闭截面型材的拉弯成形性

周贤宾 刁可山 李晓星 金朝海

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100083)

摘 要: 拉弯是型材的基本成形方法. 截面畸变是型材拉弯成形中的常见缺陷,并对型材的回弹和变薄有交叉影响,型材拉弯成形性的分析评估远比板材成形复杂. 提出了型材拉弯成形性的概念,建立了矩形截面型材拉弯成形性分析模型,基于有限元数值模拟研究了截面结构、相对高度和壁厚分布等几何参数对拉弯成形性的影响规律,从提高拉弯成形性出发提出了型材截面优化设计的原则.

关 键 词: 型材; 拉弯成形性; 有限元数值模拟; 截面畸变; 回弹; 飞机; 汽车制造

中图分类号: TG 386

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)10-1168-06

Stretch-bending formability of profile

Zhou Xianbin Diao Keshan Li Xiaoxin Jin Chaohai

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Stretch-wrap bending is the essential forming processing for profile. Cross section distortion is the common defect during the stretch-wrap bending of profile, and it brings cross-effect with thinning of thickness and springback. The stretch-wrap bending formability for profile is much more difficult to analyze and to evaluate than that for sheet forming. The concept of stretch-wrap bending formability for profile was presented and an analytic model for profile with rectangular section was established. The effect of the geometric parameters such as section configuration, relative height and wall-thickness distribution of profile on stretch-wrap bending formability was studied based on finit element method(FEM) numerical simulation. The principle for optimization design of cross section was proposed in order to improve the stretch-wrap bending formability of profile.

Key words: profile; stretch-wrap bending formability; finit element method numerical simulation; cross section distortion; springback; aircraft; automobile manufacturing

铝合金型材是飞机结构的基本用材,近年来在轻量化汽车结构及建筑结构中也得到大量应用. 铝合金框架式 ASF(Aluminum Space Frame)车身包含多种封闭截面形状的型材弯曲件,具有重量轻和安全性能高的优点,受到汽车生产商的重视[1],为此迫切需要发展铝型材高精度弯曲成形技术. 拉弯成形具有精度高、成本低的特点,并适用于变曲率弯曲件,因而受到了广泛关注[2].

型材拉弯容易产生起皱、破裂、截面畸变和回弹等多种缺陷. 对于闭截面型材成形,除应避免起皱和破裂外,最为关注的是尽可能小的截面畸变和回弹,以保证车身型材弯曲件的高精度要求. 对影响拉弯成形精度的一般因素已进行了大量的试验及数值模拟研究[3-7],但对如何评价和衡量不同结构形式的型材获得高精度的能力尚未见系统报道. 为此本文提出了型材拉弯成形性的概念,并建立典型的矩形型材拉弯成形性分析模型,对比分析了不同截面尺寸型材拉弯成形性的差异.

另一方面,技术人员希望在设计阶段兼顾轻量化和良好的成形工艺性,从而提高设计的有效

收稿日期: 2006-05-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10477001); 法国雷诺汽车公司资助项目

作者简介: 周贤宾(1938-),男,江苏南通人,教授, xianbinzhou@vip.sina.com.

性. 因此,本文研究了型材结构形状和壁厚分布对拉弯成形性的影响,提出了型材截面设计原则,为从工艺角度优化型材截面形状提供了依据.

1　型材拉弯成形性的内涵

1.1　拉弯成形性的概念

板材成形性指板材在冲压成形过程中对成形工艺的适应能力[8]. 日本学者 Yoshida 为全面考虑各类成形缺陷,曾提出综合成形性(overall formability)的概念,包括抗破裂性、贴模性和定形性,如图 1a 所示. 抗破裂性即狭义上的成形性(formability). 贴模性(fittability)研究因起皱等引起的零件与模具的不贴合. 定形性(fixability)研究成形终了卸载过程的回弹. 成形缺陷一般可分为物理损伤性缺陷(局部颈缩、破裂、表面缺陷等)和几何精度性缺陷(起皱、截面畸变和回弹等)2 类[9]. 为了对比和衡量不同截面和材料的型材对拉弯成形工艺的适应能力,针对型材成形主要特点,需研究型材拉弯成形性(stretch bending formability),即型材在拉弯成形中能够顺利成形并满足精度要求的能力,包括 3 种成形性能指标(如图 1b 所示):

1) 截面保持性,型材拉弯成形过程中保持原始截面形状的能力,即抗截面畸变性能;

2) 定形性,型材拉弯卸载时保持成形终了形状和尺寸的能力,即抗弹复性能(见图 2);

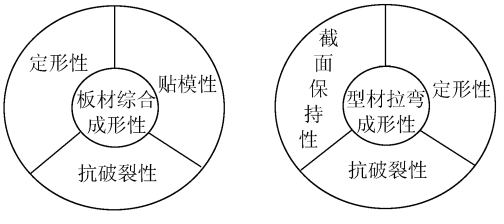
3) 抗破裂性,型材拉弯成形中抵抗颈缩和破裂的能力.

影响型材拉弯成形性的因素众多,可将其分为 3 大类:

1) 截面形状. 型材截面形状多种多样,拉弯成形性与截面形状密切相关.

2) 材料力学性能. 不同材料、不同规格型材的力学性能差异明显,主要用弹性模量 E、屈服强度 σ_s、抗拉强度 σ_b、硬化指数 n 和各向异性指数 r(r_0,r_{45}和 r_{90})来表征.

3) 工艺参数. 指拉弯成形中预拉、补拉、相对弯曲半径、弯曲角度和接触摩擦状态等;为克服截面畸变,成形中可能填充芯材,这些都将影响拉弯成形性.



a　板材综合成形性　　b　型材拉弯成形性

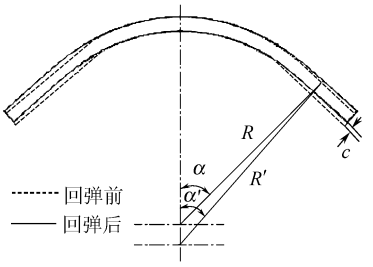
图 1　板材及型材成形性的概念

由此可见,型材拉弯成形性与板材成形性不同,不仅取决于型材的材料性能,并与型材截面几何特征密切相关,需要考虑材料变量、成形工艺变量和截面形状变量.

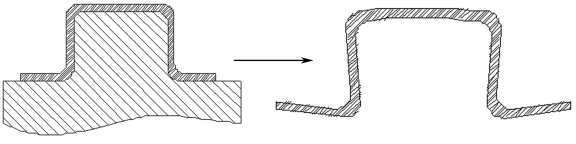
1.2　型材拉弯成形性与板材成形性对比

型材拉弯成形性与板材成形性相比,既有相似处,又存在差异,研究的侧重点有所不同.

1) 型材拉弯成形中施加适当的预拉可避免内侧失稳起皱的发生,抗皱性能可不作为型材拉弯成形性研究的重点.



a　回弹 C 使曲率半径 R 增大,弯曲角度 α 减小



b　回弹使型材截面畸变

图 2　型材拉弯定形性

2) 型材成形中易产生截面畸变,造成型材截面几何精度和贴模度降低. 因此截面形状保持性是型材拉弯成形性特有的研究内容. 系统研究截面尺寸、材料性能等因素对型材截面形状保持性的影响规律,并采用适当的工艺方法来提高型材抗截面畸变性能,对生产实践具有重要意义.

3) 型材的回弹除受材料性能和拉弯工艺参数的影响,还与截面形状及其在成形中产生的畸变密切相关,因此型材拉弯定形性研究更加复杂.

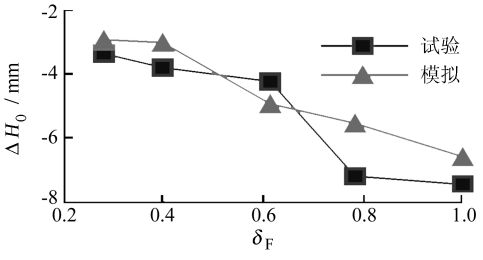
4) 抗破裂性在板材成形和型材拉弯成形研究中均占有重要的地位. 板材常用多种模拟成形性能指标来衡量不同冲压工艺下的总体抗破裂性能,并用成形极限图(FLD)来衡量局部极限变形能力[10];而型材拉弯由于截面变量及变化的影响,加之截面尺寸通常不大,难以沿用板材的典型试验方法获取成形性指标或建立成形极限图衡量成形极限. 因此针对型材截面形状和变形特点,建立适用于型材拉弯的成形极限判据,是型材抗破裂性研究的难点[2].

2 分析模型的建立

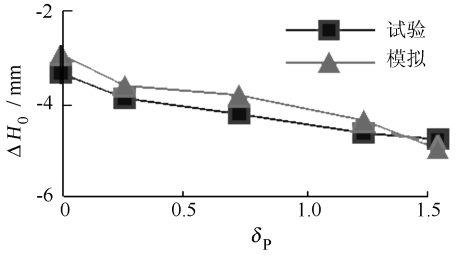
2.1 张臂式拉弯有限元加载模型及其试验验证

若基于传统的物理模拟试验方法研究不同截面型材拉弯成形性的差异,则试验消耗相当巨大,为此本文基于有限元模拟的方法进行研究.

建立张臂式拉弯有限元模型的难点在于加载轨迹的合理建模. 通过对拉弯机动作进行仿真,建立了拉伸作动筒模型,基于动态显式有限元软件PAM-STAMP2G建立了张臂式拉弯有限元加载模型[6]. 与文献[7]中的试验结果对比表明(见图3和图4),数值模拟与试验结果相当吻合,验证了该模型的有效性和模拟结果的准确性.

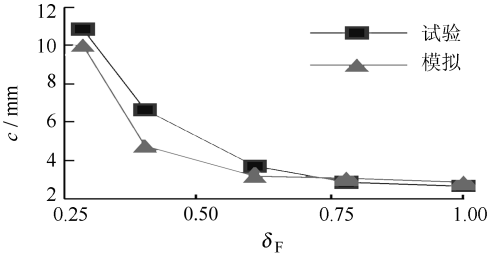


a 不同预拉率 δ_F

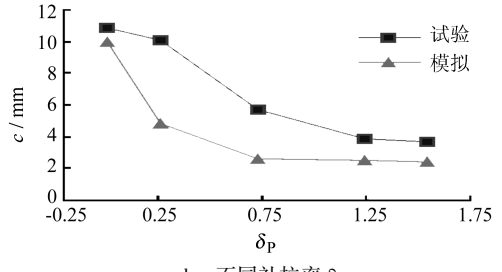


b 不同补拉率 δ_P

图3 截面畸变 ΔH_0 数值模拟精度



a 不同预拉率 δ_F



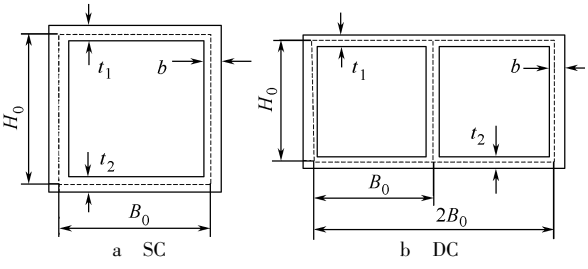
b 不同补拉率 δ_P

图4 c 模拟精度

2.2 矩形截面尺寸的定义

型材截面形状多种多样,矩形截面型材拉弯性是型材拉弯成形性研究的基础,因此以矩形型材为例建立分析模型.

考虑单室SC(Single Chamber)和双室DC(Double Chamber)矩形截面型材,尺寸参数为宽度 B_0、高度 H_0、上腹板厚度 t_1、下腹板厚度 t_2 和侧壁厚度 b,高度和宽度以厚度中心线为基准,如图5所示. 定义型材截面相对高度 h^*、侧壁相对厚度 b^*、腹板相对厚度 t_1^* 和 t_2^*,如表1所示.



a SC b DC

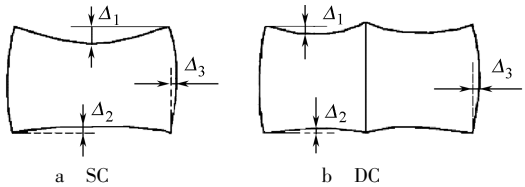
图5 型材尺寸参数

表1 截面相对尺寸参数

参数	h^*	b^*	t_1^*	t_2^*
定义	$\frac{H_0}{B_0}$	$\frac{b}{B_0}$	$\frac{t_1}{H_0}$	$\frac{t_2}{H_0}$

2.3 成形性的衡量

截面形状保持性以上腹板塌陷 Δ_1、下腹板内凹 Δ_2 和侧壁外凸 Δ_3 来衡量,如图6所示. 定形性以回弹后弯曲角度 α 处型材下腹板与模具的 c 来衡量;拉弯变形极限(抗破裂性)以卸载回弹前的壁厚最大减薄率来衡量. 拉弯成形性衡量指标及定义如表2所示.



a SC b DC

图6 截面畸变的各项参数

表2 型材拉弯成形性衡量参数

参数	Δ_1^*	Δ_2^*	Δ_3^*	c^*	Δ_t^*
定义	$\frac{\Delta_1}{H_0}$	$\frac{\Delta_2}{H_0}$	$\frac{\Delta_3}{B_0}$	$\frac{c}{H_0}$	$\frac{t_1'-t_1}{t_1}$

为使不同型材的拉弯成形性具有可比性,建立分析模型时保持型材具有相同的边界条件和拉弯变形量. 因此,分析模型中设定预拉至屈服点应变,δ_p 为0.5%,相对弯曲半径(R/H_0)为20,弯曲角为90°($\alpha=45°$),由摩擦试验测得摩擦系数为0.12. 采用铝合金AA6082T5型材力学性能数据(见表3,其中,ν 为泊松比;K 为强度系数),忽略

型材厚度不同时力学性能的差异. 型材总长为2 000 mm,其中可变形部分为1 900 mm,考虑对称性取其一半建立有限元模型如图 7 所示.

表 3　铝合金 AA6082T5 型材力学性能参数

参数	E/MPa	ν	$\sigma_{0.2}$/MPa	K/MPa	n	各向异性指数		
						r_0	r_{45}	r_{90}
数值	65 050	0.34	288.2	371.9	0.052	0.514	0.844	0.626

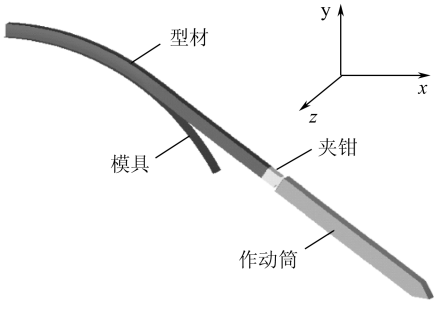


图 7　张臂式拉弯有限元加载模型

3　模拟结果及分析

3.1　截面尺寸对拉弯成形性的影响

型材具有相同的矩形截面有效面积,但当相对高度和壁厚等结构参数不同时,其拉弯成形性能也会有差异.

给定影响型材截面的尺寸参数及取值如表 4 所示. 采用正交设计方法,选用 $L_9(3^4)$ 正交表,将型材截面形状从 81 种缩减为 9 种,截面种类及计算结果如表 5 所示. 可见型材 Δ_2^* 和 Δ_3^* 均非常小,表明截面畸变主要表现为 Δ_1^*;型材厚度减薄率较稳定,说明型材抗破裂性主要受拉弯变形程度的影响,与预拉率、补拉率和相对弯曲半径等工艺参数密切相关,截面尺寸因素的影响较小.

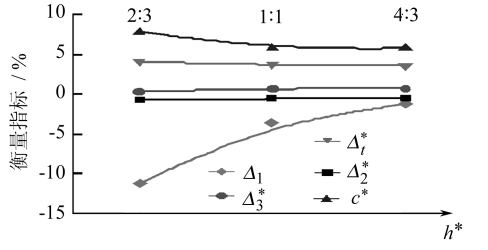
表 4　影响因素及水平

水平	h^*	b^*	t_1^*	t_2^*
1	2∶3	3∶80	3∶80	3∶80
2	1∶1	4.5∶80	4.5∶80	4.5∶80
3	4∶3	3∶40	3∶40	3∶40

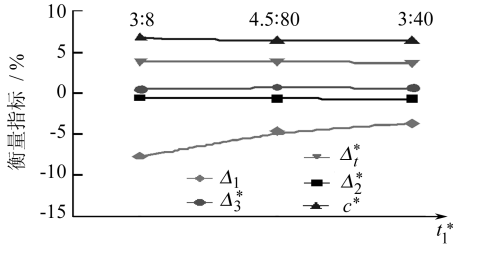
采用正交设计的极差分析方法,可以得到各截面因素对拉弯成形性的影响规律,如图 8 所示. 可见,增大型材的 h^*,t_1^*,t_2^* 和 b^*,Δ_1^* 均明显减小,其中 h^* 影响最为显著;回弹呈现先减小后趋稳定的趋势,而厚度减薄率变化不大. 因此,增大型材的 h^*,t_1^*,t_2^* 和 b^*,尤其是 h^*,可增大型材的抗截面畸变和抗回弹能力,提高型材的拉弯成形性.

表 5　正交设计及数值模拟结果

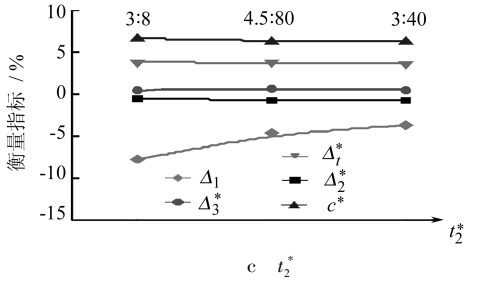
截面形状	截面尺寸参数及取值				计算结果				
	h^*	b^*	t_1^*	t_2^*	Δ_1^*/%	Δ_3^*/%	Δ_2^*/%	Δ_t^*/%	c_t^*/%
1	1	1	1	1	−17.28	0.62	−0.28	4.35	9.50
2	1	2	2	2	−8.95	0.28	−0.88	3.95	5.99
3	1	3	3	3	−7.28	0.08	−1.08	3.97	7.08
4	2	1	2	3	−4.60	0.21	−0.43	3.65	4.85
5	2	2	3	1	−3.45	1.15	−0.95	3.79	5.57
6	2	3	1	2	−2.93	0.75	−0.33	3.60	5.76
7	3	1	3	2	−1.53	0.62	−0.83	3.56	5.79
8	3	2	1	3	−1.48	0.65	−0.20	3.77	5.39
9	3	3	2	1	−0.85	0.88	−0.60	3.49	5.15



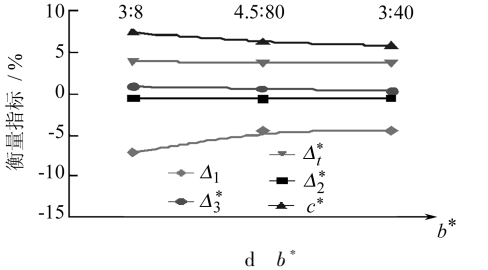
a　h^*



b　t_1^*



c　t_2^*



d　b^*

图 8　截面尺寸变化对成形精度的影响

3.2　截面壁厚分配对拉弯成形性的影响

由上可知,增大型材上、下腹板和侧壁厚度,均能提高拉弯成形性. 对于汽车等轻量化结构设计而言,在不增加型材构件重量的情况下,如何对型材截面进行优化设计从而提高其成形性具有重要的实际意义.

本节定义 3 种具有相同截面面积但截面尺寸

参数不同的型材 SC1,SC2,SC3(见表 6),系统研究上、下腹板和侧壁厚度分配对拉弯成形性的影响规律.

表 6 型材截面及尺寸参数

尺寸参数	SC1	SC2	SC3
t_1^*	2.5 ∶40	2 ∶40	1.5 ∶40
t_2^*	2.5 ∶40	2 ∶40	1.5 ∶40
b^*	1.5 ∶40	2 ∶40	2.5 ∶40

截面畸变 Δ_1^*,Δ_2^* 和 Δ_3^* 沿型材长度的变化如图 9 所示. 对比图 9a ~ 图 9c 可见,与 SC2 型材相比,SC1 型材上腹板因 t_1^* 增大使其 Δ_1^* 减小;而下腹板因 b^* 减小及 Δ_3^* 增加,使其 Δ_2^* 反而增加. SC3 型材恰好相反.

由图 9d 可见,Δ_1^* 远大于其他两者,表明这是影响截面尺寸精度的主要因素.

SC1 型材侧壁 b^* 减小造成 Δ_2^* 和 Δ_3^* 增大,但 t_1^* 增大使 Δ_1^* 的减小更为明显;3 种型材的回弹量分别为 6.8%,6.3% 和 5.71%,SC1 型材的回弹略大. 综上所述,就抗截面畸变的能力来讲,SC1 截面要优于其他 2 种;而 SC3 截面因侧壁加厚,对于减小回弹较为有利.

通过以上分析可知,在不增大型材截面面积的情况下,可通过增加上腹板相对厚度和优化壁厚分配,提高型材的拉弯成形性.

3.3 截面结构形式对拉弯成形性的影响

改善型材拉弯成形性的另一种有效途径,是在相同用料情况下改变型材的结构形式,如将截面由 SC 改为 DC. 如表 7 所示,表中,$t_1^* = t_2^* = t^*$. 对每一种截面考虑 2 种厚度.

表 7 型材截面形状及尺寸

相对参数	SC	DC
h^*	1 ∶2	1 ∶1
t^*	1 ∶20	1.71 ∶40
	3 ∶40	2.57 ∶40

模拟结果表明,$t^* = 1 \text{ ∶} 20$ 的 SC 型材,由于 h^* 较小且壁厚较薄,随着弯曲角度的增加,截面畸变严重. 当弯曲角度达 15°时,上腹板几乎完全塌陷,使型材无法顺利成形,如图 10a 所示. 将截面形状改为 DC 后,不仅可以顺利成形,而且截面畸变大大减小,如图 10b 所示.

将 SC 型材的 t^* 增大到 3 ∶40,虽也可成形,但截面畸变仍非常严重,如图 11a 所示;截面形状改为 DC,则畸变大大减小,如图 11b 和图 12 所示,并且沿型材长度截面形状更为均匀.

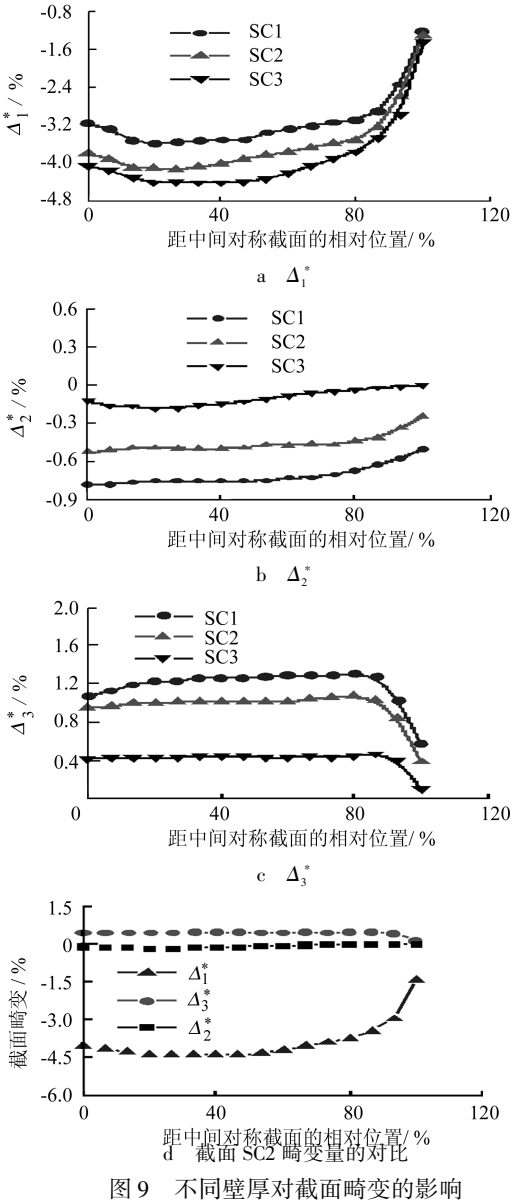
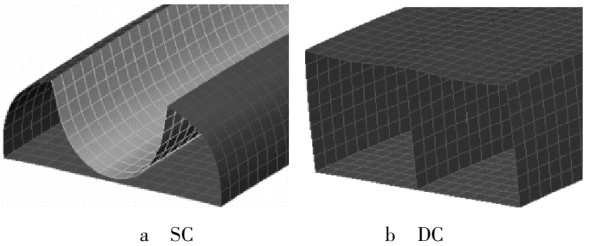
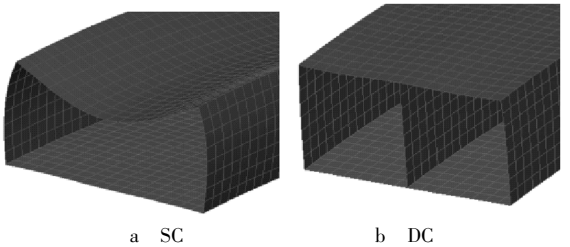


图 9 不同壁厚对截面畸变的影响



a SC b DC

图 10 型材截面畸变示意图($t^* = 1 \text{ ∶} 20$)



a SC b DC

图 11 型材截面畸变示意图($t^* = 3 \text{ ∶} 40$)

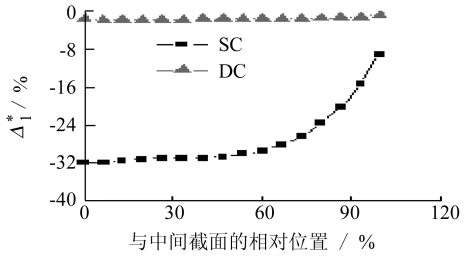


图 12　SC 与 DC 截面畸变的比较(t^* =3 :40)

由此可见,对于 h^* 较小的型材,增大 t^* 可提高型材的抗截面畸变能力;而将截面由 SC 变为 DC 等厚截面,即增大 h^*,大大提高了型材抗截面畸变的能力.

计算表明,对于 SC 型材 t^* 为 3 :40 的情况,SC 和 DC 型材的 c 分别为 9.55% 和 5.78%. 可见型材的回弹也与截面畸变密切相关,将结构改为双室后,回弹减小,大大提高了型材的抗回弹能力.

因此,在不改变材料用量的情况下,双室截面结构明显提高了型材的拉弯成形性.

3.4　截面优化设计原则

型材截面形状及壁厚分布对拉弯成形性有重要影响,从成形工艺考虑,型材截面设计应遵循以下原则:

1) 型材截面设计时,尽量采用较大的 h^*. 增大 h^*,t_1^*,t_2^* 和 b^*,均可提高型材的抗截面畸变和抗回弹能力;增大 h^* 提高拉弯成形性的效果更为明显.

2) 在不允许增加型材重量和改变结构时,可考虑增大上腹板厚度并减小侧壁厚度来提高型材的拉弯成形性.

3)截面结构形式对型材的成形精度有重要的影响. 对于 h^* 较小的型材,可考虑改变截面结构,增大 h^*,提高拉弯贴模性.

4　结 束 语

本文针对封闭截面型材拉弯成形中的质量问题,提出了型材拉弯成形性的概念,阐述了与板材冲压成形性的差异及其衡量指标;建立了矩形截面型材拉弯成形性分析模型,基于有限元模拟,系统研究了截面形状和尺寸要素对型材拉弯截面畸变、壁厚变薄和回弹的影响规律;从提高型材拉弯成形性出发,提出了型材截面优化设计的原则.

参考文献 (References)

[1] 王柏龄. 全铝车身的研究及发展[J]. 汽车工业研究, 2000(6):31-33
Wang Boling. Research and development of aluminum car body [J]. Auto Industry Research,2000(6):31-33(in Chinese)

[2] 刁可山,周贤宾,金朝海,等. 铝合金型材拉弯成形研究进展[J]. 塑性工程学报,2003,10(6):231-234
Diao Keshan, Zhou Xianbin, Jin Chaohai, et al. The study on stretch-bending process for aluminium extrusions[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2003,10(6):231-234(in Chinese)

[3] Clausen A H, Hopperstad O S, Langseth M. Stretch bending of aluminum extrusions: effect of geometry and alloy[J]. Journal of Engineering Mechanic, 1999,125(4):392-400

[4] Clausen A H, Hopperstad O S, Langseth M. Stretch bending of aluminum extrusions: effect of tensile sequence[J]. Journal of Engineering Mechanics,1999, 125(5): 521-529

[5] Clausen A H, Hopperstad O S, Langseth M. Sensitivity of model parameters in stretch bending of aluminium extrusions[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2001, 43(2): 427-453

[6] 刁可山,周贤宾,金朝海,等. 复杂截面型材力控制拉弯成形数值模拟分析[J]. 材料科学与工艺,2004,12(4):413-416
Diao Keshan, Zhou Xianbin, Jin Chaohai, et al. A numerical study on the force-controlled stretch bending of aluminum extrusion with complex cross section[J]. Material Science and Technology, 2004,12(4):413-416(in Chinese)

[7] 刁可山,周贤宾,李晓星,等. 矩形截面型材拉弯成形[J]. 北京航空航天大学学报,2005,31(2):134-137
Diao Keshan, Zhou Xianbin, Li Xiaoxing, et al. Stretch bending of aluminum extrusion [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2005,31(2):134-137(in Chinese)

[8] 王炎山. 锻压工艺标准应用手册[M]. 北京:机械工业出版社,1998:444-505
Wang Yanshan. Application standard handbook of forging & stamping process [M]. Beijing:China Machine Press, 1998:444-505(in Chinese)

[9] 周贤宾,周敏. 方板对角拉伸试验与板材的综合成形性[J]. 锻压技术,1985(4):52-56
Zhou Xianbin, Zhou Min. Yoshida backling test and overall formability of sheet metal[J]. Forging & Stamping Technology, 1985(4):52-56(in Chinese)

[10] 梁炳文. 板金成形性能[M]. 北京:机械工业出版社,1999
Liang Bingwen. Sheet-metal formability [M]. Beijing: China Machine Press, 1999(in Chinese)