



热冲压工艺对 6061 铝合金 U 型件 成形质量的影响

李文科¹, 湛利华^{1,2}, 赵俊¹

(1. 中南大学 机电工程学院, 长沙 410083;

2. 中南大学 高性能复杂制造国家重点实验室, 长沙 410083)

摘 要: 利用有限元分析软件 MSC.Marc, 研究板料初始温度、压边力、保压时间等工艺参数对制件厚度、回弹的影响规律, 并通过 6061 铝合金板材热冲压实验验证仿真分析的可靠性。结果表明: 板料热冲压初始温度在 465~565 °C 范围内变化时对该制件厚度分布和回弹量的影响不大; 压边力对制件成形质量影响明显, 本工况下选用 3 kN 较为合适; 兼顾制件保压结束时刻的温度以及最终的回弹量, 保压时间选择 5 s 左右比较合适。进一步开展成形制件热处理后的力学性能测试分析, 并与常规固溶淬火-时效热处理后的 6061-T6 铝合金进行比较, 发现热冲压制件的力学性能并未弱化, 且同一热冲压制件不同位置硬度差异在 10% 以内。

关键词: 6061 铝合金; 热冲压; 回弹; 有限元模拟

中图分类号: TG386

文献标志码: A

全球汽车产业正向着更加安全环保的方向发展, 因此, 在保证安全的情况下减轻车身质量成为各大汽车制造商实现节能减排的主要措施。铝合金因其密度小, 比强度高, 耐锈蚀等优点, 成为汽车轻量化技术中替代钢板的首选。但铝合金室温成形性差、回弹较大, 采用传统的钢板成形方法难以实现形状复杂车身覆盖件的精确成形。随着变形温度的升高, 其塑性变形能力有很大的提高, 变形抗力也下降^[1-3], 因此, 考虑采用热冲压成形工艺来实现铝合金的成形。铝合金热冲压成形技术具有成形性好、零件成形精度高、生产效率高等优点^[4]。

目前, 公开的铝合金热冲压技术文献资料相当有限。现有关于铝合金热冲压技术的研究主要采用以下两种工艺路线: 一种是将试样直接加热到由实验得出的最佳温度进行冲压^[5]; 另一种是采用 HFQ 工艺路线^[6]。已有研究表明: 当温度高于 350 °C, 采用第一种热冲压工艺路线会导致 AA5754、AA5182 性能的显著弱化^[5]。傅垒等^[7-9]采用 HFQ 工艺路线对 AA6111 铝合金热冲压工艺成形性进行了研究, 但对其成性方面的研究还鲜有报道。

6061 铝合金 Al-Mg-Si 系合金, 可通过热处理提高其强度。因其拥有较高的比强度、较好的塑性、

良好的抗腐蚀性、可焊接性, 在汽车、铁路客车、航空航天等领域扮演着越来越重要的角色^[10-11]。本文作者选用 6061 铝合金作为研究对象, 构思将经过固溶保温后的铝板快速转移到模具上热冲压成形, 保压阶段利用模具内置的冷却水系统对成形后的构件快速淬火冷却, 最后对其进行人工时效热处理强化, 即固溶-热冲压成形-淬火保压-时效热处理成性工艺路线, 已期实现汽车车身覆盖件等复杂曲面难变形构件高性能、高精度形性协同制造, 解决汽车轻量化对高性能铝合金复杂钣金件的迫切需求。

1 仿真模型的建立

目前, 热冲压成形的典型车身零件主要包括: 车门防撞梁、前后保险杠、B 柱等。可以发现: 此类零件以 U 型弯曲特征为主, 并带有一些复杂的局部成形位置, 如局部胀形。因此, 本研究中以带凸包的 U 型件为对象, 建立有限元模型进行 6061 铝合金热冲压成形仿真分析, 具体几何模型如图 1(a)所示。

分析构件的几何特征, 构件宽度远大于厚度, 适合采用壳单元, 采用 75 号 3D-Shell 单元对构件进行

网格划分。由于该构件属于完全对称图形，为了减少计算量，截取 1/4 几何模型建模进行网格划分。具体的有限元模型如图 1(b)所示。

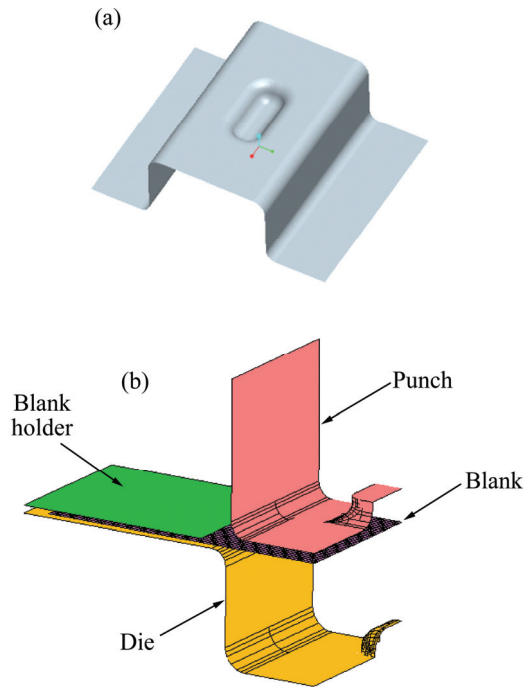


图 1 U 型件有限元模型
Fig. 1 U-shaped parts finite element model: (a) Geometric model; (b) Hot stamping finite element model

由于铝合金在高温下组织比较均匀，因此，可以采用弹塑性各向同性模型，其泊松比为 0.33，弹性模量、比热容、导热率随温度的变化如表 1 所列^[12]。

表 1 6061 铝合金的热物性参数
Table 1 Thermal physical parameters of 6061 aluminum alloy

Temperature/ ℃	Elastic modulus/ GPa	Heat transmission coefficient/ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	Specific heat capacity/ (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)
25.0	68.9	167	896
37.8	68.54	170	920
93.3	66.19	177	978
148.9	63.09	184	1004
204.4	59.16	192	1028
260.0	53.99	201	1052
315.6	47.48	207	1078
371.1	40.34	217	1104
426.7	31.72	223	1133

在热冲压过程中，压强和间隙会影响模具与板料间的热传递系数，为了简化计算，仅考虑间隙对于热传递系数的影响。具体设置如下：在冲压成形阶段，距离小于或者等于 1.5 mm 时，模具与板材之间的传热系数取值为 0.7 kW/(m²·℃)，超过 1.5 mm 时，则认为模具与板材之间无热传递；在保压阶段，模具与板材之间的传热系数取值为 1.4 kW/(m²·℃)。

在热冲压过程中，必须考虑温度变化所引起的影响，故开展了不同温度 and 不同应变速率下的热拉伸实验。6061 铝合金在不同温度 and 不同应变速率下的应力-应变曲线如图 2 所示。

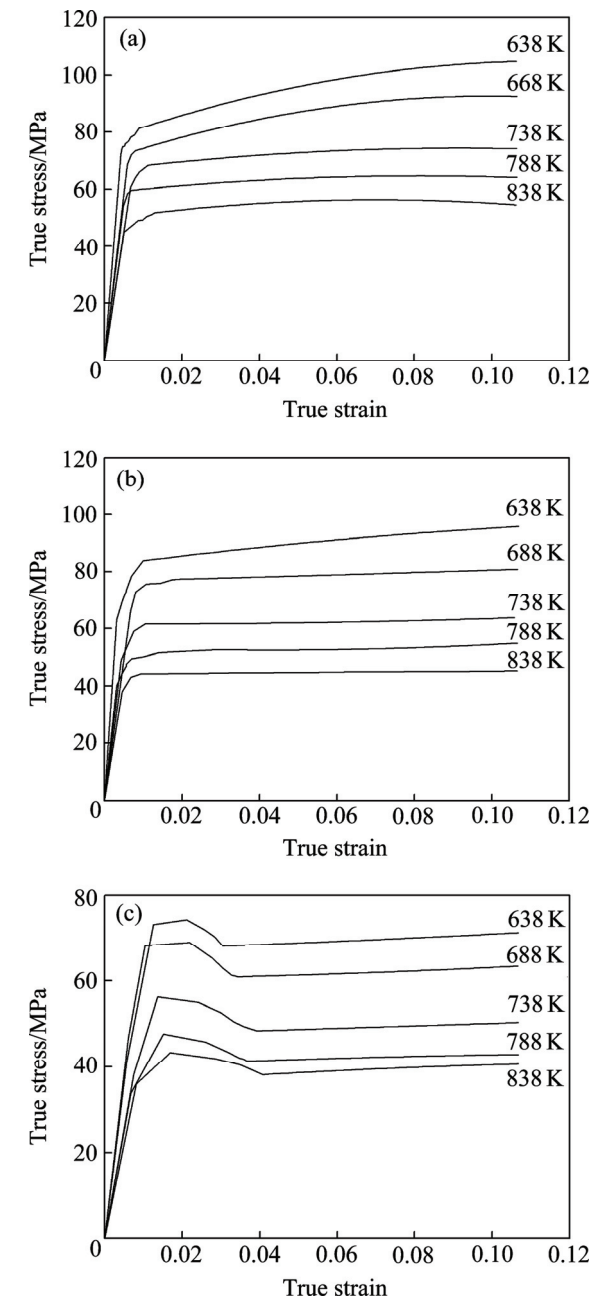


图 2 不同应变速率下的 6061 铝合金应力-应变曲线
Fig. 2 Stress-strain curves of 6061 aluminum alloy under different strain rates: (a) 1 s⁻¹; (b) 0.1 s⁻¹; (c) 0.01 s⁻¹

计算中采用 Arrhenius 关系式来描述铝合金不同温度、不同应变速率下应力与应变的关系。采用前期研究建立的 6061 铝合金本构模型^[13]:

$$\dot{\varepsilon} = 3.8 \times 10^{10} [\sinh(0.0166\sigma)]^{9.08} \exp\left(-\frac{188.44 \times 10^3}{RT}\right) \quad (1)$$

2 模拟结果与分析

基于上述有限元模型,以成形初始温度 565 °C、模具初始温度 25 °C、压边力 2 kN、冲压速度 40 mm/s、模具间隙为 1.5 mm 和保压时间 5 s 为例,进行仿真分析。

厚度变化量是衡量冲压件质量的重要指标之一,减薄不超过 30%或增厚不超过 10%都认为是合格的^[14]。热冲压模拟得到的 U 形件厚度分布如图 3 所示。从图 3 可以看出:该工况下,制件的最小厚度值为 1.063 mm,计算得到最大减薄率为 29.1%,即未发生破裂失效。

由于制件为完全对称件,按图 3(a)所示路径提取截面的厚度数据,得到截面的厚度分布规律曲线如图 3(b)所示。

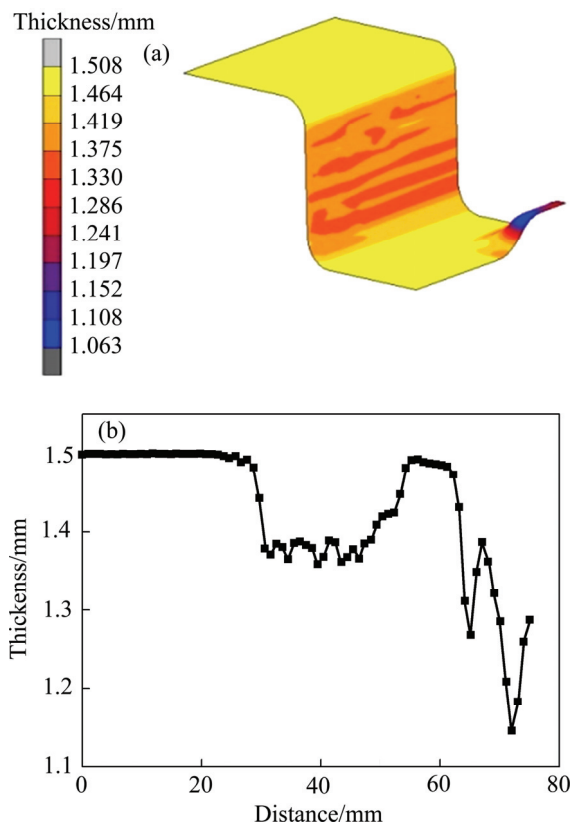


图3 板料的厚度分布

Fig. 3 Thickness of sheet metal distribution: (a) Selection of paths; (b) Thickness distribution along specified section

由展开距离可知:0~20 mm 为压边区,20~55 mm 为上下圆角和直壁区,62~75 mm 为凸包区。其减薄最严重的区域出现在凸包区域。在凹模凸台未与板材接触前,板材的变形方式为弯曲变形。除了侧壁和圆角部位有所减薄,其他部位减薄不明显。随着冲压的进行,板材开始接触凹模上的凸台,此时该部位板材处于双向拉伸状态,且该部位板材的温度较高,材料的流动性更好。但是压边区的板材此时很难提供补给,此处减薄最严重,所以凸包位置的成形是制件是否失效的关键。

对于成形零件来说,当零件的回弹量超过一定范围就会成为成形缺陷^[15],可见对零件的尺寸精度控制是很有必要的,因此需对制件的回弹情况进行分析。采用有限元模拟计算板料的回弹的方式主要包括无模法和有模法。采用有模法进行回弹分析,构件回弹后其形状如图 4(a)所示,回弹角度($\Delta\theta_i$)计算公式为

$$\Delta\theta_i = \theta_i - 90^\circ \quad (i = 1, 2) \quad (2)$$

热冲压仿真结束后,点击 REZONE MESH 之后保存成一个新的模型,而后利用 ATOS Professional 软件对模型进行回弹角度的测量,如图 4(b)所示。

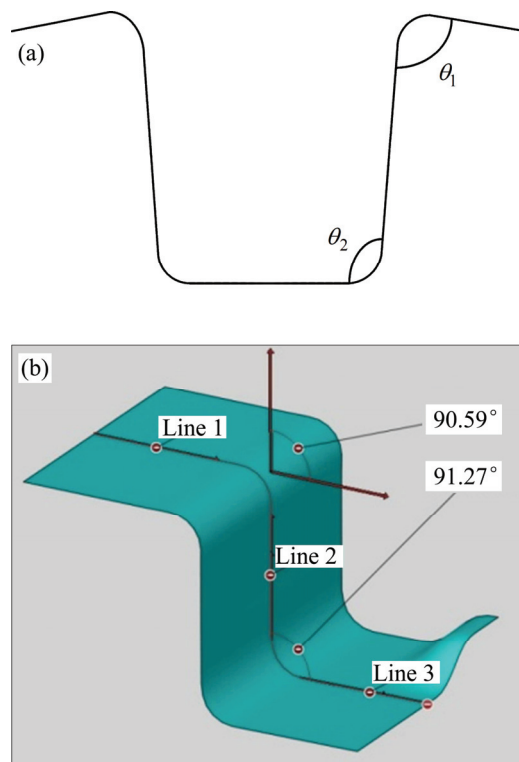


图4 U型件回弹角度的测量

Fig. 4 Measurement of U-shaped parts springback angle: (a) Shape of parts after springback; (b) Springback angle measurement

从图4可以看出:移除模具后,板材法兰和侧壁位置均产生了回弹,且侧壁的回弹角大于法兰部位的回弹角。总体来讲:无论是侧壁还是法兰部位回弹角度都比较小,这也说明热冲压工艺对于控制工件回弹,从而保证成形精度方面有很大的优势。

2.1 初始成形温度对于制件成形质量的影响

初始成形温度是指板材刚与模具冲头接触时刻的温度。模具初始温度 25 °C、压边力 2 kN、冲压速度 40 mm/s、模具间隙 1.5 mm、保压时间 5 s 这 5 个工艺参数保持不变,设定成形初始温度分别为 565、515、465 °C。制件截面厚度分布和回弹角度随初始成形温度变化分别如图 5(a)和(b)所示。

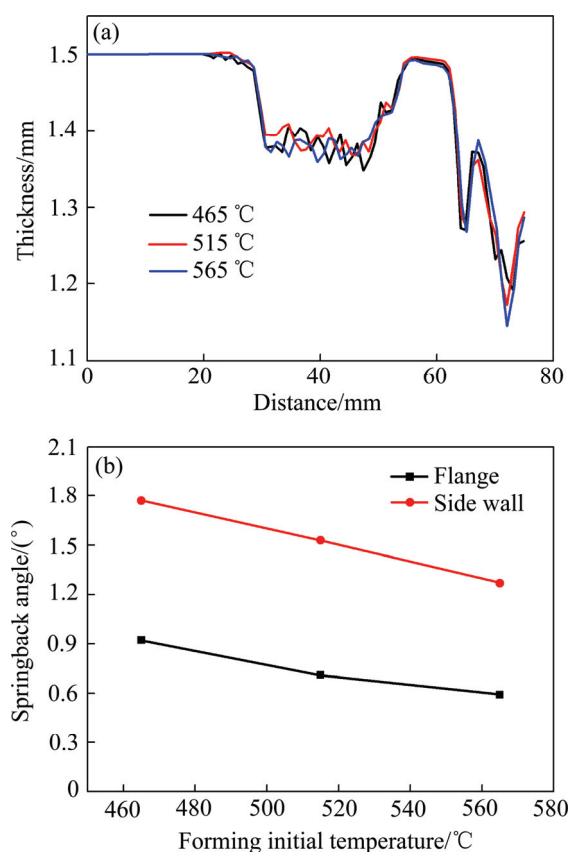


图5 初始成形温度对成形质量的影响

Fig. 5 Effect of different initial forming temperature on forming quality: (a) Thickness of section; (b) Springback angle

由图5可知,各温度下板料的最大减薄率分别为27.3%、27.9%、29.1%,均未超过减薄极限,且温度为465 °C和565 °C时,最大减薄率相差1.8%,且在不同板料初始成形温度下,其截面厚度分布规律也基本相同。这说明成形初始温度在465~565 °C范围内变化时对于该制件厚度的影响不大。从图5可以发现:随

着板料初始成形温度的提高,回弹角度越来越小。这是因为板料初始成形温度越高,成形结束后板料的最低温度值越高。在整个变形过程中,金属的塑性流动更加容易,这使得板料塑性变形部分的比重增加,而弹性变形的比重减小,从而导致零件卸载后的回弹降低。考虑到实际过程中板材从电阻炉中转移到模具上存在温度损失,因此,在本工况下成形初始温度为515 °C左右比较合适。

2.2 压边力对于制件成形质量的影响

压边力在热冲压成形中起着十分关键的作用,压边力存在的目的是为了改善材料流动阻力。压边力过大,材料被压得太死,材料的流动变得困难,容易产生拉裂现象;压边力太小,对板材流动的抑制作用可能不充分,易产生起皱现象^[16-18]。成形初始温度 565 °C、模具初始温度 25 °C、冲压速度 40 mm/s、模具间隙 1.5 mm、保压时间 5 s 这 5 个工艺参数保持不变,设定板材的压边力 2、4、6 和 8 kN。制件截面厚度分布和回弹角度随压边力变化分别如图 6(a)和(b)所示。

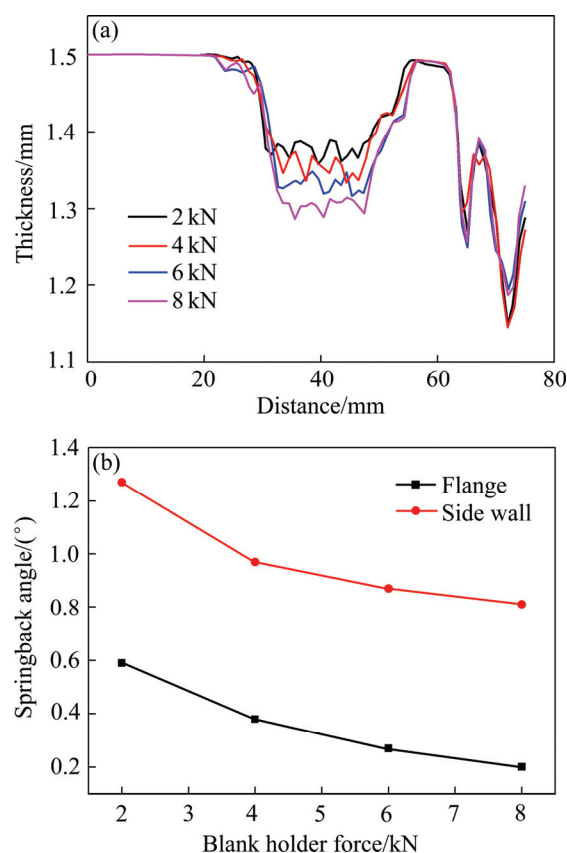


图6 压边力对成形质量的影响

Fig. 6 Effect of blank holder force (BHF) on forming quality: (a) Thickness of section; (b) Springback angle

从图 6(a)可以看出:随着压边力的增大,板料的最小厚度不断减小,压边力为 6 kN 和 8 kN 时,最大减薄率超过 30%,即凸台位置出现拉裂现象。这说明压边力对于制件侧壁的厚度影响较为明显。压边力增大,侧壁厚度显著下降。这是因为压边力的增大导致压边区的板材流动困难,因此侧壁厚度不断下降。从图 6(b)看出:在本研究的压边力范围内,随着压边力的增大,板料的回弹角不断减小。增大压边力使得板材塑性变形所占比例增加,弹性变形所占比例随之下降,所以回弹量减小。

综上所述,压边力对于铝合金成形质量影响明显。结合成形件的最小厚度以及回弹量这两个指标,在本工况下,压边力选择 3 kN 左右比较合适。

2.3 保压时间对于制件成形质量的影响

在热冲压成形工艺中,保压时间不仅决定成形的精度,还影响制件最终的力学性能,但其对于制件厚度的影响却不大。成形初始温度 565 °C、模具初始温度 25 °C、压边力 2 kN、冲压速度 40 mm/s、模具间隙 1.5 mm 这 5 个工艺参数保持不变,设定保压时间为 3、5、7 s。保压时间对于保压结束时刻制件最高/低温度以及回弹的影响规律如图 7 所示。

从图 7(a)可以看出:随着保压时间的增大,保压结束时刻板材的最高温度和最低温度均在下降,且下降的速度在随着保压时间的增大而不断减小。保压 5 s 后板材的最高温度已明显低于 6061 铝合金的淬火敏感温度区间的下限值 230 °C。从图 7(b)可以看出:随着保压时间的增加,法兰和侧壁的回弹角度均在减小。且回弹角度下降的速度随着保压时间的延长变得越来越缓慢。这说明增大保压时间能够减小回弹,但是无限延长保压时间对于提高制件成形精度的意义并不大。综上所述,结合制件保压结束时刻的温度以及最终的回弹量,在本工况下,保压时间选择 5 s 左右比较合适。

3 实验研究与对比分析

3.1 6061 铝合金 U 型件热冲压实验研究

为了验证有限元模型的准确性,研制了相应的热冲压模具并进行实验。试验参数如下:成形初始温度 515 °C、模具初始温度 25 °C、压边力 2.24 kN、冲压速度 40 mm/s、模具间隙 1.5 mm、保压时间 5 s。

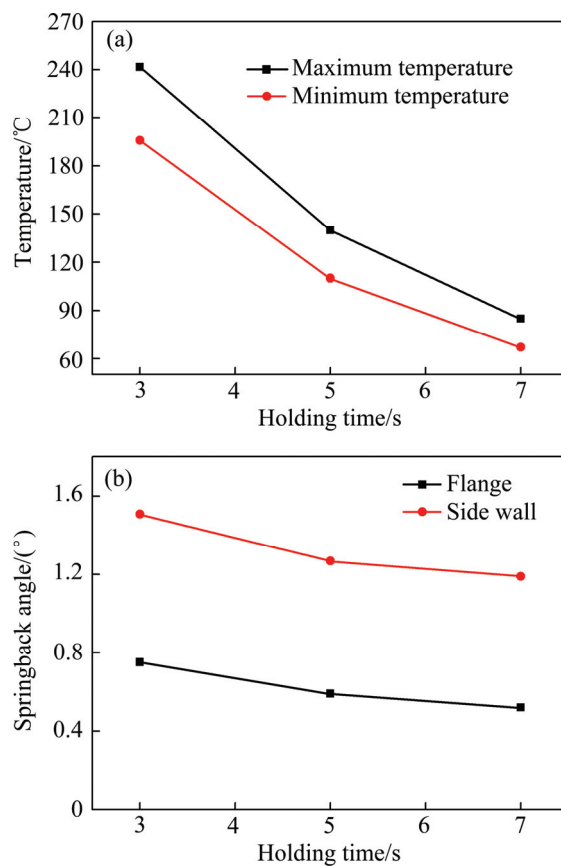


图 7 保压时间对制件成形质量的影响

Fig. 7 Effect of holding time on forming quality of product: (a) Maximum temperature and minimum temperature of parts under different pressure maintaining time; (b) Springback angle

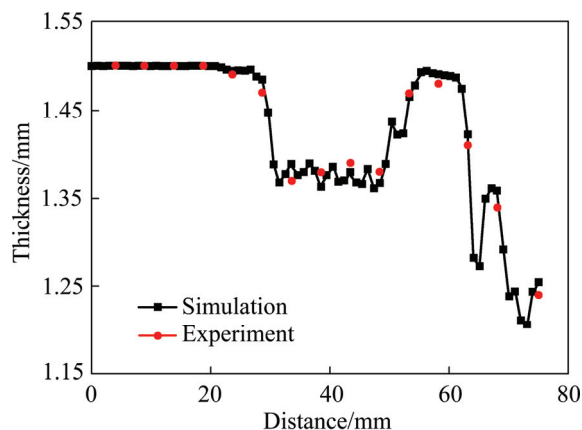


图 8 截面厚度的模拟值与试验值

Fig. 8 Simulation value and experimental value of cross section thickness

3.2 制件截面厚度试验值与模拟值对比分析

采用线切割方式沿横向对称面加工实验得到的热冲压制件,并利用千分尺进行零件截面厚度的测量,

其有限元模拟的厚度值与试验所测的厚度值对比如图 8 所示。

通过比较可以发现：模拟值和试验值偏差不大，且沿着展开距离其厚度变化趋势基本相同，这也体现了有限元模拟热冲压成形的结果是可靠的。

3.3 制件回弹对比分析

利用 ATOS 三维光学扫描仪对热冲压构件进行回弹角度的测量。同一工况下，热冲压制件回弹量的试验值与模拟值的对比如表 2 所列。

表 2 回弹量试验值与模拟值
Table 2 Simulation value and experimental value of springback

Angle	Experiment	Simulation	Deviation
$\Delta\theta_1$	0.51	0.63	0.12
$\Delta\theta_2$	2.03	1.31	0.72

总体来讲，有限元模拟测得的回弹角的大小与试验测量的回弹角大小偏差不大。说明有限元模拟对于回弹的预测也比较可靠。

4 成形制件时效热处理后的力学性能分析

热冲压成形后的制件对其进行了人工时效热处理强化，具体的时效热处理制度为 160 ℃，保温 18 h。而后对其进行力学性能检测。

4.1 拉伸力学性能分析

结合构件尺寸，设计拉伸试样。分别在构件的法兰和侧壁处获取拉伸试样，然后开展拉伸试验，其测量结果列于表 3。

从表 3 可以看出：热冲压构件不同位置的强度存在差异，但总体差异在 5%以内，通常认为这个误差

表 3 热冲压件强度
Table 3 Intensity of hot stamping parts

Position	Yield strength/MPa	Tensile strength/MPa	Elongation/%
6061-T6	280.5	323.7	12.3
Flange	293.2	323.4	12.5
Side wall	278.3	310.0	14.8

可以接受。与经过常规固溶淬火-时效热处理后的 6061-T6 铝合金性相比较，热冲压制件的强度基本无弱化。

4.2 制件的显微硬度测试

在热冲压成形加工得到的全部构件中，选取编号 1 号，6 号和 11 号构件作为试验对象，编排了如图 8 所示的 4 个硬度测量位置进行维氏硬度测量，其结果如表 4 所示。

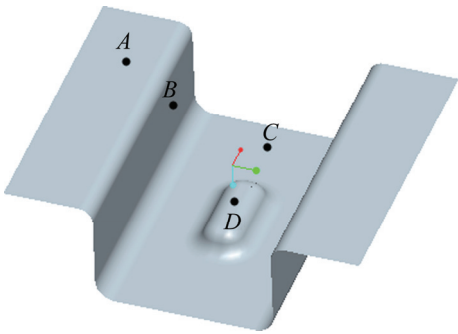


图 9 硬度测量位置
Fig. 9 Location of hardness testing

表 4 热冲压件硬度
Table 4 Hardness of hot stamping parts shown in Fig. 9

Position	Hardness			
	Sample 1	Sample 6	Sample 11	Average value
A	107.8	104.6	105.8	106.1
B	102.3	103.5	102.8	102.9
C	99.5	98.4	100.3	99.4
D	97.6	96.7	98.5	97.6

从试验测量的硬度数据来看：4 个检测位置中，最大硬度和最小硬度的差异不到 10%，不存在显著的差异，通常认为这个差异是可以接受的。

5 结论

- 1) 建立了热冲压有限元分析模型，系统研究了板料初始温度、压边力、保压时间等工艺参数对热冲压制件成形质量的影响规律，给出了实现该制件精确成形的热冲压成形工艺参数范围。
- 2) 开展了 U 型件热冲压实验研究，并与仿真结果进行了对比分析，验证了仿真模型的可靠性。
- 3) 开展了热冲压成形制件时效热处理研究，对比

分析了该合金传统热处理工艺条件下的力学性能,发现采用本文提出的工艺路线实现了6061铝合金的精确成形和高性能的协同,为铝合金车身覆盖件的形性协同制造提供了支撑。

REFERENCES

- [1] LI Dao-ming, AMIT K G. Biaxial warm forming behavior of aluminum sheet alloys[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 145(1/3): 281–293.
- [2] MOHAMED S M, ALISTAIR D F, LIN Jian-guo. Investigation of deformation and failure features in hot stamping of AA6082: Experimentation and modeling[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2012, 53(1/3): 27–38.
- [3] 王孟君, 任杰, 黄电源, 姜海涛. 汽车用5182铝合金板材的温拉伸流变行为[J]. *中国有色金属学报*, 2008, 11: 1958–1963.
- WANG Meng-jun, REN Jie, HUANG Dian-yuan, JIANG Hai-tao. Experimental study and numerical simulation of warm stamping of 5182 aluminum alloy for automotive body[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2008, 11: 1958–1963.
- [4] BARIANI P F, BRUSCHI S, GHIOTTI A, MICHIELETTI F. Hot stamping of AA5083 aluminium alloy sheets [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2013, 62(1): 251–254.
- [5] R P G, J L, T A D. Solution heat treatment and could die quenching in forming AA6xxx sheet components: feasibility study[J]. *Advanced Materials Research*, 2005, 6: 673–680.
- [6] MOHAMED M S, FOSTER A D, LIN J, BALINT D S, DEAN T A. Investigation of deformation and failure features in hot stamping of AA6082: Experimentation and modelling[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2012, 53(1): 27–38.
- [7] 傅垒, 王宝雨, 孟庆磊, 周靖, 林建国. 铝合金热冲压成形质量影响因素[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2013, 44(3): 936–941.
- FU Lei, WANG Bao-yu, MENG Qing-lei, ZHOU Jing, LIN Jian-guo. Factor affecting quality in hot stamping of aluminum alloy[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2013, 44(3): 936–941.
- [8] ZHOU Jing, WANG Bao-yu, LIN Jian-guo, FU Lei. Optimization of an aluminum alloy anti-collision side beam hot stamping process using a multi-objective genetic algorithm[J]. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2013, 13(3): 401–411.
- [9] ZHOU Jing, WANG Bao-yu, LIN Jian-guo, FU Lei, MA Wen-yu. Forming defects in aluminum alloy hot stamping of side-door impact beam[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2014, 24(11): 3611–3620.
- [10] 潘道召, 王芝秀, 李海, 郑子樵. 双级时效对6061铝合金拉伸性能和晶间腐蚀性能的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2010, 20(3): 435–441.
- PAN Dao-zhao, WANG Xiu-zhi, LI Hai, ZHENG Zi-qiao. Effects of two-step aging treatment on tensile properties and intergranular corrosion of 6061 aluminum alloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2010, 20(3): 435–441.
- [11] 盈亮, 戴明华, 胡平, 闫巧云. 6061-T6铝合金高温本构模型及温成形数值模拟[J]. *中国有色金属学报*, 2015, 25(7): 1815–1821.
- YING Liang, DAI Ming-hua, HU Ping, YAN Qiao-yun. Thermal constitutive model and numerical simulation of hot forming for 6061-T6 aluminum alloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2015, 25(7): 1815–1821.
- [12] SOUNDARARAJAN V, ZEKOVIC S, KOVACEVIC R. Thermo-mechanical model with adaptive boundary conditions for friction stir welding of Al 6061[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2005, 45(14): 1577–1587.
- [13] 赵俊, 湛利华, 史博. 6061铝合金高温拉伸流变行为[J]. *塑性工程学报*, 2014(3): 111–115.
- ZHAO Jun, ZHAN Li-hua, SHI Bo. The tensile flow behavior of 6061 aluminum alloy during high-temperature[J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2014(3): 111–115.
- [14] 伍世棋, 阳湘安. 基于CAE的车身支撑板冲模设计[J]. *模具工业*, 2010(4): 38–41.
- WU Shi-qi, YANG Xiang-an. CAE-based design of stamping die for vehicle body support plate[J]. *Die & Mould Industry*, 2010(4): 38–41.
- [15] 尚健. 金属塑性成形过程模拟[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
- SHANG Jian. Metal plastic forming process simulation[M]. Beijing: China Machine Press, 1999.
- [16] 谭海艳. 汽车钢板弹簧热成形工艺的研究及仿真[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2008.
- TAN Hai-yan. Study and simulation on the hot stamping process of automotive leaf spring[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2008.
- [17] 张凯锋. 材料热加工过程的数值模拟[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2003.
- ZHANG Kai-feng. Numerical simulation of thermal process of materials[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2003.
- [18] 邓明, 夏庆发, 杜丽伟. 基于变形区显微状态分析的精冲成形机理研究[J]. *塑性工程学报*, 2006, 12(6): 71–73.
- DENG Ming, XIA Qing-fa, DU Li-wei. Research on fine blanking mechanism based on analyzing microstate of deformation zone[J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2006, 12(6): 71–73.

Effect of hot stamping process on forming quality of 6061 aluminum alloy U-shaped parts

LI Wen-ke¹, ZHAN Li-hua^{1,2}, ZHAO Jun¹

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;

2. State Key Laboratory of High Performance Complex Manufacturing, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The factors affecting the thickness and the springback of the parts were investigated including initial blank temperature, blank holder force (BHF) and the holding time using MSC.Marc finite element analysis software. The reliability of finite element simulation was proved by the hot stamping experiments of 6061 aluminum alloy. The results show that sheet metal initial temperature has a little influence on the thickness and the springback when it changes in the range of 465–565 °C. The influence of BHF on the forming quality of aluminum alloy is obvious. The use of 3 kN is more appropriate. Combined with the temperature and the final amount of springback in the end of the product, the time selection of 5 s is appropriate. The mechanical properties of the forming parts were analyzed, and compared with the conventional solid solution quenched and aged 6061-T6. It is found that the mechanical properties of hot stamping parts have not been weakened, and the hardness of the same hot stamping parts is less than 10%.

Key words: 6061 aluminum alloy; hot stamping forming; springback; finite element simulation

Foundation item: Project(13JJ2009) supported by the Nature Science Foundation of Hunan Province, China

Received date: 2015-10-25; **Accepted date:** 2016-03-26

Corresponding author: ZHAN Li-hua; Tel: +86-731-88830254; E-mail: yjs-cast@csu.edu.cn

(编辑 王 超)