

# 2099-T83 铝锂合金型材四轴滚弯的斜弯曲控制

胡智华, 陈明和, 谢兰生

(南京航空航天大学, 江苏 南京 210016)

**摘要:** 2099-T83 铝锂合金 2 形型材是大型客机 C919 中后机身重要桁架零件, 四轴滚弯成形是加工此类零件的主要方法。由于铝锂合金比强度大, 同时 2 形型材结构非对称, 相比于普通铝合金型材, 铝锂合金 2 形型材滚弯成形中极易产生斜弯曲。为此, 利用有限元软件 ABAQUS 对 2 形型材的四轴滚弯过程进行了模拟, 分别研究了型材与滚轮之间间隙、下滚轮与型材下表面之间垂直方向预留间隙、左右滚轮 X 方向移动量对 2 形型材四轴滚弯中斜弯曲的影响, 确定了最佳滚弯工艺参数。基于最佳滚弯工艺参数进行了滚弯工艺试验。结果表明, 采用型材与滚轮之间间隙 0.2 mm、下滚轮与型材下表面之间垂直方向预留间隙 0.3 mm、左右滚轮 X 正方向移动量 1.5 mm 时能有效解决 2 形型材滚弯的斜弯曲问题。

**关键词:** 铝锂合金; 2 形型材; 滚弯; 斜弯曲

**中图分类号:** V263.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2017)10-2957-06

2099-T83 铝锂合金具有热暴露稳定性高、密度小、比强度高、疲劳裂纹扩展速率慢等优良性能, 被称为 21 世纪航空航天领域最理想的轻质高强结构材料<sup>[1-4]</sup>。2099-T83 铝锂合金 2 形变曲率型材是中国自主研制的大型客机 C919 中后机身重要桁架零件, 该型材的成形精度直接影响着飞机的气动外形和飞行性能。

四轴滚弯中型材的斜弯曲是由于弯曲滚轮对型材作用力的合力不通过剖面的任意中心主惯性平面<sup>[5]</sup>所致。2 形型材结构非对称且铝锂合金材料比强度高, 造成铝锂合金 2 形型材滚弯成形异常困难。工艺人员靠传统的以经验分析和试验为主的方法进行滚弯成形时, 为防止由斜弯曲而引起的零件报废, 必须进行反复多道次滚弯, 这样零件容易形成多个压痕, 影响表面质量, 同时滚弯后的零件还需要进行校形才能达到设计要求, 这严重影响了该种型材的加工效率, 制约了中国大型客机 C919 桁架零件的研制进展。

目前, 有关滚弯成形的研究较多。Hua<sup>[6]</sup>研究了控制弹塑性薄板大变形弯曲的微分方程。Pastor<sup>[7]</sup>对 U 形截面和  $\Omega$  形截面在纯弯曲下的受力情况进行了研究, 通过有限元模拟得出了工件弯矩和弯曲角度的关系曲线。Fan Ning<sup>[8]</sup>提出了合理设计滚轮形状和增加辅助装置来提高复杂零件三轴滚弯中的质量。陈毓勋<sup>[5]</sup>提出了在左右弯曲滚轮之间的弯曲变形区域内, 腹板和缘板两侧均加以足够的约束以避免型材发生弯曲扭转。于琦<sup>[9]</sup>提出增加滚轮对数的方法控制型材滚弯过程中

的扭转。陈鹏<sup>[10]</sup>通过在不同曲率弧段之间引入过渡弧段的方法, 使两侧弯曲滚轮位置协调调整时保持主动夹持轮的连续滚动, 有效解决了死点质量问题。周养萍<sup>[11]</sup>在研究 7075-O 铝合金 Z 型材滚弯时, 考虑到零件一次滚弯到位可能会因为刚度不足引起失稳扭转变形, 提出了分二次滚弯成形的方法。侯登振<sup>[12]</sup>通过填充支撑材料及侧向夹紧技术有效地防止了非对称截面工件弯曲成形的扭转失稳。虽然目前对于滚弯成形有过大量研究, 但采用有限元方法分析滚弯过程中型材的斜弯曲的研究却鲜有报道。

本文基于新引进的 MC4P431IAS 三维四辊数控滚弯机, 针对 C919 客机典型铝锂合金 2 形型材, 采用标准静态算法对型材的滚弯过程进行了模拟, 分析了型材与滚轮之间间隙、下滚轮与型材下表面之间垂直方向预留间隙、左右滚轮 X 方向移动量对型材四轴滚弯中斜弯曲的影响, 确定了型材滚弯的最佳工艺参数。基于最佳工艺参数进行了 2 形型材四轴滚弯工艺试验。

## 1 型材四轴滚弯模型简化

2 形型材截面及滚轮基本尺寸如图 1 所示。其中  $a$  表示型材与滚轮之间间隙。设计要求其外形误差小于 1 mm。

MC4P431IAS 三维四辊数控滚弯机平面图如图 2 所示。它由 4 个滚轮组成: 上滚轮、下滚轮、左滚轮、右滚轮。型材与滚弯机可以简化成图 3 所示。其中上

收稿日期: 2016-10-14

作者简介: 胡智华, 男, 1990 年生, 硕士, 南京航空航天大学机电学院, 江苏 南京 210016, 电话: 025-84892508, E-mail: hu050930115@163.com

滚轮轴心固定于  $O_1$ ；下滚轮轴心  $O_2$  可沿  $O_1O_2$  方向上下运动；左滚轮轴心  $O_5$  绕固定点  $O_3$  转动，运动轨迹如圆弧 AB；右滚轮轴心  $O_6$  绕固定点  $O_4$  转动，运动轨迹如圆弧 CD。

$O_1$  到  $O_3$  及  $O_4$  的竖直距离为 370 mm， $O_3O_5=240$  mm， $O_4O_6=240$  mm， $O_3O_4=445$  mm。下滚轮最小半径为 180 mm，上滚轮最大半径为 180 mm，型材厚度为 2 mm。

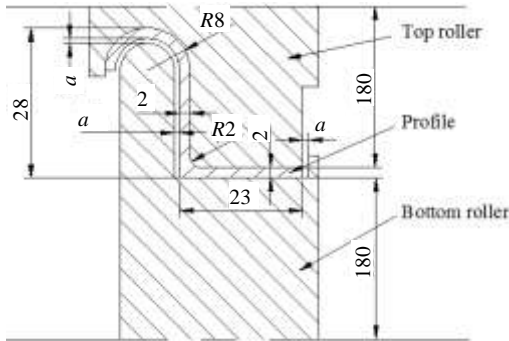


图 1 型材截面及滚轮基本尺寸

Fig.1 Cross-section of profile and rollers' basic size

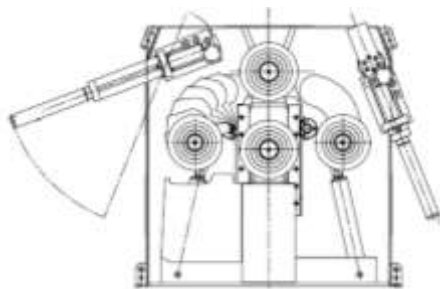


图 2 数控滚弯机平面图

Fig.2 CNC roll bending machine layout

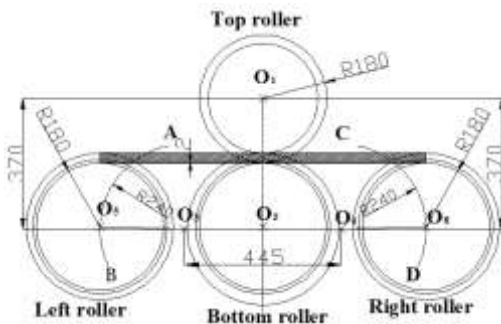


图 3 型材滚轮初始位置简化图

Fig.3 Simplified diagram of initial position for rollers and profile

为方便有限元数值模拟中边界条件定义，建立左右滚轮抬升量  $\Delta h$  与左右滚轮中心绕  $O_3$  及  $O_4$  的转角  $\alpha$  的关系。假设左滚轮轴心由  $O_5$  运动到  $O_5'$ ，对应左滚轮抬升量为  $\Delta h$ ，如图 4 所示。

分析有：

$$h_1 = 370 - 180 - 2 = 188 \quad (1)$$

$$\sin\beta = \frac{h_1 - 180}{O_3O_5} = \frac{8}{240} = \frac{1}{30} \quad (2)$$

$$\Delta h = 240\sin(\alpha + \beta) - 240\sin\beta \quad (3)$$

$$\text{得 } \alpha = \arcsin \frac{\Delta h + 8}{240} - \arcsin \frac{1}{30} \quad (4)$$

## 2 型材四轴滚弯有限元模型建立

采用非线性有限元软件 ABAQUS 对 2 形型材的四轴滚弯过程进行有限元仿真，采用线切割机床对毛坯型材进行试样切割，参考国家标准 GB228.1-2010《金属材料拉伸试验》进行取样，试样厚度为 2 mm。对试样进行单拉性能测试，测得其应力应变关系如图 5 所示。

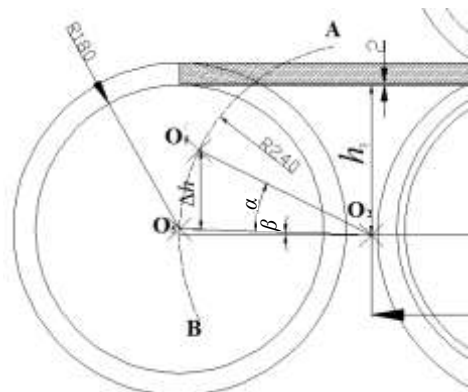


图 4 左右滚轮抬升量与转角的几何关系

Fig.4 Geometrical relationship between uplifting amount and angle

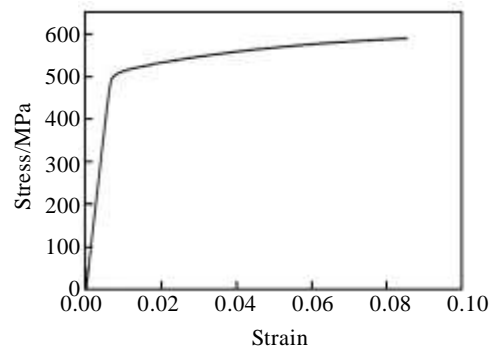


图 5 2099-T83 铝锂合金应力-应变关系

Fig.5 Stress-strain relationship of 2099-T83 Al-Li alloy

测得 2099-T83 铝锂合金室温力学性能为弹性模量 77.02 GPa，泊松比  $\nu=0.283$ ，屈服强度 504 MPa，抗拉强度 557 MPa。利用 Origin8 拟合图 5 中曲线，得到 2099-T83 铝锂合金室温下的本构模型为：

$$\sigma=77017\varepsilon, \sigma \leq 504 \text{ MPa} \tag{5}$$

$$\sigma=697.98\varepsilon^{0.06896}, \sigma > 504 \text{ MPa} \tag{6}$$

模拟中忽略型材厚度方向及型材自重影响，实际滚弯成形的型材毛坯长度为 5710 mm，为研究型材滚弯中的斜弯曲控制因素，只选择型材毛坯长度 2000 mm 进行分析。型材采用线性完全积分壳单元 S4，壳厚度为 2 mm，单元总数 8658。所有滚轮均采用离散刚体壳单元 R3D4，上滚轮单元总数 3168，下滚轮与左右滚轮单元数 3750，有限元模型如图 6 所示。

定义上滚轮与参考点 RP-1 刚体约束、下滚轮与参考点 RP-2 刚体约束、左右滚轮与各自中心刚体约束，同时在 RP-3 与右滚轮中心，RP-4 与左滚轮中心之间建立梁连接器。这样只需定义 RP-4 与 RP-3 的旋转角度就能实现左右滚轮轴心绕 RP-3 与 RP-4 的旋转运动。采用罚函数接触方式，定义滚轮与型材摩擦系数为 0.1，添加 2099-T83 铝锂合金材料模型。

令  $\Delta h=37$ ，即左右滚轮抬升 37 mm，根据式(4)得  $\alpha=0.155 \text{ rad}$ 。采用静态算法进行分析，定义第 1 个分析步左滚轮中心绕 RP-3 旋转 0.155 rad、右滚轮中心绕 RP-4 旋转 0.155 rad。第 2 个分析步上滚轮中心绕 RP-1 顺时针旋转 5.97 rad，下滚轮中心绕 RP-2 逆时针旋转 5.97 rad。

### 3 模拟结果分析

#### 3.1 型材与滚轮之间间隙对型材斜弯曲的影响

为了研究型材与滚轮之间间隙对 2 形型材滚弯的斜弯曲影响，分别选择型材与滚轮之间间隙  $a$  值为 0.1、0.2、0.3 mm 进行左右滚轮抬升量为 37 mm 的四轴滚弯有限元模拟。用滚弯后的型材 X 方向最大位移描述型材滚弯的斜弯曲程度，型材 X 方向最大位移越大，型材斜弯曲越严重。

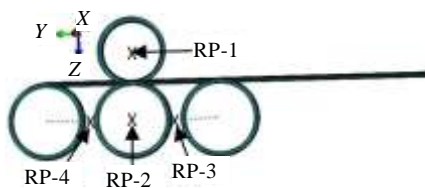


图 6 有限元模型

Fig.6 Finite element model

图 7a~7c 分别为  $a$  值采用 0.1、0.2，0.3 mm 时对应的滚弯型材 X 向位移云图。

由图 7 可知，随着  $a$  值的增加，型材 X 方向最大位移增大。 $a$  值越大，型材 X 向位移约束程度越小，从而型材在 X 方向上发生失稳变形程度越大，导致型材发生斜弯曲的可能性越大。同时  $a$  值越小，型材与滚轮划伤可能性越大，此外，实际型材毛坯还有一定的几何误差， $a$  值过小时不利于型材和滚轮的装配。综合考虑，确定型材与滚轮之间间隙  $a$  值为 0.2 mm。

#### 3.2 下滚轮与型材下表面之间竖直方向预留间隙对型材斜弯曲的影响

设下滚轮与型材下表面之间竖直方向预留间隙为  $b$ ，如图 8 所示。为研究  $b$  值对型材斜弯曲的影响，分别选择  $b$  为 0.0、0.2、0.3、0.4 mm 进行左右滚轮抬升量 37 mm，型材与滚轮之间间隙 0.2 mm 的滚弯有限元模拟。

图 9a~9d 分别为  $b=0.0、0.2、0.3、0.4 \text{ mm}$  时对应的滚弯型材 X 向位移云图，其 X 向最大位移依次为 23.4、15.35、6.82、3.02 mm。表明随着  $b$  值的增加，X 向最大位移减小，斜弯曲程度减小。

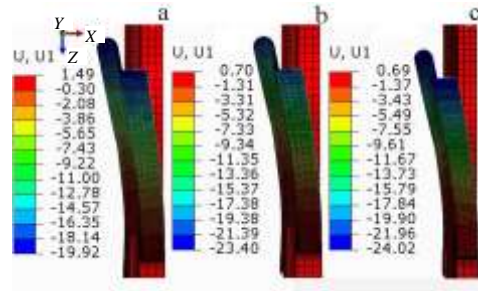


图 7 不同  $a$  值时型材 X 方向位移

Fig.7 Displacement of profile in X direction at different  $a$  value: (a) 0.1 mm, (b) 0.2 mm, and (c) 0.3 mm

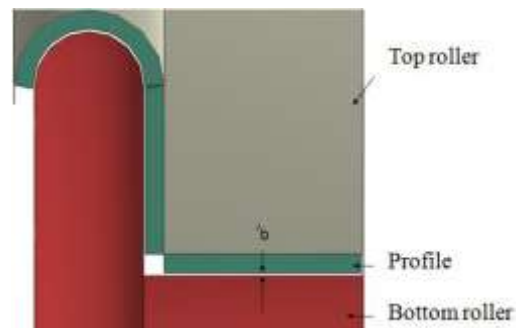


图 8 下滚轮与型材下表面之间竖直方向的预留间隙

Fig.8 Clearance between bottom roller and profile's down surface in vertical direction

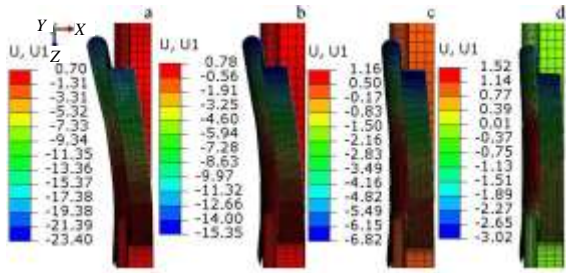


图 9 不同  $b$  值时型材  $X$  方向的位移

Fig.9 Displacement of profile in  $X$  direction at different  $b$  values:

(a) 0.0 mm, (b) 0.2 mm, (c) 0.3 mm, and (d) 0.4 mm

虽然  $b$  值越大, 斜弯曲程度越小, 但当  $b$  增大到一定程度时, 处于上下滚轮中心的 2 形型材的圆弧面上侧脱离上滚轮, 如图 10 所示, 当  $b=0.4$  mm 时, 滚弯过程中处于上下滚轮中间位置的 2 形型材圆弧段上侧与上滚轮之间产生约 0.3 mm 的间隙, 这样型材滚弯后截面发生变化, 零件无法满足设计要求。模拟结果表明当  $b=0.0$ 、0.2、0.3 mm 时, 处于上下滚轮中间位置的型材圆弧段上侧与上滚轮之间未产生间隙,  $b=0.3$  mm 时  $X$  向最大位移仅为 6.82 mm, 故而确定下滚轮与型材下表面之间竖直方向预留间隙 0.3 mm。

### 3.3 左右滚轮 $X$ 方向移动量对型材斜弯曲的影响

设左右滚轮  $X$  方向移动量为  $c$ , 如图 11 所示。为研究  $c$  值对型材斜弯曲的影响, 选择型材与滚轮之间间隙 0.2 mm, 下滚轮与型材下表面之间竖直方向预留间隙 0.3 mm, 当左右滚轮抬升 37 mm 后, 分别选择  $c=0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0$  mm 进行型材的滚弯有限元模拟。

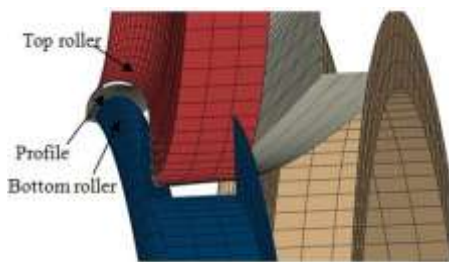


图 10 型材圆弧段脱离上滚轮

Fig.10 Arc part of profile separating from up roller

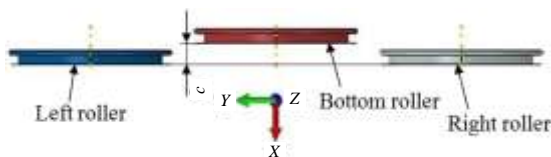


图 11 左右滚轮  $X$  方向移动量

Fig.11 Displacement in  $X$  direction of left and right rollers

图 12a~12e 分别为左右滚轮  $X$  方向移动量为 0.0、0.5、1.0、1.5、2.0 mm 对应的滚弯效果图。用滚弯后型材初始长度方向上距离 1 m 的两节点 A、B 的  $X$  方向距离  $L$  表示型材的斜弯曲程度。

通过查看滚弯后型材 A、B 节点坐标计算出这 5 种情况下 A、B 的  $X$  方向距离  $L$  值依次是 6.82、4.05、1.68、0.16、1.2 mm。随着左右滚轮  $X$  方向移动量的增加, 型材斜弯曲程度先减小后增加。这是由于处于弯曲加载时的 2 形型材由于失稳向  $X$  负方向产生变形, 通过调节左右滚轮向  $X$  正方向移动给型材施加反向载荷, 使得型材在  $X$  负方向变形趋势变小, 直至最终消除, 从而斜弯曲程度变小。当左右滚轮向  $X$  方向移动量超过临界位置时, 型材开始向  $X$  正方向变形, 斜弯曲程度逐渐变大。当  $c=1.5$  mm 时, A、B 节点的  $X$  方向距离仅为 0.16 mm, 型材斜弯曲程度最小, 故确定左右滚轮  $X$  方向移动量为 1.5 mm。

根据有限元分析结果确定了最佳滚弯成形工艺参数为型材与滚轮之间间隙  $a=0.2$  mm; 下滚轮与型材下表面之间竖直方向预留间隙  $b=0.3$  mm; 左右滚轮  $X$  方向移动量  $c=1.5$  mm。

## 4 型材滚弯工艺试验

MC4P431IAS 三维四辊数控滚弯机床参数  $X$  表示左滚轮相对初始最低位置的竖直距离;  $Y$  表示右滚轮相对初始最低位置的竖直距离;  $W$  表示下滚轮相对初始最低位置的竖直距离;  $L_s$  和  $R_s$  分别表示左右滚轮内外移动数值。

根据模拟结果, 确定型材与滚轮之间间隙采用 0.2 mm 进行滚轮设计并加工, 将加工完的滚轮安装到三维四辊数控滚弯机上, 截取长度 5710 mm 的 2 形型材并进行型材的夹装, 上下滚轮刚好夹紧型材时  $W=43.1$  mm, 下滚轮与型材下表面预留 0.3 mm 间隙, 调节下滚轮向下运动直到  $W=42.8$  mm。下滚轮与左右滚轮处

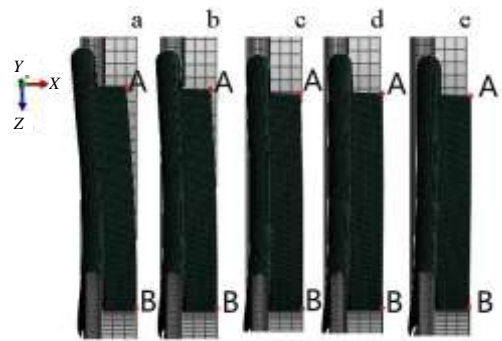


图 12 不同  $c$  值对滚弯结果的影响

Fig.12 Roller bending's effect by different  $c$  values: (a) 0.0 mm,

(b) 0.5 mm, (c) 1.0 mm, (d) 1.5 mm, and (e) 2.0 mm



于同一平面时  $L_s=R_s=161$  mm，型材处于水平位置时  $X=Y=44$  mm，如图 13a 所示。调节左右滚轮抬升 37 mm，此时  $X=Y=81$  mm，模拟结果显示，左右滚轮向 X 正方向即向外移动 1.5 mm 时斜弯曲改善效果最好，再调节机床左右滚轮使  $L_s=R_s=162.5$  mm，然后滚轮转动，图 13b 为型材滚弯过程中的某一时刻。

图 14 为型材斜弯曲检测方法。将滚弯完成的型材一端紧贴标准平面，用塞尺检测型材与标准平面之间的间隙，测得 20 个测点处的间隙如图 15 所示。测量结果显示，最大间隙 0.3 mm，表明型材横向误差为 0.3 mm，小于外形误差 1 mm，满足设计要求。

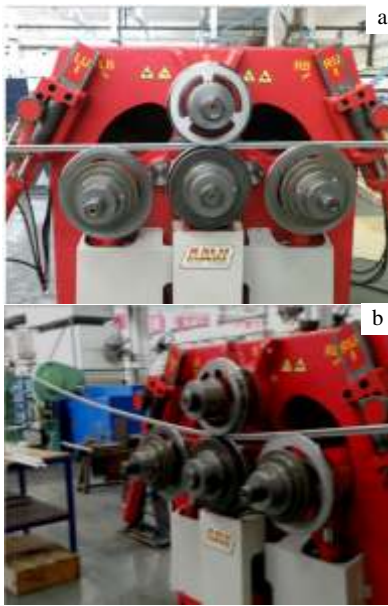


图 13 型材初始位置及滚弯中的某一时刻

Fig.13 Initial place (a) and a moment (b) during roll bending of profile

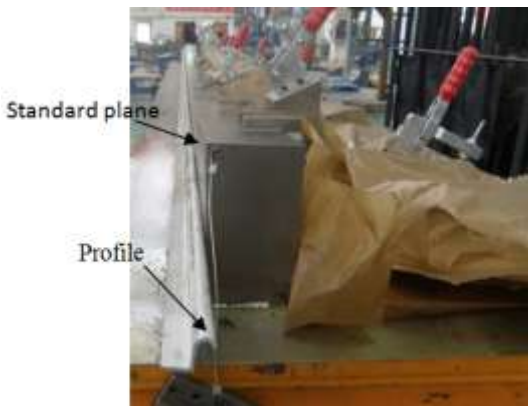


图 14 型材斜弯曲检测

Fig.14 Test for profile torsion

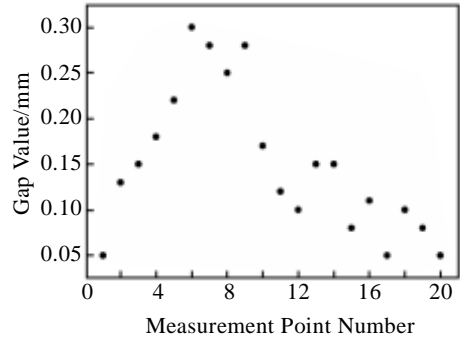


图 15 各测点的间隙

Fig.15 Gap value at each measurement point

由于滚弯成形工艺参数不同时型材的受力状态不同，各滚弯成形工艺参数对型材成形尺寸精度必有影响。由于试验中已按  $a=0.2$  mm 进行滚轮加工，故不探讨型材与滚轮之间间隙对型材成形尺寸精度的影响。

为研究下滚轮与型材下表面之间竖直方向预留间隙对型材成形尺寸精度的影响，取  $c=0$ ，分别选择  $b=0.0, 0.2, 0.3, 0.4$  mm 进行滚弯工艺试验，将滚弯完的型材放置于检验模上，进行尺寸精度测量，如图 16 所示。

利用塞尺测量型材与检验模之间的间隙，多次测量取最大间隙，最大间隙表示型材的尺寸误差，最大间隙越小，表明尺寸精度越高，表 1 为不同  $b$  值时的型材滚弯成形后的最大间隙。

由表 1 可知，型材滚弯后尺寸精度随着下滚轮与型材下表面之间竖直方向预留间隙  $b$  的增大而降低，但均满足设计要求的型材外形误差小于 1 mm。



图 16 尺寸精度测量

Fig.16 Dimension precision measurement

表 1 不同  $b$  值时的最大间隙

Table 1 Max clearance at different $b$ value (mm)				
$b$	0.0	0.2	0.3	0.4
Max clearance	0.48	0.55	0.58	0.65

为研究左右滚轮 X 方向移动量对型材成形尺寸精度的影响, 取  $b=0.3\text{ mm}$ , 分别选择  $c=0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0\text{ mm}$  进行滚弯工艺试验, 表 2 为不同  $c$  值时的型材滚弯成形后的最大间隙。

由表 2 可知, 随着左右滚轮 X 方向移动量  $c$  的增大, 型材尺寸精度先升高后降低, 采用最佳滚弯工艺参数  $a=0.2\text{ mm}$ ,  $b=0.3\text{ mm}$ ,  $c=1.5\text{ mm}$  时, 型材尺寸误差为  $0.51\text{ mm}$ , 满足设计要求的型材外形误差小于  $1\text{ mm}$ 。

表 2 不同  $c$  值时的最大间隙

Table 2 Max clearance at different $c$ value (mm)					
$c$	0.0	0.5	1.0	1.5	2
Max clearance	0.58	0.56	0.53	0.51	0.55

## 5 结 论

1) 随着型材与滚轮之间间隙的减小、下滚轮与型材下表面之间垂直方向预留间隙的增大, 型材斜弯曲程度减小; 随着左右滚轮 X 方向移动量的增加, 2 形型材斜弯曲程度先减小后增大。

2) 2 形型材最佳滚弯成形工艺参数为型材与滚轮之间间隙  $a=0.2\text{ mm}$ ; 下滚轮与型材下表面之间垂直方向预留间隙  $b=0.3\text{ mm}$ ; 左右滚轮 X 方向移动量  $c=1.5\text{ mm}$ 。

3) 型材滚弯后尺寸精度随着下滚轮与型材下表面之间垂直方向预留间隙  $b$  的增大而降低; 随着左右滚轮 X 方向移动量  $c$  的增大, 型材尺寸精度先升高后降低, 采用最佳工艺参数进行 2 形型材滚弯工艺试验后型材尺寸误差为  $0.51\text{ mm}$ , 横向误差为  $0.3\text{ mm}$  满足设计要求。

### 参考文献 References

[1] Romios M, Tiraschir, Parrish C *et al.* *Journal of Materials Engineering and Performance* [J], 2005, 14(5): 641

[2] Vander Kooi D C, Park W, Hilton M R. *Scripta Materialia*[J], 1999, 41(11): 1185

[3] Ward N, Tran A, Abad A *et al.* *Journal of Materials Engineering and Performance*[J], 2011, 20(6): 989

[4] Wei Xiuyu(魏修宇), Zheng Ziqiao(郑子樵), Yu LingJuan(余玲娟) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程) [J], 2010, 39(9): 1583

[5] Chen Yuxun(陈毓勋). *The Principle and Method of Bending Springback for Plate and Profile*(板材与型材弯曲回弹控制原理与方法)[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1990: 124

[6] Hua M, Lin Y H. *International Journal of Mechanical Sciences*[J], 1999, 41(12): 1461

[7] Pastor M M, Roure F. *Thin-Walled Structures*[J], 2009, 47(5): 514

[8] Fan Ning, Zhang Tianjun, Gao Zihui. *2011 Chinese Control and Decision Conference*[C]. Mianyang: IEEE Conference Publications, 2011: 373

[9] Yu Qi(于琦), Tong Yu(佟宇). *Hydraulics Pneumatics & Seals*(液压气动与密封) [J], 2011(3): 38

[10] Chen Peng(陈鹏), Xue Hongqian(薛红前), Wang jie(王杰) *et al.* *Materials Science & Technology*(材料科学与工艺) [J], 2014, 22(1): 68

[11] Zhou Yangping(周养萍). *China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology* (锻压装备与制造技术) [J], 2012, 47 (1): 76

[12] Hou Dengzhen(侯登振), Hao Lingyu(郝玲玉). *Journal of Northeast Heavy Machinery Institute* (东北重型机械学院学报) [J], 1997, 21(1): 20

## Oblique Bending Control of Four Roll Bending for Profile of 2099-T83 Al-Li Alloy

Hu Zhihua, Chen Minghe, Xie Lansheng

(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** Variable curvature 2-profile of 2099 Al-Li alloy is important truss of Chinese independently developed large airplane C919, and four roll bending forming is the main method to manufacture this kind of part. Due to the high specific strength of Al-Li alloy and asymmetric structure of 2-profile, compared with profile of conventional aluminum alloy, 2-profile of Al-Li alloy is extremely prone to oblique bending. Therefore, four roll bending process of 2-profile was simulated by finite element software ABAQUS. Effect of clearance between rollers and profile, clearance between bottom roller and profile's down surface in vertical direction, displacement in X direction of left and right rollers was researched on oblique bending during four roll bending of 2-profile, and the best roll bending process parameters was confirmed. Roll bending process experiment was carried out based on it. The results show that  $0.2\text{ mm}$  for clearance between rollers and profile,  $0.3\text{ mm}$  for clearance between bottom roller and profile's down surface in vertical direction,  $1.5\text{ mm}$  for displacement in X direction of left and right rollers can effectively solve the problem of oblique bending for roll bending of 2-profile.

**Key words:** Al-Li alloy; 2-profile; roll bending; oblique bending

Corresponding author: Hu Zhihua, Master, College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, P. R. China, Tel: 0086-25-84892508, E-mail: hu050930115@163.com