

引文格式: 杜志浩, 杨欢, 崔晓辉, 等. 预变形与电磁成形对铝合金曲面件回弹的影响[J]. 航空制造技术, 2022, 65(21): 143-149.
 DU Zhihao, YANG Huan, CUI Xiaohui, et al. Influence of predeformation and electromagnetic forming on springback of aluminum alloy curved parts[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(21): 143-149.

预变形与电磁成形对铝合金曲面件回弹的影响*

杜志浩¹, 杨欢², 崔晓辉^{1,2,3}, 王世鹏², 阳光²

(1. 中南大学机电工程学院, 长沙 410083;

2. 中南大学轻合金研究院, 长沙 410083;

3. 中南大学高性能复杂制造国家重点实验室, 长沙 410083)

[摘要] 以铝合金单曲率蒙皮为研究对象, 采用冲压和电磁渐进成形相结合的方法解决板料回弹大的问题。采用有限元和试验手段, 研究了定间隙和变压边两种预变形方案对板料变形和回弹的影响。与定间隙冲压相比, 变压边预变形后板料回弹被大大降低, 回弹量为 47.6 mm, 再采用带弹性垫的蒙皮件电磁渐进方法继续降低板料回弹。通过模拟发现, 放电后板料的切向拉应力减小, 并且产生微小塑性应变。零件内的塑性应变能增加, 弹性应变能降低, 回弹降低。当线圈在 6 个位置依次放电 8 kV 后, 板料的回弹量为 10.4 mm, 比准静态冲压下板料回弹量降低了 78.1%, 并且零件表面光滑。通过试验验证, 发现试验结果与模拟一致。本研究为实现铝合金蒙皮件的精确制造提供了可靠手段。

关键词: 电磁成形; 单曲率蒙皮; 渐进成形; 回弹; 数值模拟

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2022.21.143



杜志浩

博士研究生, 研究方向为电磁成形技术和理论。

蒙皮是构成飞机气动外形的主要零件, 承受空气动力作用后, 将作用力传递到飞机的机翼骨架上。由于蒙皮直接与空气接触, 所以要求蒙皮件强度高、表面光滑, 有较高的耐腐蚀性, 且蒙皮件尺寸较大, 对精度的要求较高。铝合金由于其密度低、比强度较高, 因此被用作制造蒙皮件的主要材料。

由于铝合金的塑性较差, 在成形后有较大的回弹, 影响了蒙皮件的成形精度。对于大型蒙皮件, 拉伸成形(拉形)技术是制造蒙皮件的主要工艺。拉形是使用数控蒙皮拉伸机夹持板料两端, 两端钳口施加拉力和弯矩, 使板料贴合模具。为了减少拉形后的回弹, 对板料继续施加补拉。针对飞机蒙皮件, 国内学者研究了蒙皮件的拉形过程。韩志仁等^[1-2]对飞机蒙皮拉形数值模拟中夹钳区域的加载轨迹进行了优化研究, 优化后最

大等效塑性应变减小为 3.5%, 并且蒙皮的应变分布更加均匀, 减小了回弹, 获得较佳的拉形质量。Peng 等^[3]提出了拉形过程中夹紧的运动轨迹设计方法和求解算法, 试验和仿真结果均表明了该方法可以有效实现曲面零件的高精度纵向拉伸。He 等^[4]提出了一种钛合金飞机蒙皮冷拉伸成形的优化方法, 在优化模型中, 用应力差的数学公式代替隐式回弹分析, 作为回弹程度指标。此外, 采用多目标遗传算法(MGA)来寻找最佳加载条件, 研究结果表明蒙皮零件最终回弹为 0.5 mm, 获得了精度较高的蒙皮件。马战鹏^[5]通过回弹补偿技术手段实现了双曲率蒙皮冷拉伸成形的回弹控制, 发现贴模度和模胎修模量的计算是回弹补偿过程的关键技术。通化优化传统拉形模具, 最终蒙皮件与模具间隙最大为 0.5 mm。另外, 有学者使用振动辅助工

* 基金项目: 国家自然科学基金(52275394); 中南大学高性能复杂制造国家重点实验室开放课题研究基金(ZZYJKT2020-02)。

艺降低蒙皮件的残余应力,从而降低其回弹。黄慧丽等^[6]在蒙皮拉伸成形过程中添加振动辅助,研究了振动辅助对单、双曲率飞机蒙皮拉伸成形过程中回弹量的影响。研究发现,在相同振幅条件下,当振动频率为 30 Hz 时,单曲率蒙皮的边界回弹量最小;当振动频率为 10 Hz 时,双曲率蒙皮的回弹量较好;在相同频率和振幅为 1.5 mm 条件下,单、双曲率蒙皮的回弹量较小。

电磁成形是一种高速成形工艺,具有提高材料成形极限、降低回弹^[7]等优点。Iriando 等^[8]设计了 L 形和 U 形电磁辅助弯曲工装,通过对 AA5754 铝合金和 DP600 高强钢材料的弯曲区域施加磁场力,能有效降低零件回弹。何逸汉等^[9]针对 2A12-T4 的 T 形型材翘曲的问题,进行了电磁校形试验,使用电磁力打击局部翘曲区域,使得型材产生塑性变形,消除了翘曲。Liu 等^[10]进行了带有法兰边的 V 形件电磁辅助弯曲试验,研究发现,随着放电能量的增加,板料回弹角逐渐减小。Cui 等^[11]发现电磁线圈放电后板料会出现高频振动现象,显著降低板材内的残余应力,消除零件回弹。Cui 等^[12]提出了 V 形零件电磁力反向加载方法,发现线圈放电后,板材内的切向应力和弹性应变能降低,回弹也降低。Xia 等^[13]研究了 5052 铝合金件 V 形弯曲后电磁成形消除回弹工艺,发现随着电压的增加,板料位移振动幅值增大,回弹降低。

传统电磁成形技术由于线圈和设备的限制,难以开展大尺寸铝合金件成形。针对大尺寸铝合金件的难成形问题,Cui 等^[14]首次提出电磁渐进成形方法。该方法的基本原理是放电线圈代替单点渐进成形装置中的刚性工具头。放电线圈按照一定的三维轨迹逐次移动到板件的各个局部位置并放电,使板料局部变形,最终累加为零件整体变形。Long

等^[15]研究了预压力下电磁叠加成形,采用多点柔性模具,给板料一个预压力,调整线圈位置并放电使蒙皮件成形。谭金强^[16]研究了壁板件电磁渐进成形,分析了放电电压、放电位置、线圈匝数和筋条高度对零件成形质量的影响。Su 等^[17]进行了球形薄壁件电磁渐进成形试验和模拟研究,分析了线圈重叠率、线圈移动策略和放电电压对工件成形均匀性的影响,通过 5 层放电得到了理想零件。Du 等^[18]提出了带有弹性垫的电磁渐进成形方法,通过电磁力与弹性垫的反弹变形,使板料在成形过程中产生高频振荡现象,显著降低材料残余应力和回弹,最终获得了表面光滑的板料,但是最终零件与模具间隙较大。

综上所述,本文通过调整板料的预变形工艺,使冲压后板料获得较大塑性应变。再采用电磁渐进成形技术进一步降低板料回弹,获得回弹小的零件。建立了有限元仿真模型,研究预变形和放电电压对 5052-O 铝合金回弹和零件表面成形质量的影响规律。

1 试验原理

1.1 力学原理分析

图 1 (a) 为准静态冲压弯曲变形区域某微元的受力状态,假设弯曲材料不产生加工硬化。其中, σ_θ 为切向应力; σ_r 为径向应力; R 为板材外层弯曲半径; r_0 为内层弯曲半径; r 为任意区域曲率半径 ($r_0 < r < R$); r_0 为中性层的曲率半径; $d\theta$ 为弯曲角。对于板料回弹影响最大的是切向应

力 σ_θ 。图 1 (b) 为电磁校形过程中塑性变形区域某微元的受力状态,相比于准静态冲压,还有电磁力 F_B 和惯性力 ρ_a 的作用。

当 $r_0 < r < R$ 时,板料的外层切向应力为拉应力,径向应力为压应力。对于准静态冲压状态,板料径向的受力平衡方程为

$$|\sigma_r| \cdot r \cdot d\theta - |\sigma_r + d\sigma_r| (r + dr) d\theta - 2\sigma_\theta dr \cdot \sin\left(\frac{d\theta}{2}\right) = 0 \quad (1)$$

将式(1)整理得式(2),即

$$d\sigma_r = \frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{r} \cdot dr \quad (2)$$

根据 Tresca 屈服准则,得式(3),即

$$\sigma_\theta - \sigma_r = \sigma_s \quad (3)$$

式中, σ_s 为材料的屈服应力。整理式(1)~(3),且边界条件为 $r = R$ 时, $\sigma_r = 0$ 。可得切向应力 σ_θ 为

$$\sigma_\theta = \sigma_s \left(1 - \ln \frac{R}{r}\right) \quad (4)$$

对于电磁校形状态,板料受到电磁力 F_B 和惯性力 ρ_a 。板料径向的受力平衡方程为

$$|\sigma_r| \cdot r \cdot d\theta + \rho_a \cdot r dr d\theta - F_B \cdot r dr d\theta - |\sigma_r + d\sigma_r| (r + dr) d\theta - 2\sigma'_\theta dr \cdot \sin\left(\frac{d\theta}{2}\right) = 0 \quad (5)$$

将式(5)整理得

$$d\sigma_r = \frac{\sigma'_\theta + F_B - \rho_a - \sigma_r}{r} \cdot dr \quad (6)$$

整理式(3)、(5)、(6),且边界条件为 $r = R$ 时, $\sigma_r = 0$ 。可得切向应力 σ'_θ 为

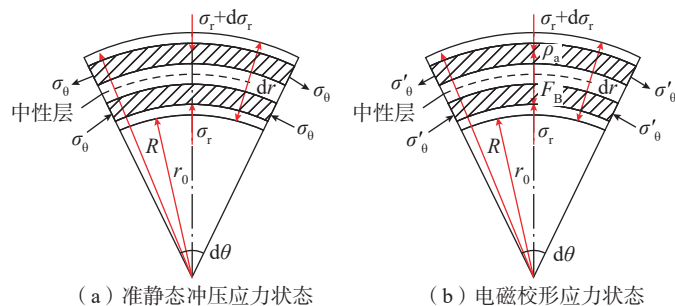


图 1 弯曲微元的受力图

Fig.1 Force diagram of bending element

$$\sigma'_0 = \sigma_s \left(1 - \ln \frac{R}{r} \right) + (F_B - \rho_a)(R - r) \quad (7)$$

由式(7)可知,当 $F_B < \rho_a$ 时,电磁成形后的切向应力将小于准静态冲压下的切向应力,切向应力与回弹角的关系如式(8)和(9)所示。

$$\alpha = \frac{M}{EI} \quad (8)$$

$$M = \int_r^R \sigma_0 b r dr \quad (9)$$

式中, α 为回弹角; M 为回弹弯矩; E 为弹性模量; I 为惯性矩; b 为板料宽度。对于同一种材料,弹性模量 E 与惯性矩 I 皆为常量。因此,当切向应力减小时,板料的回弹弯矩也将减小,进而板料的回弹角减小。

同理,当 $r_0 < r < r_c$ 时,板料的内层在电磁成形作用下切向应力将降低,回弹角度也将降低。根据Cui等^[11]的研究,电磁成形下,切向应力减小,会使得板料回弹降低。由上述分析可见,在电磁力不变的情况下,增大惯性力,可以降低切向应力。

1.2 试验过程

本研究使用5052-O态铝合金,板料尺寸为750 mm×125 mm×1.5 mm,设计了两种准静态冲压方法。方案1的试验原理如图2(a)所示,压板与托板间隙为3 mm,凸模上升对板料冲压并使板料包覆模具。方案2的试验原理如图2(b)所示,为了使板料产生较大塑性变形,首先压板和托板夹紧板料,当凸模上升90 mm时,板料端部开始产生流动,此时凸模停止上升。然后压板松开,将压板与托板的距离定为3 mm,凸模继续向上冲压板料50 mm,使板料完全包覆模具。最后,将线圈沿着板料型面移动放电,假定线圈边缘与凸模中心的距离为 L (图2(c))。线圈移动放电路径如表1所示。

2 准静态冲压模拟

在数值模拟中,考虑到高应变

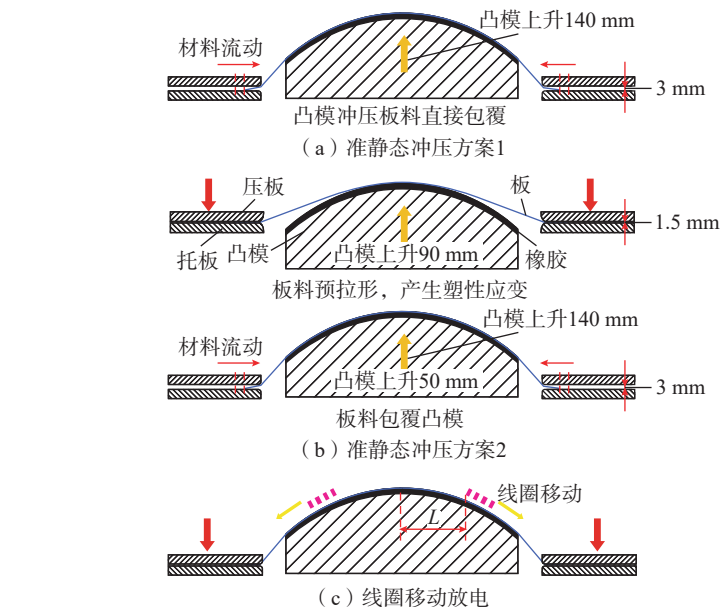


图2 试验原理图

Fig.2 Schematic diagram of experiment process

率对材料的影响,使用了Johnson-Cook(J-C)模型。Li等^[9]进行了5052-O铝合金的电磁单向拉伸试验,采用J-C模型模拟了材料成形后的高度与变形应力,试验与模拟较为吻合。J-C模型如式(10)所示,模型参数如表2所示。

$$\sigma = [A + B\varepsilon^n] \cdot \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \quad (10)$$

式中, σ_y 为准静态流动应力; ε 为准静态应变; σ 为动态流动应力; A 为屈服强度; B 为硬化模量; C 为应变率敏感系数; n 为硬化系数; $\dot{\varepsilon}$ 为应变率; $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考应变率。

图3(a)为采用Abaqus软件建立的准静态冲压结构场模型,包括压板、托板、凸模、板料与橡胶。其中压板、托板与凸模设置为刚体,单元类型为R3D4,板料单元类型为S4R,橡胶单元类型为C3D8R,其中弹性模量为8.03 MPa,泊松比为0.49,橡胶尺寸为560 mm×280 mm×10 mm。图3(b)为板料包覆模具后的位移结果。为了便于后续分析,将板料中部曲线定义为路径1。

图4(a)为准静态冲压后沿路径1的等效塑性应变分布。方案1

表1 放电路径
Table 1 Discharge path

位置	L/mm
1	30
2	65
3	105
4	140
5	175
6	205

表2 J-C模型参数
Table 2 Parameters of J-C model

A/MPa	B/MPa	C	n
92.4	132	0.02511	0.25

条件下板料的等效塑性应变远小于方案2。图4(b)和(c)分别为方案1和2的能量变化。方案2板料的弹性应变能为0.34 J,塑性应变能达到212.5 J。而方案1的弹性应变能为3.69 J,塑性应变能仅为0.97 J。方案2条件下的两步冲压工艺使板料获得了更大的塑性应变能。

图5为方案1与方案2中模具卸载后板料的回弹结果。方案1板料端部最大回弹为445 mm,方案2

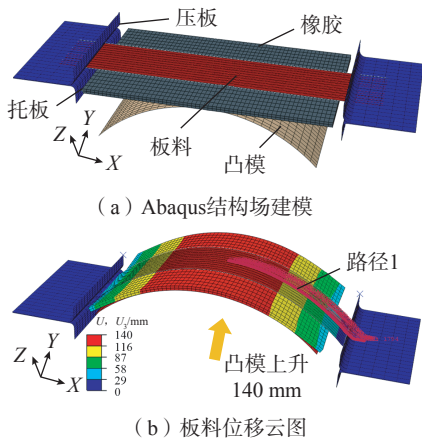
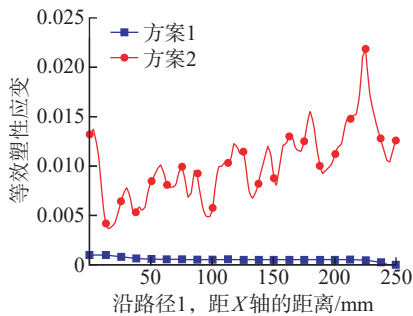
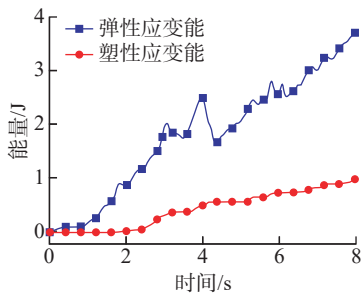


图3 采用 Abaqus 软件建立的准静态冲压模型

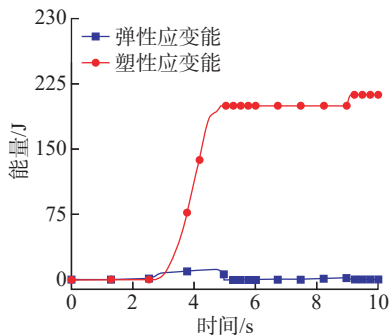
Fig.3 Quasi-static stamping model established by Abaqus software



(a) 沿路径1板料的等效塑性应变



(b) 方案1能量的变化



(c) 方案2能量的变化

图4 准静态冲压模拟应变与能量结果

Fig.4 Results of strain and energy by quasi-static stamping

板料最大回弹为 47.6 mm。因此,采用两步法冲压可以降低板料回弹。本文将对预冲压后的板料使用电磁渐进成形技术,研究了放电电压对回弹的影响。

3 板料不同预变形下的电磁成形研究

在 Ansys 软件中进行电磁场模拟,计算板料上的电磁力。试验实测 8 kV 电压下通过线圈的电流曲线,如图 6 (a)所示,在 $t=140 \mu\text{s}$ 时,电流达到峰值, $I_{\text{max}}=46.3 \text{ kA}$ 。根据 Du 等^[16]的研究,为了避免板料在成形过程中产生鼓包和零件表面不光滑,使用 304 不锈钢将线圈的一半遮挡,减弱线圈一侧的电磁力,可以显著降低鼓包高度。当电压为 8 kV, $t=100 \mu\text{s}$ 时,板料上电磁力分布云图如图 6 (b) 所示。选取线圈中央对应板料上的特殊节点 1668 进行后续分析。

3.1 冲压方案 1 及后续电磁成形

在采用冲压方案 1 和板料未卸载的条件下,图 7 (a)为线圈在第 1

个位置 ($L=30 \text{ mm}$) 放电 8 kV 后板料的变形轮廓。板料轮廓与模具的最大偏差为 0.24 mm,板料表面较光滑。图 7 (b)为 8 kV 电压下,板料上 1668 节点的位移-时间变化曲线,可知,8 kV 电压下节点发生 0.15 mm 的振荡。

图 8 (a)为冲压方案 1 在 8 kV 电压下,1668 节点的切向应力和等效塑性应变与时间关系。冲压结束后,节点 1668 应力为 116 MPa。电磁成形结束后,切向应力降低为 37 MPa。根据式(7)~(9),施加电磁力后板料的切向应力降低,板料回弹则会降低。另外,放电后板料产生等效塑性应变,放电前节点初始应变为 0.05%,放电后节点最终应变为 0.825%。图 8 (b)为板料塑性应变能由放电前的 0.97 J 增加到放电后的 2.97 J。塑性应变能增加,板料回弹降低。

3.2 冲压方案 2 和电磁成形

在采用冲压方案 2 和板料未卸载的条件下,图 9 (a)为 8 kV 电压下

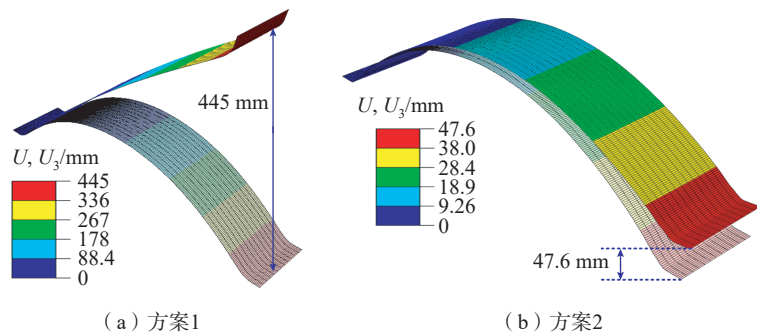
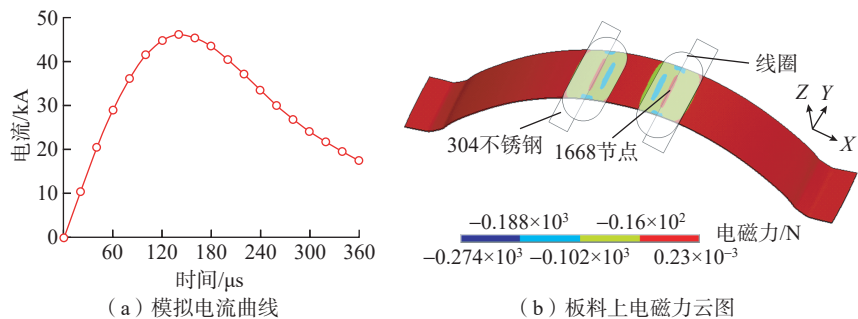


图5 准静态冲压模拟应变与回弹结果

Fig.5 Springback results after quasi-static stamping



(a) 模拟电流曲线

(b) 板料上电磁力云图

图6 电磁场分析

Fig.6 Electromagnetic field analysis

板料变形轮廓。可知,板料与模具的最大偏差为 0.25 mm。图 9 (b) 为 8 kV 电压下,板料上特殊点 1668 节点的位移-时间变化曲线,8 kV 电压下节点的最大振荡幅度达到了 1.2 mm。

图 10 (a) 为 8 kV 电压下 1668 节点的切向应力和等效塑性应变与时间关系。冲压结束后,节点 1668 切向应力为 45 MPa。电磁成形结

束后,切向应力降低为 12 MPa。放电前节点的等效塑性应变为 1.12%, 放电后节点等效塑性应变为 1.54%。图 10 (b) 为板料塑性应变能由放电前的 212.5 J 增加到放电后的 214.9 J, 塑性变形能增加,板料回弹降低。

3.3 电磁成形后板料轮廓与回弹结果

采用两种预变形方案,图 11 为线圈按照表 1 放电路径放电 8 kV 后,板

料的最终变形轮廓与回弹结果。在模具未卸载的情况下,冲压方案 1 和电磁成形作用下板料表面与模具误差在 0.11~0.26 mm 之间,板料端部回弹量为 166 mm。冲压方案 2 和电磁成形作用下板料表面与模具误差在 0.15~0.25 mm 之间,板料端部回弹量为 10.4 mm。与方案 2 准静态冲压相比,线圈多次放电后板料回弹降低了 78.1%,并且板料表面无鼓包产生。

通过研究发现,使用冲压方案 2 可以使得板料获得更大的塑性变形。在相同放电电压和放电次数的情况下,板料回弹小。因此选取冲压方案 2 进行试验研究,图 12 (a) 为成形试验装置,包括线圈、板料、橡胶等。图 12 (b) 为冲压方案 2 与 8 kV 放电电压下板料的试验结果。板料表面光滑,放电后板料回弹明显降低。图 13 为试验与模拟轮廓对比,试验

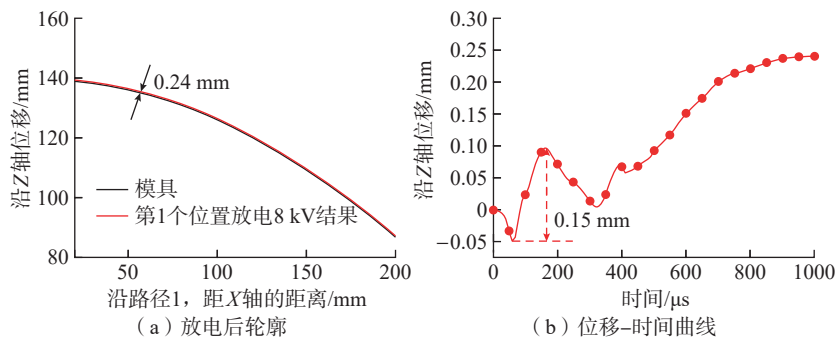


图 7 冲压方案 1: 线圈在第 1 个位置放电后的位移结果

Fig.7 Stamping scheme 1: Sheet displacement result after coil discharged at the first position

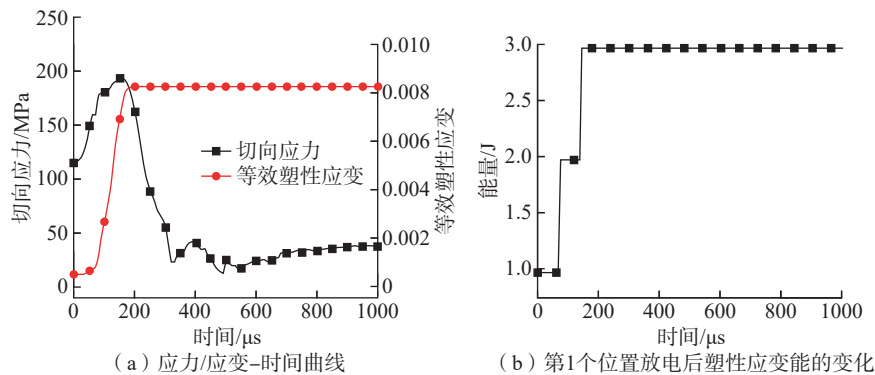


图 8 冲压方案 1: 线圈在第 1 个位置放电后应力-应变与能量结果

Fig.8 Stamping scheme 1: Stress-strain and energy results after coil discharged at the first position

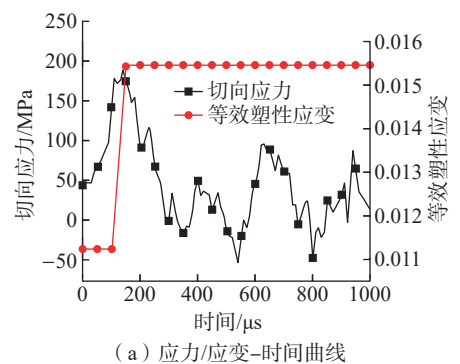


图 10 冲压方案 2: 线圈在第 1 个位置放电后应力-应变与能量结果

Fig.10 Stamping scheme 2: Stress-strain and energy results after coil discharged at the first position

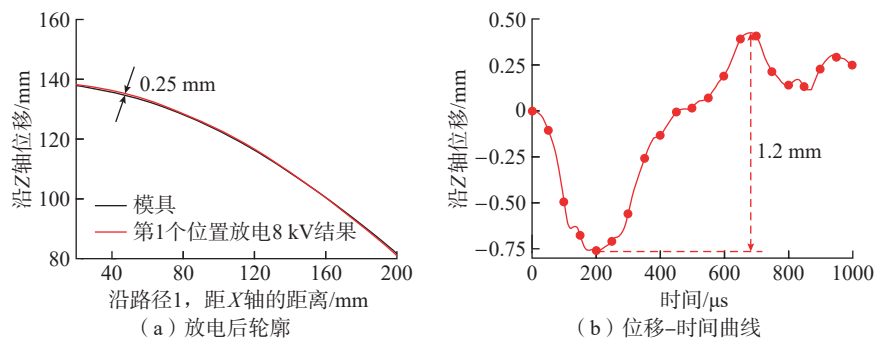
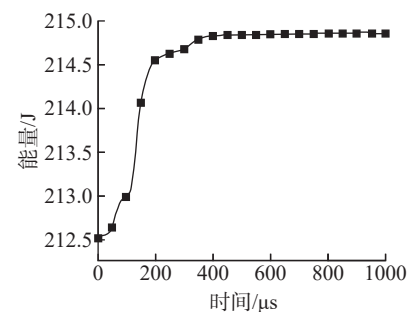


图 9 冲压方案 2: 线圈在第 1 个位置放电后的位移结果

Fig.9 Stamping scheme 2: Sheet displacement result after coil discharged at the first position



(b) 第 1 个位置放电后塑性应变能的变化

图 10 冲压方案 2: 线圈在第 1 个位置放电后应力-应变与能量结果

Fig.10 Stamping scheme 2: Stress-strain and energy results after coil discharged at the first position

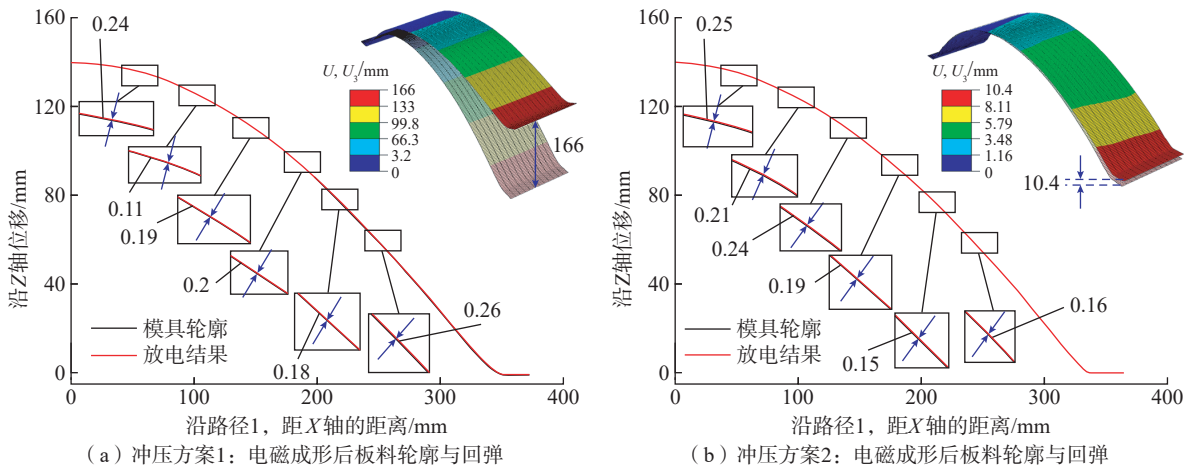


图 11 回弹模拟结果以及板料轮廓
Fig.11 Simulation results of springback and sheet profile

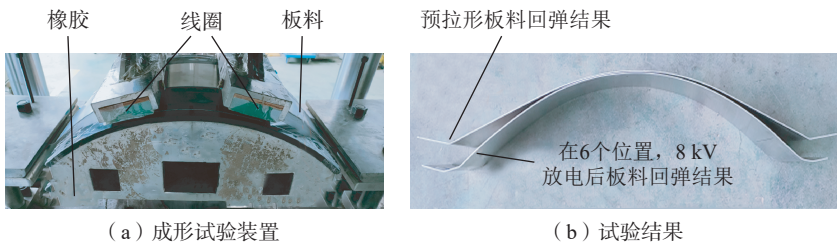


图 12 成形装置与试验结果
Fig.12 Forming device and experimental results

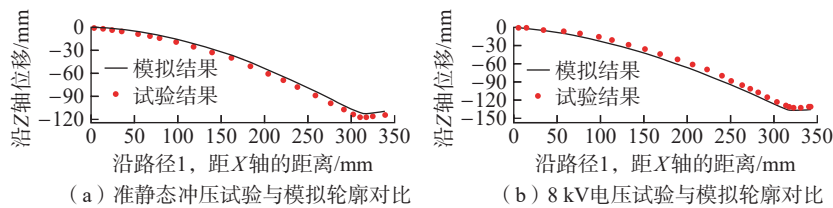


图 13 模拟与试验结果轮廓对比
Fig.13 Comparison between simulation and experimental results

与模拟结果较吻合,证明了模拟的准确性。因此,通过预冲压使板料获得较大的塑性变形再线圈放电,可以使板料的回弹明显降低,提高成形效率。

4 结论

(1) 板料在电磁力和惯性力的共同作用下,切向应力降低,能够降低回弹。

(2) 在冲压方案 1 的条件下,板料最大回弹量为 445 mm。在冲压方案 2 的条件下,板料最大回弹量为 47.6 mm。这是由于冲压方案 2 下板

料发生更大的塑性变形。两种冲压方案后再进行电磁成形,板料的塑性应变能均提高,回弹均降低。

(3) 当采用冲压方案 2 时,线圈多次放电和模具卸载后板料的回弹量为 10.4 mm,比准静态冲压下板料回弹量降低了 78.1%,且板料表面光滑。通过试验,验证了模拟的准确性。

参考文献

[1] 韩志仁,周叔阳,刘宝明,等. 基于 ANSYS 的蒙皮拉形钳口轨迹优化技术研究[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2017, 34(1): 15-19.

HAN Zhiren, ZHOU Shuyang, LIU Baoming, et al. Research on loading trajectory optimization technology in stretch forming for aircraft skin based on ANSYS[J]. Journal of Shenyang Aerospace University, 2017, 34(1): 15-19.

[2] 韩志仁,孔庆猛,孟祥韬,等. 飞机蒙皮拉形加载轨迹研究[J]. 机械设计与制造, 2016(4): 258-261.

HAN Zhiren, KONG Qingmeng, MENG Xiangtao, et al. Study on loading trajectory of aircraft skin in stretch forming[J]. Machinery Design & Manufacture, 2016(4): 258-261.

[3] PENG J W, LI W D, HAN J Q, et al. Kinetic locus design for longitudinal stretch forming of aircraft skin components[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 86(9-12): 3571-3582.

[4] HE D H, LI X Q, LI D S, et al. Process design for multi-stage stretch forming of aluminium alloy aircraft skin[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20(6): 1053-1058.

[5] 马战鹏. 某型机钛合金双弧度蒙皮冷拉成形回弹控制技术[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.

MA Zhanpeng. Research on springback technology for cold stretch forming of titanium alloy with hyperbolic skin[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.

[6] 黄慧丽,姚国风,张程鹏,等. 振动辅助对单、双曲率蒙皮回弹量的影响[J]. 地震工程与工程振动, 2019, 39(6): 138-142.

HUANG Huili, YAO Guofeng, ZHANG Chengpeng, et al. Effect of vibration

assistance on springback of single and multi-curvature skin[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2019, 39(6): 138–142.

[7] PSYK V, RISCH D, KINSEY B L, et al. Electromagnetic forming—A review[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2011, 211(5): 787–829.

[8] IRIONDO E, ALCARAZ J L, DAEHN G S, et al. Shape calibration of high strength metal sheets by electromagnetic forming[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2013, 15(2): 183–193.

[9] 何逸汉, 于海平, 邓将华, 等. 铝合金 T 形型材电磁校形试验研究[J]. *塑性工程学报*, 2020, 27(7): 86–93.

HE Yihan, YU Haiping, DENG Jianghua, et al. Experimental study on electromagnetic shape correction of aluminum alloy with T-profile[J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2020, 27(7): 86–93.

[10] LIU W, ZOU X F, HUANG S Y, et al. Electromagnetic-assisted calibration for surface part of aluminum alloy with a dedicated uniform pressure coil[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 100(1–4): 721–727.

[11] CUI X H, YU H L, WANG Q S. Electromagnetic impulse calibration in V-shaped parts[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 97(5–8): 2959–2968.

[12] CUI X H, ZHANG Z W, DU Z H, et al. Inverse bending and springback-control using magnetic pulse forming[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2020, 275: 116374.

[13] XIA W Z, CUI X H, DU Z H, et al. Springback control with small vibration using electromagnetic forming[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 118(9–10): 3133–3145.

[14] CUI X H, MO J H, LI J J, et al. Electromagnetic incremental forming (EMIF): A novel aluminum alloy sheet and tube forming technology[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, 214(2): 409–427.

[15] LONG A L, WAN M, WANG W P, et al. Electromagnetic superposed forming of large-scale one-dimensional curved AA2524–T3 sheet specimen[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 92(1–4): 25–38.

[16] 谭金强. 铝合金网格筋整体壁板

电磁成形机理与规律研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2018.

TAN Jinqiang. Research on mechanism and rule of electromagnetic forming for aluminum alloy grid-rib integral panel[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2018.

[17] SU H L, HUANG L, LI J J, et al. On the forming uniformity during a single layer forming of electromagnetic incremental forming[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 107(11–12): 4561–4572.

[18] DU Z H, YAN Z Q, CUI X H, et al. Springback control and large skin manufacturing by high-speed vibration using electromagnetic forming[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2022, 299: 117340.

[19] LI N, YU H P, XU Z, et al. Electromagnetic forming facilitates the transition of deformation mechanism in 5052 aluminum alloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, 673: 222–232.

通讯作者: 崔晓辉, 副教授, 研究方向为电磁成形理论、技术和装备。

Influence of Predeformation and Electromagnetic Forming on Springback of Aluminum Alloy Curved Parts

DU Zhihao¹, YANG Huan², CUI Xiaohui^{1,2,3}, WANG Shipeng², YANG Guang²

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

2. Light Alloy Research Institute, Central South University, Changsha 410083, China

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

[ABSTRACT] In this paper, aluminum alloy single curvature skin is taken as the research object, and the problem of large springback of sheet metal is solved by using the method of combination of tensile and electromagnetic progressive forming. The effects of two predeformation schemes of fixed clearance and variable blank holder on the deformation and springback of sheet metal were studied by finite element method and experiment. Compared with the fixed gap stamping, the springback of the sheet is greatly reduced, and the springback is 47.6 mm. Then the electromagnetic progressive method of skin parts with elastic pad is used to reduce the springback of sheet metal. It is found by simulation that the tangential tensile stress of the sheet decreases and a small plastic strain is produced. The plastic strain energy increases, the elastic strain energy decreases, and the springback decreases. When the coil discharges 8 kV in 6 positions, the springback of the sheet is 10.4 mm, which is 78.1% lower than that of the quasi-static stamping, and the surface of the parts is smooth. The experimental results are consistent with the simulation. The research in this paper provides a reliable means for the accurate manufacture of aluminum alloy skin parts.

Keywords: Electromagnetic forming; Single curvature skin; Incremental forming; Springback; Numerical simulation

(责编 古系)