^{-1})$	环境温度 $/^\circ C$	发射率	模具温度 $/^\circ C$	k_q	热传导系数	比热
0.02	5	25	0.7	25	0.90	AISI5120(DEFORM 材料库)	

1.3 材料模型确定

材料的本构模型作为成形工艺数值模拟的重要基础数据,其准确性直接影响和决定了模拟结果的精度,为研究温热条件下管材缩口的工艺过程,获得冷、温、热成形区间材料的本构模型尤为重要。以挂车车轴材料为依据,构建 20Cr-20CrMnTi 材料模

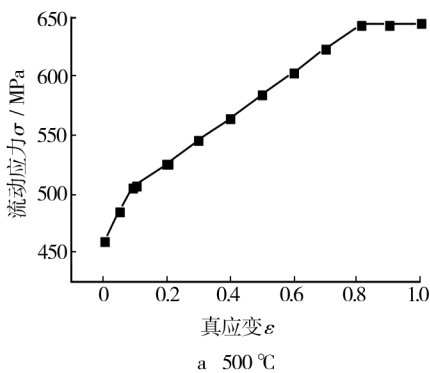
$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

式中: α 为热扩散系数; k 为材料热传导系数; t 为时间; $\dot{q}$ 为内热源强,即为单位时间单位体积内塑性变形所释放的热量^[11],可表示为:

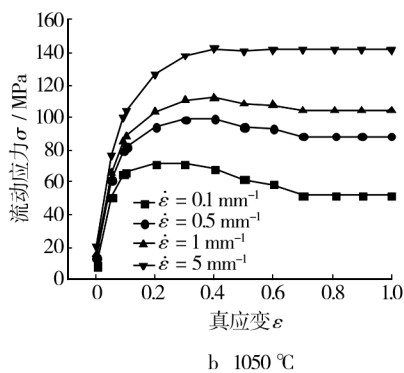
$$\dot{q} = k_q \bar{\sigma} \dot{\varepsilon} \quad (2)$$

式中: $\bar{\sigma}$, $\dot{\varepsilon}$ 分别为等效应力和等效应变速率; k_q 为无量纲系数,为应变能转化为热能的百分比,一般取 $k_q = 0.9 \sim 0.95$; 温度场模拟参数见表 1。

型,低温成形阶段采用 DEFORM 材料库中的 AISI5120 曲线,在温热成形阶段采用 20CrMnTi 材料的 Gleeble 实验数据^[12-13],刚塑性有限元材料高温屈服点通过插值方法获得,获得了应变 $\varepsilon: 0 \sim 2$,应变速率 $\dot{\varepsilon}: 0.1 \sim 5 \text{ s}^{-1}$, $20 \sim 1200^\circ \text{C}$ 范围内的本构方程,其部分本构方程曲线如图 3 所示。



a 500 °C



b 1050 °C

图3 部分温度下流动应力-真应变的关系曲线

Fig. 3 Flow stress-true strain diagram under some temperature conditions

2 两端温、热缩口变形区应力应变特点分析

首先分析 1050 °C 下缩口变形过程的应力演化特点。如图 4 所示,可将变形过程划分为 3 个阶段: 1) 入锥弯曲阶段(图 4a—c); 2) 反弯曲阶段(图

4d—f); 3) 缩口稳定阶段(图 4g—i)。如图 4a—c 所示,坯料开始接触锥形凸模,接触区受压, $\sigma_r, \sigma_z \approx -35 \text{ MPa}$, $\sigma_{\theta z} \approx -99.2 \text{ MPa}$, 同时由于靠近传力区的坯料开始发生弯曲,在管坯轴向弯曲的外侧产生拉应力 $\sigma_z \approx 15.7 \text{ MPa}$, 而相应内侧材料产生压应力 $\sigma_z \approx -24.9 \text{ MPa}$, 在周向主要产生压应力 $\sigma_{\theta} \approx -4.55 \text{ MPa}$ 。如图 4d—f 所示,当管材端面反弯曲开始时,

管坯轴向反弯曲的内侧(即管坯外侧)受到压应力,而反弯曲的外侧(即管坯的内侧)受到拉应力,其中压应力为拉应力的近5倍($\sigma_z \approx -215$ MPa)。在管坯的径向、轴向整体受压, $\sigma_r \approx -183$ MPa, $\sigma_\theta \approx -305$ MPa,同时也注意到在未变形区管坯的外侧周向产生了较大的拉应力 $\sigma_\theta \approx 46.3$ MPa。如图4g—i为管材进入稳定缩口时的应力云图,由于变形后管坯的弹性回弹以及管坯外侧的摩擦力和管坯端面和内测为自由表面等因素,在管坯轴向已变形区外侧及端部产生的拉应力 σ_z 分别为:96.2 MPa和26.3 MPa,而对应轴向内侧为压应力,同时在管坯的已变形区

周向外侧材料产生拉应力($\sigma_\theta \approx 75.9$ MPa),在缩口稳定阶段的径向应力与反弯曲阶段的类似。

图4j—l(1050℃条件下)为稳定热缩口过程的应变云图,由图可知,由于轴向端部为自由端面和外侧的拉应力以及对应内侧的压应力的作用,使管坯端部产生“端部翘曲”变形,由轴向应变可知最大值在管坯外侧端部点处;在管坯轴向在入锥变形区受压应变值为 $\varepsilon_z \approx -0.101$,而反弯曲以及已成形区应变为正值($\varepsilon_z \approx 0.126$),管坯终挤压后长度为581.459 mm,管材沿轴向缩短,径向应变在反弯曲和已成形区的应变值都为正值,因此在径向变形为增厚变形,

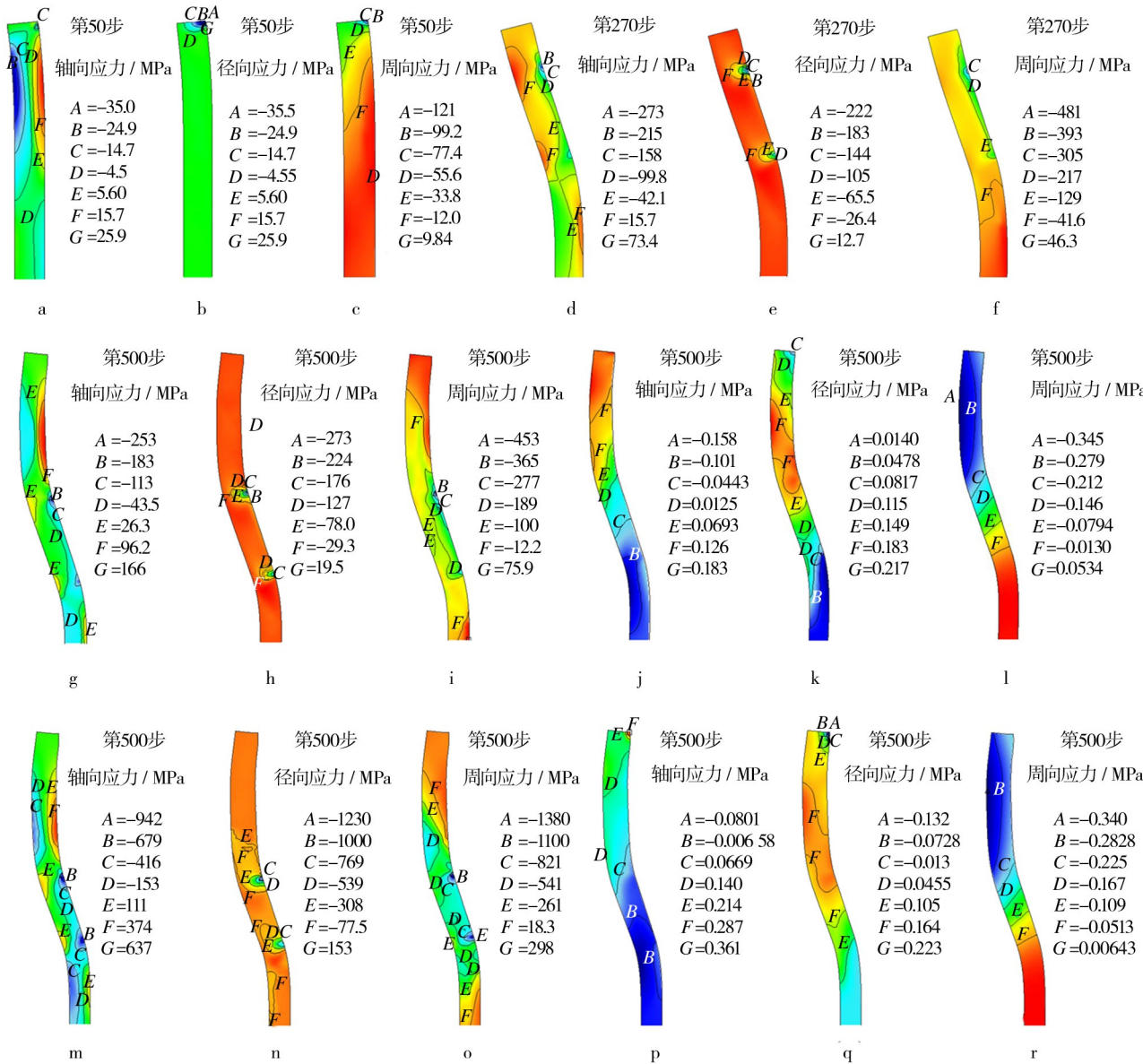


图4 缩口过程不同阶段的应力应变分布云图

Fig. 4 Stress-strain distribution at different stages of the process

在管材的反弯曲前后以及已变形区都为负值,在管材周向的入锥变形区,靠近为变形区管坯产生拉应变($\varepsilon_\theta \approx 0.0534$)。

如图4m—r分别为500℃条件下管坯缩口的应力应变云图,由图可知,应力应变在3个方向的分布和热成形相似。由应变分布可知,温成形的在反弯曲和稳定成形区轴向拉应变比热成形的轴向应变大,在反弯曲处的轴向应变 $\varepsilon_z \approx 0.140$,管坯的终挤压长度为609.184 mm,可见管材沿轴向伸长,而在径向,在反弯曲阶段和已变形阶段的前端应变为 $\varepsilon_r \approx 0.164$,较热成形同位置的应变略小,因此,在该工艺参数下温成形的径向增厚变形略小于热成形的增厚变形。在圆周方向,入锥变形阶段靠近变形区的拉应变($\varepsilon_\theta \approx 0.00643$)远小于热变形时的0.0534,因此在温成形时入锥变形处的变形较热成形时小得多。

3 缩口工艺参数对管材壁厚增厚的影响

3.1 温、热成形条件下管材缩口系数、模具半锥角对壁厚增厚的影响

对温、热条件下缩口系数和模具半锥角两参数进行全面实验模拟,温度选取500,1050℃作为温、热成形的两个水平,模具半锥角分别取18°,20°,22°,24°,26°,28°,30°,32°,34°,9个水平,缩口系数分别取0.82,0.84,0.86,0.88,0.90,0.92,0.94,0.96共8个水平进行全面实验,通过测量3次稳定成形区的壁厚厚度的平均值作为该工艺参数下的壁厚值(下文取值方法相同),其中缩口系数定义为:

$$m = \frac{d_1}{d_0} \quad (3)$$

其中: d_1 为缩口后管材直径; d_0 为缩口前管材直径。

图5所示为温、热缩口条件下缩口系数与模具半锥角对壁厚的影响,在相同模具半锥角下管材壁厚增厚量随着缩口系数的减小逐渐增大,而缩口系数相同时,管材壁厚随着模具半锥角的增大而增大。通过温热缩口条件下的比较,缩口系数较小时,两者的增厚量相差不大,而在较大缩口系数下,温成形缩口时壁厚随着模具锥角的增大而增大,幅度比热成形时显著。由此可见,缩口系数和模具半锥角对管

材缩口壁厚增厚的影响显著,可以通过减小缩口系数和增大模具半锥角来增加缩口后的壁厚。需要注意的是,缩口系数的缩小受到极限缩口系数的限制,而模具半锥角的选择受到产品外形的限制,同时,管材缩口存在使成形力最小的最佳缩口模具半锥角,在摩擦因子为0.05~0.3时,最佳模具半锥角为20°~30°^[6],因此考虑壁厚增厚确定缩口系数和模具锥角需要综合考虑。

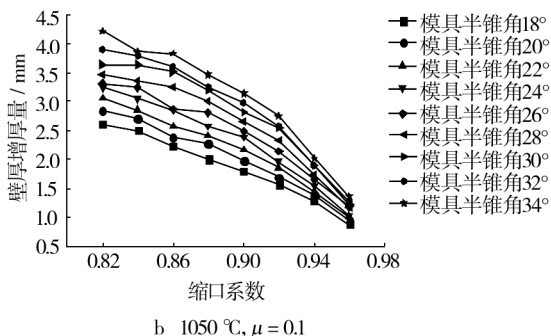
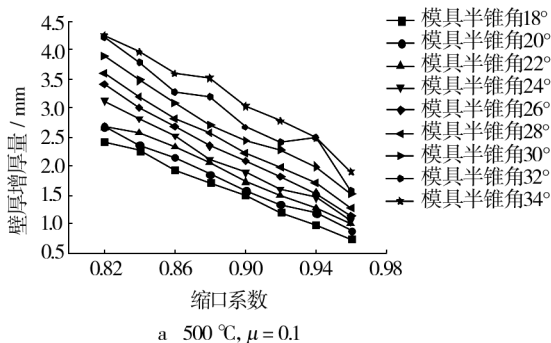
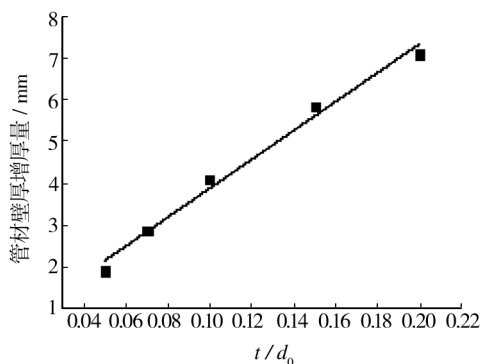


图5 温、热条件下缩口系数、模具半锥角与壁厚增厚量的关系曲线

Fig. 5 Relation curves of thickening amount and necking coefficient, half cone angle of Mold under warm and hot conditions

3.2 管坯几何尺寸 t/d_0 对管材壁厚增厚的影响

分别取管材壁厚为8.9,12.5,17.8,26.7,35.6 mm,对应 t/d_0 为0.05,0.07,0.1,0.15,0.20,研究 t/d_0 对管材壁厚的影响,结果如图6所示。随着 t/d_0 的增大,管材壁厚增厚量呈线性增大,因此增加管材的壁厚可以大幅度增加缩口后管材壁厚,而坯料壁厚的选择需要考虑产品要求以及轻量化发展的趋势。

图6 t/d_0 与管材壁厚增厚量的关系曲线Fig. 6 Relation curves of thickening amount and t/d_0 value

3.3 成形温度、摩擦条件对壁厚增厚的影响

如图7所示,随着成形温度的升高,在摩擦因数较小的条件下,管材壁厚增厚量随着温度的升高而

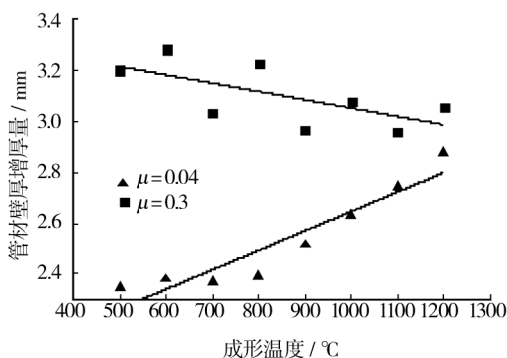


图7 不同摩擦条件下温度与管材壁厚增厚量的关系曲线(缩口系数0.86,模具半锥角24°)

Fig. 7 Relation curves of thickening amount and forming temperature under different friction conditions

升高,而在摩擦较大的条件下,管材壁厚增厚量随着温度的升高有所降低。这主要是因为摩擦因数较大时,在入锥变形阶段,由于管材的变形,靠近变形区的周向应变较大,在开始缩口的过程内,入锥变形区的管材增加了管材的直径 d_0 ,减小了 t/d_0 值,影响了壁厚的增厚,这种影响随着温度的增加和摩擦因子的增大而更加明显,因此在较大摩擦因数条件下管材的增厚量随着温度的增加略有下降。该影响同时也在图5b中热成形缩口时,壁厚随着模具锥角的增大而增大,幅度比温成形时小表现出来。由应力应变特点分析可知,摩擦条件影响反弯曲阶段以及

已成形阶段的应力应变分布,摩擦因子越大,反弯曲管坯外侧的轴向拉应力越大,管材内侧金属镦粗也越明显,因此管材缩口后增厚越明显。如图8所示,随着摩擦因子的增加,管材壁厚增厚量线性增加,同样由于高温时摩擦因子的增加会影响 t/d_0 值,从而抑制壁厚的增加,使较大摩擦条件下,热缩口后管材壁厚小于温缩口后管材壁厚的增加量。因此,在管材大于极限缩口系数条件下,增加摩擦因数并选择合适的成形温度,有利于管材壁厚的增厚。

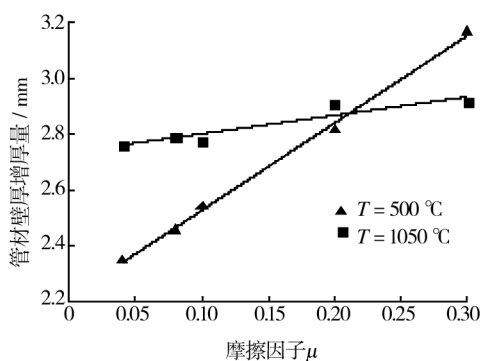


图8 温、热条件下摩擦因子对管材壁厚增厚量的影响曲线(缩口系数0.86,模具半锥角24°)

Fig. 8 Relation curves of thickening amount and friction factor under different temperature conditions

4 结论

1) 通过数值模拟详细分析了厚壁管温、热缩口过程的应力应变分布。管材缩口分为3个典型阶段,管材缩口变形特点为周向、轴向压缩变形和径向的增厚变形,在低温缩口时轴向伸长,高温缩口时轴向缩短,管材缩口端部具有“翘曲”现象。

2) 管材壁厚增厚量随着模具锥角的增大和缩口系数的减小而增大,同时 t/d_0 对管材壁厚的增厚影响显著,成形温度对管材壁厚增厚的影响受摩擦条件的影响,在较小摩擦条件下,温度越高,管材壁厚增厚越大,而摩擦因数较大时,温度越高,管材的壁厚增厚略有下降;同时管材壁厚增厚量随着摩擦因子的增大而增大,温缩口比热缩口壁厚增加量显著。

3) 根据以上分析可知:减小缩口系数、增加模具锥角、增加管材壁厚,选择合适的成形温度与润滑剂,有利于管材壁厚增厚,而相关工艺参数的选择同

时受到产品外形尺寸、极限缩口系数、省力成形、轻量化等要求的影响,因此参数选择时需综合考虑。

参考文献:

- [1] 杨合,林艳,孙志超. 面向 21 世纪的先进塑性加工技术与管成形研究发展[C]//中国科协 2000 年学术年会文集. 北京:中国科学技术出版社,2000:745—746.
YANG He, LIN Yan, SUN Zhi-chao. Research Development of Plastic Processing Technology and Advanced Tube Forming for The 21st Century[C]//China Association 2000 Annual Conference Proceedings, Beijing: China Science & Technology Press, 2000:745—746.
- [2] LIN Y, YANG H. Thin-walled Tube Precision Bending Process and FEM Simulation[C]//In: Proceedings of the 4th International Conference on Frontiers of Design and Manufacturing. Beijing: International Academic Publishers, 2000:305—308.
- [3] 卢险峰,陶文芊,孟凡胜. 关于弧形类缩口件坯料计算模型[J]. 南昌大学学报,2013,35(1):49—53.
LU Xian-feng, TAO Wen-qian, MENG Fan-sheng. On Calculated Model of Blank for Arc Type Necking Parts [J]. Journal of Nanchang University, 2013, 35(1):49—53.
- [4] 夏巨谟,王英,胡国安,等. 薄壁管缩径挤压工艺的模拟分析与应用[J]. 石油机械,1997,25(3):18—21.
XIA Ju-chen, WANG Ying, HU Guo-an, et al. Simulation and Application of Extrusion-Sinking Technology for Thin-Walled Tube[J]. China Petroleum Machinery, 1997, 25(3):18—21.
- [5] 胡成武,罗文波,彭炎荣. 锥形凹模缩口力的理论计算与试验验证[J]. 中国工程科学,2005,7(6):54—56.
HU Cheng-wu, LUO Wen-bo, PENG Yan-rong. The Theoretic Evaluation and Verification for the Necking Force of the Cone-shaped Concave Die[J]. Engineering Science, 2005, 7(6):54—56.
- [6] 胡成武,邹安全,姚齐水. 基于轴对称屈曲失稳的缩口力与临界缩口尺寸[J]. 锻压技术,2003,23(3):14—17.
HU Cheng-wu, ZOU An-quan, YAO Qi-shui. Necking Force and Critical Necking Dimension Based on the Inflectional Instability of Axial Symmetry [J]. Forging & Stamping Technology, 2003, 23(3):14—17.
- [7] 陈汇,郎利辉,杜传军,等. 薄壁精密罐多道次缩口过程及其机理[J]. 北京航空航天大学学报,2011,37(7):805—810.
CHEN Hui, LANG Li-hui, DU Chuan-jun, et al. Multi-Stages Necking Process and Mechanism of Precision Thin-Walled Can [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2011, 37(7):805—810.
- [8] HAMED Zoghi, ALIREZA Fallahi Arezoodar, MOJTABA Sayeefatabi. Enhanced Finite Element Analysis of Material Deformation and Strain Distribution in Spinning of 42CrMo Steel Tubes at Elevated Temperature[J]. Materials and Design, 2013(47):234—242.
- [9] KWAN Chin-Tarn. An Analysis of the Eccentric Nosing Process of Metal Tubes[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003(140):530—534.
- [10] 葛新石,叶宏. 传热和传质基本原理[M]. 北京:化学工业出版社,2012.
GE Xin-shi, YE Hong. Fundamentals of Heat and Mass Transfer [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2012.
- [11] 刘君. 叶片精锻变形-传热-组织演变耦合的三维有限元分析[D]. 西安:西北工业大学,2004.
LIU Jun. 3D FEM Coupled Analysis of Deformation-Heat Transfer-Microstructure Evolution for Precision Forging Process of Blade [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2004.
- [12] 杨慧,李振红,张质良. 20CrMnTi 钢温热变形行为及其数学建模[J]. 上海交通大学学报,2005,39(11):1879—1802.
YANG Hui, LI Zhen-hong, ZHANG Zhi-liang. The Warm-Hot Deformation Behavior and Modeling of 20CrMnTi Steel [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2005, 39(11):1879—1802.
- [13] 马璟,皇涛,陈拂晓. 20CrMnTi 高温塑性变形行为研究[J]. 锻压技术,2011,36(5):132—136.
MA Jing, HUANG Tao, CHEN Fu-xiao. Research on Plastic Deformation Behavior of 20CrMnTi at High Temperature [J]. Forging & Stamping Technology, 2011, 36(5):132—136.