

基于板料电磁翻边的电磁力分布对成形质量影响的数值模拟研究

黄攀¹, 黄亮^{1,2}, 苏红亮¹, 马飞³, 李建军¹

(1. 华中科技大学 材料成形与模具技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

(2. 湖南大学 汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 湖南 长沙 410082)

(3. 中国航天科技集团公司长征机械厂, 四川 成都 610100)

摘要: 针对铝合金板料电磁翻边工艺过程, 采用数值模拟方法, 研究板料上的电磁力分布特性以及几何参数对电磁力分布的影响规律, 并揭示电磁力分布对翻边件成形质量的影响。结果表明, 铝合金板料电磁翻边中, 预制孔的存在使板料上形成电磁力边缘积聚效应, 板料预制孔径和成形线圈内径参数通过改变线圈投影面积比影响电磁力分布; 随着线圈投影面积比的减小, 电磁力边缘积聚效应更加显著, 边缘电磁力密度增大; 电磁力分布较均匀时, 圆角区材料塑性流动更显著, 成形件能获得更高的成形高度与更小的边缘减薄率, 变形区厚度分布较均匀, 成形质量更好。

关键词: 电磁翻边; 电磁力; 边缘积聚效应; 成形质量

中图分类号: TG391;TG146.21

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2019)09-2987-07

铝合金由于具有高低温力学性能良好、比强度高优点而广泛应用于航空航天等领域^[1], 例如, 国产大飞机机身蒙皮和航天运载火箭燃料贮箱^[2]。其中, 火箭燃料贮箱箱底局部需要加工翻边特征以便于与管路的连接^[3], 当采用常规冲压方法加工时, 成形后的工件回弹严重^[4]且在翻边孔边缘处容易开裂^[5], 工件的成形质量难以保证。电磁成形技术是一种通过脉冲磁场施加电磁力使工件变形的高速率成形方法^[6]。与准静态成形相比, 电磁成形能显著提高材料成形极限, 减小工件的回弹, 改善工件的贴模性能^[7-10]。电磁翻边正是利用电磁成形的优势应用于板材局部翻边成形的工艺^[11,12]。电磁成形中, 电磁力作为驱动力, 是影响材料塑性变形量的重要因素^[13]。本实验以 2219 铝合金板料为研究对象, 采用数值模拟方法, 探究电磁翻边过程中板料上的电磁力分布特性以及几何工艺参数对电磁力分布的影响规律, 揭示电磁力分布对翻边件成形质量的影响, 从而为电磁翻边过程的工艺参数优化以及成形质量控制提供参考。

1 电磁翻边数值模拟

1.1 有限元模型的建立

采用能实现结构场与电磁场顺序耦合的商业软件

LS-DYNA R8.0 对 2219 铝合金板料电磁翻边进行数值建模。如图 1 所示, 该有限元数值模型包括成形线圈、板料、模具以及压边圈 4 个部分。数值模型中, 采用 3 层平板螺旋线圈提升成形能力^[14]。为了提高计算精度, 采用六面体实体单元对模型进行网格划分, 板料厚度方向划分为 6 层, 并在板料主要成形区域以及模具圆角部位采取网格精细化处理。成形过程中, 模具、压边圈以及成形线圈均设置为刚体, 并限制其各个方向的自由度。为保证压边圈对板料的紧固作用, 设置压边圈与板料、板料与模具之间的接触摩擦系数为 0.2^[15]。

本研究所用材料为 2219 铝合金, 热处理状态为退火态。不同的应变率条件下, 2219 铝合金所表现的塑性流动行为并不一致。电磁成形是一种高速成形, 材料应变率达 10^3 s^{-1} , 在这种成形条件下, 铝合金材料流动应力相对于准静态下发生改变, 准静态下的本构模型不再适用于电磁成形这种高速率成形。在 LS-DYNA 数值模拟中, 常采用 Cowper-Symonds 模型^[16]来描述高速率成形条件下的本构模型:

$$\sigma = \sigma_0 [1 + (\dot{\epsilon} / C)^{1/p}] \quad (1)$$

式中, σ_0 为准静态条件下的材料流动应力, 通过室温下准静态拉伸实验得到的材料真实应力-应变曲线如图 2 所示。可以得到, 退火态 2219 铝合金屈服强度为

收稿日期: 2018-09-10

基金项目: 国家自然科学基金 (51575206, 51435007); 中国航天科技集团公司航天科技创新基金 (CASC150704); 湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室开放基金 (31615006); 中央高校基本科研业务费专项资金 (2016YXZD055)

作者简介: 黄攀, 男, 1994 年生, 硕士生, 华中科技大学材料科学与工程学院, 材料成形与模具技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074, 电话: 027-87543490, E-mail: hphust@hust.edu.cn

78 MPa, 抗拉强度为 194 MPa。C、P 为描述应变率效应的材料参数, 取值分别为 $C=6500 \text{ s}^{-1}$, $P=4^{[17]}$ 。材料其他性能参数如表 1 所示。

1.2 模型的验证

为了验证本研究所建立的数值模型的可靠性, 分别在 8~10 kV 放电电压下进行了电磁翻边实验, 实验工装如图 3 所示, 主要包括成形线圈、原始板料、模具、压边圈、模座、导柱、紧固螺栓等。整个工装采用同轴装配, 成形模具固定在下模座上, 并依次与板

料、压边圈装配, 线圈与上模座固定, 进而整体装配在板料上, 上下模座利用导柱定位, 并采用紧固螺栓进行紧固。电磁翻边系统的电容、电感和电阻分别为 $213 \mu\text{F}$ 、 $29.7 \mu\text{H}$ 和 $71.5 \text{ m}\Omega$ 。电磁翻边结果如图 4 所示, 从电磁翻边实验所得工件中可以看出, 8 与 9 kV 条件下的板料虽然发生了较大的塑性变形, 但成形后的工件未与模具完全贴合, 与模具仍有较大间隙; 10 kV 条件下所得的工件与模具完全贴合, 且周向一致性较好, 直壁凸缘处无裂痕, 所得工件质量良好。同时, 在数值模拟中也得到了与实验工件较为吻合的成形轮廓, 模型能够准确的模拟出板料的电磁翻边成形工艺。

更进一步地, 对电磁翻边实验所得工件以及数值模拟结果的成形高度与边缘厚度进行测量, 如图 5 所示。随着放电电压的增加, 板料成形高度增加, 边缘

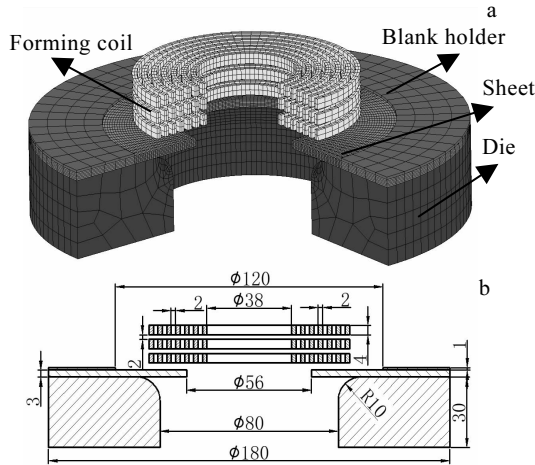


图 1 有限元建模

Fig.1 Finite element modeling: (a) numerical model and (b) geometric parameters (mm)

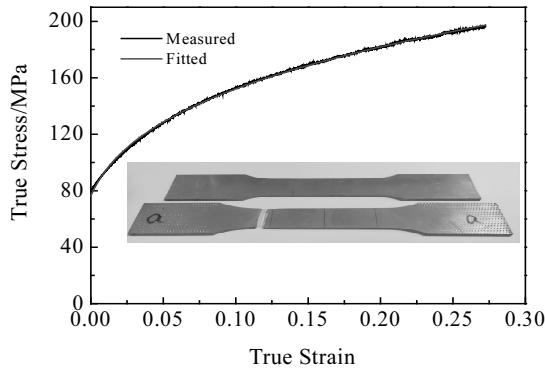


图 2 2219 铝合金真实应力-应变曲线

Fig.2 True stress-strain curve of 2219 aluminum alloy

表 1 2219 铝合金材料性能参数

Table 1 Material property parameters of 2219 aluminum alloy

Parameter	Value
Elastic modulus/GPa	75
Density/kg·m ⁻³	2820
Poisson's ratio	0.33
Electrical conductivity/($\Omega\cdot\text{m}$) ⁻¹	2.55×10^7

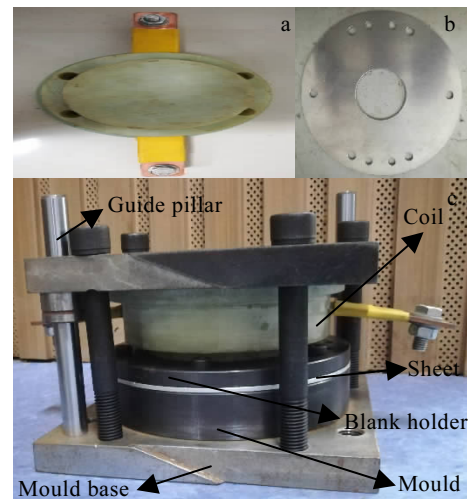


图 3 电磁翻边实验装置

Fig.3 Experiment setup of electromagnetic flanging: (a) forming coil, (b) sheet metal, and (c) tools

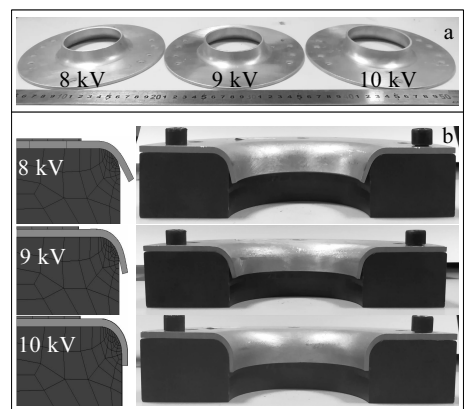


图 4 电磁翻边结果

Fig.4 Results of electromagnetic flanging: (a) experimental results and (b) profile comparison

厚度减小。板料完全贴模时的成形高度最大，边缘厚度最小，其值分别为 15.1 和 2.38 mm。数值模拟结果和实验结果的变化规律一致，数值模拟所得成形高度和边缘厚度与实验结果有一定偏差，最大偏差分别为 3.3%和 2.5%。造成这种偏差的主要原因是有限元数值模型中的线圈每一层均采用同心同向的螺旋线方法简化建模，层与层之间并未相连，这与实验所用的实际线圈有些微区别。但数值模拟与实验结果之间的偏差较小，在允许范围内。因此，本研究所建立的数值模型能够准确的模拟板料电磁翻边实际工艺过程，计算结果是可靠的、适用的。

2 结果与讨论

2.1 电磁力分布特性

2.1.1 电磁力分布规律

翻边过程中，由于模具的约束作用，板料上发生大变形的区域集中在预制孔边缘至模具圆角上端对应的区域，称之为板料悬空区域。本研究中板料悬空区域为预制孔边缘至半径为 50 mm 之间的区域。电磁翻边时，板料受电磁力作用发生变形可以用图 6 加以说明，成形线圈中通过瞬时脉冲电流，并在脉冲电流周围的空间内产生感应磁场，处于感应磁场内的板料由于电磁感应而产生与成形线圈内脉冲电流方向相反的感应电流，感应电流与感应磁场相互作用产生电磁力，板料悬空区域在电磁力作用下以变化的速度背离成形线圈运动，朝模具内壁逐渐贴模。电磁翻边时的板料所受电磁力可通过式（2）得到。

$$F=j \cdot B \tag{2}$$

式中， F 为板料上任意点的电磁力密度， j 为板料中感应电流密度， B 为电磁翻边系统中磁感应强度，感应电流密度和磁感应强度与电磁翻边系统中的几何结构参数密切相关。

为研究板料中电磁力分布规律，以放电电压为 10 kV 的数值模拟结果为分析对象。同时为了避免板料变形量过大而对电磁力分布产生较大影响，选取变形时刻为 50 μ s（此时板料变形量较小，位移对电磁力分布的影响可以忽略），并沿径向方向选取板料悬空区域的首层、中间层以及底层单元分别定义为 Path1、Path2、Path3。三条路径上电磁力分布如图 7 所示。Path1 和 Path2 两条路径中的各板料单元均有较为显著的电磁力分布，电磁力最大的区域位于板料预制孔边缘，随半径增加而逐渐减小。Path3 路径中各单元所受电磁力几乎为零，这是因为在高频的电磁转换中，由于趋肤效应^[18]，感应电流集中分布在板料表面，造成板料所受电磁力主要集中在趋肤深度范围内，并从上

表面至下表面呈指数性衰减分布。由文献[18]计算可知本研究中的趋肤深度约为 2.2 mm。因此，电磁力在厚度方向上主要分布在 0~2.2 mm 范围内，而 2.2~3 mm 范围内几乎无电磁力分布。

2.1.2 电磁力边缘积聚效应

由上述分析可知，电磁翻边过程中板料上的电磁力峰值出现在板料边缘，形成了电磁力边缘积聚效应。而平板电磁胀形过程中板料上的电磁力主要集中在圈内外径之间对应的区域，电磁力峰值出现在线圈中部对应的位置^[19]。造成这种电磁力分布的差异性与板料的预制孔有关。电磁翻边过程中，由于预制孔的存在，板料对感应磁场的屏蔽效果减弱，感应磁场将主

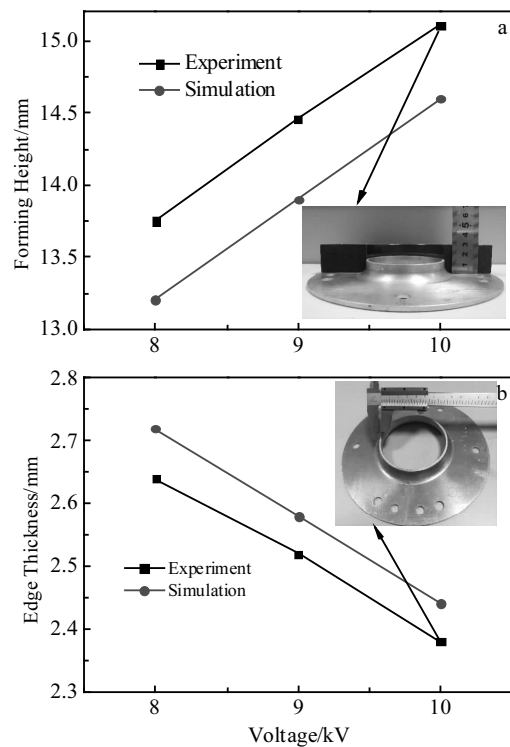


图 5 成形高度及边缘厚度

Fig.5 Forming height (a) and edge thickness (b)

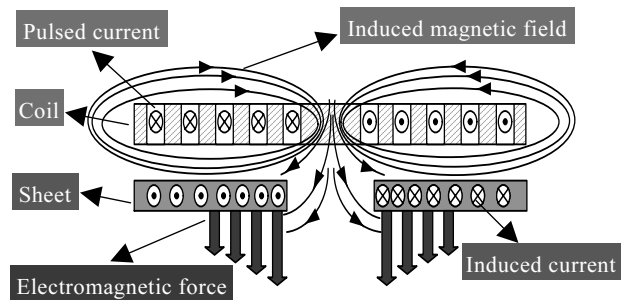


图 6 电磁力作用原理图

Fig.6 Schematic diagram of electromagnetic force

要分布在线圈和板料的间隙间以及预制孔范围内，因而预制孔附近的磁感应强度较大，同时预制孔附近感应电流流通通道变窄导致感应电流密度增大。板料上的电磁力密度与感应电流密度、磁感应强度均成正相关，从而导致预制孔附近电磁力密度升高，形成了电磁力边缘积聚效应。

图 8 所示为预制孔大小对电磁力分布的影响。从中可以看出，放电参数一定时，随着预制孔半径的增大，板料中的感应电流通道越窄，电磁力边缘积聚效应越显著，预制孔边缘处电磁力密度也越大。当板料预制孔半径从 18 mm 扩大至 28 mm 时，板料边缘电磁力密度几乎扩大至原来的 3.5 倍。由于线圈尺寸固定，当预制孔半径增加时，板料上悬空区的各单元电磁力密度仅在预制孔边缘至半径为 40 mm 的范围内有较为显著的升高；而 40~50 mm 范围内的模具圆角所对应的板料单元，电磁力密度几乎无明显变化。从图中还可以发现，当预制孔半径减小至 18 和 20 mm 时，电磁力边缘积聚效应不明显，不足以使电磁力峰值出现在预制孔边缘，电磁力峰值因而由预制孔边缘转移至线圈中径对应的位置，板料上悬空区域的电磁力呈现先增大后减小的分布规律。

电磁翻边过程中，在高频脉冲电流激励下，成形线圈周围产生感应磁场，其轴向分量主要集中在成形线圈内径范围内，径向分量主要集中在线圈内径之间的区域^[20]。线圈几何结构参数通过影响感应磁场的分布而影响板料上电磁力分布。图 9 所示为线圈内径对电磁力分布的影响。可以发现，随着线圈内径的增加（即线圈在板料上的投影区域沿径向从板料悬空区域向受模具限制区域移动），电磁力边缘积聚效应逐渐减弱，预制孔边缘电磁力密度随之减小，而靠近模具圆角的板料区域电磁力密度有所增加。当线圈内径增

加至 54 mm 时，由于电磁力边缘积聚效应不明显，电磁力峰值由板料预制孔边缘转移至板料半径为 40 mm 处，板料上电磁力沿径向呈现先增大后减小的分布规律。这种分布状态与图 8 中板料预制孔半径为 20 mm 时的电磁力分布较为相似。

事实上，在管件和平板件的电磁胀形中，当线圈长度超过管件长度或者线圈面积大于平板件成形面积时，管件和平板件边缘都会出现电磁力聚集的现象。电磁翻边中，板料预制孔径和线圈内径参数通过改变线圈投影面积比（线圈在板料上的投影面积与线圈法向总面积的比值）来影响电磁力边缘积聚效应，进而对板料上电磁力分布产生影响。通过上述研究发现，线圈投影面积比越高，电磁力边缘积聚效应越不明显，预制孔边缘电磁力密度越低。对上述两组数值模拟结果进行计算，当线圈投影面积比低于 95% 时，电磁力峰值出现在预制孔边缘并沿径向递减分布；当线圈投影面积比高于 95% 时，由于电磁力边缘积聚效应不明

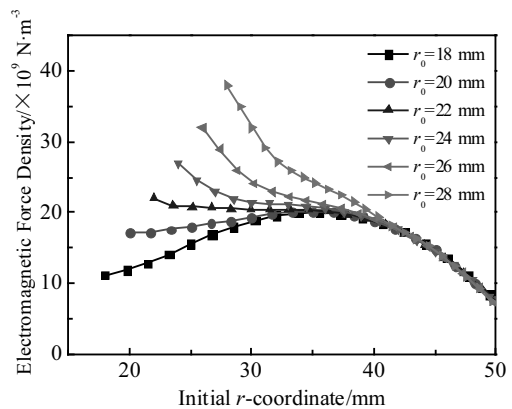


图 8 预制孔半径对电磁力分布的影响

Fig.8 Influence of precast hole radius on electromagnetic force distribution

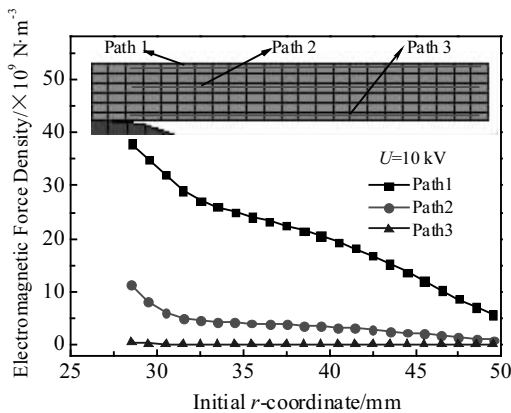


图 7 板料悬空区的电磁力分布

Fig.7 Electromagnetic force distribution in noncontact region of sheet metal

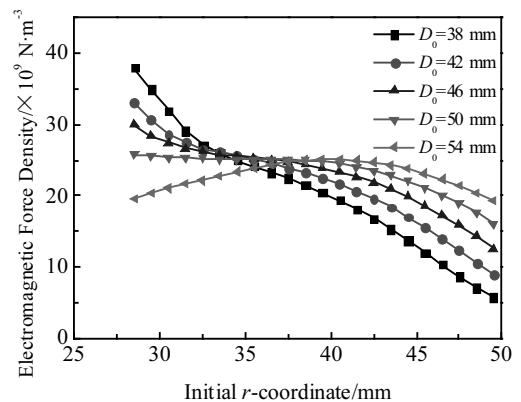


图 9 成形线圈内径对电磁力分布的影响

Fig.9 Influence of inner diameter of forming coil on electromagnetic force distribution

显，电磁力峰值不再出现在预制孔边缘，电磁力沿径向呈先增大后减小的分布状态。因此，在设计电磁翻边工艺时，可以通过调整预制孔径或线圈内径来改变线圈投影面积比从而实现不同的电磁力场分布。

2.2 成形质量分析

板料电磁翻边过程中，未受模具限制的悬空区域在电磁力的驱动作用下向模具凹腔内运动，发生塑性变形。在电磁翻边中，预制孔的存在导致变形区域中的电磁力分布复杂，不同的电磁力分布会导致成形结果的多样性。因此，为考察电磁力分布对板料翻边结果的影响，对预制孔半径为 28 mm 的板料电磁翻边展开研究，通过改变线圈内径（分别选取 D_0 为 38 和 50 mm）实现不同的电磁力场分布。如图 9 所示，当线圈内径为 38 mm 时，电磁力从预制孔边缘沿径向递减分布；线圈内径为 50 mm 时，电磁力分布相对较均匀。

图 10 所示为两组不同电磁力分布条件下，板料翻边成形后的成形高度以及边缘厚度分布。为方便讨论，后文将以 A、B 分别表示两组电磁翻边后的成形件。从图中可以发现，相对于成形件 A 而言，成形件 B 的成形高度以及边缘厚度均有所增加，在板料翻边工艺中，成形件获得较高的成形高度以及较小的边缘减薄量是高质量的体现。一般而言，在电磁翻边过程中，当板料预制孔一定时，成形高度越高，板料边缘减薄量将越大，板料边缘厚度将越小。然而本研究中的成形件 B 在成形高度增加的同时却出现了边缘减薄量减小的现象。为了探究在不同电磁力分布下成形件 A、B 产生差异的原因，揭示电磁力分布对电磁翻边成形质量的影响，后续将从成形件径向厚度分布、板料单元变形速度、单元应变分布以及应力历史等几个方面进行深入讨论。

图 11 所示为成形件 A、B 的径向厚度分布，依据成形件与模具贴合位置的几何特征，可将成形件划分为直壁区、圆角区以及法兰区。电磁翻边过程中，板料悬空区的运动伴随着预制孔的扩大，成形后预制孔边缘减薄最严重，厚度最小。可以看出，成形件 B 的预制孔边缘减薄量小于成形件 A 对应的区域，而圆角区的减薄量却大于成形件 A 对应的区域。由于模具的限制，法兰区只在板料悬空区域变形的影响下产生了微弱的减薄，对整个变形结果的影响较小。两种不同电磁力分布下板料成形结果的差异主要表现在预制孔边缘以及圆角区。电磁力较为均匀地分布时，成形过程中板料的圆角区材料塑性流动行为更显著，材料能更多地流入直壁区，从而提升了板料的成形高度，并能有效抑制板料边缘处的减薄。这有助于充分利用电磁翻边过程中板料的塑性变形能力，降低极限翻边系数。

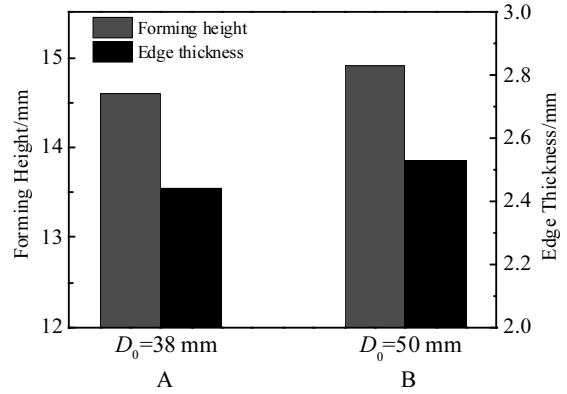


图 10 成形高度及边缘厚度分布

Fig.10 Distribution of forming height and edge thickness

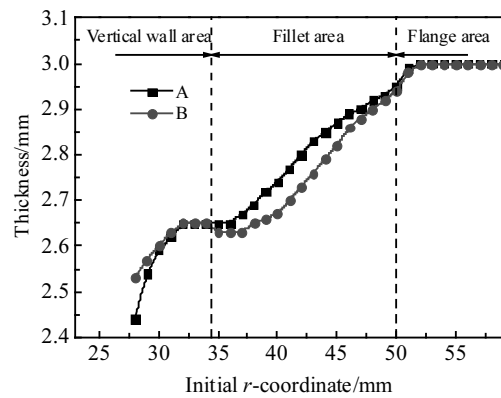


图 11 成形件的径向厚度分布

Fig.11 Distribution of thickness of workpieces along radial direction

电磁成形是一种瞬时的高速成形，其成形速度高达数百米每秒。电磁翻边过程中，板料变形区各单元由于几何位置以及所受电磁力的差异，其变形速度并不一致。因此，成形过程中板料单元的速度场分布对成形结果有重要影响。对两种电磁力分布条件下成形的翻边件，沿径向分别选取 1、2、3、4 号特征单元，其中 1 号单元位于直壁区边缘，2 号单元位于直壁区与圆角区的过渡区域，3 号单元位于圆角区中部，4 号单元位于圆角区顶部。特征单元的速度随时间变化曲线如图 12 所示。成形前期，板料上各单元速度在电磁力驱动下迅速上升，悬空区向模具凹腔内运动并发生塑性变形。随着速度的上升，板料的位移增加，板料与线圈之间的距离增加，电磁力的影响逐渐减弱，随后板料在惯性作用下继续变形，单元速度逐渐减小。当板料边缘与模具贴合时，由于碰撞，单元速度发生瞬时改变，并在一段时间内小范围波动直到降为零。整个成形过程在数百微秒内完成。

电磁力实际上是以冲量的形式作用于板料，并转

化为板料的动量，因而在电磁翻边成形过程中，板料的变形是由动能转化为塑性变形能。电磁力越大，板料运动速度越高，成形件 A 的边缘单元所受电磁力高于成形件 B 的边缘单元，因而其单元速度较高。但成形件 B 电磁翻边时电磁力分布较均匀，其单元速度分布相对于成形件 A 而言较均匀。电磁翻边是板料悬空区沿模具圆角至直壁依次贴模的过程，单元运动速度将影响贴模时间。从图 12 中可以看出，成形件 A 的直壁贴模时间较短，在成形时间为 154 μs 时完成贴模；成形件 B 由于边缘单元速度小，直壁贴模时间有所延迟，在成形时间为 164 μs 时完成贴模。圆角区情况恰恰相反，成形件 B 由于圆角区单元速度领先于成形件 A 对应的区域单元，因而其圆角区贴模时间缩短。成形过程中已贴模的区域将受到未贴模区域的拉拽作用。成形件 B 的圆角区贴模较快而直壁区贴模较慢，已贴模的圆角区在未贴模的直壁区的拉拽作用下继续发生形变，圆角区材料能持续向直壁区内流动。

沿成形件径向取首层单元，得到板料电磁翻边后的主应变分布如图 13 所示。成形件 A、B 的主应变分布规律一致，电磁力的不同分布不影响成形件的区域应变状态，直壁区主要处于单向拉伸和双向拉伸状态，圆角区主要处于平面应变状态。不同的是，由于贴模时间的差异，成形件 B 的圆角区在电磁翻边过程中受到直壁区较大的拉拽作用，区域特征单元由此产生附加正应力，造成圆角区单元径向拉应力增加，直壁区单元径向拉应力减小（如图 14 所示，其中 4 号单元位于直壁区，16 号单元位于圆角区）。从特征单元的应力历史曲线（图 14）中还可以看出，单元径向应力在成形过程中持续上升，当区域贴模后，单元径向应力随之下落。成形件 A 的直壁区由于贴模速度过大，在与模具发生剧烈的碰撞后其径向应力在一段时间内产生了较大的波动，而剧烈的碰撞对成形件的贴模性能

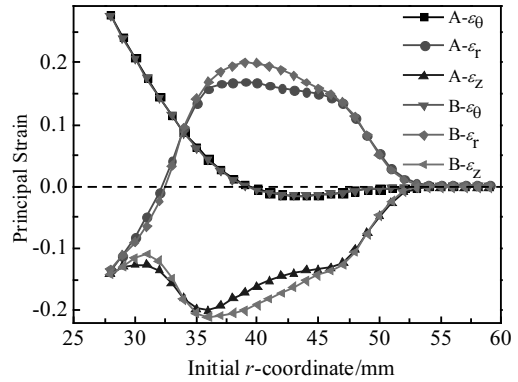


图 13 成形件的主应变分布

Fig.13 Principal strain distribution of workpieces

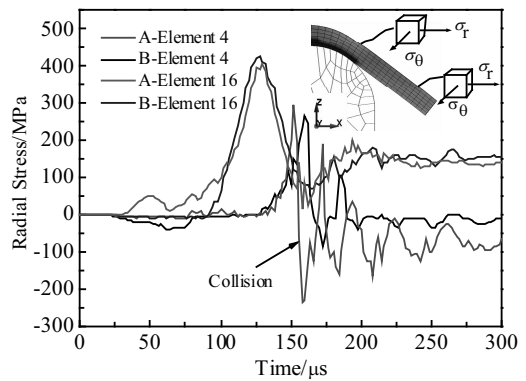


图 14 特征单元的径向应力历史

Fig.14 Radial stress history of characteristic elements

会造成不利影响。因此，基于上述分析可知，均匀化的电磁力改善了特征区域的径向拉应力分布，从而使圆角区产生更大的径向拉应变和轴向压应变，直壁区产生更小的轴向压应变。在成形结果上表现为圆角区更大的拉伸与材料塑性流动，直壁区更小的厚度减薄量，从而成形件能获得更高的成形高度，同时边缘厚度减薄更小。

3 结 论

1) 铝合金板料电磁翻边中，预制孔的存在使板料对感应磁场的屏蔽效果减弱，感应电流的流通通道变窄，预制孔附近感应电流密度和磁感应强度集中，形成了电磁力边缘积聚效应。

2) 板料预制孔径与成形线圈内径通过改变线圈投影面积比对电磁力分布产生影响。随着线圈投影面积比的减小，电磁力边缘积聚效应更加显著，板料预制孔边缘电磁力密度增加。电磁翻边工艺设计时，可通过改变线圈投影面积比，使板料悬空区获得不同的电磁力场分布。

3) 电磁力通过影响板料悬空区的运动速度，对特

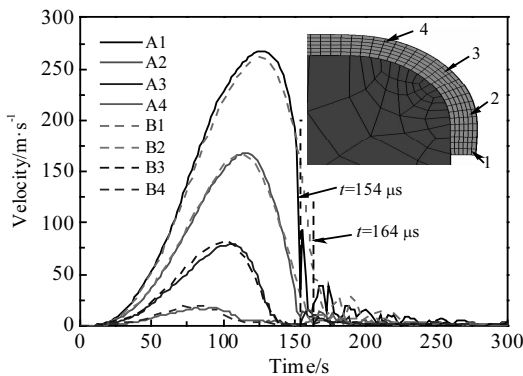


图 12 特征单元的速度分布

Fig.12 Velocity distribution of characteristic elements

征区域贴模时间产生影响, 已贴模的区域在未贴模区域的拉拽作用下持续发生材料塑性流动; 电磁力分布较均匀时, 圆角区材料流动更显著, 成形能获得更高的成形高度与更小的边缘减薄率, 变形区厚度分布较均匀, 成形质量更佳。

参考文献 References

- [1] Kaibyshev R, Sitdikov O, Mazurina I *et al.* *Materials Science and Engineering*[J], 2002, 334(1): 104
- [2] Wang Guojun(王国军), Wang Zhutang(王祝堂). *Light Alloy Fabrication Technology*(轻合金加工技术)[J], 2017, 45(11): 1
- [3] Zhang Wenzhong(张文忠), Chen Hao(陈浩), Dong Zhanguo(董占国) *et al.* *Aerospace Manufacturing Technology*(航天制造技术)[J], 2009, 4: 5,16
- [4] Kim H S, Koç M. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2008, 204: 370
- [5] Huang Y M. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2007, 34: 641
- [6] Psyk V, Risch D, Kinsey B L *et al.* *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2011, 211: 787
- [7] Seth M, Vohnout V J, Daehn G S. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2005, 168(3): 390
- [8] Chen Xiaowei(陈晓伟), Wang Wenping(王文平), Wan Min(万敏) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2015, 44(2): 514
- [9] Ma H, Huang L, Li J *et al.* *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2018, 96(1-4): 359
- [10] Liu Dahai(刘大海). *Thesis for Doctorate*(博士论文)[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010
- [11] Su H, Huang L, Li J *et al.* *International Journal of Machine Tools and Manufacture*[J], 2018, 124: 99
- [12] Yu H, Zheng Q, Wang S *et al.* *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2018, 257: 54
- [13] Xu D, Liu X, Fang K *et al.* *Journal of Applied Physics*[J], 2010, 107(12): 299
- [14] Huang Liang(黄亮), Luo Wenyong(骆文勇), Liu Xianlong(刘贤龙) *et al.* *Journal of Mechanical Engineering*(机械工程学报)[J], 2013, 49(24): 24
- [15] Fang J, Mo J, Cui X *et al.* *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2016, 238: 395
- [16] Cowper G R, Symonds P S. *Small Business Economics*[J], 1957, 31(03): 235
- [17] Luo W, Huang L, Li J *et al.* *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2014, 214(11): 2811
- [18] Chu Hongyan(初红艳), Fei Renyuan(费仁元), Lu Xin(陆辛) *et al.* *Journal of Mechanical Engineering*(机械工程学报)[J], 2003, 39(3): 62
- [19] Huang Shangyu(黄尚宇), Chang Zhihua(常志华), Wang Lifeng(王立峰) *et al.* *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 1998, 8(3): 441
- [20] Paese E, Geier M, Homrich R P *et al.* *Applied Mathematical Modelling*[J], 2015, 39(1): 309

Electromagnetic Force Distribution and Its Effect on the Forming Quality for Numerical Simulation Study of Electromagnetic Flanging of Sheet Metal

Huang Pan¹, Huang Liang^{1,2}, Su Hongliang¹, Ma Fei³, Li Jianjun¹

(1. State Key Laboratory of Materials Processing and Die & Mould Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

(2. State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University, Changsha 410082, China)

(3. Changzheng Machinery Factory, China Aerospace Science and Technology Corporation, Chengdu 610100, China)

Abstract: Based on electromagnetic flanging process of aluminum alloy sheet metal, numerical simulation was conducted to investigate the distribution characteristics of the electromagnetic force and the influence of geometry parameters on the electromagnetic force distribution, and then the influence of the electromagnetic force distribution on the forming quality of workpieces was revealed. The results show that in the process of electromagnetic flanging of aluminum alloy sheet metal, the marginal accumulation effect of the electromagnetic force is produced due to the existence of the precast hole. The aperture of the sheet metal and the inner diameter of the forming coil can affect the distribution of electromagnetic force by changing the ratio of the projection area to the coil area. With the decrease of the ratio of the projection area to the coil area, the marginal accumulation effect of the electromagnetic force becomes more prominent, and the electromagnetic force density of the hole edge increases. Materials of the corner area flow more significantly under the circumstance of the uniform electromagnetic force distribution; meanwhile higher forming height and smaller edge reduction rate can be obtained after forming, which means more uniform thickness distribution of the deformation area and better forming quality of workpiece.

Key words: electromagnetic flanging; electromagnetic force; marginal accumulation effect; forming quality

Corresponding author: Huang Liang, Ph. D., Associate Professor, State Key Laboratory of Materials Processing and Die & Mould Technology, School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, P. R. China, Tel: 0086-27-87543490, E-mail: huangliang@hust.edu.cn