

管材成形

管坯参数对金属薄壁“目”字形截面管绕弯截面畸变的影响

王小卓, 牛卫中

(兰州交通大学 机电工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 为了研究管坯材料与尺寸参数对金属薄壁“目”字形截面管绕弯后截面畸变的影响, 利用有限元分析软件 ABAQUS 对 6 组 19 种管坯的绕弯过程分别进行了仿真, 得出了这些弯管截面畸变的一般形式与每种弯管 3 个尺寸缩减率的最大值。结果表明: “目”字形截面管坯绕弯后其截面通常会变为梯形; 弯管壁厚缩减率的最大值在大多数情况下均高于顶宽缩减率的最大值与截面高度缩减率的最大值; 选用屈服比较小的管材、截面高度较小的管坯有助于减小弯管的截面畸变和壁厚减薄; 以设计合理的“目”字形截面管坯取代矩形或“日”字形截面管坯可以明显抑制弯管的截面畸变, 但难以对其顶板壁厚的减薄做出改善。

关键词: “目”字形截面管; 绕弯成形; 管坯; 截面畸变; 壁厚减薄

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.11.005

中图分类号: TG386.43

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 11-0030-07

Influences of tube blank parameters on section distortion for metallic thin-walled tube with “目”-shaped section in rotary draw bending

Wang Xiaozhuo, Niu Weizhong

(School of Mechanical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In order to study the influences of material and size parameters of tube blank on the section distortion of metallic thin-walled tube with “目”-shaped section in rotary draw bending, the rotary draw bending process of six groups and nineteen types of tube blanks were respectively simulated by finite element analytical software ABAQUS, and the general pattern of section distortion for these bent tubes and the maximum reduction rate of three sizes for each bent tube were obtained. The results show that after rotary draw bending, the section of tube blank with “目”-shaped section usually becomes trapezoid, and the maximum value of wall-thickness reduction rate for bent tube is generally higher than that of top-width reduction rate and section-height reduction rate. Choosing the tube material with smaller yield-strength ratio or the tube blank with smaller section height help to reduce section distortion and wall-thickness thinning of bent tube, and taking the well-designed tube blank with “目”-shaped section to replace the rectangular the section or “日”-shaped section can significantly suppress the section distortion of bent tubes, but it is difficult to improve the thinning of the wall thickness for top plate.

Key words: tube with “目”-shaped section; rotary draw bending; tube blank; section distortion; wall-thickness thinning

近年来, 为适应汽车轻量化发展方向, 汽车制造厂家已将许多车身构件设计为采用高强度钢材制成的非圆形截面薄壁管件, 这些管件可由横截面为方形、矩形、“日”字形、“目”字形等形状的管坯弯曲而成。它们的应用可显著提高车身构件的强度与刚度, 但其在弯曲成形中出现的工艺缺陷, 如弯曲段截面畸变较大、壁板局部厚度减薄严重等, 对其使用性能造成了不容忽视的影响, 这就使得此类管件毛坯的合理

设计与弯曲成形成为一个值得研究的课题。

为探索金属薄壁非圆形截面弯管件截面畸变的形式、影响因素、影响效果及改善措施, 国内外已有很多学者进行了研究。如 Paulsen F 等^[1-2]通过实验观察与理论分析, 研究了铝合金薄壁矩形管与“日”字形截面管在弯曲中的截面变形形式与尺寸变化情况; Utsumi N 等^[3]、刘郁丽等^[4-8]分别采用数值仿真方法并结合实验结果分析了铝合金薄壁方管与“日”字形截面方管、铝合金薄壁矩形管与黄铜矩形管绕弯中多种工艺缺陷的成因与改善措施, 探索了管材力学性能、管坯截面尺寸与众多工艺参数对管坯绕弯后截面畸变的影响; 王翠竹等^[9-10]分别研究了多个工艺参数对高强度薄壁矩形管绕弯后

收稿日期: 2024-03-01; 修订日期: 2024-07-12

作者简介: 王小卓 (1995-), 男, 硕士研究生

E-mail: 812018349@qq.com

通信作者: 牛卫中 (1962-), 男, 硕士, 教授

E-mail: nwz@mail.lzjtu.cn

截面畸变的影响；梁策等^[11]研究了工艺参数与型材壁厚对高强钢“日”字形截面管件绕弯后截面畸变的影响。但是到目前为止，尚未检索到专门针对金属薄壁“目”字形截面管件弯曲成形的研究成果，也未看到述及这种管件弯曲成形后截面畸变的内容。

为了弥补以上不足，本文将运用有限元软件，通过采用数值仿真的方法来探索分析管坯材料与尺寸参数对金属薄壁“目”字形截面管绕弯后截面畸变的影响效果，期望得出能够指导合理设计这种管坯的结论。

1 “目”字形截面管坯的结构与尺寸

图 1 为本文研究所用金属薄壁“目”字形截面管坯横截面的形状，其横截面的宽度与高度分别为 w_0 和 h_0 ，外圈壁板的厚度与内圆角半径分别为 t_0 和 r_0 ，支撑板中部的壁厚、两端的圆角半径及其中面与侧板外壁的距离分别为 t_s 、 r_s 与 w_s 。

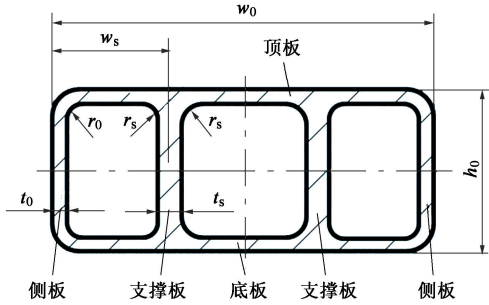


图 1 “目”字形截面管坯横截面的形状
Fig. 1 Cross-section shape of tube blank with "目"-shaped section

在数值仿真中共设计了 6 组 19 种管坯（第 18、19 种管坯分别为矩形截面管与“日”字形截面管），其材料牌号与横截面尺寸如表 1 所示。所用的 3 种管材分别为高强钢、不锈钢与铝合金，其力学性能参数见表 2。

2 仿真模型与仿真工况

绕弯是广泛用于成形金属弯管件的一种工艺，具有易实现自动化、适合大批量生产等优点，其加工原理在文献 [9] 和文献 [10] 中均有介绍。由于“目”字形截面管坯的支撑板在绕弯中具有较强的支撑作用，加之其 3 个仓室的结构也不便于使用芯棒与芯头，因而这种管件的成形往往采用无芯绕弯

表 1 数值模拟所用管坯的材料与横截面尺寸 (mm)
Table 1 Materials and cross-section sizes of tube blanks used in numerical simulation (mm)

管坯 编号	所用材料	横截面尺寸						
		w_0	h_0	w_s	t_0	r_0	t_s	r_s
1	JAC590Y 高强钢	40	20	12	2	1	2.0	2.0
2	0Cr18Ni9 不锈钢	40	20	12	2	1	2.0	2.0
3	AA6016 铝合金	40	20	12	2	1	2.0	2.0
4	0Cr18Ni9 不锈钢	40	15	12	2	1	2.0	2.0
5	0Cr18Ni9 不锈钢	40	25	12	2	1	2.0	2.0
6	0Cr18Ni9 不锈钢	40	30	12	2	1	2.0	2.0
7	0Cr18Ni9 不锈钢	40	20	8	2	1	2.0	2.0
8	0Cr18Ni9 不锈钢	40	20	10	2	1	2.0	2.0
9	0Cr18Ni9 不锈钢	40	20	14	2	1	2.0	2.0
10	0Cr18Ni9 不锈钢	40	20	16	2	1	2.0	2.0
11	0Cr18Ni9 不锈钢	40	20	12	2	1	1.0	2.0
12	0Cr18Ni9 不锈钢	40	20	12	2	1	1.5	2.0
13	0Cr18Ni9 不锈钢	40	20	12	2	1	2.5	2.0
14	0Cr18Ni9 不锈钢	40	20	12	2	1	2.0	1.0
15	0Cr18Ni9 不锈钢	40	20	12	2	1	2.0	1.5
16	0Cr18Ni9 不锈钢	40	20	12	2	1	2.0	2.5
17	0Cr18Ni9 不锈钢	40	20	12	2	1	2.0	3.0
18	0Cr18Ni9 不锈钢	40	20	—	2	1	—	—
19	0Cr18Ni9 不锈钢	40	20	20	2	1	2.0	2.0

表 2 3 种管材的力学性能参数
Table 2 Mechanical property parameters of three kinds of tube materials

管材牌号	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/ ($\times 10^5 \text{ MPa}$)	泊松比	屈服强度 R_{eL}/MPa	抗拉强度 R_{m}/MPa
JAC590Y 高强钢	7850	2.07	0.28	381	907
0Cr18Ni9 不锈钢	7830	2.07	0.28	239	1040
AA6016 铝合金	2700	0.69	0.33	113	314

的形式。据此建立这种管件 90°绕弯的仿真模型，如图 2 所示，确定的仿真工况如表 3 所示。

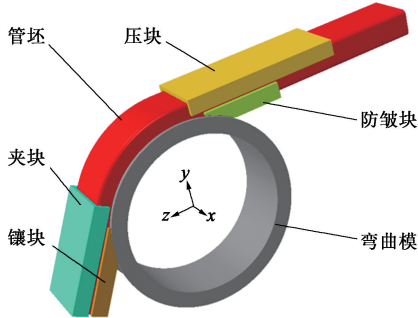


图 2 管件 90°绕弯的仿真模型
Fig. 2 Simulation model of tube in 90° rotary draw bending

表 3 仿真工况
Table 3 Simulation conditions

参数	数值
管坯底部的弯曲半径 R/mm	60
弯曲模角速度 $\omega/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	1.57
管坯与夹块、镶块的单边间隙/ mm	0
管坯与夹块、镶块间的摩擦因数	∞
管坯与其他模块的单边间隙/ mm	0.1
管坯与弯曲模间的摩擦因数	0.1
管坯与压块、防皱块间的摩擦因数	0.15

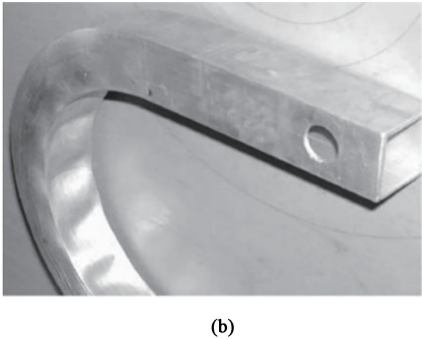
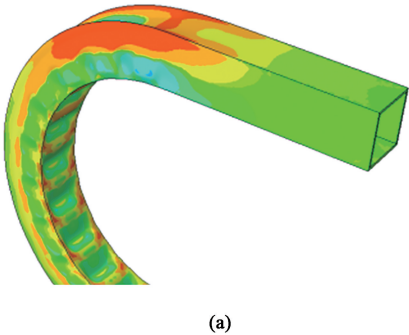


图 3 A6061S-O 铝合金方管绕弯后的形状

(a) 本文仿真结果 (b) 文献 [3] 中的实验结果

Fig. 3 Shapes of A6061S-O aluminum alloy square tube after rotary draw bending
(a) Simulation result in this paper (b) Experimental result in literature [3]

表 4 方管起皱后 5 个最宽横截面的宽度 (mm)
Table 4 Widths of five widest cross-sections of square tube after wrinkling (mm)

截面编号	本文仿真结果	文献中 [3] 中的实验结果
1	49.9	47.8
2	50.0	47.9
3	49.9	48.4
4	50.0	48.6
5	50.1	48.7

从图 3 与表 4 中可以看出, 本文仿真所得 A6061S-O 铝合金方管绕弯后弯曲段底板的起皱形式和 5 个最宽横截面的宽度数据均与文献 [3] 中的实验结果十分接近。这说明基于本文所建模型利用 ABAQUS 软件仿真金属薄壁管绕弯成形的精度较高, 其结果能够较为准确地反映真实情况。

3 管件截面的畸变形式与参数定义

表 1 所列前 17 种“目”字形截面管坯绕弯过程的数值仿真结果表明, 由于支撑板具有强力制约作用, 这些管坯的底板在绕弯中均未沿周向起皱。

数值仿真采用 ABAQUS 有限元分析软件, 为了验证建模方法的可靠性与应用这一软件仿真金属薄壁非圆形截面管件绕弯成形的准确度, 首先, 针对文献 [3] 中给出实验结果的 A6061S-O 铝合金方管 ($w_0=h_0=40\text{ mm}$, $t_0=3\text{ mm}$) 的绕弯过程建立仿真模型。在按文献 [3] 中所列的管材力学性能参数与成形参数建模并进行数值仿真后, 可得出本文仿真结果与文献 [3] 中实验结果的对照, 如图 3 与表 4 所示。

但在弯管任一径向截面上, 均会产生如图 4 所示的畸变形式, 即两侧板与两支撑板的上部向宽度中面倾斜, 截面整体呈现梯形; 顶板在两支撑板中部、支撑板与侧板中部以及侧板连接处均有下沉, 同时壁厚有所减薄; 底板因受弯曲模凹槽限制虽不会变宽, 但在两支撑板中部、支撑板与侧板中部会略微凸起, 同时壁厚轻微增大, 与侧板连接处的内圆角半径则明显减小。图 4 中, w_1 、 h_1 、 t_1 分别为弯管在该径向截面上的顶部宽度、最小高度与最小壁厚。

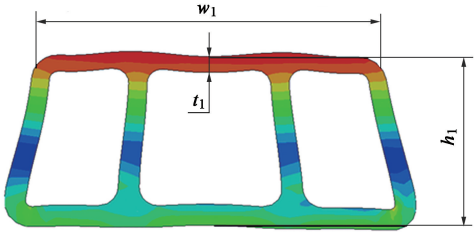


图 4 “目”字形截面管坯绕弯后截面畸变的一般形式

Fig. 4 General pattern of section distortion for tube blank with “目”-shaped section after rotary draw bending

为了反映弯管截面畸变的程度, 忽略底板壁厚的轻微增大, 定义弯管任一径向截面上的顶宽缩减率 $\lambda=1-w_1/w_0$, 截面高度缩减率 $\eta=1-h_1/h_0$, 壁厚

缩减率 $\Delta = 1 - t_1/t_0$ 。显然, 弯管上 λ 、 η 、 Δ 的最大值 λ_{\max} 、 η_{\max} 、 Δ_{\max} 愈大, 表明其径向截面的畸变愈发严重, 顶板愈易出现细颈甚至开裂, 这均将导致“目”字形截面弯管件的成形质量变差, 使用性能降低。

4 仿真结果的分析

4.1 弯管前端截面应力的变化形式

对高强钢管坯 1 的绕弯进行数值仿真, 可以得出弯管前端截面的顶板中部、底板中部、侧板中部、支撑板中部 4 个位置在 90° 绕弯过程中每一位置的周向应力 σ_θ 、径向应力 σ_r (在顶板、底板上即为厚向应力 σ_t) 与宽向应力 σ_w (在侧板与支撑板上即为厚向应力 σ_t) 的变化形式, 如图 5 所示。

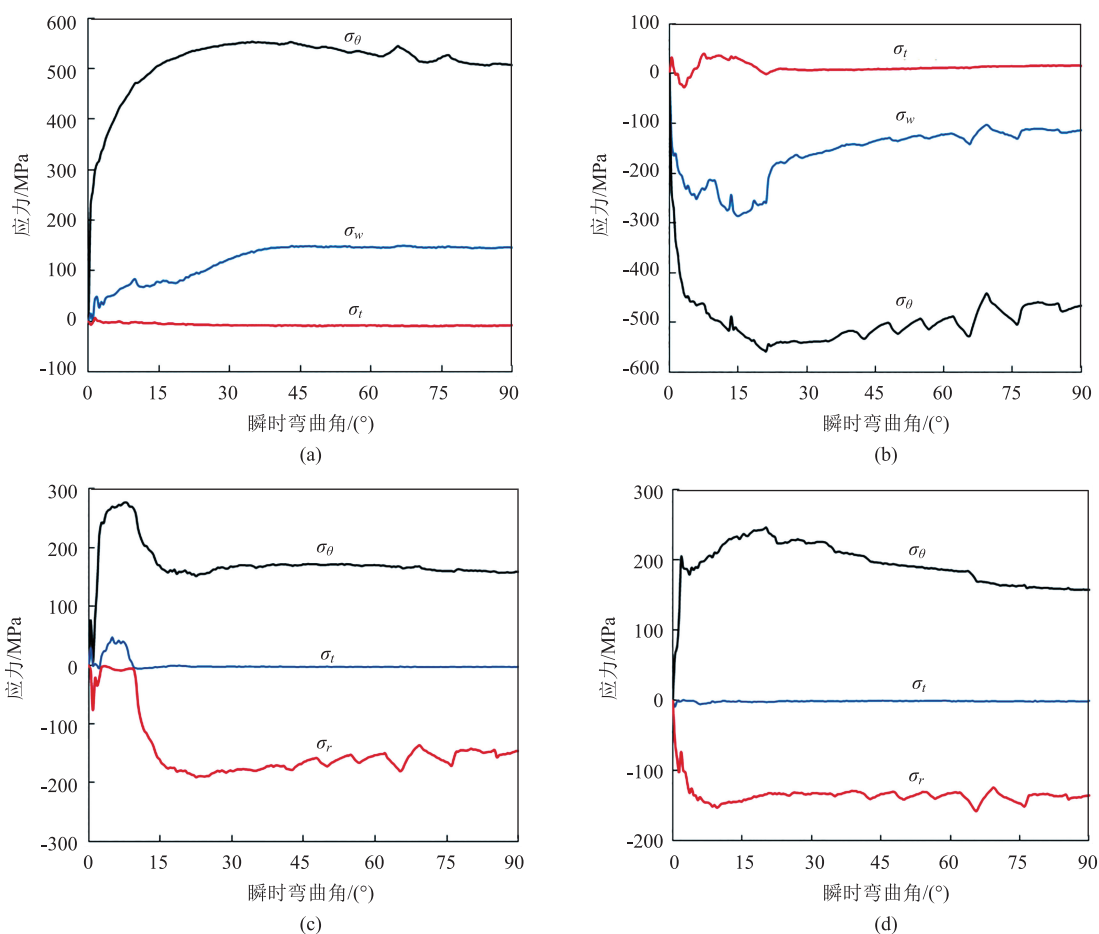


图 5 弯管前端截面 4 个位置处应力的变化形式

(a) 顶板中部 (b) 底板中部 (c) 侧板中部 (d) 支撑板中部

Fig. 5 Changing forms of stresses at four positions in front-end section of bent tube

(a) At middle of top plate (b) At middle of bottom plate (c) At middle of side plate (d) At middle of supporting plate

4.2 管材屈强比 R_{eL}/R_m 对弯管截面畸变的影响

对管坯 1、管坯 2 和管坯 3 (它们所用管材的屈

由图 5 可见, 由于管坯壁板的厚度相对横截面的宽度、高度均较小, 因此, 这些壁板中部在整个绕弯过程中除开始阶段以外, 其余时间均处于两向应力状态。顶板中部在周向受到较大拉应力的同时, 由于沿径向下沉, 因而在宽向也受到一定拉应力, 这就导致其下沉部位的壁厚减薄较多; 底板中部在周向受到较大压应力的同时, 因受模具凹槽的限制, 在宽向也受到一定压应力, 这就使得底板壁厚轻微增大, 并在两支撑板中部、支撑板与侧板中部略微凸起; 而侧板中部与支撑板中部均在径向受压的同时沿周向受拉, 且其应力大小与变化形式很是接近, 表明绕弯成形中管件的弯曲中性层已由高度中面沿径向下移, 此时该管坯的侧板和支撑板的壁厚与两端内圆角半径相同, 在绕弯中所起到的支撑作用基本相当。

服强度和抗拉强度之比, 即屈强比 R_{eL}/R_m 分别为 0.42、0.23 和 0.36) 的绕弯分别进行数值仿真后,

可以得出 3 种材料弯管各壁板的位移云图与应变云图。依据这些云图中的数据,可绘出“目”字形截面弯管的 λ_{\max} 、 η_{\max} 、 Δ_{\max} 与管材屈强比的关系曲线,如图 6 所示。

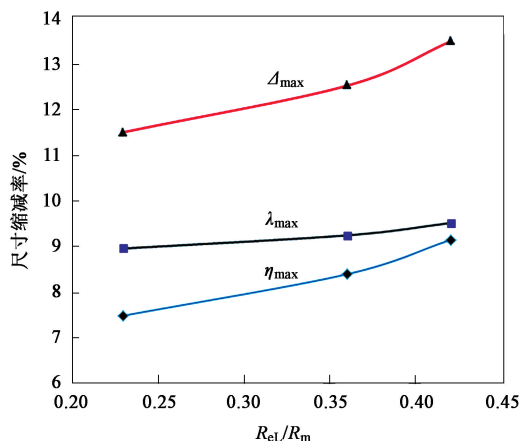


图 6 弯管 λ_{\max} 、 η_{\max} 、 Δ_{\max} 与管材屈强比的关系曲线

Fig. 6 Relation curves between λ_{\max} , η_{\max} , Δ_{\max} of bent tubes and yield-strength ratios of tube materials

由图 6 可见,虽然管坯 1~管坯 3 所用材料有所不同,但绕弯后弯管上的 Δ_{\max} 均明显大于 λ_{\max} 与 η_{\max} ,且这 3 个尺寸的缩减率均会随着管材屈强比的增大而增大,其中, η_{\max} 、 Δ_{\max} 的增长更为显著。这一方面说明,管坯 1~管坯 3 在绕弯后顶板局部壁厚的减薄相比顶宽与局部高度的缩减更为突出,可能成为制约弯管件产品质量的主要因素;另一方面也说明,屈强比越大的管材的抗失稳能力越差,在绕弯后,其局部壁厚与局部高度的缩减也更加严重。因此,要使“目”字形截面弯管的截面畸变与壁厚缩减较小,显然应选择屈强比较小的材料。

4.3 管坯绕弯高径比 h_0/R 对弯管截面畸变的影响

对管坯 4~管坯 6 的绕弯分别进行数值仿真,根据所得云图中的数据并结合对管坯 2 绕弯仿真所得的数据可以得出,在管材与管坯其他尺寸不变,仅截面高度变化时,管坯截面高度与管坯底部弯曲半径之比 h_0/R 对“目”字形截面弯管截面畸变的影响如图 7 所示。

从图 7 可以看出,在弯管模凹槽底部弯曲半径不变的情况下,随着管坯截面高度 h_0 的增大,弯管的 λ_{\max} 、 η_{\max} 、 Δ_{\max} 均会增大,其中 λ_{\max} 的增大尤为显著。其原因在于:管坯截面高度增大后,绕弯中管件侧板与支撑板向宽度中面倾斜所引起的与顶板交界处的宽向位移也就变大,此时顶板在侧板与支撑板中间以及两支撑板中间的下沉也就变大,而由于与

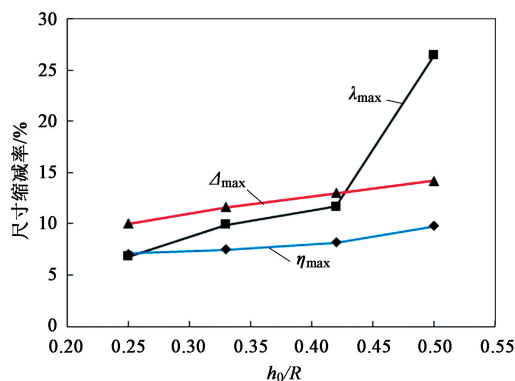


图 7 弯管 λ_{\max} 、 η_{\max} 、 Δ_{\max} 与管坯绕弯高径比的关系曲线

Fig. 7 Relation curves between λ_{\max} , η_{\max} , Δ_{\max} of bent tubes and height to bending radius ratio of tube blanks in rotary draw bending

中性层的距离变远,管件顶板的壁厚减薄也就更加严重。由此看来,采用较小截面高度的管坯可有效降低“目”字形截面弯管的截面畸变与壁厚减薄。

4.4 支撑板位置比 w_s/w_0 对弯管截面畸变的影响

对管坯 7~管坯 10 的绕弯分别进行数值仿真,根据所得云图中的数据并结合对管坯 2 绕弯仿真所得的数据可以得出,在管材与管坯其他尺寸不变,仅支撑板位置变化时,管坯支撑板位置比 w_s/w_0 对“目”字形截面弯管截面畸变的影响如图 8 所示。

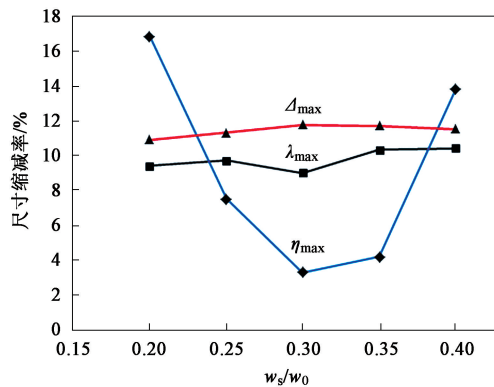


图 8 弯管 λ_{\max} 、 η_{\max} 、 Δ_{\max} 与管坯支撑板位置比的关系曲线

Fig. 8 Relation curves between λ_{\max} , η_{\max} , Δ_{\max} of bent tubes and location ratio of supporting plate for tube blanks

从图 8 可以看出,随着管坯支撑板位置比 w_s/w_0 从 0.2 逐步增大至 0.4,弯管的 λ_{\max} 与 Δ_{\max} 变化不大,说明支撑板位置的变化对弯管顶宽缩减率与顶板壁厚缩减率最大值的影响较小。但 η_{\max} 的先降后增的抛物线式变化则反映出当管坯中间仓室宽度明显大于或小于两侧仓室宽度时,均会导致顶板在宽度较大仓室中部的下沉程度变大,从而导致弯管在该截面的最小高度变小。由此可见,为使“目”字形截面弯管截面高度缩减率的最大值较小,并使

其顶部相对平整, 在管坯截面的设计中应使其 3 个仓室的宽度相同或较为接近。

4.5 支撑板壁厚比 t_s/t_0 对弯管截面畸变的影响

对管坯 11~管坯 13 的绕弯分别进行数值仿真, 根据所得云图中的数据并结合对管坯 2 绕弯仿真所得的数据可以得出, 在管材与管坯其他尺寸不变, 仅支撑板壁厚变化时, 管坯支撑板的壁厚比 t_s/t_0 对“目”字形截面弯管截面畸变的影响如图 9 所示。

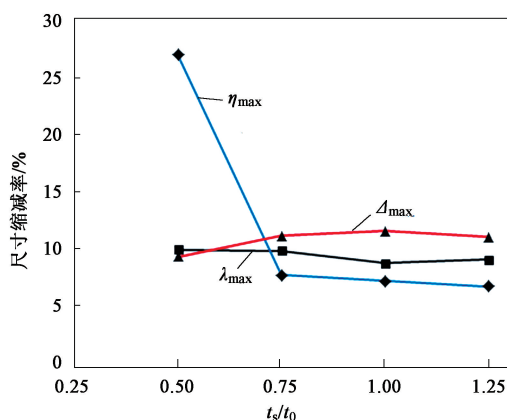


图 9 弯管 λ_{\max} 、 η_{\max} 、 Δ_{\max} 与管坯支撑板壁厚比的关系曲线

Fig. 9 Relation curves between λ_{\max} , η_{\max} , Δ_{\max} of bent tubes and wall thickness ratio of supporting plate for tube blanks

由图 9 可以看出, 在管坯支撑板壁厚比 t_s/t_0 变化时, 弯管的 λ_{\max} 与 Δ_{\max} 的波动很小, 但 η_{\max} 的变化很大。当 $t_s/t_0 = 0.5$ 时, 管件的 η_{\max} 甚至可达到 27%, 说明当管坯支撑板的壁厚相对侧板壁厚较薄时, 其在绕弯中可起到的支撑作用较弱, 易导致顶板在宽度中面大幅下沉。但当 $t_s/t_0 > 0.75$ 即支撑板的壁厚接近侧板壁厚后, 弯管的 η_{\max} 保持稳定。由此看出, 在设计“目”字形截面管坯时, 将支撑板壁厚取为大于侧板壁厚的数值对降低弯管的 λ_{\max} 、 η_{\max} 、 Δ_{\max} 并无效果, 因此, 可将管坯各壁板的壁厚取为同一数值。

4.6 支撑板圆角半径比 r_s/r_0 对弯管截面畸变的影响

对管坯 14~管坯 17 的绕弯分别进行数值仿真, 根据所得云图中的数据并结合对管坯 2 绕弯仿真所得的数据可以得出, 在管材与管坯其他尺寸不变, 仅支撑板圆角半径变化时, 管坯支撑板圆角半径比 r_s/r_0 对“目”字形截面弯管截面畸变的影响如图 10 所示。

由图 10 可以看出, 随着管坯支撑板两端圆角半径 r_s 的由小到大, 弯管 λ_{\max} 与 Δ_{\max} 的数值变化不大, 但 η_{\max} 的数值有明显下降。这说明在管坯设计

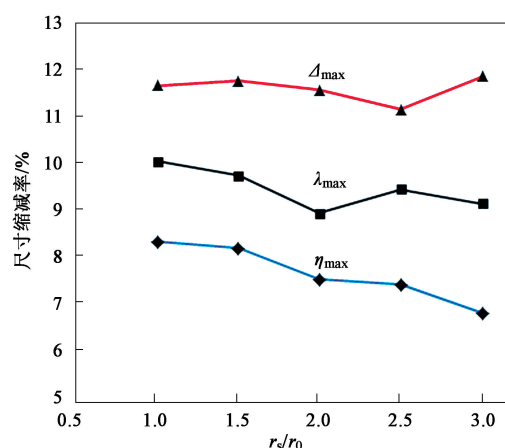


图 10 弯管 λ_{\max} 、 η_{\max} 、 Δ_{\max} 与管坯支撑板圆角半径比的关系曲线

Fig. 10 Relation curves between λ_{\max} , η_{\max} , Δ_{\max} of bent tubes and fillet radius ratio of supporting plate for tube blanks

中采用较外圈壁板内圆角半径 r_0 更大的 r_s 可以有效提高支撑板的支撑作用, 减小顶板在两支支撑板中部与侧板和支撑板中部的下沉。

4.7 支撑板数量对弯管截面畸变的影响

对管坯 18~管坯 19 的绕弯分别进行数值仿真, 根据所得云图中的数据并结合对管坯 2 绕弯仿真所得的数据还可得出, 在管材与管坯截面外廓尺寸不变、仅支撑板数量由 0~2 变化时, 管坯支撑板的存在与否及其数量对弯管截面畸变的影响如图 11 所示。

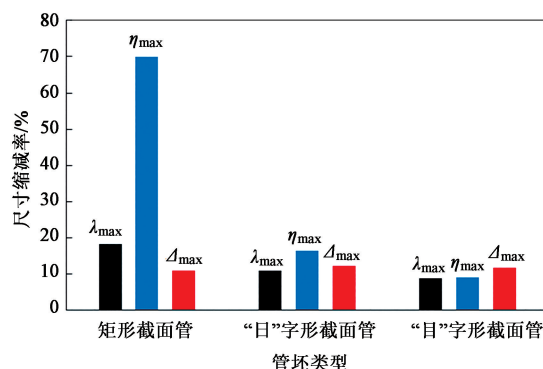


图 11 3 种不同截面弯管 λ_{\max} 、 η_{\max} 、 Δ_{\max} 的对比

Fig. 11 Comparison of λ_{\max} , η_{\max} , Δ_{\max} in three bent tubes with different sections

由图 11 可以看出, 截面外廓为矩形的管坯中有无支撑板以及支撑板的数目对弯管的 λ_{\max} 、 η_{\max} 、 Δ_{\max} 均有影响, 其中, 影响最大的是 η_{\max} 。对于宽高比较大而无支撑板支撑的矩形截面管坯, 在绕弯时很可能会因顶板中部下沉与底板中部凸起过大而导致两壁板过于贴近, 甚至发生接触。随着支撑板数目由 0 增大至 2, 弯管的 λ_{\max} 、 η_{\max} 均有明显降

低,但 Δ_{\max} 的数值却变化很小。这表明在外廓尺寸与成形参数一致的情况下,“目”字形截面弯管比矩形截面弯管与“日”字形截面弯管的截面畸变更小,但壁厚减薄的情况却相差不大。

5 结论

(1) 金属薄壁“目”字形截面管坯绕弯中由于支撑板的强力制约,其底板不易沿周向出现起皱。弯管截面的畸变形式为两侧板与两支撑板的上部向宽度中面倾斜,截面整体呈现梯形。

(2) 在大多数情况下,弯管顶板壁厚缩减率的最大值均高于顶宽缩减率的最大值与截面高度缩减率的最大值,因此,顶板局部壁厚减薄较多甚至开裂往往是制约“目”字形截面弯管件成形质量与使用性能的主要因素。

(3) 由于屈强比越大的管材抗失稳能力越差,在绕弯成形中弯管截面局部高度与局部壁厚的缩减越发严重。因此,选择屈强比较小的管材有利于减小“目”字形截面弯管的截面畸变与壁厚减薄。

(4) 管坯绕弯时的高径比对弯管截面畸变与壁厚减薄的影响较大,采用较小截面高度的管坯有利于减小“目”字形截面弯管的截面畸变与壁厚减薄。

(5) 管坯支撑板的位置、壁厚及其两端的圆角半径大小对弯管截面高度缩减率的最大值有着较大影响。为降低弯管的这一数值并使其顶部相对平整,应在“目”字形管坯截面的设计中使其3个仓室等宽并使管坯各壁板等厚,支撑板两端的圆角半径大于外圈壁板的内圆角半径。

(6) 在截面外廓尺寸与成形参数一致的情况下,以“目”字形截面管坯取代矩形截面或“日”字形截面管坯,虽可明显抑制弯管的截面畸变,却难以改善其顶板壁厚的减薄。

参考文献:

- [1] Paulsen F, Welo T. Cross-sectional deformations of rectangular hollow sections in bending: Part I-Experiments [J]. International Journal of Mechanical Science, 2001, 43 (1): 109-129.
- [2] Paulsen F, Welo T. Cross-sectional deformations of rectangular hollow sections in bending: Part II-Analytical models [J]. International Journal of Mechanical Science, 2001, 43 (1): 131-152.
- [3] Utsumi N, Sakaki S. Countermeasures against undesirable phenomena in the draw-bending process for extruded square tubes

- [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 123: 264-269.
- [4] 刘郁丽, 杨合, 崔珊珊, 等. 薄壁矩形管弯曲过程截面畸变的三维有限元分析 [J]. 塑性工程学报, 2007, 14 (3): 72-75.
Liu Y L, Yang H, Cui S S, et al. 3-D FEM analysis of section distortion in bending process of the thin-walled rectangular tube [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2007, 14 (3): 72-75.
- [5] 刘郁丽, 卢彩虹, 赵刚要, 等. 间隙对薄壁矩形管绕弯成型截面畸变影响的研究 [J]. 中国机械工程, 2008, 19 (16): 1972-1975.
Liu Y L, Lu C H, Zhao G Y, et al. Effect of clearance on cross section distortion of thin-walled rectangular tube in rotary draw bending process [J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19 (16): 1972-1975.
- [6] 张津, 刘郁丽, 赵刚要, 等. 材料参数对矩形管绕弯截面变形的影响 [J]. 热加工工艺, 2009, 38 (13): 1-4, 7.
Zhang J, Liu Y L, Zhao G Y, et al. Influence of material parameters on rectangular tube cross section deformation in rotary draw bending process [J]. Hot Working Technology, 2009, 38 (13): 1-4, 7.
- [7] 齐海雁, 刘郁丽, 杨合. 芯模参数对 3A21 矩形管绕弯截面变形的影响研究 [J]. 材料科学与工艺, 2012, 20 (6): 97-102.
Qi H Y, Liu Y L, Yang H. Influence of mandrel parameters on cross-section deformation of 3A21 rectangular tube in rotary-draw bending process [J]. Materials Science & Technology, 2012, 20 (6): 97-102.
- [8] Zhu Y X, Liu Y L, Yang H. Sensitivity of springback and section deformation to process parameters in rotary draw bending of thin-walled rectangular H96 brass tube [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22 (9): 2233-2240.
- [9] 王翠竹, 牛卫中. 芯管间隙对 JAC590Y 高强度矩形管绕弯成形质量的影响 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (2): 94-99.
Wang C Z, Niu W Z. Influences of clearance between mandrel and tube on forming quality for JAC590Y high strength steel rectangular tube in rotary draw-bending [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (2): 94-99.
- [10] 王翠竹, 牛卫中. 弯曲角度与半径对 Q345 钢矩形管绕弯截面畸变的影响 [J]. 塑性工程学报, 2021, 28 (8): 112-118.
Wang C Z, Niu W Z. Influences of bending angle and radius on the section distortion of Q345 steel rectangular tube in rotary-draw bending [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28 (8): 112-118.
- [11] 梁策, 黄富雷, 梁继才, 等. 日字形防护梁绕弯成形数值模拟 [J]. 吉林大学学报 (工学版), 2023, 53 (12): 3397-3403.
Liang C, Huang F L, Liang J C, et al. Numerical simulation on deformation of protective beam with "日"-shaped section during rotary draw bending [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2023, 53 (12): 3397-3403.