基于 Autoform 的铝合金座椅横梁热成形模拟及回弹补偿

张泉达，刘子知，孙福臻，吉日格勒，李蕙宇
（北京机科国创轻量化科学研究院有限公司，北京 101407）

摘要：针对某 6XXX 铝合金汽车座椅横梁，采用 Autoform 成形模拟软件建立热成形工艺有限元模型，进行成形工艺和零件回弹的分析研究。首先，利用 Autoform 进行回弹分析，通过直接补偿法对零件进行回弹补偿，多次迭代补偿后将零件的法向回弹量控制在±0.5 mm 范围内，使得零件满足热成形生产要求。然后，进行模具研发和零件试制，对试制零件进行偏差检测，零件各点的总偏差均低于 0.6 mm，符合主机厂的质量要求，证明了热成形模拟的合理性和有效性。模拟及零件试制结果表明，依据热成形模拟和回弹补偿结果进行零件加工能够获得优质的产品，能够为汽车高强铝合金零件的批量化生产提供设计参考。

关键词：热成形；高强铝合金；回弹补偿；直接补偿法；偏差检测
DOI：10.13330/j.issn.1000-3940.2022.08.011
中图分类号：TG146.2+1；O242.21　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1000-3940（2022）08-0068-08

Hot forming simulation and springback compensation on aluminum alloy seat beam based on Autoform

Zhang Quanda, Liu Zizhi, Sun Fuzhen, Ji Rigele, Li Huiyu
(Beijing National Innovation Institute of Lightweight Ltd., Beijing 101407, China)

Abstract: For a certain 6XXX aluminum alloy automobile seat beam, the finite element model of hot forming process was established by forming simulation software Autoform, and the forming process and the part springback were analyzed and researched. Firstly, the springback analysis was performed by Autoform, and the part springback was compensated by the direct compensation method. After multiple iterations of compensation, the normal springback amount of part was controlled within ±0.5 mm, so that the part could meet the requirements of hot forming production. Then, the research and development of die and the trial production of part were carried out, and the deviation detection of trial production parts was conducted. The total deviation for each point of the parts was less than 0.6 mm, which met the quality requirements of the original equipment manufacture and proved the rationality and validity of the hot forming simulation. The results of simulation and trial production of parts show that the part processing based on the results of hot forming simulation and springback compensation can obtain high-quality products, which provides guidance for the mass production of automotive high-strength aluminum alloy parts.

Key words: hot forming; high-strength aluminum alloy; springback compensation; direct compensation method; deviation detection

汽车轻量化是减少燃油消耗、降低空气污染、实现节能减排的有效措施，燃油汽车整车质量每减少 10%，燃油经济性可提高 6%～8%，汽车的尾气排放量降低，纯电动汽车整车质量的减少亦可显著提升续航里程[1]。使用轻量化材料、结构优化设计和制造工艺轻量化为实现汽车轻量化的 3 个重要途径，而在轻量化材料中，铝合金具有密度小、比强度高、抗冲击性能好和耐蚀性高等优点，目前已成为车身轻量化的重要材料，应用广泛，前景良好[2]。

进行铝合金热成形时，常用的方式为：先进行固溶热处理，然后进行模内成形和淬火，最后进行人工时效处理，从而提升材料的强度、均匀性、抗晶间腐蚀等性能，然而铝合金进行热处理的耗时较长，生产效率较低，同时相比汽车使用的低碳钢，铝合金在成形时更易出现起皱、开裂等缺陷，回弹量更大，影响零件的成形精度和质量[3]。进行高强铝合金热成形模拟研究，有助于了解材料热成形时的变形规律，掌握成形工艺参数的具体数值，提高加工产品的品质，进而提高生产效益。闫华军等[4]对铝合金地板梁拉延成形的回弹情况进行了研究，

收稿日期：2021-07-06；**修订日期**：2021-10-09
基金项目：中央引导地方科技发展资金项目（基础研究项目）（206Z1803G）
作者简介：张泉达（1986-），男，博士，工程师
E-mail：zhangquandadgu@163.com
通信作者：刘子知（1994-），男，硕士，助理工程师
E-mail：2399725786@qq.com

通过 Dynaform 回弹补偿的方式进行了模具型面补偿。郭小农等[5]对铝合金弧面节点板冲压成形的回弹特性进行了研究，研究了材料参数、冲压拱度等参数对回弹量的影响，推导获得了节点板回弹量的计算式，通过数值分析验证了算式的准确性。陈佳等[6]研究了固溶时效制度对 6A02 铝合金的组织及力学性能的影响，获得了适合材料的固溶温度、时效温度和保温时间，获得了其力学性能参数，并观察了其微观组织。叶雨寒等[7]对汽车车身用 6082-T6 铝合金进行了 3 种连接工艺下的拉伸试验分析，确定了自冲铆接工艺具有较为优异的性能。李祥亮等[8]借助显微硬度测试、SEM、TEM、元素面扫描等方法，研究了 T6 和 T78 时效工艺对铝合金显微结构和性能的影响。陈镇扬等[9]采用 Gleeble-3500 热模拟机，研究了 2219 铝合金在不同变形温度和应变速率下的热变形行为，并建立了超大型环形件用铝合金热变形时的本构方程及热加工图。

本文通过 Autoform 成形模拟软件，对铝合金汽车座椅横梁进行热成形模拟，根据模拟结果分析零件的成形性，通过工艺优化、消除零件缺陷；通过模拟软件中的直接回弹补偿迭代法控制冲压件的回弹量，将零件整体回弹控制在±0.5 mm 范围内，以满足零件的生产要求；最后根据回弹补偿后的模面进行模具设计加工，然后进行座椅横梁试制，对试制零件的关键位置进行三坐标检测，计算检测各点的总偏差值，发现试制零件与目标模型间的偏差较小，且零件无起皱、开裂、回弹缺陷，证明了模拟结果的合理性和有效性，为零件的批量化生产提供了参考。

1　热成形有限元模型建立

本文研究对象为某汽车座椅横梁，零件整体尺寸为 1454 mm×122 mm×69 mm，如图 1 所示。将零件三维数模导入 Autoform 后，设置模型的缝合公差为 0.1 mm，网格公差为 0.01 mm，最大边长为 10 mm，以提高模拟结果的精确程度。零件材料选用密度低、比强度高的 6XXX 铝合金，板料厚度为 1.5 mm，以满足零件轻量化设计要求。

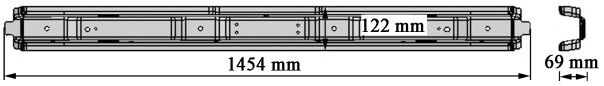


图 1　座椅横梁模型

Fig. 1　Seat beam model

按照加热—拉延—冷却—修边冲孔的顺序设置工艺流程，并根据工艺要求进行工具体设计。工具体包括压板、上模和下模 3 个主要部分，采用定位销对料片进行固定，设计刀块进行零件的修边和冲孔，以模拟零件的热成形全工序[10-12]，如图 2 所示。

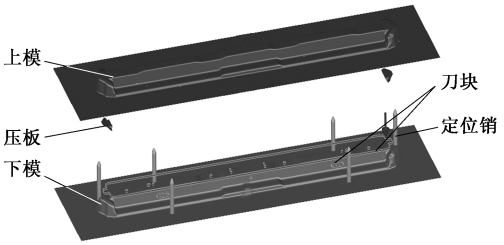


图 2　零件工具体示意图

Fig. 2　Schematic diagram of tool body for part

明确热成形步骤后，进行热成形工艺参数设置。铝合金的固溶温度不宜过高或过低，温度过高，容易造成过烧，影响零件品质；温度过低，固溶效果不理想，降低零件强度，故以铝合金固相线等材料参数及生产经验为依据，将加热温度设置为 520 ℃[13-15]。并设置冲压速度为 200 mm · s^{-1}，料片转移时间为 6 s，冲压前的滑块运动时间为 3 s，板料的摩擦因数为 0.2。

2　成形性分析及工艺优化

2.1　尺寸精度及缺陷分析

求解结束后，为保证零件的成形精度，观察拉延过程中板料与模具的最终贴合情况，发现二者的贴合情况良好，最大间隙小于 0.3 mm，能够保证零件的尺寸精度，如图 3 所示。

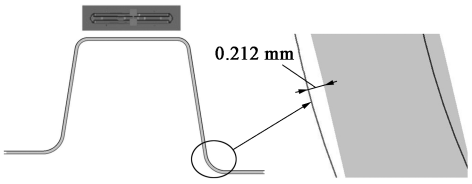


图 3　板料-模具贴合情况

Fig. 3　Fitting condition between sheet and mold

铝合金材料在高温下抵抗破裂的能力较低，容易出现开裂问题，零件开裂会大幅降低零件强度，严重降低产品寿命，出现该问题的零件会进行报废处理；冲压时板料流动过快、拉延时凸凹模间隙过大等情况还会引起起皱现象，降低生产效率，提高

成本。为确保零件热成形方案的可行性，满足实际生产对零件质量的要求，进行回弹分析前需进行缺陷分析，避免零件起皱或开裂，确保成形工艺的合理性[16-17]。初次求解获得的成形极限图（Forming Limit Diagram，FLD）如图 4a 所示，发现零件存在过度减薄区，对零件进一步观察可知，零件的端部和中段均出现明显起皱现象，如图 4b 所示，过度减薄区与起皱位置存在交集，判断为起皱引起的板料异常。

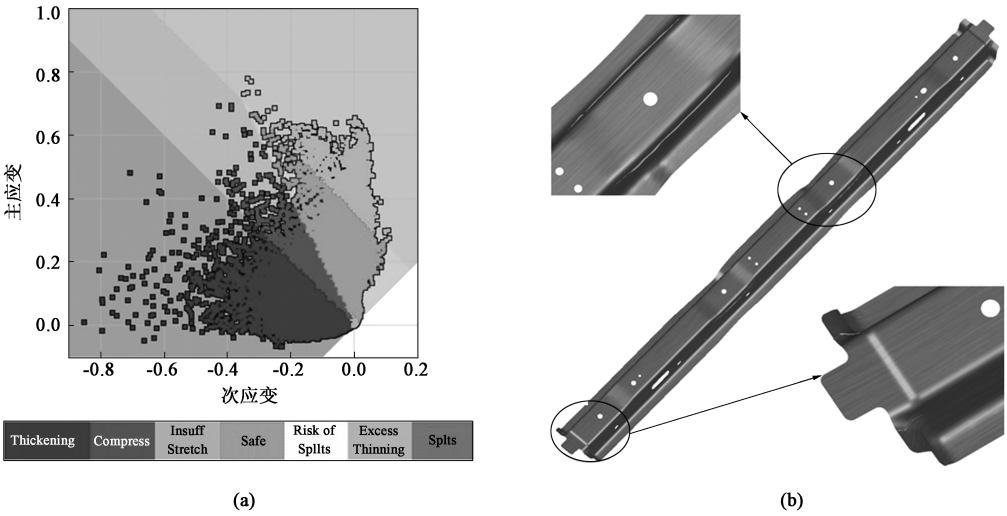


图 4 初始方案零件起皱情况

（a）成形极限图 （b）零件起皱区域

Fig. 4 Wrinkle condition of part in initial scheme

（a）Forming limit diagram （b）Wrinkle area of part

根据初次模拟结果进行热成形工艺优化，以消除零件缺陷。优化热成形工艺参数，多次调试后将拉延时的冲压速度减小至 130 mm · s^{-1}，压板与上模的间距调整为 50 mm，压板压料间隙调整为 0.2 mm，此外对软件生成的料片进行形状优化，消除边界处的轮廓突变，使得边界曲线光顺。优化后的成形极限图如图 5 所示，过度减薄区完全消除，但增厚区仍然存在，因此需对零件的减薄和起皱情况进行定量分析。

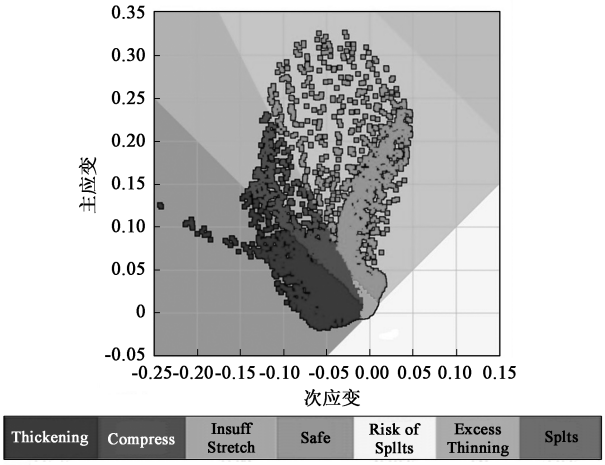


图 5 优化后成形极限图

Fig. 5 Forming limit diagram after optimization

零件的减薄率分布云图如图 6a 所示，最大减薄率为 20.5%，位于立直面与法兰边的过渡圆角处，板料未出现开裂现象。零件的起皱分布云图如图 6b 所示，最大起皱为 14%，位于零件上表面与立直面的过渡圆角位置，数值较低，无起皱风险。

2.2 回弹分析

铝合金在室温下的成形性低，回弹问题严重，故通过铝合金固溶成形工艺，解决铝合金冷冲压时成形性低及回弹量大的问题[18-19]。使用模拟软件进行回弹分析，通过回弹补偿控制回弹量，提高零件的设计效率，节约人力物力，降低成本[20]。

通过 Autoform 中的设备测量模块（Measuring Equipment）对零件各工序完成后的自由回弹情况进行测量，以判断成形各阶段的零件回弹情况，通过零件的法向回弹量对零件的回弹程度进行评价[21]。零件的法向回弹量分布云图如图 7 所示，由图 7 可知，相对于参考零件，成形零件的两端向下弯曲，中段向上拱起，总体回弹明显，多数区域的回弹量超过 0.500 mm。

2.3 回弹补偿优化

模具模面补偿是控制减小回弹的主要方法之一，采用软件进行模面补偿的操作便捷，补偿效率高，

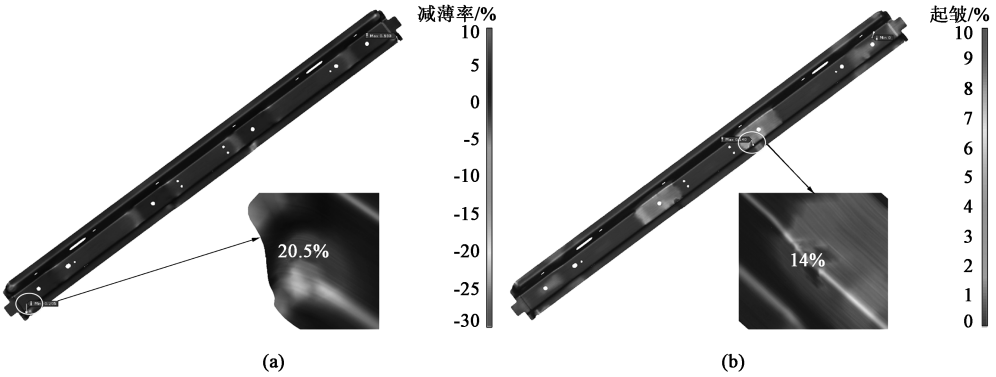


图 6　零件减薄率（a）和起皱（b）分布云图

Fig. 6　Distribution cloud maps of thinning rate（a）and wrinkle（b）for part

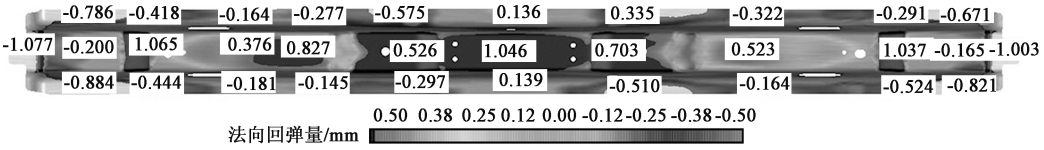


图 7　零件法向回弹量分布云图

Fig. 7　Distribution cloud map of normal springback amount for part

节约成本[22]。在 Autoform 中可对回弹分析文件进行克隆操作，即对分析文件进行克隆，并在模面设计阶段添加 1 个补偿模块，用于回弹补偿，补偿后可进行补偿迭代，通过增大补偿次数逐渐减小零件总体的回弹值。运用直接补偿法对零件进行全局补偿，补偿因子设置为 1.0，即对模面节点施加 1 倍的回弹反向位移，设置光顺度为 0.5，在保证一定补偿精度的同时避免模面出现不光顺的问题。生成模面后，需重新进行工具体设置，避免由于工具体曲面缺失而产生的成形问题。若一次补偿无法达到理想效果，则需进行多次补偿迭代，通过调节补偿因子和光顺度参数来调控模面形状，进而控制回弹量，补偿因子调节范围为 1.0~1.2，光顺度调节范围为 0.5~1.0。对成形工艺进行优化也是降低零件回弹的有效方式，在进行补偿的过程中，若出现补偿效果无法达到预期的情况，应考虑对工艺的方法、参数等进行优化，结合模面补偿法，达到更优的补偿效果[23-25]。

初次补偿后，零件的整体回弹仍超出公差允许范围，故按照相同方法进行回弹补偿迭代，每次迭代后对零件的回弹情况进行观察分析。迭代 3 次后的零件的法向回弹量分布云图如图 8 所示，由图 8 可知，经过 3 次迭代补偿后，零件的整体回弹量已控制在 ±0.5 mm 范围内，符合零件公差要求，优化效果显著。

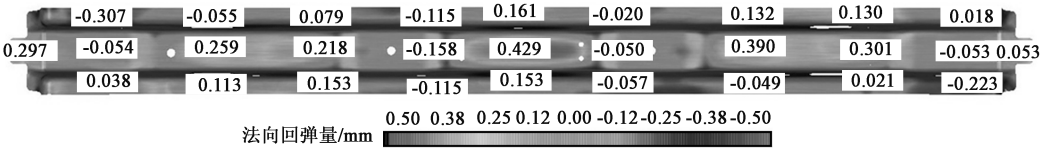


图 8　3 次迭代补偿后零件法向回弹量分布云图

Fig. 8　Distribution cloud map of normal springback amount for part after compensation of three iterations

对零件容易出现大回弹的截面进行观察，观察位置包括零件中段纵向截面、零件端部纵向截面、立直面-法兰边过渡圆角横向截面、上表面-立直面过渡圆角横向截面等，在软件中提取零件的上述截面后，于截面位置均匀选点，并对各点的法向回弹量进行统计，如图 9~图 12 所示。分析可知，零件截面处的法向回弹量均在±0.5 mm 范围内，未出现大回弹量，回弹数值分布与零件结构存在一定的相关性，进一步证明了回弹补偿的有效性。

进行第 4 次回弹补偿迭代后，零件整体的回弹量相较第 3 次补偿有所增加，继续补偿数次后无法达到更优的补偿效果，故以第 3 次回弹补偿结果作

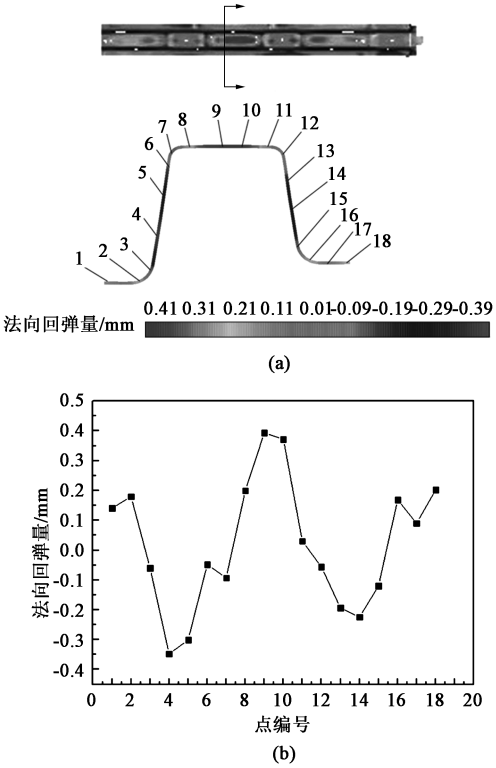


图 9 零件中段纵向截面示意图（a）和法向回弹量统计结果（b）

Fig. 9 Schematic diagram of longitudinal section (a) and statistic result of normal springback amount (b) for middle section of part

为最终优化结果。

3 零件试制及检测

3.1 模具研发

为了验证优化后的热成形工艺方案以及回弹补偿的实际效果，进行热成形模具研发，用于汽车铝合金座椅横梁的试制。将回弹补偿后的模面从 Autoform 中导出，作为模具设计的重要参考依据，模具的结构及尺寸需结合生产实际，确保其结构和性能符合零件成形要求。通过三维软件设计的热成形模具如图 13a 所示，包括模座、配流板、模芯镶块、导向机构等组成部分，能够实现铝合金座椅横梁的冲压淬火一体化成形。依据模型进行模具实物加工，并进行模具动静态检查，确保模具的外观、安全及通用项、导向机构、工作型面、弹性元件、拉延机构、工件的投入及取出符合验收要求，模具实物如图 13b 所示。

3.2 零件试制及偏差检测

根据热成形模拟获得的成形工艺参数，结合实际生产条件，进行铝合金座椅横梁的零件试制，获得的零件如图 14 所示，零件的成形情况良好，表面

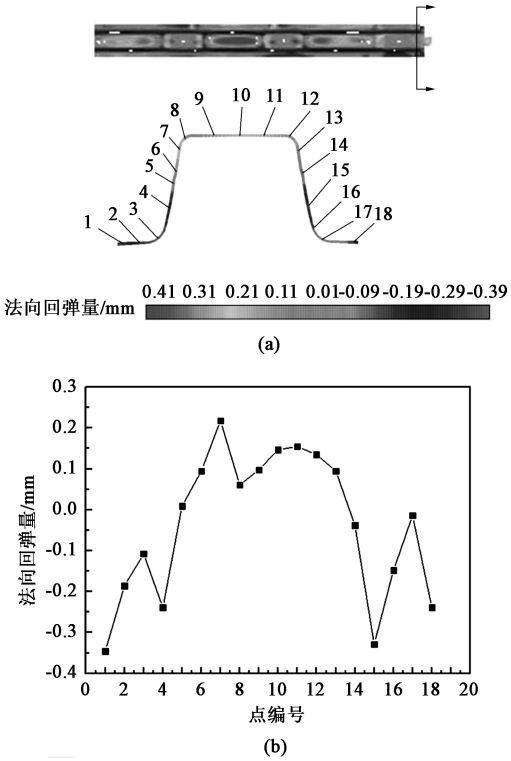


图 10 零件端部纵向截面示意图（a）和法向回弹量统计结果（b）

Fig. 10 Schematic diagram of longitudinal section (a) and statistic result of normal springback amount (b) for part end

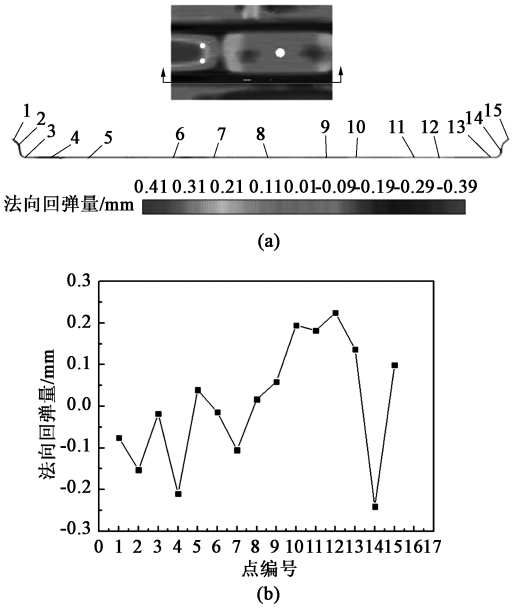
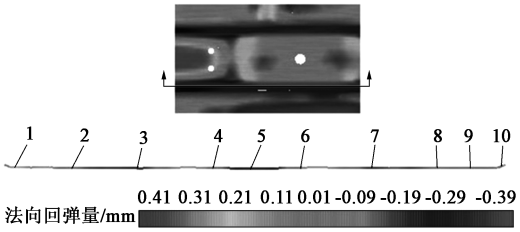


图 11 立直面-法兰边过渡圆角横向截面示意图（a）和法向回弹量统计结果（b）

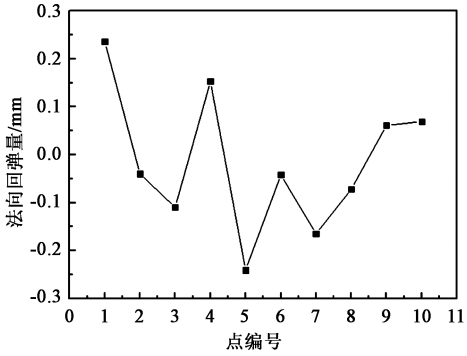
Fig. 11 Schematic diagram of transverse section (a) and statistic result of normal springback amount (b) for vertical surface-flange edge transition fillet

无起皱、开裂等缺陷，未出现明显回弹现象。

使用三坐标测量仪对试制零件进行形位公差检



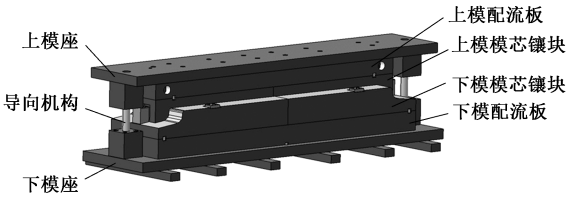
(a)



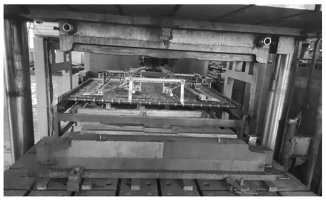
(b)

图 12　上表面-立直面过渡圆角横向截面示意图（a）和法向回弹量统计结果（b）

Fig. 12　Schematic diagram of transverse section (a) and statistic result of normal springback amount (b) for upper surface-vertical surface transition fillet



(a)



(b)

图 13　模具设计及加工

（a）模具三维装配模型　（b）模具加工实物

Fig. 13　Design and processing of die

(a) 3D assembly model of die　(b) Processing object of die

测，测得 X、Y、Z 这 3 个坐标方向的坐标值，以及相对于零件模型的坐标偏差值，从而计算零件各点的偏差是否在公差范围之内。检测位置包括上表面孔中心、上表面、立直面等处，根据检测数据计算各检测点的总偏差 D，计算公式如式（1）所示：

$$D = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \tag{1}$$

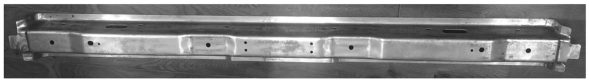


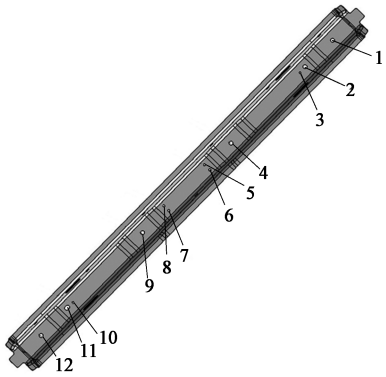
图 14　座椅横梁加工实物

Fig. 14　Processed object of seat beam

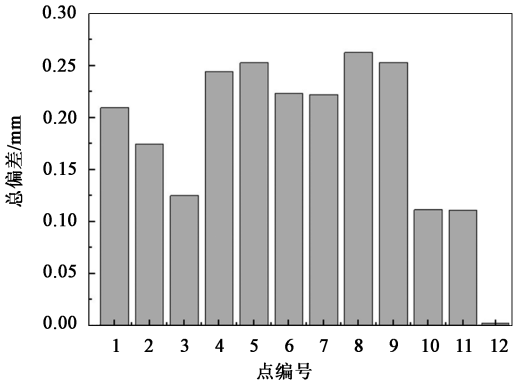
式中：x 为检测点于 X 坐标方向（平行于零件长度方向）的偏差值；y 为检测点于 Y 坐标方向（垂直于零件长度方向）的偏差值；z 为检测点于 Z 坐标方向（零件上表面的法线方向）的偏差值。

总偏差值的计算结果如图 15~图 17 所示，分析可知，零件上表面孔中心的最大总偏差为 0.26 mm，上表面接近圆角处检测点的最大总偏差为 0.52 mm，立直面接近圆角处检测点的最大总偏差为 0.42 mm，统计结果表明，零件各检测点的总偏差数值低，满足主机厂验收的质量要求。

试制结果表明，试制的座椅横梁无起皱、开裂缺陷，回弹量小，与目标零件模型的坐标偏差小，符合主机厂验收要求，证明了运用 Autoform 进行热成形工艺设计及回弹补偿的合理性和有效性。



(a)



(b)

图 15　试制零件上表面孔中心总偏差

（a）检测点位置　（b）总偏差统计结果

Fig. 15　Total deviation of upper surface hole center for trial production parts

(a) Measuring point positions　(b) Statistic result of total deviation

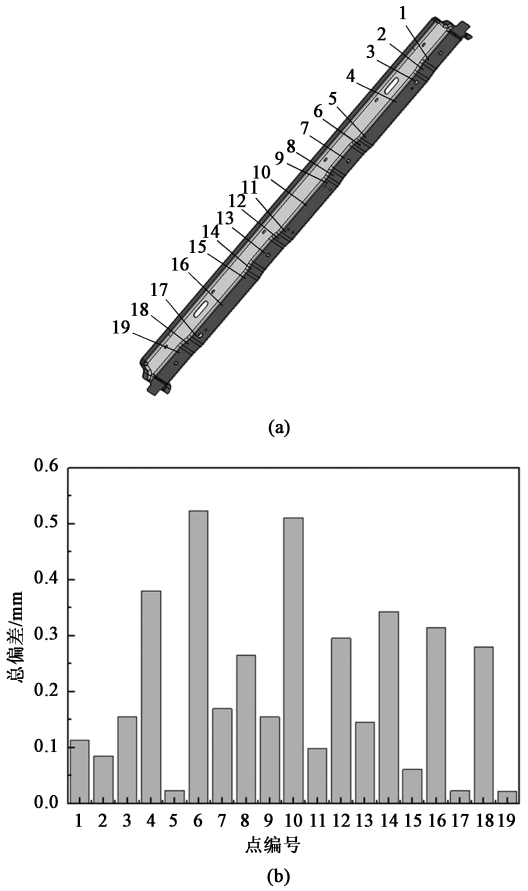


图 16 试制零件上表面总偏差

（a）检测点位置 （b）总偏差统计结果

Fig. 16 Total deviation of upper surface for trial production parts

（a）Measuring point positions （b）Statistic result of total deviation

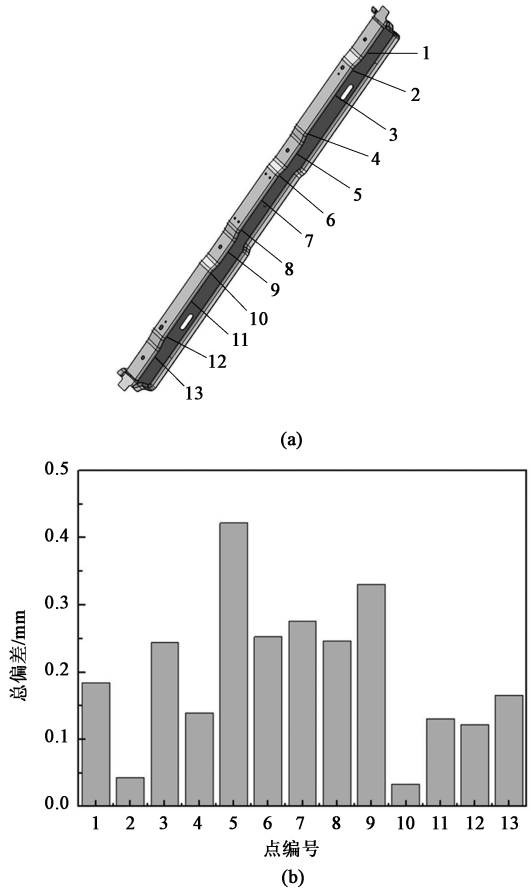


图 17 试制零件立直面总偏差

（a）检测点位置 （b）总偏差统计结果

Fig. 17 Total deviation of vertical surface for trial production parts

（a）Measuring point positions （b）Statistic result of total deviation

4 结论

（1）通过铝合金座椅横梁的热成形模拟，进行热成形工艺的设计优化，能够保证零件的尺寸精度，消除零件的成形缺陷，降低设计成本，加快零件生产周期。

（2）通过成形模拟软件中的直接补偿迭代法，能够有效降低零件的回弹量，经过 3 次补偿迭代后，座椅横梁的整体回弹量控制在±0.5 mm 范围内，回弹补偿的效率较高，回弹补偿后的模面能够为模具的设计提供参考。

（3）依据模拟优化结果开发热冲压模具，进行零件试制，获得的零件无起皱、开裂等缺陷，未出现明显的回弹现象，经过偏差检测后满足主机厂验收质量要求，证明了热成形模拟及回弹补偿的合理性和有效性，能够为汽车高强铝合金零件的批量化生产提供设计参考。

参考文献：

[1] 杨甄鑫，廖抒华. 轻质合金在汽车轻量化中的应用［J］. 汽车零部件，2021，（1）：107-113.
Yang Z X, Liao S H. Application of light alloy in automotive lightweight［J］. Automobile Parts, 2021, (1): 107-113.

[2] 李光霁，刘新玲. 汽车轻量化技术的研究现状综述［J］. 材料科学与工艺，2020，28（5）：47-61.
Li G J, Liu X L. Literature review on research and development of automotive lightweight technology［J］. Materials Science and Technology, 2020, 28 (5): 47-61.

[3] 肖代红，陈康华，罗伟红. 固溶热处理对 AA7085 铝合金组织与性能的影响［J］. 稀有金属材料与工程，2010，39（3）：494-497.
Xiao D H, Chen K H, Luo W H. Effect of solution heat treatment on microstructure and properties of AA7085 aluminum alloys［J］. Rare Metal Materials and Engineering, 2010, 39 (3): 494-497.

[4] 闫华军，王波，张双杰，等. 铝合金地板梁拉延成形回弹分析及补偿［J］. 塑性工程学报，2020，27（2）：21-28.
Yan H J, Wang B, Zhang S J, et al. Springback analysis and compensation of drawing of aluminum alloy floor beam［J］. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27 (2): 21-28.

[5] 郭小农，保文通，曾强，等. 铝合金弧面节点板冲压成形回弹特性研究［J］. 同济大学学报：自然科学版，2020，48（10）：1433-1441.

Guo X N, Bao W T, Zeng Q, et al. Springback characteristics of arched aluminum alloy gusset plate in stamping forming [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2020, 48 (10): 1433-1441.

[6] 陈佳，闫晓东，沈健，等. 热处理工艺对 6A02 合金管材组织性能的影响 [J]. 稀有金属，2016，40 (3)：193-200.
Chen J, Yan X D, Shen J, et al. Microstructure and properties of 6A02 aluminum alloy extruded tube with heat treatment [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2016, 40 (3): 193-200.

[7] 叶雨寒，袁艺宁，刘庆涛，等. 汽车车身铝合金连接构件的拉伸试验分析 [J]. 锻压技术，2020，45 (4)：189-194.
Ye Y H, Yuan Y N, Liu Q T, et al. Tensile test analysis of aluminum alloy connection part in automobile body [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (4): 189-194.

[8] 李祥亮，陈江华，刘春辉，等. T6 和 T78 时效工艺对 Al-Mg-Si-Cu 合金显微结构和性能的影响 [J]. 金属学报，2013，49 (2)：243-250.
Li X L, Chen J H, Liu C H, et al. Effects of T6 and T78 tempers on the microstructures and properties of Al-Mg-Si-Cu alloys [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2013, 49 (2): 243-250.

[9] 陈镇扬，彭文飞，牛波凯，等. 超大型环形件用 2219 铝合金的热变形本构方程及热加工图 [J]. 塑性工程学报，2020，27 (4)：83-92.
Chen Z Y, Peng W F, Niu B K, et al. Hot deformation constitutive equation and hot processing map of 2219 aluminum alloy for super large rings [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27 (4): 83-92.

[10] El Fakir O, Wang L L, Balint D, et al. Numerical study of the solution heat treatment, forming, and in-die quenching (HFQ) process on AA5754 [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2014, 87: 39-48.

[11] Liu Y, Zhu B, Wang Y L, et al. Fast solution heat treatment of high strength aluminum alloy sheets in radiant heating furnace during hot stamping [J]. International Journal of Lightweight Materials and Manufacture, 2019, 3: 20-25.

[12] Geng H C, Wang Y L, Wang Z J, et al. Investigation on contact heating of aluminum alloy sheets in hot stamping process [J]. Metals, 2019, 9 (12): 1-14.

[13] 王祝堂. 论铝合金的挤压机固溶热处理及 6063-T6 材料的优化生产工艺参数 [J]. 轻合金加工技术，2001，29 (3)：6-11, 26.
Wang Z T. Solution treatment for aluminum alloys on the extrusion press [J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2001, 29 (3): 6-11, 26.

[14] 李慎兰，黄志其，蒋福利，等. 固溶温度对 6061 铝合金组织和性能的影响 [J]. 材料热处理学报，2013，34 (5)：131-136.
Li S L, Huang Z Q, Jiang F L, et al. Effect of solution temperature on microstructure and property of a 6061 aluminum alloy [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2013, 34 (5): 131-136.

[15] 刘勇，耿会程，朱彬，等. 高强铝合金高效热冲压工艺研究进展 [J]. 锻压技术，2020，45 (7)：1-12.
Liu Y, Geng H C, Zhu B, et al. Research progress on high efficiency hot stamping process for high strength aluminum alloy [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (7): 1-12.

[16] 王义林，刘勇，耿会程，等. 高强铝合金热冲压成形技术研究进展 [J]. 航空制造技术，2019，62 (16)：19-32.
Wang Y L, Liu Y, Geng H C, et al. Research progress of hot stamping technology for high strength aluminum alloy sheet [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62 (16): 19-32.

[17] 陈礼健，刘裕中，邓国朝，等. 基于 Autoform 的汽车后门外板冲压回弹补偿分析 [J]. 模具工业，2019，45 (6)：14-18.
Chen L J, Liu Y Z, Deng G C, et al. Springback compensation analysis of rear door outer panel based on Autoform [J]. Die & Mould Industry, 2019, 45 (6): 14-18.

[18] 马闻宇，王宝雨，周靖. 铝合金热冲压过程数值模拟分析 [J]. 航空制造技术，2016，(4)：95-98.
Ma W Y, Wang B Y, Zhou J. Analysis of hot stamping of aluminum alloy based on numerical simulation [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, (4): 95-98.

[19] 刘萌，单忠德，李新亚，等. 6016 铝合金汽车典型结构件固溶成形工艺研究 [J]. 中国机械工程，2020，31 (22)：2648-2654.
Liu M, Shan Z D, Li X Y, et al. Research on solid solution forming process of typical automotive structural part with 6016 aluminum alloy [J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31 (22): 2648-2654.

[20] 张建. 铝合金板材冲压成形的模具回弹补偿 [J]. 模具技术，2016，(6)：50-54.
Zhang J. Springback compensation of aluminum alloy sheet stamping [J]. Die and Mould Technology, 2016, (6): 50-54.

[21] 李英，焦洪宇，杨兰玉. 汽车横梁全工序冲压成形仿真分析 [J]. 机械设计与制造，2015，(9)：251-253.
Li Y, Jiao H Y, Yang L Y. Simulated analysis of complete stamping process for automobile cross member [J]. Machinery Design & Manufacture, 2015, (9): 251-253.

[22] 翟洪健，毕云军，刘俊杰，等. 基于 AutoForm 回弹补偿研究 [J]. 模具制造，2020，20 (3)：16-18.
Zhai H J, Bi Y J, Liu J J, et al. Research of springback compensation based on AutoForm [J]. Die & Mould Manufacture, 2020, 20 (3): 16-18.

[23] 段磊，夏磊，李庆宝，等. 汽车前梁后部零件全工序成形回弹仿真及模面补偿研究 [J]. 锻压技术，2020，45 (8)：62-69.
Duan L, Xia L, Li Q B, et al. Research on whole process forming springback simulation and die surface compensation for rear part of automobile front member [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (8): 62-69.

[24] Andersson A. Numerical and experimental evaluation of springback in a front side member [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 169 (3): 352-356.

[25] Neugebauer R, Schieck F, Rautenstrauch A, et al. Hot sheet metal forming: The formulation of graded component characteristics based on strategic temperature management for tool-based and incremental forming operations [J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2011, 4 (2): 180-188.