

AZ31 镁合金薄板热油恒温成形数值模拟与 实验研究

余 犇¹, 王冬晓¹, 刘 禹², 李建平¹

(1. 东北大学 轧制技术及连轧自动化国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110819;

2. 沈阳理工大学 材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 利用有限元模拟和成形实验相结合的方式, 研究 AZ31 镁合金的成形性能, 基于 Dynaform 模拟软件和热油恒温成形设备, 探究出一种适合镁合金的热成形工艺, 并对成形件显微组织进行分析. 研究表明, 通过调整薄板尺寸、模具 R 角、压边力及摩擦系数等工艺参数, 以降低成形件的底部减薄率, 减少破裂倾向, 提高镁合金的成形性能; 成形温度为 200 °C, 模具 R 角为 16 mm, 薄板直径为 80 mm, 并调整合适压边力和摩擦系数, 可获得最佳的工艺窗口; 靠近成形件底部, 晶粒及第二相尺寸逐渐减小并趋于均匀化.

关键词: AZ31 镁合金; 热油恒温成形; 工艺参数; 减薄率; 成形性能

中图分类号: TG 394 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2024)02-0179-08

Numerical Simulation and Experimental Study on Hot Oil Thermostatic Temperature Forming of AZ31 Magnesium Alloy Sheet

YU Ben¹, WANG Dong-xiao¹, LIU Yu², LI Jian-ping¹

(1. State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China;

2. College of Materials Science and Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110819, China.

Corresponding author: LI Jian-ping, E-mail: ljp@mail.neu.edu.cn)

Abstract: The formability of AZ31 magnesium alloy was studied by finite element simulation and forming experiment. It's based on Dynaform simulation software and hot oil thermostatic forming equipment to explore a hot forming process which is suitable for magnesium alloy, and to analyze the microstructure of the formed parts. The results showed that by adjusting the process parameters such as the plate size, die R angle, blank holder force and friction coefficient, the bottom thinning rate of the formed part and the fracture tendency can be reduced, and the forming performance of magnesium alloy can be improved; and when the forming temperature is 200 °C, the die R angle is 16 mm, the plate diameter is 80 mm, the appropriate blank holder force and friction coefficient are adjusted, it can obtain the best process window. Near the bottom of the formed parts, the grain size and the second phase size gradually decrease and tend to be uniform.

Key words: AZ31 magnesium; hot oil thermostatic forming equipment; process parameter; thinning rate; forming performance

镁合金密度较小, 比强度较高, 减振性能良好, 被称为 21 世纪最具发展前途的金属材料, 广泛应用于多个领域^[1-2], 具有很大的应用潜力. 但是镁

合金属于密排六方结构, 在室温下滑移系开动较少, 很难发生塑性变形, 这也大大限制了其使用范围. 而随着温度的升高, 镁合金非基面滑移被激

收稿日期: 2022-10-17

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB0304100).

作者简介: 余 犇(1997-), 男, 安徽黄山人, 东北大学硕士研究生; 李建平(1958-), 男, 吉林长春人, 东北大学教授, 博士生导师.

活,塑性增加,成形性能显著提升,并利用塑性加工工艺可得到强度高、延展性好的成形件^[3-5]. 目前镁合金成形工艺领域的研究已取得了初步的研究成果,其中以拉深工艺最具代表性,应用也较广. 范立坤等^[6]通过 AZ31 镁合金板材在等温条件下进行拉深成形,发现在精确控制润滑条件及压边力的条件下能够进行良好的拉深成形. Altan 等^[7]将热油作为传力及传热的介质进行液压成形,是一种较为先进的成形模式,相比于电加热,能有效改善镁合金板料在热成形过程中的氧化. Wang 等^[8]研究了控制上模温度对 AZ31 镁合金板材的冲压成形性能的影响,研究发现,由于凸模温度场的变化,使得板材局部组织发生变化,最终导致产生不同的断裂位置,对成形深度影响较大. 以上均利用不同的成形方式对镁合金的成形性能展开研究,但都未解决镁合金热成形过程中模具与板材温度一致性的问题,使得板材组织发生局部变化,故不能保证镁合金板材的成形性能. 以上研究都围绕实验展开,未利用数值模拟对模具 R 角、板直径、压边力及摩擦系数对成形性能的综合影响进行研究,且对成形件微观组织的分析尚未完成.

本研究通过数值模拟探索模具 R 角、板材尺寸、压边力及摩擦系数对成形的影响,为后期实

验提供参考. 利用热油恒温成形试验机,使模具与薄板都置于箱体热油中,通过油浸模具进行温度和液压力的控制,代替了凸模的作用,让热油直接作用到板材表面,从而完成镁合金薄板试件的拉深成形,保证了镁合金薄板在热成形过程中温度的均匀性,解决了镁合金薄板与模具之间温度梯度的控制难题,开发出一种适合镁合金热成形的新工艺技术.

1 实验流程及实验设备

1.1 实验流程

通过 Solidworks 进行建模,然后利用 Dynaform 模拟软件对相关工艺参数(R 角、薄板直径、压边力及摩擦系数)进行有限元模拟,探究成形变化规律,获得最佳工艺窗口,为后期热油恒温成形实验提供参数指导;并利用成形实验进行相关工艺参数的验证,观察薄板的成形效果是否与前期模拟结果一致,能否满足成形规律;若不满足,则调整参数设置(R 角、板直径、压边力及润滑),再进一步成形;若满足,则得出合理的工艺参数,并对满足要求的成形件进行分析检测,探究其微观组织变化规律,实验流程图见图 1.

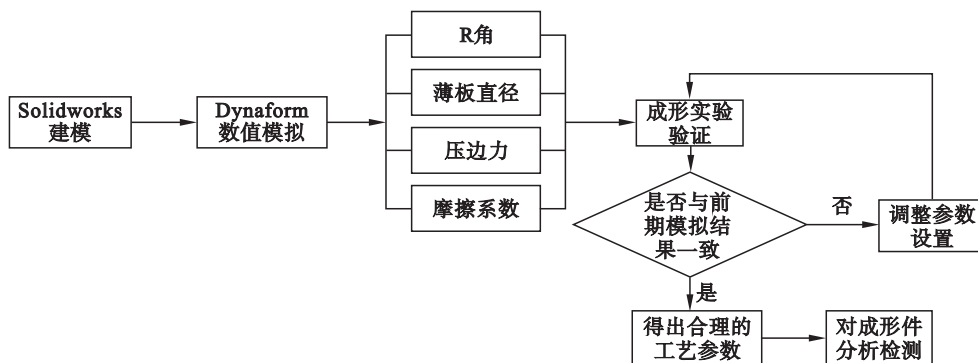


图 1 实验流程示意图

Fig. 1 Experimental process diagram

1.2 实验设备与使用方法

本实验所用设备为热油恒温成形试验机,该设备主要由热油箱体、模具、模具装卸台、手动泵、冷却水箱体以及中控面板组成,如图 2 所示. 操作步骤主要包括试样的放置、合模密封、调压边力、加热、手动加压、卸压、水循环冷却以及取样等. 首先将厚度为 1 mm 的 AZ31 挤压态镁合金薄板试样置于模具内,然后将模具上部分下放合模,上模具置有两道密封圈来实现密封与压边功能;并通过拧动边部的 10 根弹簧实现对压边力的控制,单根弹簧的劲度系数 $k=420.4375 \text{ N/mm}$,再将调整好的模具

放于热油箱体中;通过启动油箱内的加热装置进行加热,该过程持续 30~40 min,温度通过热电偶测得后于控制面板显示,主要记录箱体环境温度与模具内部温度;当二者温度趋于一致时,开始控制手动泵将箱体内热油抽入模具内,由于薄板与上模具的密封圈之间存在一个加载腔,热油以液压的形式直接作用于试样表面,而下模具与试样之间存在一个背压腔,在液压力的作用下,试样被拉入腔内从而完成液压成形实验,下模具腔内深度可调;最后打开水循环冷却系统对油箱进行降温,当箱体温度降至室温后取出成形件.



图2 热油恒温成形设备

Fig. 2 Hot oil thermostatic forming equipment

(a)一箱内设备;(b)一主要设备实体;(c)一控制面板.

2 数值模型的建立与参数的设置

AZ31 镁合金热油恒温成形的有限元模拟模型建立包括压边圈、薄板和下模具,首先利用 Solidworks 绘图软件建立三者的几何模型,如图 3a 所示;然后将其以 IGES 的格式导入 Dynaform 模拟软件中进行有限元模拟,板厚度设置为 1 mm,三者进行自适应性的网格划分,这样有利于薄板在边缘及模具的较小特征位置的网格自动细化,然后检查并修补网格处可能存在的缺陷. 本文将模具、压边圈网格的最大尺寸设置为 5,板料网格的最大尺寸设置为 3,因为在液压成形过程中,薄板是唯一受力并发生变形的对象,网格划分应更为细致,有利于提高有限元模拟数值的精确性^[9],网格模型如图 3b 所示;再对成形过程中薄板及密封圈位置与运动状态进行定义设置并利用 Ls-dyna 求解器进行计算求解;最后对处理的结果进行比较分析,主要包括薄板的成形极限、壁厚变化规律以及边部运动量的分析.

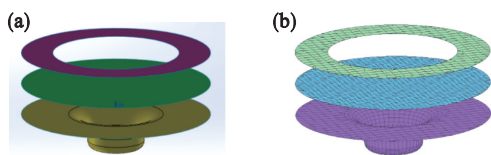


图3 建模与网格划分

Fig. 3 Modeling and mesh subdivision

(a)—Solidworks 建模;(b)—Dynaform 网格划分.

3 结果与分析

3.1 下模具 R 角对成形性能的影响

模具的设计是本实验展开的基础,而下模具 R 角的大小是模具设计的重点,R 角的大小对薄板成形性能有重要影响. 本文设计了 5 种不同 R 角(0, 4, 8, 12 和 16 mm)的模具,并设定成形温度 $t = 200^{\circ}\text{C}$,摩擦系数 $f = 0.05$,液压力

$P = 20 \text{ MPa}$ 及压边力 $F = 33.6 \text{ kN}$. 图 4 给出了不同 R 角条件下的有限元模拟结果,研究表明,模具 R 角越大,板成形性能越好. 由图 4e 的成形极限图可知,当 $R = 0$ 时,其成形深度与边部运动量最小,只有 10 mm 和 0.21 mm,法兰处拉深不足,且 R 角处产生破裂,成形状态不佳;适当增加 R 角至 4 mm 时,成形深度与边部运动量提高至 12 mm 和 0.44 mm;当 $R = 16 \text{ mm}$ 时,薄板获得最佳的成形状态,无破裂倾向发生,其成形深度为 22 mm,边部运动量达到 5.35 mm,两者都比 $R = 0$ 时提升很多. 这是因为当模具 R 角增加时,该位置应力集中逐渐减小,边部运动更易发生,有效减小了随成形深度增加而导致的筒壁减薄过度发生破裂的风险,因此 R 角与底部均未出现破裂倾向,底部减薄率最小,成形状态较好.

为了进一步验证有限元模拟数值的准确性,采用相应参数对厚度为 1 mm 的 AZ31 镁合金板进行热油恒温成形实验,模具深度设为 16.6 mm,便于更直观地观察成形结果的区别,如图 5 所示. 当 $R = 8 \text{ mm}$ 时,成形件底部破裂较为严重且成形件不贴模; $R = 12 \text{ mm}$ 时,成形状态有所改善,件底部只出现轻微裂缝,并未完全贴模;当 R 角增加至 16 mm 时,成形件底部完全贴模,且成形状态良好,无裂缝产生,模拟结果与实验结果趋于一致. 通过模拟与实验结合验证,当薄板直径为 80 mm 时,要想获得良好的成形件,下模具 R 角应为 16 mm.

3.2 薄板尺寸对成形性能的影响

图 6 为模具 R 角 16 mm, $t = 200^{\circ}\text{C}$ 时板直径 D 为 80, 88 及 120 mm 的有限元模拟结果. 图 6a ~ 6c 的成形极限图表明,不同板材试样尺寸对其成形性能有显著的影响. 这是由于在液压成形时,法兰区域会产生径向拉应力,在法兰处由外沿向内逐渐增大;筒底所受径向拉应力最大,由于液压成形中试样中心部分先到达底部,但

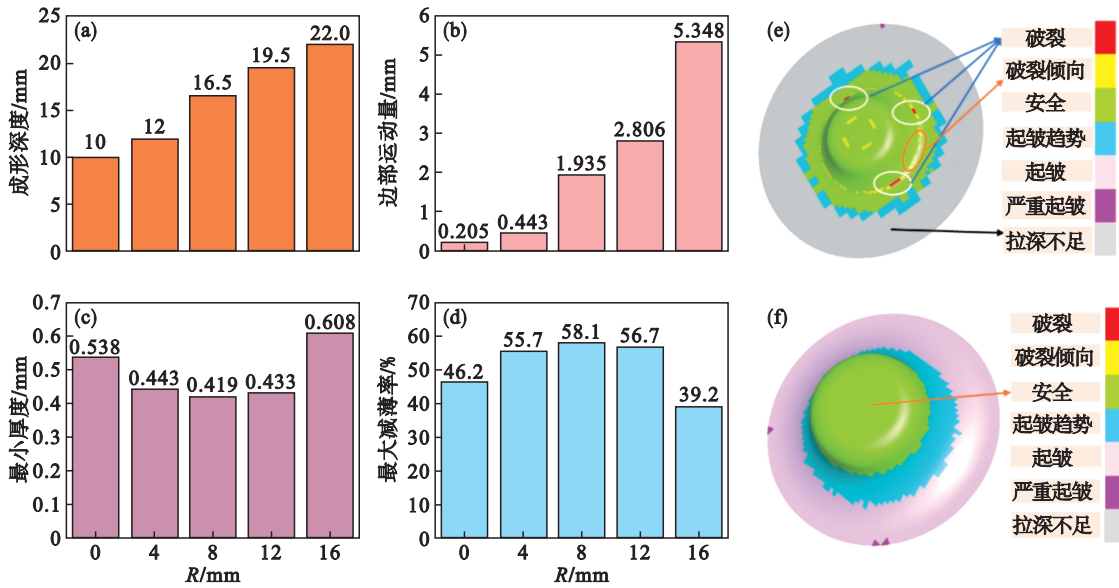


图 4 不同模具 R 角下的薄板热油恒温成形模拟

Fig. 4 Simulation of hot oil thermostatic forming of plates with different die R angles

(a)—成形深度; (b)—边部运动; (c)—最小厚度; (d)—最大减薄率; (e)— $R=0$; (f)— $R=16$ mm.

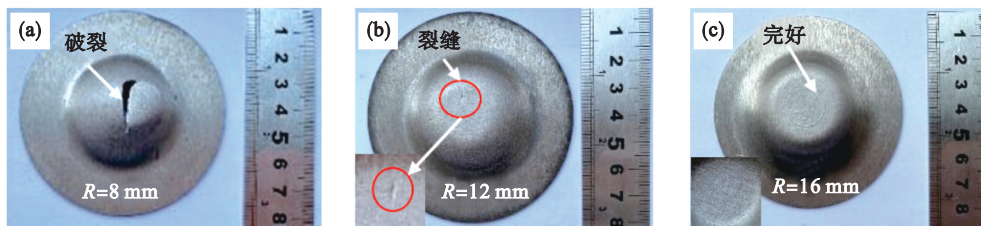


图 5 不同 R 角模具下的薄板热油恒温成形实验

Fig. 5 Hot oil thermostatic forming experiment with different R angle molds

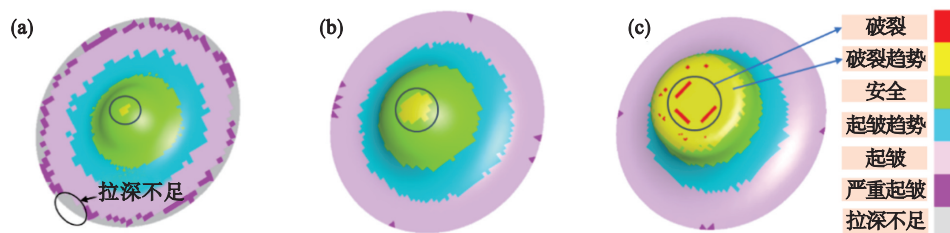
(a)— $R=8$ mm; (b)— $R=12$ mm; (c)— $R=16$ mm.

此时试样还未与底部 R 角接触,在液压力的作用下,试样底部将继续向四周拉深直至与凹模圆角贴合,由于底部的持续减薄,若补料不充分,则极易产生裂纹甚至破裂。

如图 6a, 6d 所示,由于 120 mm 的板径过大,故在边缘处的径向拉应力小,使得薄板边缘区并未充分变形,边部进给量过小,只有 0.601 mm,补料不充分,这使得板材仅靠自身的拉伸变形,并且在底部出现破裂倾向,成形件并未贴合模具;随着板直径减小至 88 mm,如图 6b, 6e 所示,其边界的径向拉应力增大,使得边部运动增加至

2.29 mm,但成形并未完全,在底部出现破裂倾向;如图 6c, 6f 所示,当板直径为 80 mm 时,其边部进给量大大提高,为 4.798 mm,由于模具深度过深,使得底部出现破裂,但相较于前两者,成形效果得到较大改善,成形件完全贴模。

图 7 是直径为 120, 88 及 80 mm 薄板的成形实验结果,对比三者的成形实验,趋势与模拟一致,前两者并未完全贴模,而 80 mm 直径的薄板成形完全,所以热油恒温成形的板最佳直径为 80 mm。



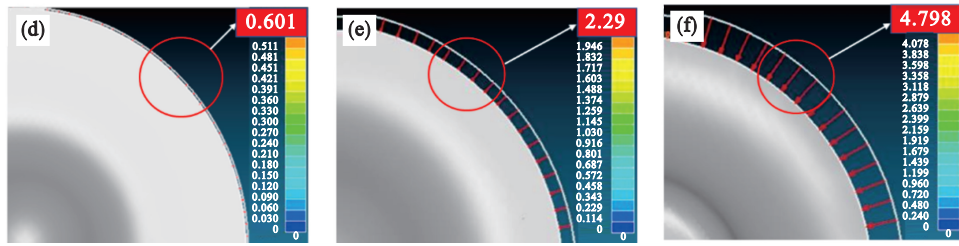


图 6 不同直径薄板的热油恒温成形模拟

Fig. 6 Simulation of hot oil thermostatic forming of plates with different diameters

(a)— $D=120$ mm; (b)— $D=88$ mm; (c)— $D=80$ mm; (d)— $D=120$ mm; (e)— $D=88$ mm; (f)— $D=80$ mm.

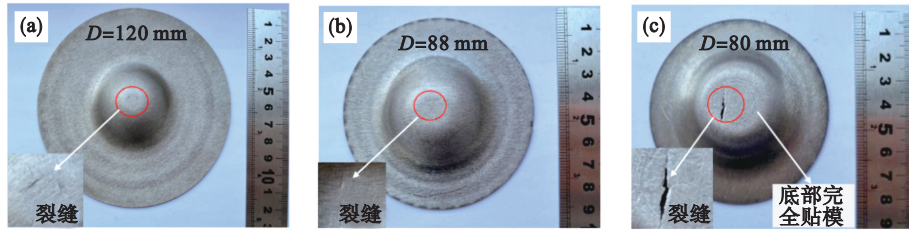


图 7 不同直径薄板的热油恒温成形实验

Fig. 7 Experiment of hot oil thermostatic forming of plates with different diameters

(a)— $D=120$ mm; (b)— $D=88$ mm; (c)— $D=80$ mm.

3.3 压边力对成形性能的影响

图 8 为不同压边力条件下的有限元模拟与实验结果. 研究表明,压边力过大或者过小都会导致

成形失败^[10]. 如图 8g, 8h 所示, 由于压边力 F 过大, 边部补料不充分, 底部出现破裂; 压边力过小则会造成法兰区域起皱从而泄压, 以致成形不完全.

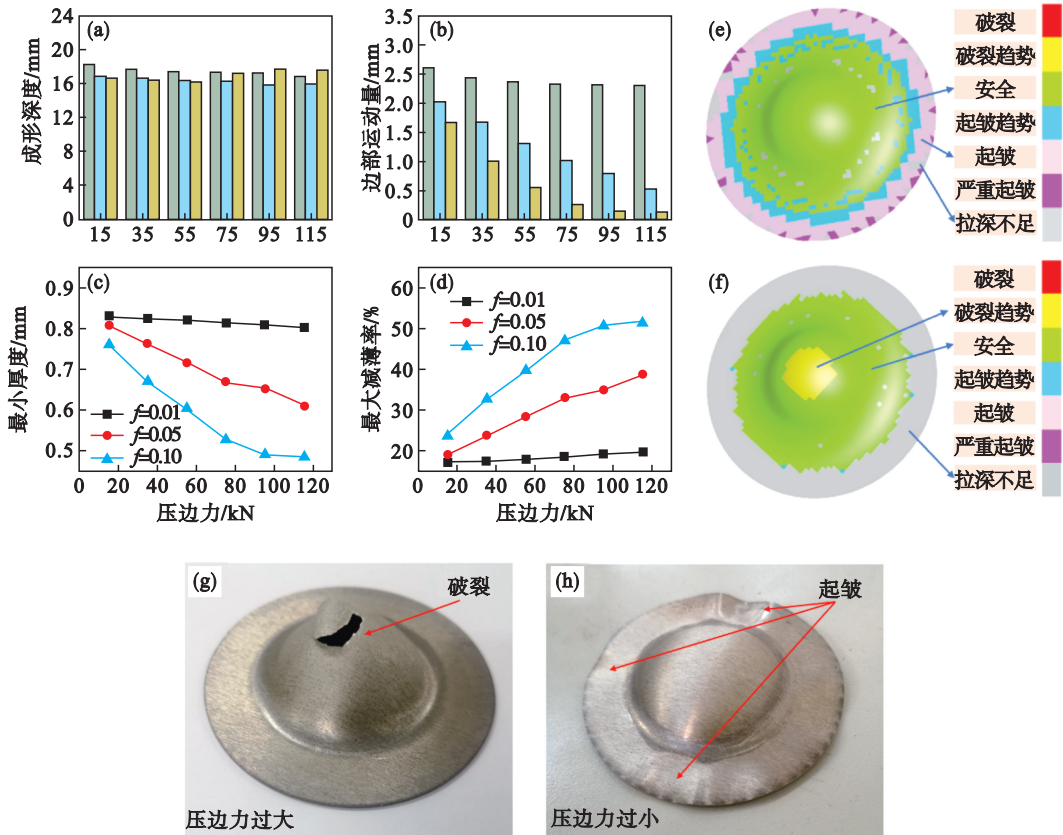


图 8 不同压边力下的薄板热油恒温成形的模拟与实验

Fig. 8 Simulation and experiment of sheet hot oil thermostatic forming of plates with different blank holder force

(a)—成形深度; (b)—边部运动量; (c)—最小厚度; (d)—最大减薄率; (e)— $F=55$ kN; (f)— $F=75$ kN; (g)—压边力过大; (h)—压边力过小.

图 8a~8f 为镁合金薄板在 200℃ 条件下的有限元模拟结果,为考虑压边力与摩擦系数之间的交互作用,设置摩擦系数 f 为 0.01, 0.05 及 0.1, 探究薄板在不同压边力条件下的成形深度、边部运动量、成形件最小厚度以及最大减薄率. 当摩擦系数不变时,随着压边力的增加,其成形深度变化幅度不大,而边部运动量与板的壁厚变化较大,呈现下降趋势. 当 f 为 0.01, 0.05 时,由于摩擦系数较小,随着压边力的增加,板并未发生破裂;当 $f=0.1, F=55$ kN 时,如图 8e 所示,成形件法兰处发生起皱,成形区未发生破裂,而当压边力 F 增加至 75 kN 时,如图 8f 所示,由于压边力过大,使得薄板与模具间的摩擦力增加,成形件法兰区域拉深变形不足,致使边部进给量较小,使得补料不充分,导致底端出现早期破裂倾向. 综上,在 $t=200$ °C 的条件下,当 $f=0.01 \sim 0.1$ 时,压边力为 15~55 kN 才能获得良好的成形效果.

3.4 摩擦系数对成形性能的影响

在成形过程中,薄板受到液压力的作用发生

变形,此时板上、下表面分别受到密封圈与下模具 R 角的作用,势必存在摩擦力阻碍拉深成形. 通过 Dynaform 模拟在成形温度 200 °C, R 角半径 16 mm, 压边力 35 kN 及不同液压力 P 的条件下,摩擦系数 f 对薄板成形性能的影响,模拟结果如图 9a~9d 所示. 当液压力不变时,随着摩擦系数的增加,板成形深度与边部运动量逐渐减小,减薄率逐渐增加. 当 $f=0.1, P=8.8$ MPa 时,其成形深度与边部运动量达到最小值,分别为 16.52 和 1.03 mm,若继续施加液压力,则易在成形件底部中心区出现破裂风险;当 $f=0, P=8.8$ MPa 时,薄板由于所受摩擦力最小,其边部运动量最大,成形区补料较为充足,因此减薄率较小,不易发生破裂. 图 9d 为 $f=0.04$ 时,法兰边缘至成形件中心位置的壁厚分布,可以发现成形件中心区域减薄最为严重.

如图 9f 所示,通过在下模具 R 角处添加二氧化钨润滑粉末可以改善摩擦系数的影响,提高成形深度,减小成形件底部破裂的风险. 图 9e, 9g

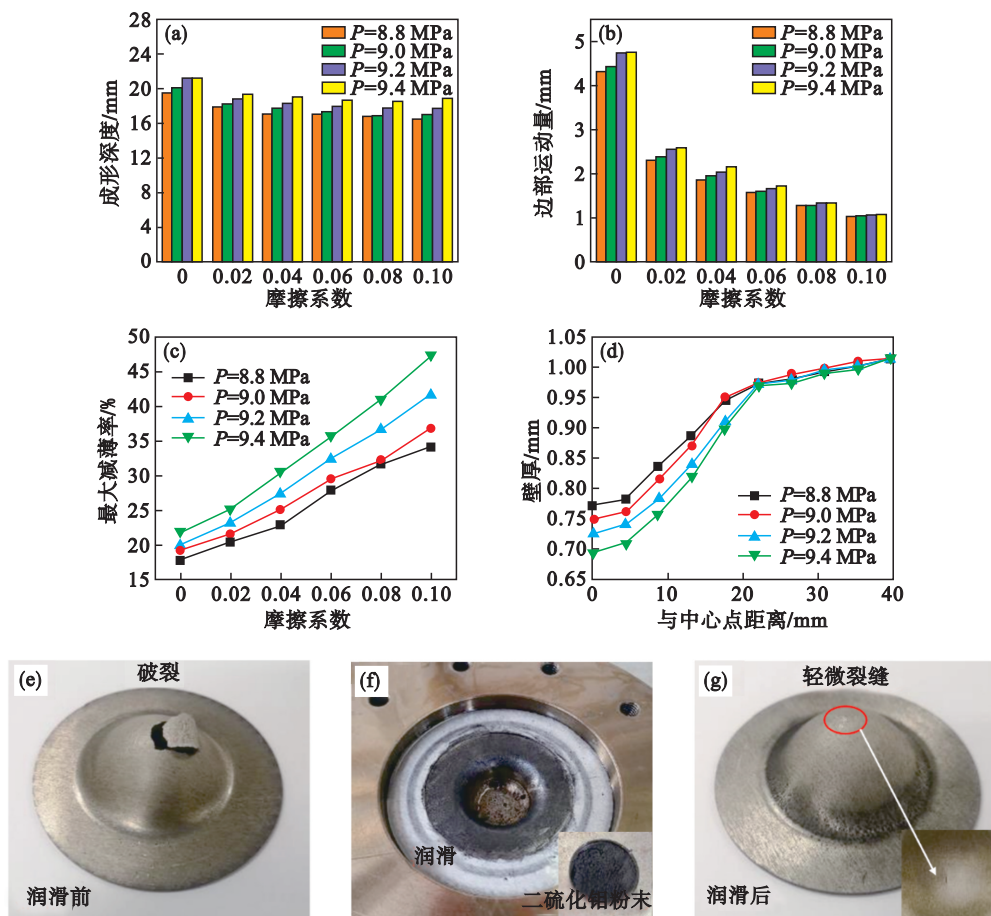


图 9 不同摩擦系数下的薄板热油恒温成形模拟与实验

Fig. 9 Simulation and experiment of hot oil thermostatic forming of plates under different friction coefficients

(a) —成形深度; (b) —边部运动; (c) —最大减薄率; (d) —成形件厚度分布;

(e) —润滑前; (f) —R角处涂抹润滑剂; (g) —润滑后.

分别为润滑前后的成形效果对比,润滑前摩擦系数较大,使得成形区补料少,发生严重破裂,成形深度 $h=17.41$ mm;当使用润滑剂润滑后,摩擦系数减小,成形性能得到很大改善,底部只有轻微裂缝,成形深度达到19.5 mm. 因此,摩擦系数是影响镁合金薄板热油恒温成形的重要因素,摩擦系数越小,板成形深度与边界运动量越大,最大减薄率越小,薄板成形性能越好.

4 微观组织分析

为了观察成形件各区域的组织演变规律,根据液压成形实验结果,选取成形件上R角、侧壁

处及底部成形区进行金相观测. 图10a为AZ31镁合金薄板的原始金相组织,图10b~10d为直径 D 为80 mm的板试样在 $t=200$ °C,模具 $R=16$ mm,液压力 $P=8.5$ MPa条件下所得的成形件各区域的金相显微组织. 利用Image-Pro Plus分析软件测量计算平均晶粒尺寸,计算公式如下:

$$D = \sum_{i=1}^N \sqrt{4A/\pi} / N, \quad (1)$$

$$F_s = N / \sum_{i=1}^N [C^2 / (4\pi A)]. \quad (2)$$

式中: D 为平均直径; F_s 为形状因子; A 为面积; N 为数量; C 为周长.

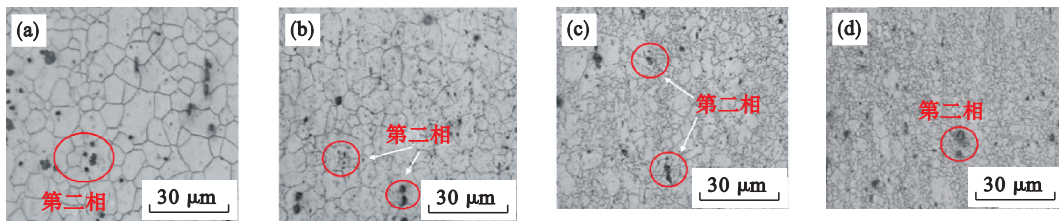


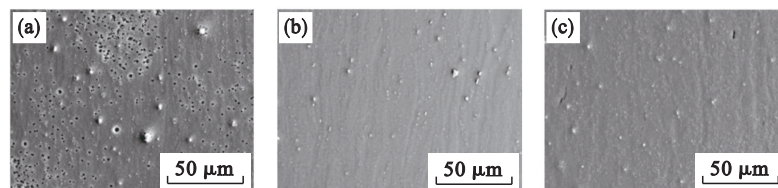
图10 原始状态与 $t=200$ °C, $R=16$ mm, $P=8.5$ MPa条件下成形件的金相显微组织

Fig. 10 Original state and metallographic microstructure of formed parts at $t=200$ °C, $R=16$ mm, $P=8.5$ MPa

(a)—原始试样; (b)—R角; (c)—侧壁; (d)—底部.

薄板原始组织晶粒呈等轴状,平均晶粒尺寸为 11.96 μm ,并在晶界处伴有较大的第二相;经过液压成形实验后,R角处的晶粒组织的平均晶粒尺寸为 9.6 μm ,侧壁处的平均晶粒尺寸为 6.46 μm ,成形区底部平均晶粒尺寸为 1.73 μm ,随着成形的继续,晶粒尺寸逐渐减小并且均匀化. 这是由于变形初期液压力的作用,在R角处变形程度较小,晶粒细化不明显;侧壁位置拉深变形程度更大,晶格扭曲较为严重,晶粒细化进一步加深;当底部贴合模具时,其变形量最大,晶粒细化最为明显. 这是因为镁合金在热成形过程中会发生剧烈的组织演变,其主要机制为动态再结晶^[11],原始的大晶粒逐渐转变为细小的再结晶晶粒,且变形量越大,晶界能越高,动态再结晶后晶粒细化更为完全.

成形件不同区域的微观形貌组织如图11a~11c所示,白色颗粒物为镁合金第二相组织,图11d为R角处的SEM的局部放大照片,其中A,B两点的EDS结果如图11e,11f所示. 第二相的主要元素为Mg,Al及较多的Mn元素,B点为Al-Mn相脱落后留下的基体孔洞,由此可以看出R角处的第二相较多,基体主要为Mg元素及少量的Al,Zn元素,随着成形过程的进行,侧壁区与成形区底部的Al-Mn相尺寸逐渐减小,相较于R角处其含量逐渐减少,分布也更为均匀. 第二相减少能降低对再结晶的抑制作用,提高材料的塑性变形能力^[12]. 由以上可看出在热油恒温条件下,成形件各区域的晶粒尺寸及第二相分布逐渐趋于细小均匀化,有利于提高镁合金薄板的成形性能.



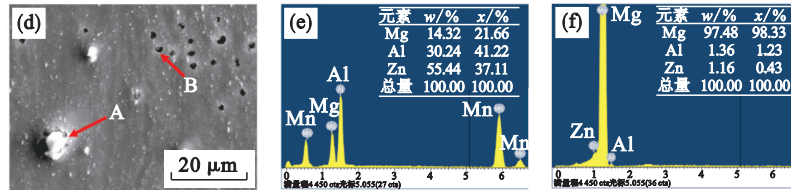


图 11 $t=200\text{ }^{\circ}\text{C}$, $R=16\text{ mm}$, $P=8.5\text{ MPa}$ 条件下成形件的显微组织 SEM 图

Fig. 11 SEM images of formed parts at $t=200\text{ }^{\circ}\text{C}$, $R=16\text{ mm}$, $P=8.5\text{ MPa}$

(a)—R角; (b)—侧壁; (c)—底部; (d)—R角局部放大; (e)—A点 EDS; (f)—B点 EDS.

5 结 论

1) 模具的 R 角越大, 该处所受的应力集中越小, 边部运动更易发生, 补料更为完全. 当模具 R 角增加至 16 mm 时, 薄板实际成形深度最高可达 16.6 mm, 且成形状态良好.

2) 不同规格直径的薄板其成形效果差异较大, 薄板尺寸越小, 成形性能越好, 这与板在成形时的径向拉应力有关. 薄板直径最佳的尺寸为 80 mm, 此时成形最为完全, 成形深度为 17.6 mm.

3) 压边力过小或者过大都会使成形失败, 通过模拟与实验结合得出最佳的压边力值应控制在 15 ~ 55 kN.

4) 摩擦系数越大, 边部运动与成形深度越小, 成形件的最大减薄率增加, 容易导致成形件底部破裂. 降低摩擦系数在提高板成形性能方面的作用尤为突出, 故使用二硫化钼等润滑剂能减小摩擦系数的影响, 提高薄板的成形性能.

5) 通过对成形件 R 角、侧壁及底部的金相观测和 SEM 分析可以看出, 越靠近底部, 晶粒越细小, 分布更为均匀, 其最小平均晶粒尺寸为 $1.73\text{ }\mu\text{m}$, 且 Al-Mn 相逐渐细小, 趋于均匀化.

参考文献:

- [1] 丁文江, 吴玉娟, 彭立明, 等. 高性能镁合金研究及应用的新进展[J]. 中国材料进展, 2010, 29(8): 37-45. (Ding Wen-jiang, Wu Yu-juan, Peng Li-ming, et al. Research and application development of advanced magnesium alloys [J]. *Materials China*, 2010, 29(8): 37-45.)
- [2] Aghion E, Bronfin B. Magnesium alloys development towards the 21st century [J]. *Materials Science Forum*, 2000, 350: 19-30.
- [3] Siegert K, Häussermann M, Lösch B, et al. Recent developments in hydroforming technology [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2000, 98(2): 251-258.
- [4] Tam K J, Vaughan M W, Shen L, et al. Modelling the temperature and texture effects on the deformation mechanisms of magnesium alloy AZ31 [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2020, 182: 105727.
- [5] Xu J R, Zhou Y Q, Cui J J, et al. Experimental study for rubber pad forming process of AZ31 magnesium alloy sheets at warm temperature [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 89 (1): 1079-1087.
- [6] 范立坤, 王荣, 张平, 等. AZ31 镁合金板料等温拉深[J]. 热加工工艺, 2008, 37(3): 71-73. (Fan Li-kun, Wang Rong, Zhang Ping, et al. Isothermal deep drawing process of AZ31 Mg alloy sheet [J]. *Hot Working Technology*, 2008, 37(3): 71-73.)
- [7] Altan T, Kaya S, Aue-u-Ian Y. Forming Al and Mg alloy sheet and tube at elevated temperatures [J]. *Key Engineering Materials*, 2007, 344: 317-324.
- [8] Wang Z M, Gu R Y, Chen S C, et al. Effect of upper-die temperature on the formability of AZ31B magnesium alloy sheet in stamping [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, 257: 180-190.
- [9] 谢江怀. 基于 Dynaform 的汽车门内板工艺参数的分析及优化[D]. 广州: 广东工业大学, 2020. (Xie Jiang-huai. The parameters analysis and optimization of stamping forming for the car's door inner plate based in Dynaform software [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2020.)
- [10] 裴群峰, 李大永, 彭颖红, 等. AZ31 镁合金板料温冲数值模拟与实验研究[J]. 中国有色金属学报, 2006, 16(4): 580-585. (Chang Qun-feng, Li Da-yong, Peng Ying-hong, et al. Numerical simulation and experimental study of warm deep drawing of AZ31 magnesium alloy sheet [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2006, 16(4): 580-585.)
- [11] He Y Y, Bai S W, Fang G. Coupled CA-FE simulation for dynamic recrystallization of magnesium alloy during hot extrusion [J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2022, 10 (3): 833-851.
- [12] 崔晓明, 王争光, 于智磊, 等. Mg-8.07Al-0.53Zn-1.36Nd 轧制镁合金退火过程中的静态沉淀、再结晶及织构演变[J]. 稀有金属材料与工程, 2022, 51(4): 1413-1419. (Cui Xiao-ming, Wang Zheng-guang, Yu Zhi-lei, et al. Static precipitation, recrystallization and texture evolution of Mg-8.07Al-0.53Zn-1.36Nd rolled magnesium alloy during annealing [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2022, 51(4): 1413-1419.)