

金属弯头扩径推弯成形的金属流变特性

陈 军, 杨英丽, 杨海璇, 王廷询, 段文森

(西北有色金属研究院, 西安 710016)

摘 要: 介绍扩径推弯弯头的成形原理和成形过程中金属流变规律。弯头管坯金属在环向扩径力与轴向推制力作用下, 发生轴向压缩和环向扩径的复合变形。轴向压缩使管坯发生弯曲变形, 在羊角芯头的约束下, 使腹部金属发生压缩增厚, 背部基本不变形。环向扩径是偏心的, 偏心扩径保证了弯管腹部金属弯曲受压时壁厚增加量能顺利流向背部以补充弯管背部金属弯曲受拉时壁厚减薄补偿。为了保证弯管腹部金属塑性流动过程和弯管背部金属弯曲变形过程的协调性和连续性, 弯管腹部之间的金属网格必呈梯形, 方可保证弯头的壁厚均匀性。短半径弯头的相对弯曲半径越小, 单位长度内的弯曲和扩径变形量越大, 弯头成形难度越大。

关键词: 弯头; 扩径推弯法; 羊角芯头

中图分类号: TG 146.4

文献标志码: A

Metal rheological characteristics of elbow made by expanding diameter and pushing bend

CHEN Jun, YANG Ying-li, YANG Hai-ying, WANG Ting-xun, DUAN Wen-sen

(Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

Abstract: The forming theory of elbow made by expanding diameter and pushing bend was induced. The tube blank of elbow takes place combined deformation with compaction along axial direction and expanding diameter along circumferential direction under the action of expanding diameter force along circumferential direction and pushing force along axial direction. The compaction compression deformation along axial direction makes tube blank bend deformation under the restrained acting of ram's mandrel. Finally, the belly metal of elbow becomes thicken after compaction, while the back metal of elbow does not take place deformation. The expanding diameter along circumference direction is eccentric because the eccentric expanding diameter along circumference direction ensures the increased thickness flowing favorably from elbow belly to elbow back, supplying the alleviated thickness of back elbow because of undergoing bending and tension. The shorter the relatively bending radius is, and the larger the bending and expanding diameter degree is, the larger the deformation difficulty of elbow is in the unit length.

Key words: elbow; diameter-expanding and pushing method; ram's mandrel

弯头在管道中起连接和改变方向的作用, 同时, 也可以吸收管道热膨胀应变产生的应变。弯头的成形方法包括扩径推弯法、隧道挤压法、模压弯曲法、压片拼压法、凹槽轮滚压法、虾米腰弯头和超塑成形等方法^[1-2]。其中, 整体成形的弯头方法包括扩径推弯法、隧道挤压法、模压弯曲法、凹槽轮滚压法, 可采用无

缝管材加工成整体弯头; 非整体成形的方法包括压片拼压法、虾米腰弯头和超塑成形, 所制备的弯头都有焊接焊缝, 焊缝的存在降低了管道腐蚀性能和设计安全系数。与采用传统的压片拼焊法制备的弯头相比, 由于扩径推弯短半径弯头减少了两条纵向焊缝; 与虾米腰弯头相比, 没有环形焊缝, 弯曲半径光滑, 降低

基金项目: 陕西省重点科技创新团队(2012KCT-23)

收稿日期: 2013-07-28; 修订日期: 2013-10-10

通信作者: 陈 军, 教授级高级工程师; 电话: 029-86231078; E-mail: christinchenjun@163.com

液体紊流现象; 无缝弯头提高了管路系统的腐蚀性能和设计安全系数, 使得管路的整体性能大幅度提高。隧道挤压法与模压弯曲法属于冷加工, 由于受到挤压机和模压设备的限制, 仅适合于加工小于 DN80 的具有良好的冷成型性能弯头; 模压弯曲法属于热加工, 适合加工大口径的厚壁弯头; 扩径推弯法与其他弯头成形方法相比, 可进行冷热加工, 生产不同材质的壁厚均匀、不同弯曲半径($R \geq D$ 、 $1.5D$ 或 $2 \sim 5D$)、薄壁($t/T \approx 0.015$)、产品规格多($D_n = 20 \sim 1200$)的多角度弯头(30° 、 60° 、 90° 和 180°), 而且可以生产环形管(360°)或螺旋管, 生产效率高, 并保证弯头外径圆度和壁厚均匀, 适合于批量生产^[3], 加工的弯头包括钢、钛、锆、镍等其他金属材料的弯头或环形管。

在此, 本文作者介绍扩径推弯弯头的成形原理和成形过程中应力状态以及弯头个部分的应变、扩径推弯过程中的金属流变规律。

1 扩径推弯原理

扩径推弯弯头是管坯套在依次排列芯杆上, 芯杆锁定在固定牌坊等机架架上, 芯杆前端焊接羊角芯头, 活动牌坊推动推制环、推制管和管坯顺芯杆前进, 最终管坯从羊角芯头外沿爬过、推出, 羊角芯头外围采用感应加热圈加热羊角芯头和管坯, 管坯在羊角芯头处发生连续的环向扩径、轴向弯曲的性变形而成为弯头, 扩径推弯法示意图如图 1 所示。

2 羊角芯头结构

成形模羊角芯头是使管坯发生形状和直径变化的重要部位, 其结构由引伸段、扩径成形段和整形段 3

部分组成, 如图 2 所示。引伸段是指引导管材进入成形区的部分, 对管坯起支撑、定位和引导作用。扩径成形段是指使管坯发生扩径和弯曲变形的部分, 是弯头变形的关键部位。整形段对弯头进行归圆、调整形状, 使弯头外径和弯曲半径满足要求。管坯在羊角芯头处承受推制力 F 、管坯与羊角芯头的摩擦力 f 、扩径力 P 和羊角芯头的弯矩作用 M , 管坯在羊角芯头的扩径力 P 和推制力 F 的推制作用下, 在羊角芯头处发生轴向压缩和环向扩径变形, 压缩变形和扩径变形程度与羊角芯头形状和尺寸有关。因此, 羊角芯头的几何参数设计对弯头推制中弯曲和扩径变形的连贯性和协调性、弯头壁厚均匀性和形状起着至关重要的作用。成形模羊角芯头的设计和制作的核心部分是扩径成形段, 扩径成形段的设计参数包括起始弯曲半径 OA 、弯曲角度 β 和中心线曲线 L_1 的描述。扩径成形段中心线描述影响因素包括起始弯曲半径、弯曲角度、管坯直径、弯头直径; 扩径成型段中心线长度与弯曲半径和弯曲角度相关, 弯曲半径和弯曲角度越大, 中心线长度越长。一般情况, 管坯材料高温拉伸强度低、塑性好, 比高温拉伸强度高、塑性差的材料的起始弯曲半径和弯曲角度低^[4]。

扩径成形段弯曲角度与弯曲中心线的长度是相互关联的参数。如果成形段大头外径为 D_3 , 成形段小头成形段外径为 D_2 , 扩径成形段长度为 L_1 , 成形段成形锥度 $\beta = (D_3 - D_2)/L_1$, 那么, 扩径成形段存在一个最佳成形锥度 β_0 。当 $\beta > \beta_0$ 时, 缩短羊角芯头扩径部分的弧长, 造成扩径推弯速度太快, 在单位长度内提高扩径量, 引起管坯对模具的正压力小于管坯摩擦力, 致使轴向压力小, 周向拉力大, 容易造成管坯减薄; 当 β 过大时, 很容易造成管坯撕裂。但当 $\beta < \beta_0$ 时, 一般可保证弯头壁厚均匀性, 但 β 过小, 会使羊角芯头成形段长度过长, 一是造成加热圈长度增加, 加热均匀性难以保证, 二是造成管坯与羊角芯头接触面过大,

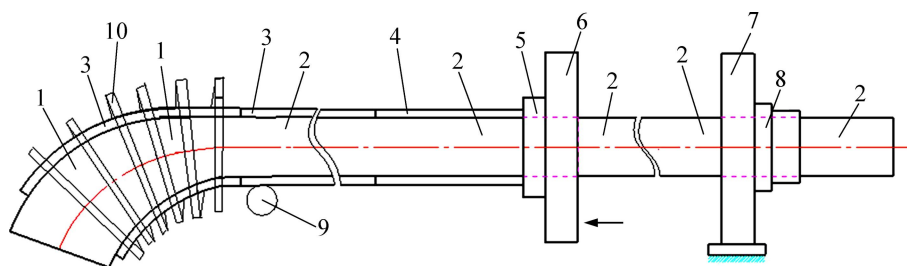


图 1 扩径推弯法示意图

Fig. 1 Diagrammatic sketch of elbow made by expanding diameter and pushing bend: 1—Ram shape die; 2—Core rod; 3—Elbow; 4—Pipe; 5—Pushing hoop; 6—Movable frame; 7—Fixing frame; 8—Supporting roller wheel; 9—Supporting roller wheel; 10—Heating coil

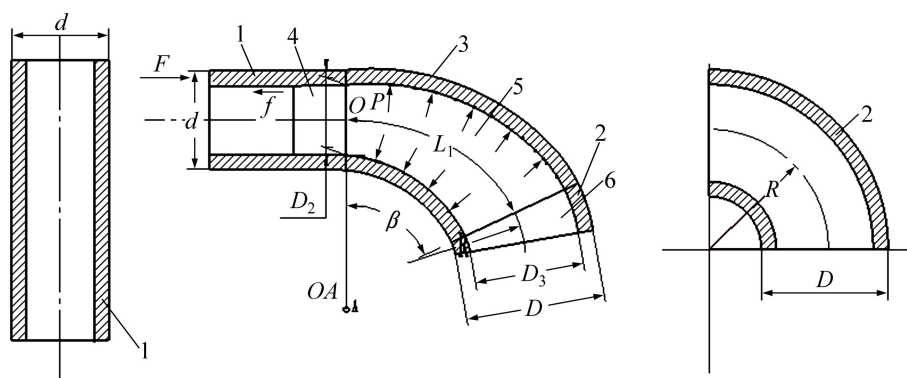


图 2 扩径推弯用成型模羊角芯头和管坯受力状态

Fig. 2 Mould of ram's core used by diameter-expanding and pushing bend deformation; 1—Pipe; 2—Elbow; 3—Elbow during expanding-diameter and pushing bend deformation; 4—Transition sector of diameter of ram shape die; 5—Expanding-diameter and pushing bend deformation sector of ram shape die; 6—Reshaping sector of ram shape die (d —Pipe diameter; D —Diameter of elbow; R —Bending radius; F —Pushing force; P —Expanding-diameter force; OA —Primary bending radius; β —Deformation angle of expanding-diameter and pushing bend deformation sector; D_2 —Small end outer-diameter of forming sector of ram shape die; D_3 —Large end outer-diameter of forming sector of ram shape die; L_1 —Center line length of expanding-diameter and bending deformation sector)

总摩擦力增大, 需要增加推制力, 造成管坯所承受的轴向力过高, 当管坯高温强度不能抗衡轴向推制力时, 造成管坯折叠、打皱, 造成成形工作失败^[5]。

3 扩径推弯弯头的金属流变特性

若将坯料表面等分成正方小网格, 弯头扩径推弯后的网格变化如图 3 所示。扩径推制后弯头背部处网格基本不变, 则说明弯头外侧的金属没有参与变形, 腹部的网格变化最剧烈, 轴向网格缩短, 产生压缩变形; 环向网格拉长, 产生拉伸变形, 网格呈现等腰梯形状, 从弯头背部到腹部其变形程度逐步加剧。

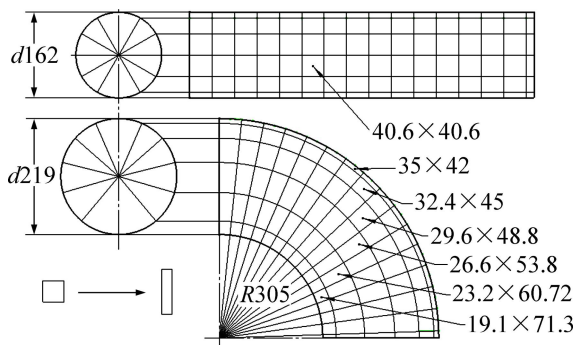


图 3 扩径推弯过程的网格变化^[6]

Fig. 3 Gridding change during pushing bend by expanding diameter^[6]

图 4 所示为扩径推弯过程中应变分布示意图, 应变分布整体上是腹部向背部逐渐减小的趋势。

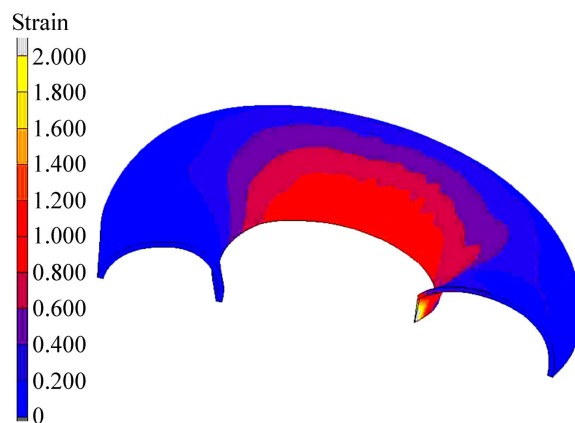


图 4 弯头扩径推弯应变分布云图

Fig. 4 Strain distribution of elbow made by expanding diameter and pushing bend

图 5 所示为扩径推弯弯头受力图, 受到轴向压应力 σ_z 和环向拉应力 σ_θ 。

如果材料是各向同性的, 管坯的厚向应变 ε_t 为

$$\varepsilon_t = \frac{\bar{\varepsilon}}{\bar{\sigma}} (\sigma_\theta + \sigma_z) \quad (1)$$

式中: $\bar{\varepsilon}$ 为等效应变, $\bar{\varepsilon} = -\frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\varepsilon_\theta^2 + \varepsilon_\theta \varepsilon_z + \varepsilon_z^2}$; $\bar{\sigma}$

为等效应力, $\bar{\sigma} = \sqrt{\sigma_\theta^2 + \sigma_\theta \sigma_z + \sigma_z^2}$; σ_θ 为环向拉应力。

可见, 当 $\sigma_\theta + \sigma_z > 0$ 时, 厚向应变 $\varepsilon_t < 0$, 材料拉伸变形, 厚度变薄, 管坯可能扩形涨裂; 当 $\sigma_\theta + \sigma_z < 0$ 时, 厚向应变 $\varepsilon_t > 0$, 压缩变形, 材料变厚, 在一定情况下可能失稳起皱; 而当 $\sigma_\theta + \sigma_z = 0$ 时, 厚向应变 $\varepsilon_t = 0$, 产生纯剪变形, 弯头厚度不变。也就是说, 在管坯扩径推弯时, 若管坯后端的推制力合适, 就可以是弯头在背部最大变薄处保持厚度不变。

热推弯头成形过程, 弯头管坯金属在环向扩径力与轴向推制力作用下, 发生轴向压缩和环向扩径的复合变形。轴向压缩使管坯发生弯曲变形, 在羊角芯头的约束下, 使腹部金属发生压缩增厚, 背部基本不变形。而环向扩径是偏心的, 偏心扩径保证了弯管腹部金属弯曲受压时壁厚增加量能顺利流向背部以补充弯管背部金属弯曲受拉时壁厚减薄补偿, 参与变形的金属是部分的。图 6 所示为出扩径推弯过程中金属流动示意图。当弯曲变形量与偏心扩径量在弯管成形过程中保持一定比例, 就可保证推出壁厚均匀的弯头^[6-8]。

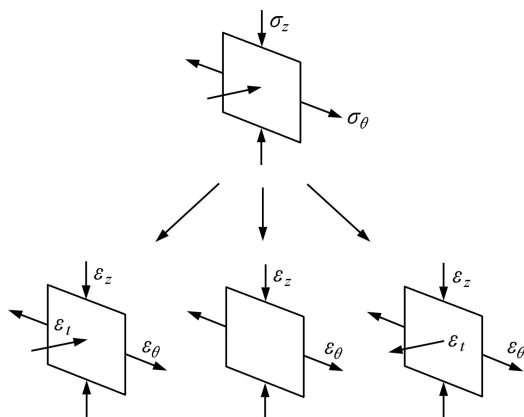


图 5 扩径推弯弯头受力图

Fig. 5 Stress of elbow during expanding diameter and pushing bend

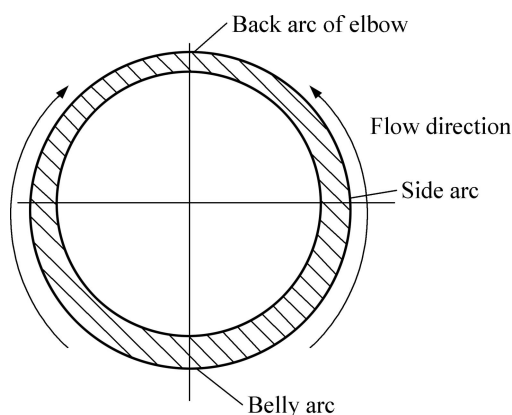


图 6 扩径推弯过程中金属流动示意图

Fig. 6 Metal rheological characteristics of elbow made by expanding diameter and pushing bend

偏心扩径是扩径推弯加工工艺区别于其它感应加热煨弯弯管的本质特征, 它保证了弯管腹部金属弯曲受压时壁厚增加量能顺利流向背部, 以补充弯管背部金属弯曲受拉时壁厚减薄量的需求, 可保证外径的圆度和壁厚的均匀性。这就是热推弯管工艺之所以能推出壁厚均匀的等强度弯管的塑性成形机理。感应加热煨弯弯管直径与管坯同直径, 热煨弯管没有芯模支撑, 是管坯在弯矩作用下, 局部加热弯曲变形部位, 外弧管壁受拉减薄, 内弧管壁受压增厚而造成的壁厚不均匀现象^[9-10]。

4 结论

1) 扩径推弯弯头是管坯在羊角芯头处发生周向扩径、轴向弯曲变形的过程, 管坯在环向扩径力与轴向推制力作用下, 腹部金属发生压缩增厚, 背部不发生变形; 环向扩径是偏心扩径, 偏心扩径保证了弯管腹部金属弯曲受压时壁厚增加量能顺利流向背部以补充弯管背部金属弯曲受拉时壁厚减薄补偿。

2) 环向扩径是偏心的, 偏心扩径保证了弯管腹部金属弯曲受压时壁厚增加量能顺利流向背部以补充弯管背部金属弯曲受拉时壁厚减薄补偿。为了保证弯管腹部金属塑性流动过程和弯管背部金属弯曲变形过程的协调性和连续性, 弯管腹部之间的金属网格必呈梯形, 方可保证弯头的壁厚均匀性。

3) 由于短半径弯头的扩径和弯曲变形程度比长半径弯头的变形程度大, 因此, 短半径弯头的扩径推弯成形温度要高于长半径弯头的。

REFERENCES

- [1] 陈 军, 杨海瑛, 段文森. 金属弯头的成型技术[J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37(Suppl.4): 555-560.
CHEN Jun, YANG Hai-ying, DUAN Wen-sen. The forming technology of metal elbow[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2008, 37(Suppl.4): 555-560.
- [2] 王廷询, 陈 军, 杨海瑛, 段文森. 钛合金弯头成形技术[J]. 石油管工程, 2011, 17(6): 1-6.
WANG Ting-xun, CHEN Jun, YANG Hai-ying, DUAN Wen-sen. The forming technology of titanium alloy elbow[J]. Oil Tuber Goods Engineering, 2011, 17(6): 1-6.
- [3] CHEN Jun, DUAN Wen-sen, YANG Hai-ying. The forming technology and using of titanium alloy elbow made by diameter-expanding and pushing[C]//2nd International Conference on Electrical & Mechanical Engineering and Information Technology (EMEIT-2012). Paris: Atlantis Press.

- 992-996.
- [4] 陈 军, 杨海瑛, 段文森. 钛合金扩径推弯中的重要问题[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(S1): s704-s708.
- CHEN Jun, YANG Hai-ying, DUAN Wen-sen. The important technology parameters of elbow made by diameter-expanding and pushing[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(S1): s704-s708.
- [5] 段文森. 钛及钛合金弯头成形工艺改进[J]. 金属学报, 2002, 38(sup.1): 422-424.
- DUAN Wen-sen. Improvement of elbow forming technology of titanium and its alloys[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2002, 38(Sup.1): 422-424.
- [6] 李 奎. 中频热推弯管新工艺及试验研究[J]. 施工技术, 1994(2): 32-38.
- LI Kui. New technique and experimental investigation of axis-thrust tube bending by inductive heating[J]. Construction Technology, 1994(2): 32-38.
- [7] 鹿晓阳, 史宝军, 鹿晓力. 分析热推弯管成形过程的实验解析法[J]. 锻压机械, 1997(4): 10-13.
- LU Xiao-yang, SHI Bao-jun, LU Xiao-li. Experimental analytics for axis-thrust tube bending[J]. Metal Forming Machinery, 1997(4): 10-13.
- [8] 鹿晓阳, 徐秉业, 岑章志, 史宝军. 牛角芯棒热推弯管成形过程受力变形特点[J]. 力学与实践, 1998, 20(6): 15-17.
- LU Xiao-yang, XU Bing-ye, CEN Zhang-zhi, SHI Bao-jun. The characteristics of force and deformation in forming process of heated pushing curved tubes through ox-core[J]. Mechanics and Engineering, 1998, 20(6): 15-17.
- [9] 李林涛, 曾卫东, 殷京瓯, 张学敏, 徐 斌, 杨英丽, 周义刚. 中频感应加热纯钛弯管成形过程中的有限元模拟[J]. 锻压技术, 2006, 31(6): 131-134.
- LI Lin-tao, ZENG Wei-dong, YIN Jing-ou, ZHANG Xue-min, XU Bin, YANG Ying-li, ZHOU Yi-gang. Finite element simulation of pipe bending process of pure titanium using local induction heating[J]. Forging & Stamping Technology, 2006, 31(6): 131-134.
- [10] 鹿晓阳, 徐秉业, 李 奎. 中频加热推制弯管的成形过程及成形机理初探[J]. 锻压机械, 1994(7): 11-14, 25.
- LU Xiao-yang, XU Bing-ye, LI Kui. The primary research of forming process and forming mechanics of elbow pipe made by medium frequency heating[J]. Forging and Stamping Technology, 1994(7): 11-14, 25.

(编辑 杨 华)