

大曲率变截面复杂航空钣金构件成形技术研究*

李晓军,董锦亮,门向南,邓涛,曾一畔,成靖

(航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司,成都 610092)

[摘要] “彩虹”零件具有尺寸长、曲率大、变截面且夹角小,且一半整体下陷、结构扭曲等复杂特征。长期以来,这类复杂零件均采用“落压成形+手工校正”的成形方法,成形质量差,后期需要大量的手工校正工作,导致加工效率和合格率都极为低下。通过分解零件结构特征,分析现有技术与设备资源,提出了“型材+板材”的跨专业组合成形工艺方案,并探索型材拉弯成形技术在大曲率、变截面、小夹角航空钣金构件成形上的应用。通过工艺试验,对零件成形参数进行验证并不断优化,最终实现该零件的精确成形。

关键词: 彩虹零件;复杂特征;落压成形;拉弯成形;组合成形;精确成形

Research on Forming Technology of Complex Aeronautical Sheet Metal Components With Large Curvature and Variable Section

LI Xiaojun, DONG Jinliang, MEN Xiangnan, DENG Tao, ZENG Yipan, CHENG Jing

(AVIC Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Chengdu 610092, China)

[ABSTRACT] The “rainbow” part has such complex characteristics as long size, large curvature, variable cross-section and small angle, half of which is joggle, structural distortion and so on. For a long time, this kind of complex parts had been formed by the method of “hammer forming + manual correction”. The forming quality was poor, and a lot of manual correction work was needed in the later stage, resulting in low processing efficiency and qualified rate. In this study, by disassembling the structural characteristics of the part, the existing technology and equipment resources, a cross-specialty combined forming process of “profiles + sheets” was proposed, and the application of stretch-bending technology of profiles in the forming of aeronautical sheet metal components with large curvature, variable cross-section and small angle was explored. Through the process test, the forming parameters of the part are verified and optimized continuously, and the precise forming of the part is finally realized.

Keywords: “Rainbow” part; Complex characteristics; Hammer forming; Stretch bending; Combined forming; Accurate forming

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2020.07.096

随着我国航空事业的快速发展,客户对飞机的性能要求越来越高,航空钣金零件逐渐向整体化、大型化发展,成形难度加大,这对成形工艺提出了更高的要求。长期以来,各大主机厂均采用落锤成形辅以手工校正^[1]来加工零件,成形质量、效率难以满足实际需求。为此,各院所、高校、企业从航空钣金零件成形原理^[2-4]、有限元数值模拟分析^[5-6]、新工艺开发及创新等方面进行积极研究。郎利辉等^[7]对液压成形技术在复杂薄壁航空整体钣金件上的应用进行了深入研究;航空工业成飞公司也在积极研究新工艺,成靖等^[8]实现了冲压拉深成形工艺在复杂口框类钣金件上的成功应用。

* 基金项目:四川省重点研发项目(2018GZ0063)。

“彩虹”零件形似彩虹,为某新型飞机关键零件,其对疲劳性能、抗冲击能力、抗应力腐蚀能力要求相当高。因此,成形过程中应尽量减少对材料性能的内部损伤,消除手工校正,提升零件成形质量。

1 零件工艺性分析

1.1 零件基本信息

1.1.1 零件构型

“彩虹”零件具有大曲率、变截面、小夹角、整体下陷、结构扭曲等结构特征,具体如图1所示。

1.1.2 材料信息

零件材料为 7075-O- δ 3.175mm,航空工业成飞公司

委托高校对该材料的力学性能进行了测试,结果如表 1 所示,3 个方向的真实应力-应变曲线如图 2 所示。

1.2 落压成形及成形难点综合分析

1.2.1 PAM-STAMP落压成形过程仿真分析

首先,采用常规工艺——落压成形对零件成形工艺进行分析。通过 CATIA 对零件非工作面进行工艺补充,按经验值给定初始毛料,借助于 PAM-STAMP 对落压成形过程进行建模仿真,仿真模型如图 3 所示。

1.2.2 有限元仿真结果分析

在实际加工中,由于落压成形时无压边,无接触部分毛料处于自由变形状态。而成形初期,毛料与模具接触面积小,使得材料受力不足,变形大,易出现起皱、贴模度差等缺陷。由图 4.5 的仿真结果可以看出,零件成形过程中整体受力都较小,因此,板料大部分处于严重起皱趋势(Strong Wrinkling Trend)及拉伸不足(Insufficient Stretching)状态,仿真结果与实际情况相符。最终,只能通过大量的手工劳动(排皱及校正贴膜)

来达到零件交付要求。

1.2.3 成形难点综合分析

综合考虑零件尺寸大、材料厚等结构特征,手工校正有限,需进行多次落压来降低手工校正难度。该方法会带来以下问题:

(1) 顶部 R 受力集中,易造成材料厚度超差;

(2) 落压成形无法精确定位,造成每次成形的下陷处有偏差,需进行手工打磨,影响表面质量。

由此可见,常规的落压成形工艺方案难以满足“彩虹”零件高成形质量要求,其加工效率也难以满足当前行业提出的“快速响应”科研任务需求。

2 加工方案的确定

2.1 加工方案分析

从构型上来看,“彩虹”零件与大曲率板弯型材零件类似,结合航空工业成飞公司自身的加工经验,采用拉弯成形工艺具备可行性。通过对零件构型特点进行

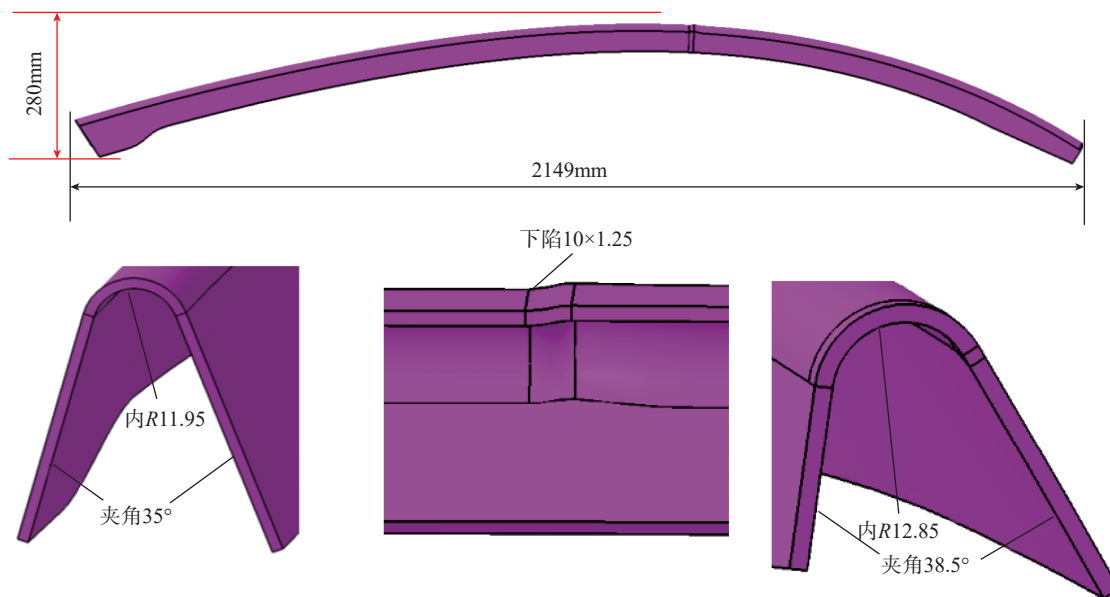


图1 “彩虹”零件结构特征

Fig.1 Structural characteristics of rainbow parts

表1 7075-O铝合金板材的力学性能参数

Table 1 Mechanical properties of 7075-O aluminum alloy sheet

方向 / (°)	屈服强度 R_p /MPa	抗拉强度 R_m /MPa	均匀延伸率 $A_{gt}/\%$	断裂延伸率 $A_t/\%$	厚向异性系数 r	应变强化系数 K /MPa	应变强化指数 n
0	106	215	14.9	20.6	0.707	360	0.18
45	106	214	14.5	21.1	1.134	359	0.186
90	109	216	10.6	15.6	0.85	352.5	0.167

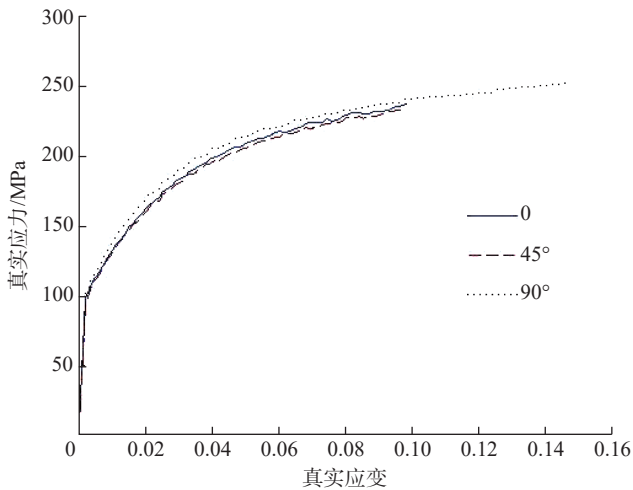


图2 真实应力-真实应变曲线
Fig.2 True stress-strain curve

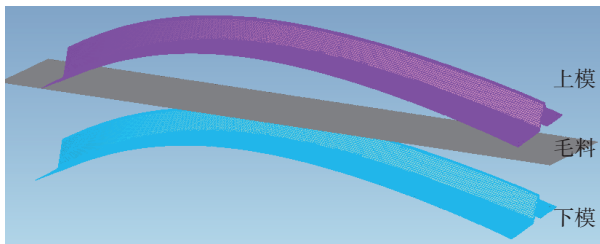


图3 仿真模型
Fig.3 Simulation model

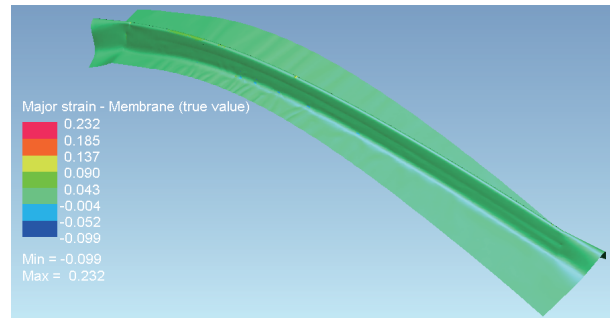


图4 最大主应变分布图
Fig.4 Maximum principal strain distribution

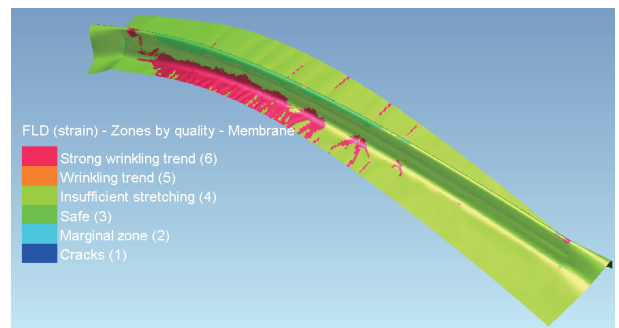


图5 成形极限图
Fig.5 Forming limit diagram

详细分解,结合专业厂设备及技术资源,得到工艺分析矩阵表2,匹配对应的最优加工方法,再进行工艺组合。

由表2可知,“彩虹”零件最佳组合工艺为“闸压成形V形槽(即小截面夹角)—拉弯成形弧度—落压成形整体下陷”。

2.2 总体研究方案

通过对工艺流程进行详细分析,确定了每道工序所需工艺参数,制定了该零件成形技术研究的总体方案,具体流程如图6所示。

3 方案实施

3.1 工艺数模的建立

工艺数模是模具设计、制造的依据,根据总体研究方案,需建立3个工艺数模:闸压工艺数模、拉弯工艺数模和落压工艺数模。

3.1.1 闸压工艺数模

闸压工艺数模建模要求:填平下陷,以零件最小截面夹角、最大弯边及最长弧度展开尺寸进行建模(其中,长度方向需加上下一步拉弯工序所需的两端夹头尺寸)。如图7所示,工艺数模顶部 $R=15\text{mm}$,长 2900mm ,两弯

边尺寸分别为 76.8mm 和 73.4mm ,夹角为 34° 。

3.1.2 拉弯工艺数模

拉弯工艺数模建模要求:填平下陷及台阶,对弧面进行圆滑过渡,如图8所示。

3.1.3 落压工艺数模

落压工艺数模建模要求:下陷加深 0.3mm 。如图9所示,工艺数模下陷由 1.25mm 加深为 1.55mm 。

3.2 参数设定

工艺参数与模具参数是影响钣金零件成形的两个主要因素。在“彩虹”零件成形技术研究中,成形质量取决于拉弯成形效果。多年来,国内学者在拉弯成形技术研究上取得许多重要成果^[9-11],张磊等^[12]构建了型材拉弯工艺知识库系统。航空工业成飞公司基于自身在数十年实际加工中积累的经验参数构建了基于实践的工艺知识库,大幅提高了工艺研究效率及质量。

3.2.1 闸压参数的确定

闸压模用于闸压预成形工序,其主要作用是成形一个V形槽,作为后续拉弯工序坯料。模具需放回弹 3° ,凸模高度大于零件闸压后最大弯边高度(76.8mm),以免干涉,模具如图10所示。

表2 工艺方案分析矩阵表
Table 2 Process plan analysis matrix

成形方式	小截面夹角	大弧度、大弦高	整体下陷
落压成形	顶部材料变薄严重	起皱严重、效果差	回弹小、效果好
液压成形	橡皮囊损坏风险高	无法成形(尺寸限制)	回弹大、效果一般
拉伸成形	可横拉但材料浪费严重	效果一般	无法成形
拉弯成形	无法成形	效果好、精度高	无法成形
闸压成形	效果好、精度高	定位困难	回弹大、效果一般

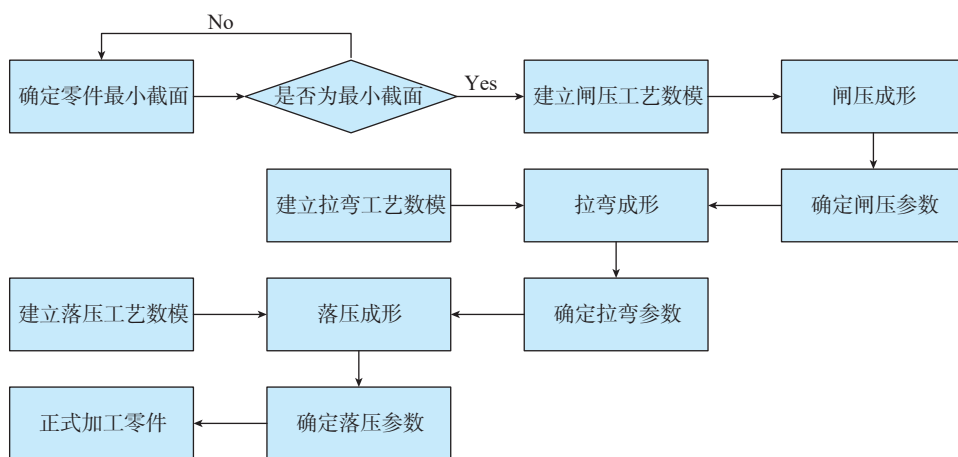


图6 总体研究方案流程图
Fig.6 Flow chart of general research scheme

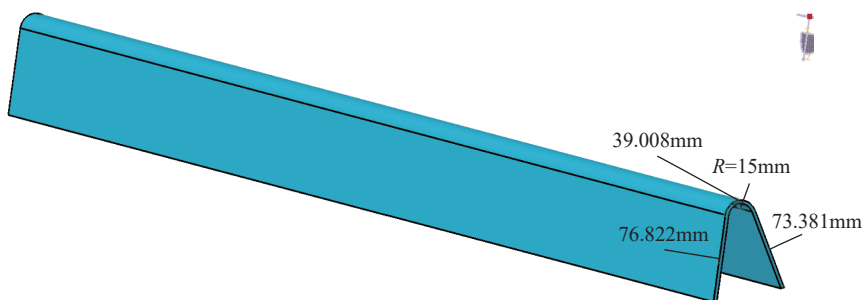


图7 闸压工艺数模
Fig.7 Digital model for pressing

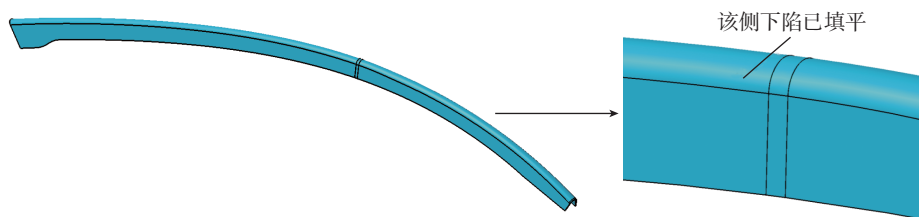
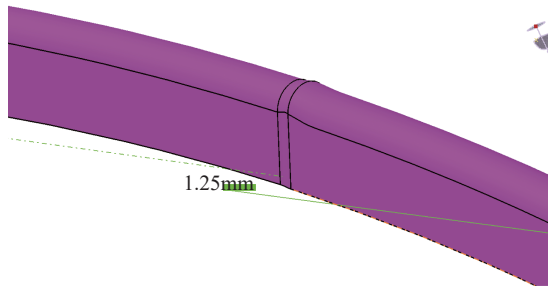
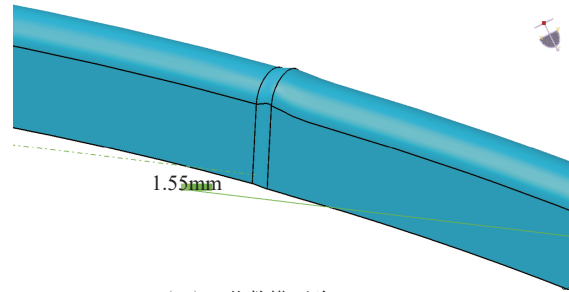


图8 拉弯工艺数模
Fig.8 Digital model for stretch bending



(a) 工艺数模下陷 1.25mm



(b) 工艺数模下陷 1.55mm

图9 落压工艺数模

Fig.9 Digital model for hammer forming

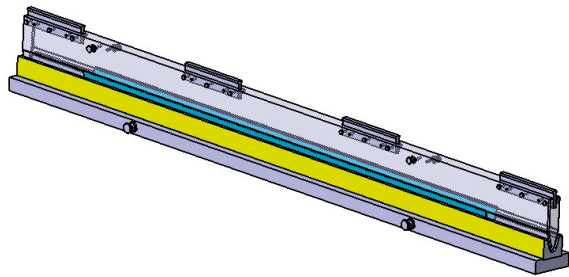


图10 闸压模3D模型

Fig.10 3D model of pressing mould

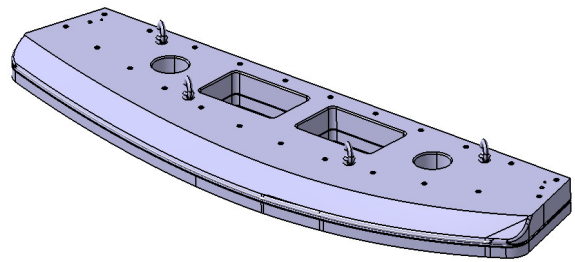


图11 拉弯模3D模型

Fig.11 3D model of stretch bending die

3.2.2 拉弯参数的确定

拉弯模用于成形零件弧度,是本次研究的关键点。根据工艺知识库(经验值),模具间隙设定为0.1 (0/+0.1)mm,预拉量为1%,补拉量为1.5%,模具如图11所示。

3.2.3 落压参数的确定

落压模用于成形零件下陷,下陷区域加深0.3mm(该参数已固化),非工作区型面需要按零件弧度进行流线,模具如图12所示。

3.3 毛料确定

毛料尺寸由拉弯工艺确定,其长度方向尺寸:

$$L (\leq L') = L_1 + \Delta L = 2386\text{mm} + 400\text{mm} = 2786\text{mm}$$

(1)

其中, L' 为闸压模模具长度(2900mm), L_1 为零件展开长度, ΔL 为两端拉弯加持余量。

其宽度方向尺寸:

$$W = H_1 + H_2 + I + \Delta W = 76.8\text{mm} + 73.4\text{mm} + 39\text{mm} + 20\text{mm} = 209.2\text{mm}$$

(2)

其中, H_1 、 H_2 分别为两侧弯边最大长度; I 为顶部 R 弧长; ΔW 为经验余量值。

通过计算,毛料尺寸确定为 $2786 \times 209.2\text{mm}$ (实际生产中为了便于下料,对毛料尺寸进行了取整,即 $2800 \times 210\text{mm}$)。

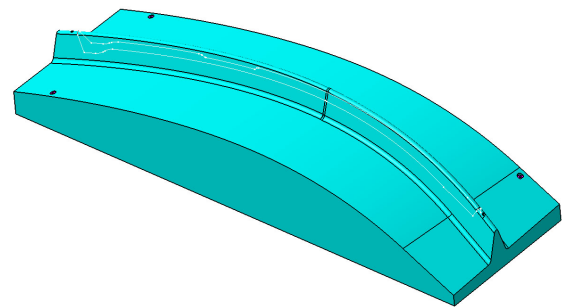


图12 落锤模3D模型

Fig.12 3D model of drop hammer die

4 实施结果

本研究按给定参数进行了工艺试验,并根据实际情况进行参数优化,实现了“彩虹”零件的精确成形。优化参数如下:

(1) 闸压成形后的V形槽,两侧弯边尺寸应保持一致(尺寸差 $\leq 5\text{mm}$);

(2) 拉弯模间隙较小,零件弯曲过程中底部弯边由于收料起皱,局部无法进入卡槽,导致后续拉弯无法进行,结合实际情况,间隙参数优化为 $0.3 (-0.1/+0.1)\text{mm}$ 。

5 结论

本文以“彩虹”零件为研究对象,通过对其结构特征进行分解,探索了型材拉弯成形工艺在板材零件成形上的应用,得到了以下结论:

(1) 截面为变夹角时,拉弯坯料(即 V 形槽)时应以最小截面夹角为准;

(2) 对拉弯坯料(即 V 形槽)进行回弹修正时,应当加大 $1^{\circ}\sim 2^{\circ}$,便于侧边贴模。V 形槽两侧边尺寸尽量保持一致,避免应力集中;

(3) 板材进行拉弯时,其基准边更容易出现起皱现象,拉弯模具在设计时间隙参数应适当放大(一般放大 0.2mm)。

参考文献

- [1] 职业技能培训 MES 系列教材编委会. 冷作钣金工技能 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2008.
Editorial Board of MES Series Textbooks for Vocational Skills Training. Cold working sheet metalworking skills[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2008.
- [2] 余汉清, 陈金德. 金属塑性成形原理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
YU Hanqing, CHEN Jinde. Metal plastic forming principle[M]. Beijing: China Machine Press, 2012.
- [3] 刘翔, 李烁. 实用钣金技术手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
LIU Xiang, LI Shuo. Practical sheet metal technical manual[M]. Beijing: China Machine Press, 2012.
- [4] 熊艳才. 航空复杂构件精密成形技术基础 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
XIONG Yancai. Foundation of precision forming technology for aeronautical complex components[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012.
- [5] 李珑泉. 金属板料成形有限元模拟基础 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2008.
LI Shuanggao. Finite element simulation basis of sheet metal forming[M]. Beijing: Beihang University Press, 2008.
- [6] 李光俊, 袁胜, 许旭东, 等. 面向对象的钣金成形有限元分析系统开发与应用 [J]. 航空制造技术, 2014, 57(17): 100-103.
LI Guangjun, YUAN Sheng, XU Xudong, et al. Development and application of object-oriented finite element analysis system for sheet metal forming[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 57(17): 100-103.
- [7] 郎利辉, 孙志莹, 孔德帅, 等. 复杂薄壁航空整体钣金件的液压成形技术 [J]. 锻压技术, 2014, 39(10): 25-31, 42.
LANG Lihui, SUN Zhiying, KONG Deshuai, et al. Hydraulic forming technology for complex thin-walled aeronautical integral sheet metal parts[J]. Forging Technology, 2014, 39(10): 25-31, 42.
- [8] 成靖, 李晓军, 曾一畔, 等. 航空复杂钣金构件冲压成形的研究与应用 [J]. 锻压技术, 2018, 43(12): 31-35.

CHENG Jing, LI Xiaojun, ZENG Yipan, et al. Research and application of stamping forming of aeronautical complex sheet metal components[J]. Forging Technology, 2018, 43 (12): 31-35.

[9] 刘天骄, 王永军, 吴建军, 等. 大型客机铝锂合金型材拉弯成形关键技术 [J]. 航空制造技术, 2012, 55(17): 40-44.

LIU Tianjiao, WANG Yongjun, WU Jianjun, et al. Large aircraft Al-Li alloy profiles stretch bending key technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012, 55(17): 40-44.

[10] 张晓丽, 李晓星, 周贤宾, 等. 复杂截面铝合金型材拉弯成形有限元模拟 [J]. 塑性工程学报, 2004, 11(4): 44-47.

ZHANG Xiaoli, LI Xiaoxing, ZHOU Xianbin, et al. Finite element simulation for stretch-wrap bending of aluminium profile with complex cross section[J]. Journal of Plastic Engineering, 2004, 11(4): 44-47.

[11] 李小强, 曹增强, 王俊彪, 等. 型材拉弯工艺研究进展 [J]. 航空制造技术, 2004, 47(4): 80-82.

LI Xiaoqiang, CAO Zengqiang, WANG Junbiao, et al. Progress in research on stretch bending process of profiles[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2004, 47(4): 80-82.

[12] 张磊, 刘闯, 王俊彪. 型材拉弯成形工艺知识库研究与开发 [J]. 航空制造技术, 2011, 54(4): 71-74.

ZHANG Lei, LIU Chuang, WANG Junbiao. Research and development of profile drawing and bending process knowledge base[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011, 54(4): 71-74.

通讯作者: 李晓军, 工程师, 研究方向为复杂航空钣金构件精确制造技术, E-mail: lxjupup@163.com。

(责编 阳光)

(上接第95页)

[8] 陈志同, 陈胜林. 一种矩形阵列同步摆动机构及基于该机构的多轴联动加工机床: CN103769997A[P]. 2014-05-07.

CHEN Zhitong, CHEN Shenglin. A rectangular array synchronous oscillating mechanism and a multi axis machine tool based on the mechanism: 201410004979.X[P]. 2014-05-07.

[9] 陈志同, 徐志雄, 张黎明, 等. 一种双减速器相互消隙无回差传动装置: 201710762347.3 [P]. 2017-08-30.

CHEN Zhitong, XU Zhixiong, ZHANG Liming, et al. A kind of double decelerator mutual clearance and no return difference transmission device: 201710762347.3[P]. 2017-08-30.

[10] 李潜彤. 高温合金铣削磨削抛光组合加工表面完整性控制研究 [D]. 北京: 北京航空航天大学, 2018.

LI Qiantong. Research on surface integrity control of superalloy milling, grinding and polishing combined machining[D]. Beijing: Beihang University, 2018.

通讯作者: 陈志同, 博士, 教授, 研究方向为先进数控加工技术与装备、机床机构学、共轭几何学、制造经济学和加工表面科学, 提出并联合航空发动机企业、机床制造企业共同研究航空发动机叶轮、叶片数控磨削抛光工艺与机床, E-mail: ztchen@buaa.edu.cn。

(责编 阳光)