

引文格式: 陈明和, 谢兰生, 冯瑞, 等. 中机身蒙皮骨架变曲率截面桁条滚弯精确成形工艺研究[J]. 航空制造技术, 2022, 65(21): 135-142.

CHEN Minghe, XIE Lansheng, FENG Rui, et al. Research on roll bending precision forming technology of variable curvature section of middle fuselage skin frame[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(21): 135-142.

# 中机身蒙皮骨架变曲率截面桁条滚弯精确成形 工艺研究\*

陈明和<sup>1</sup>, 谢兰生<sup>1</sup>, 冯 瑞<sup>1</sup>, 文松涛<sup>2</sup>, 罗志辉<sup>2</sup>

(1. 南京航空航天大学, 南京 210016;

2. 航空工业江西洪都航空工业集团有限责任公司, 南昌 330096)

[摘要] 为解决 C919 国产大飞机蒙皮骨架非对称截面桁条的精确成形难题, 基于 2 形及 L 形型材的 2099-T3 和 T83 铝锂合金性能测试评价, 获得材料的本构模型和回弹规律。同时提出一种分段式等曲率渐近滚弯新工艺, 结合滚弯成形理论分析计算, 建立等曲率四轴滚弯有限元模型, 并分析了两种型材的滚弯回弹及曲率半径影响因素, 模拟结果确定了非对称截面型材的合理滚弯成形工艺参数为: 型材与滚轮摩擦系数为 0.10~0.12, 型材和滚轮之间间隙为 0.2 mm, 2 形型材和 L 形型材滚弯的左右滚轮极限抬升高度分别为 43 mm 和 30 mm。最终采用分段等曲率渐近滚弯的方法, 通过 MC4P4311AS 数控滚弯机成功生产出合格的变曲率型材, 最大间隙值为 0.76 mm, 成功验证了变曲率滚弯成形方案的可行性和准确性。目前, 该研究成果已成功应用于 C919 中机身蒙皮骨架长桁的滚弯成形生产中。

关键词: C919 大飞机; 变曲率蒙皮桁条; 铝锂合金; 渐近滚弯成形; 有限元模型

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2022.21.135



陈明和

教授, 博士, 主要研究方向为板料成形 CAE 技术、集成计算材料工程 (ICME)、材料超塑性及成形/扩散连接技术、飞行器钣金精密制造及抗疲劳制造技术。

为了满足国产大飞机 C919 中机身复杂曲面蒙皮的型面精度要求, 其骨架桁条需采用非对称截面变曲率设计, 材料选用 2099 铝锂合金。2099 铝锂合金作为新一代的轻质高强合金材料, 具有密度低、弹性模量高、强度高、抗疲劳裂纹扩展能力强和耐腐蚀性等众多优点, 已成为当前航空航天领域中日益广泛应用的 结构材料之一, 也是国产 C919 大型客机后机身桁架的关键材料<sup>[1-3]</sup>。其中以 2099 铝锂合金为材料的 2 形和 L 形变截面曲率型材是我国自主设计的机身桁架重要零件。考虑到 2 形和 L 形型材均属于变曲率非对称截面型材, 在室温条件下加工易产生回弹缺

陷, 将影响到飞机的装配精度和后期气动外形及服役性能。具体桁条型材结构如图 1 所示。我国的铝锂合金研究起步较晚, 虽然国内高校和研究院奋起直追, 取得了卓有成效的工作, 但是对于铝锂合金的大规模研制和应用与西方国家依旧存在一定差距<sup>[4-5]</sup>。对于铝锂合金复杂的变曲率型材成形, 传统的弯曲成形理论和方法已不再适用, 故越来越多的学者开始将型材成形工艺的目光转向滚弯成形。

滚弯成形作为一种连续塑性弯曲的成形工艺, 其装备不受型材长度限制, 适用性好, 设备所需载荷小, 相比传统的拉弯工艺, 可加工出更小曲率半径, 广泛应用于航空航天领域<sup>[6-7]</sup>。

\* 基金项目: 江西洪都航空工业集团有限责任公司 C919 国产大飞机制造产学研项目。

目前国内外对滚弯成形的工艺研究较多。Cai 等<sup>[8]</sup>计算出薄板三辊弯曲过程中直端变形的解析解,并对成形中的塑性加载和卸载理论进行分析,最终准确地计算出直端截面的塑性变形量和弯曲最终形状。Salem 等<sup>[9]</sup>基于非对称三辊弯曲试验建立一种预测辊弯力和残余应力的解析模型,模型的计算结果与试验结果吻合较好。但传统的三辊弯曲无法精确实现非对称截面的成形控制,故近年来各国学者逐渐开展四轴滚弯工艺研究。Jia 等<sup>[10]</sup>基于 Ansys 软件建立了冷连轧机辊系变形的非线性有限元接触模型,并采用三维弹塑性有限元法对四辊冷轧机的轧辊过程进行了模拟分析,计算出的辊缝剖面与实测值比较接近。该模型通过正确的预设定模型和带材在线控制模型,提高了成品的精度。王安恒等<sup>[11]</sup>为控制大截面 Z 型材四轴滚弯成形缺陷,结合 Abaqus 数值模拟,对四轴滚弯成形提出了侧滚轮非对称加载和二次滚弯方式改进工艺,研究结果表明,两种工艺对型材起皱缺陷具有明显的改善作用。

目前国内外对铝锂合金滚压研究偏少<sup>[12]</sup>。Saito 等<sup>[13]</sup>对铝锂合金板材进行低温滚压试验,分析了材料织构演化和力学性能。张荣霞等<sup>[14]</sup>对 T8 铝锂合金薄板固溶态进行蠕变时效成形试验研究,并建立基于滚弯预变形和蠕变时效复合成形工艺,解决了薄壁大曲率复杂型面零件的回弹缺陷问题。由于较少的理论和工艺研究导致目前国内对于复杂变截面的型材滚弯成形工艺停留在经验分析和试验为主的方法,难以成形高质量的型材,且加工效率偏低<sup>[15]</sup>。综上所述,目前对于铝锂合金的滚压研究主要集中于材料力学性能和热处理研究,迫切需要进行室温条件下铝锂合金型材滚压成形的工艺研究。

本文面向 C919 大尺寸飞机中机身蒙皮桁架新型铝锂合金 2 形及

L 形复杂型材零件,基于 2099-T3 和 T83 铝锂合金性能测试评价,结合有限元软件 Abaqus,建立 2 形及 L 形型材的等曲率滚弯模型,并成功预测滚弯成形的回弹曲率半径,得到滚弯回弹规律。模拟结果可为四轴滚弯设计提供优化方案,最终采用分段等曲率渐近滚弯成形加工方法,通过 MC4P431IAS 新型数控型材滚弯机试验实现变曲率型材的精确成形,缩短研制周期,提出并成功实现全新的渐近滚弯生产工艺,大大推进了我国大型客机 C919 蒙皮桁架零件的国产化研制进展。

### 1 试验及方法

试验用原始材料分别为 2099-T3 和 2099-T83 铝锂合金,其化学成分(质量分数,%)为 Al-2.7Cu-1.8Li-0.7Zn-0.3Mn。T3 是铝锂合金通过 500 °C × 90 min 固溶处理 + 冷加工得到,而 T83 材料则是通过铝锂合金先后经历 500 °C × 90 min 固溶 + 冷加工 + 155 °C × 20 h 时效处理得到。为进一步获得两种铝锂合金材料的成形性能评价,下文将分别进行单向拉伸试验和弯曲性能测试。

室温拉伸试样按照 GB/T 228.1—2010 标准进行制备,试样尺

寸如图 2 (a) 所示。对 2 形及 L 形的长度方向进行线切割加工,2099-T3 试样厚度为 1.6 mm,2099-T83 试样厚度为 2 mm。室温拉伸试验在 UTM 5504X 电子万能试验机上进行,应变速率设置为 0.00025 s<sup>-1</sup>,为减少误差,拉伸试验重复 3 次。

考虑到型材滚弯成形的实质是弯曲,故铝锂合金材料的弯曲测试试样按照 GB/T 232—2010 标准制备。试样具体尺寸如图 2 (b) 所示,材料厚度分别为 1.2 mm、1.7 mm 和 3 mm 3 种。室温弯曲试验在 RG2000—2A 微机控制电子万能试验机上进行,两支辊中心距采用 80 mm,压头直径 D=5 mm,压头下压速度设置为 5 mm/min,高度下压量分别为 10 mm、15 mm、20 mm、25 mm 和 30 mm。弯曲试验结束后,将成形后的试样放置在扫描仪上,进行试样形状扫描,保存为 .jpg 格式的图片,最后将图片导入 AutoCAD 软件中测量两直线的夹角,该夹角的补角即为铝锂合金板料回弹后的弯曲角。

### 2 结果与讨论

#### 2.1 2099 铝锂合金成形性能分析及本构方程

图 3 为 2099-T3 和 T83 铝锂合

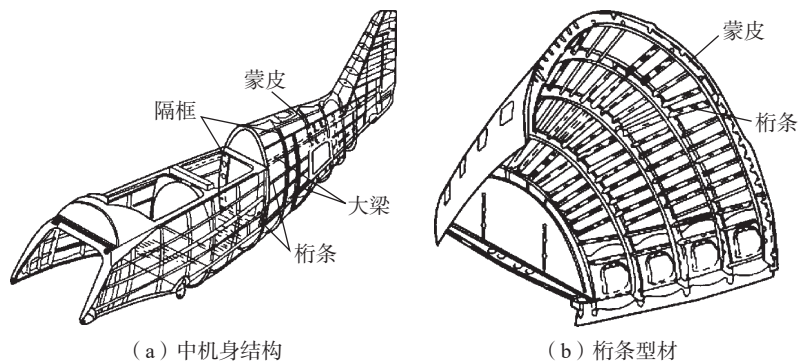


图 1 飞机中机身结构及桁条型材  
Fig.1 Mid-fuselage structure and stringer profiles of aircraft

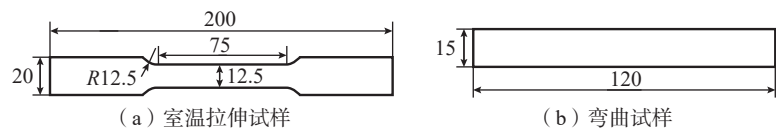


图 2 力学性能试验试样尺寸 (mm)  
Fig.2 Sample size of mechanical experiment test (mm)

金室温拉伸真应力-真应变曲线,可知,在拉伸试验初期,流变应力随真应变的增大而迅速上升,达到屈服应力后增速减缓。这主要是因为,在初始阶段,加工硬化占主导地位,流动应力迅速增加。随着拉伸应变增大,出现以动态回复为主的软化行为,软化效应增强,流动应力的增速缓慢并逐渐趋于稳定,直至颈缩断裂<sup>[16]</sup>。

根据图3流动应力数据,结合拉伸试样原始横截面面积,分别计算其弹性模量、屈服强度、抗拉强度和硬化指数等参数。由表1可知,两种铝锂合金材料的弹性模量相差较小,但T83的强度远高于T3,这主要是因为T83铝锂合金是通过固溶处理+冷加工+时效处理得到的,时效处理可以显著提高材料的强度和硬度,但同时也会导致塑性降低,但T3的延伸率略微高于T83,主要原因可能是T83未达到或超过合适的峰时效阶段。可以看出,T3材料的硬化指数远高于T83,表明T3铝锂合金具有较强的应变强化能力<sup>[17]</sup>。

进一步计算并建立两种铝锂合金材料的室温拉伸本构模型,由图3可知,铝锂合金拉伸曲线呈现弹性直线段和塑性软化两个阶段,故为精确表征铝锂合金的应力应变关系,本文采用分段式各向同性幂硬化本构方程来计算。

$$\sigma_e = E\varepsilon \quad (1)$$

$$\sigma_p = K\varepsilon^n \quad (2)$$

式中, $\sigma_e$ 和 $\sigma_p$ 分别为弹性阶段流动应力和塑性阶段流动应力; $E$ 为弹性模量,表示材料弹性变形的难易程度; $\varepsilon$ 为应变; $K$ 为材料参数; $n$ 为硬化指数。结合式(1)和(2)对流动应力曲线中弹性阶段和塑性阶段进行拟合,可得2099-T3和T83铝锂合金室温变形条件下本构模型分别为

$$\sigma_e = 77089\varepsilon, \varepsilon \leq 5.67 \times 10^{-3} \quad (3)$$

$$\sigma_p = 681.9532\varepsilon^{0.13537}, \varepsilon \geq 5.67 \times 10^{-3} \quad (4)$$

$$\sigma_e = 77182\varepsilon, \varepsilon \leq 7.68 \times 10^{-3} \quad (5)$$

$$\sigma_p = 737.869\varepsilon^{0.08157}, \varepsilon \geq 7.68 \times 10^{-3} \quad (6)$$

继续计算材料在回弹后的弯曲角 $\theta$ ,建立板厚 $t$ 和高度压下量 $h$ 和回弹后的弯曲角的线性拟合关系,具体拟合方程如图4所示。图4(a)表示在弯曲压头高度下压量为20 mm时,不同厚度2099-T83和T83铝锂合金板料弯曲试验的弯曲角。由图4中趋势可得,当材料的厚度持续增加,型材在回弹后的弯曲角同样持续上升,说明铝锂合金的厚度与弯曲回弹呈正相关关系。图4(b)则表示在两种铝锂合金板料均为1.7 mm厚度时,对弯曲压头进行不同高度下压量的弯曲角。可知,随着高度

下压量的增加,板料回弹后的弯曲角增加。在相同下压量时,2099-T3铝锂合金比T83材料的回弹后弯曲角要大,表明T3铝锂合金比T83铝锂合金的室温弯曲塑性更好。

## 2.2 滚弯成形理论分析

铝锂合金在滚弯成形过程中的弹塑性弯曲是一个非常复杂的过程,故分别进行滚弯成形理论半径和型材应力应变中性层的计算,为后续的有限元仿真模拟提供理论和数据支撑。

### (1) 滚弯成形理论半径计算

考虑到四轴滚弯成形装备的复杂性,可参考三轴滚弯型材的理论半径求解方法<sup>[18]</sup>,具体示意如图5所示,计算并推导出上滚轮在 $O_1C$ 方

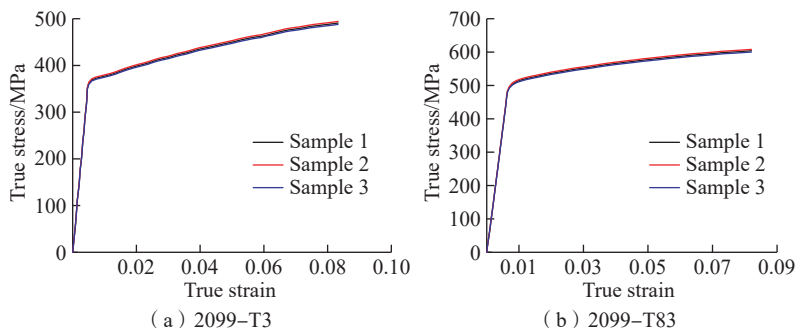


图3 2099 铝锂合金真应力-真应变曲线

Fig.3 Curves of true stress-true strain about 2099 Al-Li alloy

表1 2099 铝锂合金材料室温拉伸成形性能参数

Table 1 Performance parameters of room temperature tensile forming of 2099 Al-Li Alloy

牌号	泊松比 $\nu$	弹性模量 $E$ /GPa	屈服强度 $\sigma_s$ /MPa	抗拉强度 $R_m$ /MPa	硬化指数 $n$	断后延伸率 $A$ /%
2099-T3	0.2821	77.09	371	455	0.1354	9.62
2099-T83	0.2825	77.18	504	557	0.0816	9.54

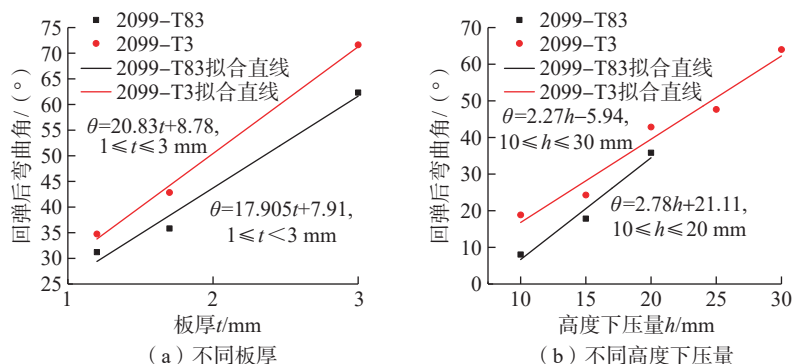


图4 2099 铝锂合金板料不同板厚和高度下压量下弯曲试验回弹后弯曲角

Fig.4 Bending angle after springback in bending test of 2099 Al-Li alloy sheet with different thickness and pressure

向的位移量、滚轮半径  $R_2$  和左右滚轮中心距  $2a$  之间的关系,并为下文的仿真分析确定合理的滚轮间距与位移量。

$$\overline{O_q O_2}^2 = \overline{O_2 C}^2 + \overline{O_q C}^2 \quad (7)$$

$$\overline{O_2 C} = R_{nq} + h + R_2 \quad (8)$$

其中,  $\overline{O_2 C} = a$ ,  $\overline{O_q C} = R_{nq} - R_2 + Y$ ,代入式(7)和(8),计算可得成形半径和滚轮的压下量以及左右轮中心距之间的关系公式为

$$Y = \sqrt{(R_{nq} + h + R_2)^2 - a^2} - R_{nq} + R_1 \quad (9)$$

(2) 型材应力应变中性层计算。

型材滚弯成形中主要的塑性变形为弯曲,在型材截面方向上的外表面层和内部组织结构在弯曲过程中分别承受拉应力和压应力,为简化计算,将拉应力和压应力的交界处定义为型材的中性层。若沿着型材纤维方向的切应力为0,则可定为应力中性层;如果沿着型材拉伸方向的变

形为0,则可判定为应变中性层。故在型材滚弯成形过程中,首先需要确定坯料的应变中性层位置,即中心轴位置,因为型材截面的中心轴恰好经过型材的质心。结合应力应变特点,根据实际的型材截面尺寸,计算型材的截面质心和截面惯性矩,确定型材的应力应变中心层,为后续的型材滚弯成形结果分析作准备。首先计算型材的真实应力和真实应变,即

$$\epsilon = y/R \quad (10)$$

式中,  $y$  为型材上任意一点到该型材中性层的距离;  $R$  为中性层半径。同理,可得该点真实应力

$$\sigma = C\epsilon^n \quad (11)$$

式中,  $C$  为塑性系数,与材料性能有关;  $n$  为材料塑性强化指数。故最终计算可得型材的真实应力为

$$\sigma = C(y/R)^n \quad (12)$$

2.3 建立 2 形和 L 形等曲率型材四轴滚弯成形的有限元模型

图 6 (a) 为四轮滚弯机平面结构简化图<sup>[19]</sup>,分别由上下左右 4 个滚轮组成,其中上滚轮的轴心  $O_1$  固定,下滚轮轴心  $O_2$  可沿中心线  $O_1 O_2$  上下运动,左滚轮轴心  $O_5$  可绕固定点  $O_3$  处转动,其运动轨迹为半径 240 mm 的圆弧  $AB$ 。右滚轮的轴心  $O_6$  可绕固定点  $O_4$  处转动,运动轨迹为半径 240 mm 的圆弧  $CD$ 。其中轴心  $O_1$  到  $O_3$  和  $O_4$  的竖直距离均为 370 mm。由图 6 中轴对称结构可得  $O_3 O_5 = O_4 O_6 = 240$  mm。

建立有限元仿真模型如图 6 (b) 所示,2 形和 L 形两种型材毛坯长度均选取 2 m,其中 2 形型材的厚度为 2 mm,L 形型材厚度不一,腹板上侧最大厚度为 3.75 mm。材料参数模型选用 2.1 节中建立的室温下各向同性幂硬化本构模型。考虑到 2 形型材在滚弯长度方向的大尺寸,故本模型忽略该型材交接处倒圆角的影响,同时为了提高运算效率,2 形型材最终选用单元类型为四节点曲壳网格单元,网格数量为 9100 个。但 L 形型材为变厚度材料,本文选择三维实体 C3D8 网格单元。同理为简化计算,忽略型材的倒圆角,最终网格数量为 27896 个。为了保证网格的规整,以上两种复杂型材均采用扫掠型网格划分,2 形与 L 形型材网格划分具体结果如图 7 所示。本模型选用有限滑动类型建立型材和滚轮之间的约束接触。

参照图 6 (a) 设计的四轮滚弯机的平面结构,在 Abaqus 有限元软件中对模型设置多个固定参考点。如图 6 (b) 所示的装配模型,并将各滚轮的中心处定义刚体约束,同时对左右下 3 个滚轮的中心点和 RP-1、RP-3 和 RP-4 进行耦合绑定约束,从而实现一体化运动。模型的边界条件主要由滚弯过程的 3 个阶段决定,分别为滚轮压下阶段、滚弯成形阶段以及卸载回弹阶段。(1) 压下阶段:此过程中只需指定上滚轮向

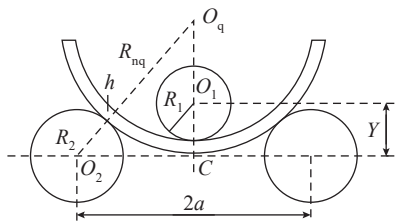
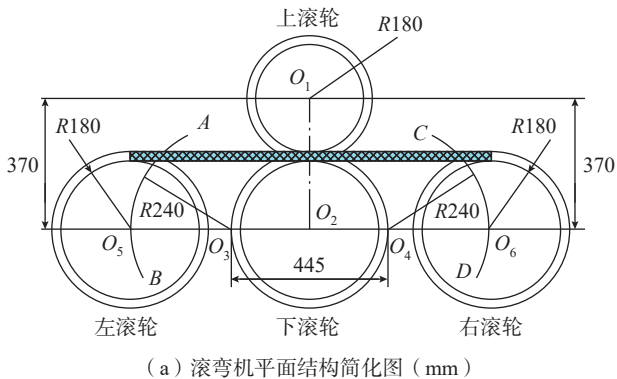
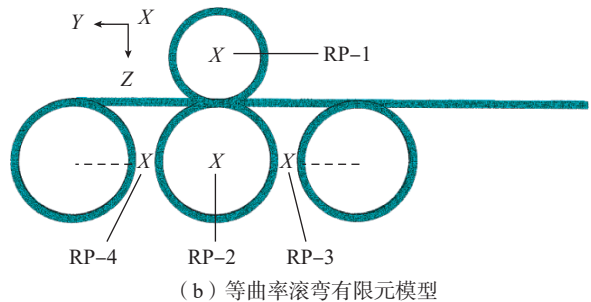


图 5 三轴滚弯装置上下滚轮轴心和中心轴距的几何关系

Fig.5 Geometric relation between upper and lower roller axis and center wheel base of three axes of rolling and bending device



(a) 滚弯机平面结构简化图 (mm)



(b) 等曲率滚弯有限元模型

图 6 滚弯成形结构及有限元模型示意图

Fig.6 Schematic diagram of rolling and bending forming structure and finite element model

下的位移量,其余的所有约束均设为0。对于下滚轮,保持所有的边界约束,释放沿Y轴方向的位移,并对左右两滚轮施加固定约束。(2)成形阶段:设定滚轮的转动惯量,限制上滚轮Y、Z方向的平动约束,释放其绕X轴的转动约束。对于其余3个滚轮,固定Y、Z方向的平动,释放绕X轴的转动约束,使之随着型材的进给运动而转动。(3)卸载回弹:给予上滚轮Y轴的正向位移,其余滚轮保持位置不变。

#### 2.4 等曲率滚弯有限元模拟结果分析

对于2099-T83和T83材料的2形型材和L形型材,分别将其左右滚轮各抬高37mm和27mm。由于本文接触面之间的摩擦属于切向作用,因而采用切向接触模型描述滚轮和型材之间的接触。采用库仑摩擦定义接触面之间的摩擦力,故定义滚压成形的摩擦系数 $\mu$ 分别为0.1、0.15、0.2和0.25,最终得出两种不同形状型材的摩擦系数 $\mu$ 与型材回弹曲率半径之间的关系,如图8所示。可知,两种型材的回弹曲率半径均会随着摩擦系数的增加而增大,在 $\mu$ 为0.25时,回弹曲率半径达到最大。故为减少型材滚弯成形中的回弹,需要减小型材与滚轮之间摩擦,可选择对型材

和滚轮之间进行润滑处理,但应考虑到如果 $\mu$ 值过小无法顺利送料。另外由图中可得两种材料的摩擦系数 $\mu$ 在0.10~0.15区间基本保持稳定,故综合考虑以上因素,在本文后续仿真计算中 $\mu$ 取值范围为0.10~0.12。

为了进一步深入探索型材和滚轮之间间隙对两种型材滚弯成形过程的影响,故此将滚轮和型材之间的间隙大小定义为 $a_1$ 值。对于2形型材, $a_1$ 分别取值0.1mm、0.2mm、0.3mm进行研究。但L形型材属于变厚度材料,在L型材模拟中可将间隙 $a_1$ 作为定值,并进行左右滚轮抬高37mm的四轴滚弯数值模拟。在后处理中,为了进一步优化工艺参数,可选取滚弯后的型材在 $U_1$ 方向的偏移量作为判断型材的斜弯曲程度,

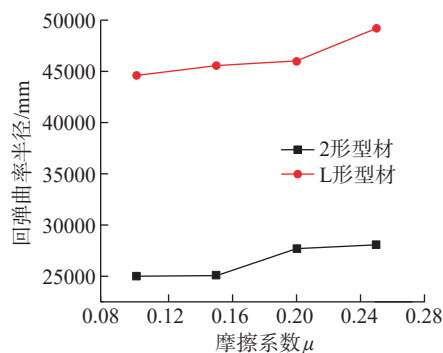


图8 回弹曲率半径与摩擦系数的关系  
Fig.8 Relation between radius of springback curvature and friction coefficient

具体研究结果如图9所示,可知当 $a_1$ 为0.1mm时,2形型材在X方向位移最大,代表该型材的斜弯曲程度最严重。综合对比图9(b)和(c)可以发现,当 $a_1=0.2$ mm时,位移区间小于0.3mm时位移量,故选择 $a_1=0.2$ mm。同理对于L形型材的 $a_1$ 取0.2mm。

尽管抬高左右滚轮的高度可以解决变曲率型材的加工难题,但为达到型材的精确成形目标,需要确定左右滚轮抬升量和型材曲率半径的关系,最终获取合理滚压成形工艺参数。故本模型对2形和L形型材选取多组左右滚轮的抬升量,分别研究34~43mm和24~30mm对两种型材的影响。从图10可知,随着左右滚轮的抬升量增加,两种型材的曲率半径均呈现下降趋势。综上所述,并基于数控滚弯机的工作区间,最终确定2形型材、L形型材滚弯的左右滚轮极限抬升量分别为43mm和30mm。

采用上述合理的滚弯成形工艺参数对两种型材进行滚弯回弹模拟,分段式回弹模拟完成后,去除型材两端的直线段,测量回弹模拟后两种型材特征线等弧长分段点处的曲率半径。表2为两种型材各等分点处的数模曲率半径与模拟曲率半径的偏差百分比,其中最大曲率半径偏差分别为5.5%和3.2%,均满足型材的设计要求。

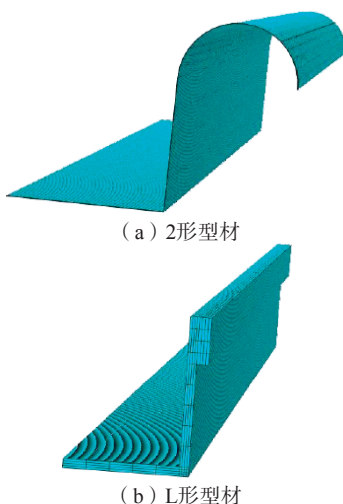


图7 型材网格划分  
Fig.7 Profile grid division

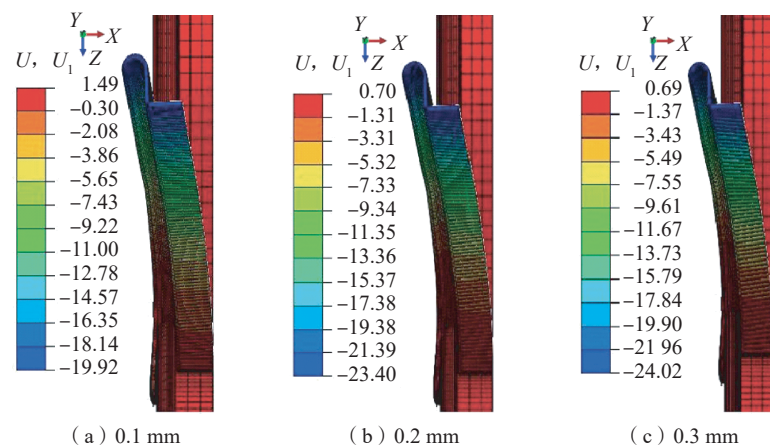


图9 不同 $a_1$ 值时2形型材在X方向的位移量  
Fig.9 Displacement of 2-shaped profiles in X direction at different  $a_1$  values

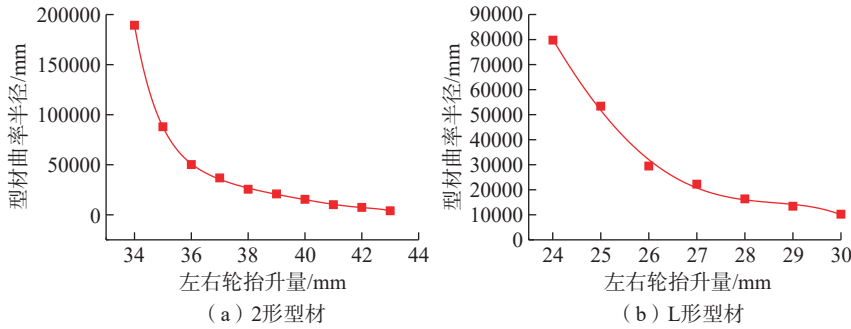


图10 型材滚弯成形曲率半径与左右滚轮抬升量的关系  
Fig.10 Relation between radius of curvature and lift height of left and right rollers

2.5 2形及L形非对称截面型材滚弯工艺试验

结合2.4节模拟仿真结果,确认2形和L形型材在四轮滚弯成形时的最佳工艺参数为型材与滚轮摩擦系数范围为0.10~0.12,型材和滚轮之间最佳间隙为0.2mm,2形型材和L形型材滚弯的左右滚轮极限抬升高度分别为43mm和30mm。

综合考虑滚轮的材料和制造成本,本研究选择牌号CrWMn高碳合金工具钢,并在滚轮上设计3个均匀分布的减重槽。考虑到2形和L形型材均含有多组长度不一的型材,采用分段等曲率滚弯方法来加工变曲率型材,故选择对型材进行等分段式处理。2形和L形型材长度分别为4076mm和5606mm,并取10等分。同时建立2形和L形型材在每个分段处与滚弯机床几何加工参数X、Y坐标值对应关系,如表3和4所示。

试验采用的设备为MC4P431IAS数控滚弯机,由4个滚轮组成,可通过百分比调节相关滚弯参数来控制其运动,具体机器及型材如图11和12所示。其主要工艺步骤为毛坯下料→划线分段→滚弯参数确定→滚弯成形→贴膜检验→校形。在完成型材的分段式滚弯加工后,可将型材的下表面放置于检验模之上,采用塞尺测量每个等分段处的间隙,表5为两种型材各等分段处下表面与检验模之间的误差,可知2形型材下表面与检验模最大间隙值为0.5mm,L

表2 2形及L形型材各等分点的曲率半径偏差百分比

Table 2 Percentage of curvature radius deviation at each bisection point of 2-shaped profile and L-shaped profile %

分段号	2形型材	L形型材
1	5.5	1.4
2	1.4	1.7
3	4.7	2.9
4	2.5	1.3
5	2.6	3
6	2.8	3.2
7	1.7	2.6
8	2.5	0.5
9	0.8	1.4
10	4.6	0.6
11	0.04	2.3

形型材的最大间隙值为0.76mm,其纵向轮廓度均满足不大于1mm的设计要求。表6为两种型材各等分点的试验与数模曲率半径偏差百分比,其中2形及L形型材的最大曲率半径偏差分别为5.6%和3.4%,成功验证了分段式等曲率的渐近滚弯成形方案的可行性和准确性,克服了非对称截面型材加工难题。相较于传统滚弯工艺以经验分析和试验为主的方法中存在难于成形高质量的型材,而且加工效率低、废品率高等问题,该研究不仅成功减小滚弯成形道次,缩短了加工周期,也为我国非对称截面型材滚弯成形技术达到国际

表3 2形型材的等分段对应机床加工X、Y坐标值  
Table 3 Equal sections of 2-shaped profile correspond to machining coordinate values of X and Y by machine tool mm

分段号	X值	Y值
1	79	80
2	82	83
3	83	83
4	83	84
5	84	84
6	84	84
7	84	84
8	83	84
9	83	83
10	82	83

表4 L形型材的等分段对应机床加工X、Y坐标值  
Table 4 Equal sections of L-shaped profile correspond to machining coordinate values of X and Y by machine tool mm

分段号	X值	Y值
1	69	70
2	69	70
3	70	70
4	70	70
5	70	71
6	70	71
7	71	71
8	71	71
9	71	71
10	71	71

先进水平提供了重要技术支撑。

3 结论

(1)通过性能测试评价,建立2099铝锂合金厚度和高度下压量与回弹后弯曲角的线性拟合关系。结果表明,随着材料厚度和下压量的增加,合金材料回弹后的弯曲角持续增加。同时发现在相同高度下压量时,



(a) 2形型材 (b) L形型材

图 11 型材某一时刻滚弯成形试验

Fig.11 Experimental of profile rolling bending at certain time

表 5 两种型材各等分段处下表面与检验模之间的误差

Table 5 Error of each equal segment of two profiles between lower surface and inspection die mm

分段号	2形型材	L形型材
1	0.06	0.22
2	0.11	0.26
3	0.20	0.34
4	0.35	0.58
5	0.41	0.76
6	0.50	0.44
7	0.36	0.42
8	0.25	0.36
9	0.23	0.34
10	0.12	0.24
11	0.04	0.16

表 6 两种型材各等分点的试验与数模曲率半径偏差百分比

Table 6 Percentage of deviation between test and mathematical model curvature radius at each bisection point of two profiles %

分段号	2形型材	L形型材
1	5.6	2.2
2	3.4	1.9
3	4.5	3.4
4	2.8	1.6
5	3.1	3.3
6	2.9	3.4
7	1.8	2.7
8	2.5	1.2
9	1.1	1.7
10	4.5	1.1
11	0.3	2.5



(a) 2形型材 (b) L形型材

图 12 变曲率型材成形后的贴模检验

Fig.12 Checkout effect of dies about variable curvature profile after forming

2099-T3 合金弯曲角更大, T3 铝锂合金比 T83 铝锂合金的室温弯曲塑性更好。

(2) 结合 2 形和 L 形型材的等曲率滚弯有限元模拟结果, 获得了合理滚弯成形工艺参数: 型材与滚轮摩擦系数为 0.10~0.12, 型材和滚轮之间间隙为 0.2 mm, 2 形型材和 L 形型材滚弯的左右滚轮极限抬升高度分别为 43 mm 和 30 mm。

(3) 采用分段等曲率渐近滚弯新工艺成功实现了非对称截面型材的精确成形, 其中长度为 4076 mm 的 2 形型材和 5606 mm 的 L 形型材最大纵向轮廓度误差分别为 0.5 mm 和 0.76 mm, 最大曲率半径偏差分别为 5.6% 和 3.4%, 均满足设计要求, 成功验证了该滚弯成形工艺的可行性和准确性, 为国产 C919 大飞机非对称截面型材批量化生产提供了重要技术支撑。

## 参考文献

- [1] WARD N, TRAN A, ABAD A, et al. The effects of retrogression and reaging on aluminum alloy 2099 (C458)[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2011, 20(6): 989-996.
- [2] 魏修宇, 郑子樵, 余玲娟, 等. Mg, Zn 在 2099 铝锂合金中的微合金化作用[J]. 稀有金属材料与工程, 2010, 39(9): 1583-1587.
- WEI Xiuyu, ZHENG Ziqiao, SHE Lingjuan, et al. Microalloying roles of Mg and Zn additions in 2099 Al-Li alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2010, 39(9): 1583-1587.
- [3] 徐义, 李落星, 李光耀, 等. 型材弯曲工艺的现状与发展前景[J]. 塑性工程学报, 2008, 15(3): 61-70.

XU Yi, LI Luoxing, LI Guangyao, et al. Extrusion bending: Method, application and recent development[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2008, 15(3): 61-70.

[4] 孙中刚, 郭旋, 刘红兵, 等. 铝锂合金先进制造技术及其发展趋势[J]. 航空制造技术, 2012, 55(5): 60-63.

SUN Zhonggang, GUO Xuan, LIU Hongbing, et al. Development trend of advanced manufacturing technology for aluminum lithium alloy[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012, 55(5): 60-63.

[5] 王永军, 刘瑞, 武伟超, 等. 板料与型材成形柔性模具的关键技术及发展现状与趋势[J]. 航空制造技术, 2011, 54(13): 42-46.

WANG Yongjun, LIU Rui, WU Weichao, et al. Key technology and development of flexible die for sheet and extrusion forming[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011, 54(13): 42-46.

[6] 吴建军, 刘伟萍, 何文华, 等. 2099 铝锂合金型材热压下陷模具结构优选[J]. 航空制造技术, 2016, 59(13): 43-49.

WU Jianjun, LIU Weiping, HE Wenhua, et al. Tool development for hot joggle forming of 2099 Al-Li alloy profile[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(13): 43-49.

[7] 周养萍. 型材滚弯加工现状与展望[J]. 锻压装备与制造技术, 2010(3): 14-18.

ZHOU Yangping. The status and prospect of roll banding process for section bar[J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2010(3): 14-18.

[8] CAI Z Y, LAN Y W. Analysis on the straight-end problem in thin-plate three-roll bending[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 80-81: 585-590.

[9] SALEM J, CHAMPLIAUD H, FENG Z K, et al. Experimental analysis of an asymmetrical three-roll bending process[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 83(9-12): 1823-1833.

[10] JIA F Y, WANG J S, LIU J W. FEM analysis for asymmetric bending roll of roll process in four-high mill[J]. Materials Science Forum, 2020, 976: 151-155.

[11] 王安恒, 薛红前, 高鹏飞, 等. 大截面 Z 型材滚弯成形缺陷的数值模拟及试验研究[J]. 航空制造技术, 2018, 61(7): 62-69.

WANG Anheng, XUE Hongqian, GAO Pengfei, et al. Numerical simulation and experimental of forming defects in roll-bending

process for Z-shaped profiles with large cross-section[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2018, 61(7): 62–69.

[12] 韩志仁, 罗雪磊. 基于 ANSYS Workbench 的型材拉弯有限元仿真模块开发[J]. *航空制造技术*, 2020, 63(13): 64–68.

HAN Zhiren, LUO Xuelei. Development of finite element simulate module of ANSYS workbench on profile stretch-bending[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2020, 63(13): 64–68.

[13] SAITO M, ASAKAWA M, KOBAYASHI M, et al. Manufacture of Mg/Al clad sheet by roll bonding and formability at room temperature[J]. *Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity*, 2013, 54(630): 635–639.

[14] 张荣霞, 高志勇, 吴为, 等. 基于滚弯预变形的新型 Al–Li–Cu–Mg 合金蠕变时效成形试验研究[J]. *航空制造技术*, 2017, 60(1/2): 90–93.

ZHANG Rongxia, GAO Zhiyong, WU

Wei, et al. Research on creep age-forming test of new Al–Li–Cu–Mg alloy based on performing of rolling bend[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2017, 60(1/2): 90–93.

[15] 郭训忠, 杨秋成, 程诚, 等. 型材构件六轴自由弯曲成形机理及成形质量控制研究[J]. *航空制造技术*, 2022, 65(10): 24–32.

GUO Xunzhong, YANG Qiucheng, CHENG Cheng, et al. Research on six-axis free bending forming mechanism and forming quality control of profile components[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2022, 65(10): 24–32.

[16] 黄珂, 易幼平, 黄始全, 等. 2195 铝锂合金超低温流变行为及成形特性研究[J]. *材料导报*, 2022, 36(3): 168–173.

HUANG Ke, YI Youping, HUANG Shiquan, et al. Experimental research on 2195 Al–Li alloy rheological behavior and forming characteristics in cryogenic[J]. *Materials Reports*, 2022, 36(3): 168–173.

[17] 胡智华. 铝锂合金非对称截面型材四轴滚弯工艺研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.

HU Zhihua. Research on four roll bending process of Al–Li Alloy asymmetric profile[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.

[18] 卢崇梅. 铝锂合金复杂截面型材滚弯工艺研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.

LU Chongmei. Research on complex-section profile roll-bending process of Al–Li alloy[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014.

[19] 胡智华, 陈明和, 谢兰生. 2099 铝锂合金型材的变曲率滚弯工艺[J]. *塑性工程学报*, 2016, 23(3): 82–87.

HU Zhihua, CHEN Minghe, XIE Lansheng. Variable curvature roll-bending for 2099Al–Li alloy profile[J]. *Journal of plasticity engineering*, 2016, 23(3): 82–87.

## Research on Roll Bending Precision Forming Technology of Variable Curvature Section of Middle Fuselage Skin Frame

CHEN Minghe<sup>1</sup>, XIE Lansheng<sup>1</sup>, FENG Rui<sup>1</sup>, WEN Songtao<sup>2</sup>, LUO Zhihui<sup>2</sup>

(1. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. AVIC Jiangxi Hongdu Aviation Industry Co., Ltd., Nanchang 330096, China)

**[ABSTRACT]** In order to solve the problem of accurate forming of asymmetric cross-section truss strip of skin frame of C919 domestic large aircraft, the constitutive model and springback law of materials were obtained based on the performance test and evaluation of 2099–T3 and T83 Al–Li alloys with 2-shaped profile and L-shaped profile. At the same time, a new piecewise constant curvature progressive roll bending process is proposed. Combined with the theoretical analysis and calculation of roll bending forming, the finite element model of constant curvature four-axis roll bending is established, and the influence factors of roll bending springback and curvature radius of two types of profiles are analyzed. The simulation results determine the reasonable roll bending process parameters of asymmetric cross-section profiles as follows: the friction coefficient between profile and roller is 0.10–0.12, the clearance between profile and roller is 0.2 mm, and the limit lifting heights of left and right rollers of 2-shaped profile and L-shaped profile are 43 mm and 30 mm, respectively. Finally, the qualified variable curvature profile parts were successfully produced by the MC4P431IAS CNC roll bending machine using the method of piecewise equal curvature asymptotic roll bending, and the roll bending process test verification of variable curvature profile was completed. The maximum clearance value is only 0.76 mm, which successfully verifies the feasibility and accuracy of the variable curvature rolling forming scheme. At present, the research results have been successfully applied to the roll bending production of fuselage skin skeleton truss in large aircraft of C919.

**Keywords:** C919 large aircraft; Variable curvature of skin truss; Al–Li alloy; Progressive roll bending; Finite element model

(责编 古京)