

基于 DEFORM-3D 的 7075 铝合金筒型件半固态成形有限元模拟及试验验证

牛海侠^{1,2}, 甘国强³, 李萍³, 薛克敏³

(1. 安徽三联学院 机械工程学院, 安徽 合肥 230601)

(2. 国家车辆驾驶安全工程技术研究中心, 安徽 合肥 230031)

(3. 合肥工业大学 材料科学与工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 使用三维模拟软件 DEFORM-3D, 模拟了 7075 铝合金深腔筒型件的半固态成形过程, 分析了坯料温度、模具温度及加载速度对筒型件成形过程的影响。结果表明, 提高模具温度和坯料温度, 能显著降低坯料的变形抗力; 提高模具温度和加载速度可以减少热量损失, 提高半固态坯料的充型能力。最优工艺参数为: 坯料温度 610 °C, 模具温度 350~400 °C, 加载速度 15 mm/s, 此时, 材料最大等效应力值为 69.9 MPa。通过试验验证表明, 在模拟参数下进行半固态成形, 筒型件外形完整, 表面品质高, 组织致密, 无成形缺陷。

关键词: 7075 铝合金; 半固态挤压成形; 有限元模拟; 温度; 加载速度

中图分类号: TG146.21

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2022)05-1697-08

半固态成形是利用材料在半固态温度区间较小的变形抗力, 实现零件的近净成形, 被誉为 21 世纪最具有发展前景的新技术之一。半固态成形能获得晶粒细小、组织致密均匀的零件^[1-4]。近年来, 半固态成形研究发展迅速, 尤其是数值模拟技术, 在铝合金触变成形工艺优化中受到广泛关注。

Yan 等^[5]选取工艺参数: 模具温度 300 °C、挤压速度 0.1、0.2 m/s、正向挤压比 4, 模拟了半固态挤压过程中 AZ61 合金的等效应力、等效应变分布, 并与常规挤压做对比。模拟结果显示: 半固态成形中应力场分布均匀, 材料的最大应力值为 30 MPa; 常规挤压成形时应力场分布不均匀, 且材料最大应力达到 100 MPa, 是半固态成形的 3 倍多。姜巨福^[6]借助 ProCAST 软件模拟了 A356 铝合金件的挤压铸造过程, 结果表明凝固首先从铝熔体与模具的接触面开始, 拐角区中心处最后凝固。随浇注温度和模具温度升高, 凝固时间延长, 材料的最大的等效应力下降。Ragab 等^[7]运用 Procast 模拟了 A357 铝合金控制臂半固态成形时的流场分布和凝固特点, 并对模拟中出现的问题(湍流和凝固缺陷)提出解决方案并优化参数, 对零件的抗疲劳性能进行预测和分析。半固态成形过程是一个涉及

温度场、应力场、应变场以及速度场等多物理场演变的复杂过程^[8]。数值模拟技术代替了传统的物理样机试制, 节约了成本, 能形象生动地再现零件成形的每个阶段。对零件的半固态成形过程进行有限元模拟, 用计算机运算成形过程中各参数的变化, 并预测可能产生的零件缺陷, 有利于零件结构和工艺参数的优化, 这对半固态成形时各参数设计具有重要的指导意义。对高强铝合金件的成形, 半固态挤压工艺具有重要的应用前景。7075 是常见高强度铝合金, 适用于半固态挤压成形^[9,10]。本课题运用 DEFORM-3D 模拟了 7075 铝合金筒型件半固态挤压过程, 并通过试验验证, 为有限元模拟在高强度铝合金半固态触变成形中的应用提供支持。

1 触变挤压前处理过程

1.1 三维实体模型的创建与网格划分

首先进行三维实体模型的创建。为了便于建模, 简化计算, 将模具简化为凸模、凹模、顶杆和坯料 4 个部分, 运用 SolidWorks 软件创建的零件如图 1 所示。坯料的尺寸为 $\Phi 72 \text{ mm} \times 73 \text{ mm}$, 筒型件内腔的拔模斜度为 1°。将创建完成的实体模型装配后以“stl”格式输

收稿日期: 2021-06-17

基金项目: 国家自然科学基金(51575153); 安徽省高校优秀拔尖人才培养资助项目(gxgnfx2019071); 安徽省教育厅高校自然科学重点项目(KJ2019A0892)

作者简介: 牛海侠, 女, 1979 年生, 硕士, 副教授, 安徽三联学院机械工程学院, 安徽 合肥 230601, 电话: 0551-63890187, E-mail: niuhaixia2005@126.com

入到模拟软件 DEFOEM-3D 前处理器中, 如图 1e 所示。采用相对网格法划分坯料网格, 最小网格尺寸为 0.6 mm, 总数量为 70 200。采用绝对网格法划分模具网格, 凸模和凹模的网格数量均为 32 000, 步长设置为 0.2 mm。

1.2 材料模型的建立

金属材料的本构关系是材料的流动应力与变形温度、应变速率和变形程度之间的关系, 它对分析材料在不同条件下的变形行为、成形过程的数值模拟非常重要。

首先采用差示扫描量热分析方法 (differential scanning calorimetry, DSC) 测定 7075 半固态坯料液相体积分数随温度的变化曲线, 并对 DSC 曲线拟合得出液相率变化曲线, 如图 2 所示。

其次对 7075 材料进行了半固态等温压缩试验。图 3 为不同温度、不同应变速率下材料的真应力-真应变曲线。

研究半固态材料的本构关系最常用的是 Arrhenius 方程^[11-13]。

$$\dot{\epsilon} = A_1 \sigma^{n_1} \exp[-Q/(RT)] \quad (\alpha \sigma < 0.8) \quad (1)$$

$$\dot{\epsilon} = A_2 \exp(\beta \sigma) \exp[-Q/(RT)] \quad (\alpha \sigma > 1.2) \quad (2)$$

$$\dot{\epsilon} = A[\sinh(\alpha \sigma)]^n \exp[-Q/(RT)] \quad (\text{All } \alpha \sigma) \quad (3)$$

式中, A 、 A_1 、 A_2 为结构因子, n 、 n_1 为应力指数, α 、 β 为应力水平参数 (MPa^{-1}), 且有 $\alpha = \beta/n_1$, R 为摩尔气体常数, $R=8.314 \text{ J}/(\text{mol K})$, Q 为变形激活能 (J/mol), T 为变形温度 (K), σ 为流动应力 (MPa), $\dot{\epsilon}$ 为应变速率 (s^{-1})。在半固态金属的变形过程中, 材料内部已有液相产生, 其流变行为与普通固态下的变形行为有所不同, 半固态下的材料变形需要考虑液相相对流动应力的影响。因此本模拟将液相率 f_L 引入 Arrhenius 方程, 并进行修正, 用 $S=(1-1.5f_L)^L$ 表征应变速率的增加使流动应力变大的“作用”随着液相率增加而减弱的趋势, 得出 7075 铝合金半固态下的本构方程:

$$(1-1.5f_L)^L \dot{\epsilon} = A[\sinh(\alpha \sigma)]^n \exp[-Q/(RT)] \quad (4)$$

式中, f_L 为液相率且 $f_L < 0.667$, L 为液相率因子。

首先采用指数函数对 480~632 °C 之间的液相率随温度变化的散点进行拟合, 如图 4 所示。得出:

$$f_L = 2.688 \times 10^{-9} \exp(-16.11431 + 0.03916T) \quad (5)$$

在本构方程 (4) 中, 未知数为 A , α , n , Q 和 L 。分别对式 (1)、(2)、(3) 和 (4) 取对数, 得到

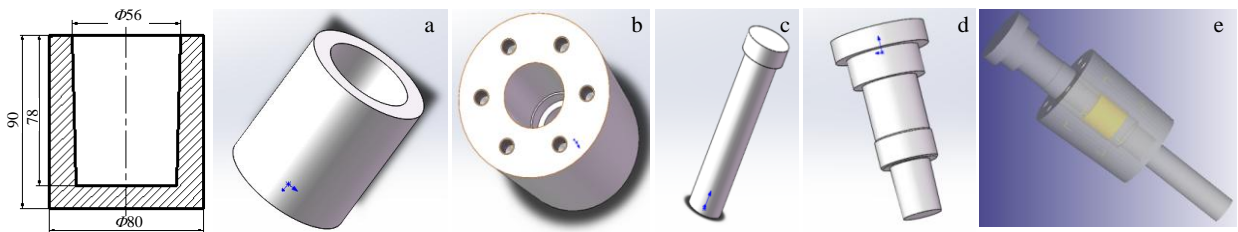


图 1 三维实体模型

Fig.1 3D solid model: (a) schematic diagram of cylinder, (b) die, (c) top bar, (d) punch, and (e) assemble a complete entity model

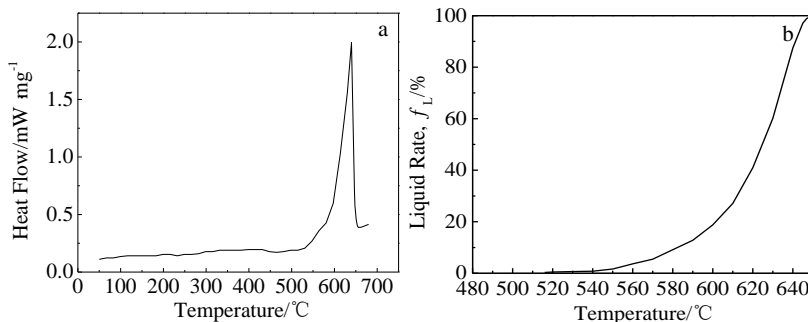


图 2 7075 铝合金棒料的 DSC 曲线和液相率曲线

Fig.2 DSC curve (a) and liquidus rate curve (b) of 7075 aluminum alloy bar

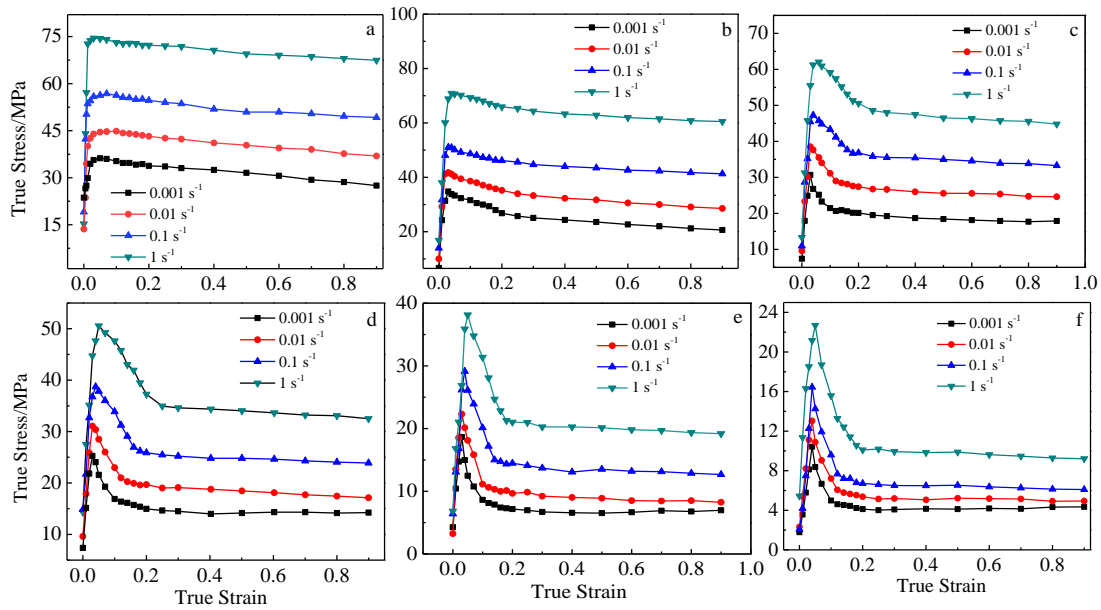


图3 7075 铝合金不同温度下的真应力-真应变曲线

Fig.3 True stress-true strain curves of 7075 aluminum alloy at different temperatures: (a) 490 °C, (b) 510 °C, (c) 540 °C, (d) 560 °C, (e) 580 °C, and (f) 600 °C

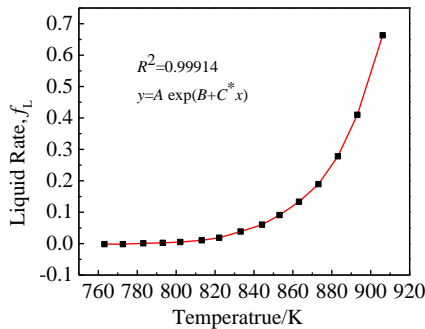


图4 液相率 f_L 和温度 T 的指数函数拟合曲线

Fig.4 Exponential function fitting curve of liquid rate f_L and temperature T

式 (6)、(7)、(8) 和 (9)。由方程 (6)、(7)、(8) 作出不同温度下 $\ln \dot{\epsilon} - \ln \sigma$ 、 $\ln \dot{\epsilon} - \sigma$ 和 $\ln \dot{\epsilon} - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 散点图, 进行线性拟合, 结果如表 1 所示, 求得不同温度下拟合直线的斜率的平均值, 得出 $n_1=9.3025$, $\beta=0.2798$, $\alpha=\beta/n_1=0.03007$; $n=6.5209$ 。

$$\ln \dot{\epsilon} = n_1 \ln \sigma + \ln A_1 - Q/(RT) \quad (6)$$

$$\ln \dot{\epsilon} = \beta \sigma + \ln A_2 - Q/(RT) \quad (7)$$

$$\ln \dot{\epsilon} = n \ln \sinh(\alpha\sigma) + \ln A - Q/(RT) \quad (8)$$

$$n \ln \sinh(\alpha\sigma) - \ln \dot{\epsilon} = -\ln A + Q/(RT) + L \ln(1 - 1.5f_L) \quad (9)$$

在材料半固态区间, 在给定的变形温度和应变速率下均对应着式 (9)。根据 6 个变形温度 (490, 510, 540, 560, 580, 600 °C)、4 个应变速率 (0.001, 0.01, 0.1, 1 s⁻¹)

表 1 7075 铝合金半固态 Arrhenius 方程线性拟合结果

Table 1 Linear fitting results of semi-solid Arrhenius equation for 7075 aluminum alloy

$T/^\circ\text{C}$	$\ln \dot{\epsilon} - \ln \sigma$ n_1	$\ln \dot{\epsilon} - \sigma$ β	$\ln \dot{\epsilon} - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ n
490	9.6433	0.17918	5.4818
510	9.1383	0.17851	5.3856
540	9.7470	0.21368	6.2179
560	10.164	0.27413	7.3190
580	10.416	0.36400	8.4098
600	6.7068	0.46857	6.3094

得到 24 个方程, 求得 $A=3.1992 \times 10^7$, $Q=166.16 \text{ kJ/mol}$, $L=22.93$ 。将所求参数代入式 (4) 得到式 (10), 将其输入 DEFOEM-3D 前处理器中。

$$(1 - 1.5f_L)^{22.93} \dot{\epsilon} = 3.1992 \times 10^7 [\sinh(0.03007\sigma)]^{6.5209} \exp[-1998.5567/T] \quad (10)$$

在半固态成形中, 最主要的工艺参数有模具温度、加载速度和坯料温度, 保温时间设定为 20 min。设定凸模温度分别为 300, 350, 400 °C, 凹模温度分别为 350, 400, 450 °C。加载速度影响半固态坯料的流动应力, 对成形件内部的组织和成分分布及模具寿命亦有重要影响^[14]。设定加载速度分别为 10, 15, 20 mm/s。半固态成形时坯料温度影响其流动性, 坯料温度设定在 580~615 °C, 具体工艺参数如表 2 所示。

表 2 7075 铝合金半固态触变挤压过程数值模拟工艺参数

Table 2 Numerical simulation parameters of semi-solid thixotropic extrusion process of 7075 aluminum alloy

Serial No.	Billet temperature/°C	Punch temperature/°C	Die temperature/°C	Loading speed/mm s ⁻¹
1	580	350	400	15
2	590	350	400	15
3	600	350	400	15
4	610	350	400	15
5	615	350	400	15
6	610	300	350	15
7	610	350	400	15
8	610	400	450	15
9	610	350	400	10
10	610	350	400	15
11	610	350	400	20

2 模拟结果与分析

2.1 半固态触变挤压成形过程等效应力场分析

图 5 是 7075 铝合金坯料在不同的凸模位移量下筒型件的成形过程。其中,坯料温度 600 °C、凸模温度 350 °C、凹模温度 400 °C、加载速度 15 mm/s。由图看出,筒型件的成形由墩粗变形逐步到筒壁成形、筒顶部成形几个变形阶段。凸模开始接触坯料时,坯料产生墩粗变形,随后产生反挤变形形成筒壁,如图 5a 所示。随着凸模行程的增加,墩粗现象越加显著,同时,坯料中间鼓起部位逐渐与凹模内壁接触,零件的筒壁与内腔部位开始成形,如图 5b、5c 所示。当凸模位移量增加到 47.24 mm 时,鼓起部位在模具的作用下消失,且筒底部贴紧凹模,开始成形,此时筒壁部位也在凸模的挤压作用下成形,

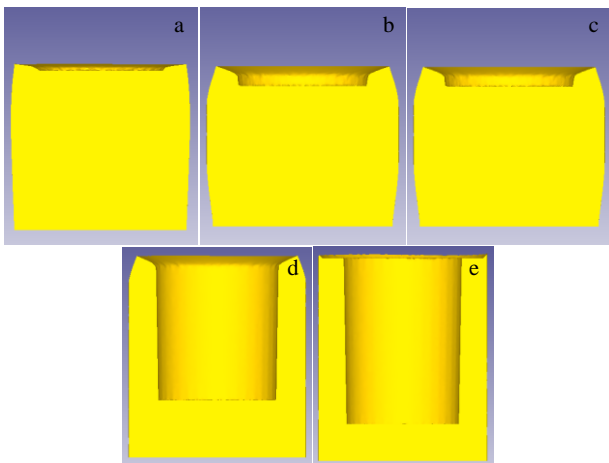


图 5 凸模不同位移量下坯料成形过程

Fig.5 Billet filling process under different displacement of punch: (a) 6 mm, (b) 14.79 mm, (c) 31.56 mm, (d) 47.24 mm, and (e) 55.73 mm

如图 5d 所示。凸模位移量增加到 55.73 mm 时,整个零件完全成形,在顶部出现轻微飞边,如图 5e 所示。

图 6 是坯料在不同的凸模位移量下的等效应力分布。由图 6a 看出,在与凹模接触的筒底部和与凸模接触的零件内腔部位等效应力明显增大,最大值为 18.6 MPa 左右,其余部位都小于 10 MPa。随着凸模位移量的增加,整个零件的等效应力增大,且最大值始终处在与模具直接接触的内凹部位和筒底部,其值由 25.3 MPa 增大到 42.1 MPa,如图 6b、6c、6d 所示。凸模位移量为 55.73 mm 时,筒型件成形完整,此前一直处于两向压应力状态的筒顶部部位开始与凸模接触,在凸模的压力下成形,因此,该部位等效应力最大,为 71.7 MPa,其余部位均在 35 MPa 左右。如图 6e 所示。综合分析知筒型件的半固态触变成形中材料的变形抗力非常小,适合复杂零件的成形。

2.2 半固态触变挤压成形过程速度场分析

图 7 是在坯料温度 600 °C 时,不同凸模位移量下的速度场分布。可以看出,凸模开始接触坯料时,坯料主要向下流动,但内部存在向侧壁流动的速度分量,如图 7a 所示;凸模不断压下坯料的过程中流动情况也在变化。压下量为 14.79 mm 时,流动速率最大的部位在与凸模直接接触的内凹处,不同于自由墩粗,要通过受力来分析,如图 7b 所示;当凸模压下量由 31.56 mm 增大到 47.24 mm 时,在凸模挤压下,侧壁部位的坯料产生反向流动,如由图 7c、7d 所示,同时还可看出,此时筒壁部位的充填流线比较平稳,这对于筒型件的成形是有

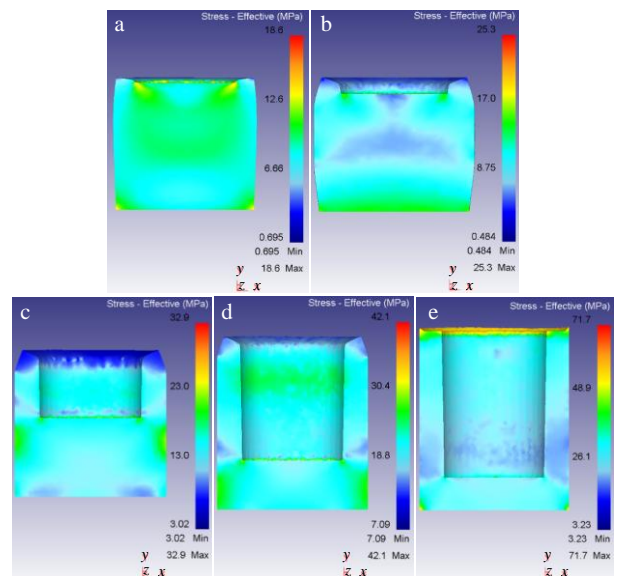


图 6 凸模不同位移量下的等效应力分布

Fig.6 Equivalent stress distribution under different displacement of punch: (a) 6 mm, (b) 14.79 mm, (c) 31.56 mm, (d) 47.24 mm, and (e) 55.73 mm

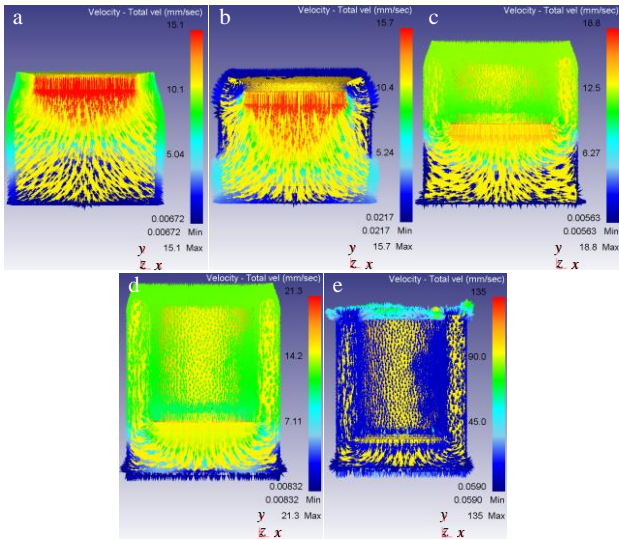


图 7 凸模不同位移量下坯料的速度场分布

Fig.7 Velocity field distribution of billet under different displacement of punch: (a) 6 mm, (b) 14.79 mm, (c) 31.56 mm, (d) 47.24 mm, and (e) 55.73 mm

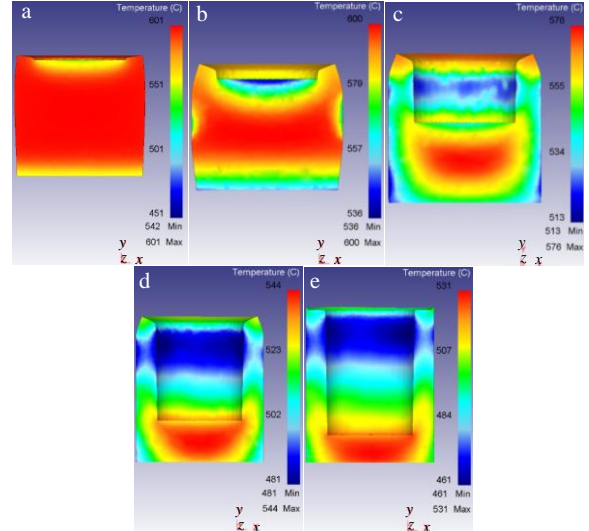


图 8 凸模不同位移量下坯料的温度场分布

Fig.8 Temperature field distribution of billet under different displacement of punch: (a) 6 mm, (b) 14.79 mm, (c) 31.56 mm, (d) 47.24 mm, and (e) 55.73 mm

利的。当凸模的行程达到 55.73 mm 时，零件完整成形，整个坯料的流动速度基本为 0，仅在顶部有部分坯料轻微流动形成飞边，由图 7e 所示。凸模再向下运动，促使该部位组织更为致密。

2.3 半固态触变挤压成形过程温度场分析

坯料温度对半固态成形性能有重要影响。为了充分发挥半固态成形的优势，必须保证坯料处于半固态温度区间，坯料的温度决定了其液相率，从而影响其流动性。因此，模拟半固态成形时坯料温度场分布也非常重要。图 8 是在坯料温度为 600 °C、上模温度为 350 °C、下模温度为 400 °C 时凸模不同位移量下温度场的分布。由图看出，随着凸模位移量的增加，坯料的温度显著下降，尤其是与模具直接接触的部位温度较低，主要是因为模具与坯料之间存在较多的热交换使坯料温度下降。当凸模压下量为 31.56 mm 时，最低温度降为 520 °C 左右，其余部位在 530~576 °C 之间。当凸模压下量为 55.73 mm 时，与凹模接触的筒壁位置温度已降至 460 °C 左右，其余部位的温度基本在 500~530 °C 之间。成形过程中，虽然坯料温度逐渐降低，但绝大部分仍处于 500 °C 以上的半固态温度区间。筒型件成形终了阶段，由于温度降低，坯料固相率较高，材料的变形抗力有所增加。

2.4 坯料温度对触变挤压成形过程的影响

图 9 是在凸模温度 350 °C、凹模温度 400 °C、加载速度 15 mm/s 时不同坯料温度下等效应力的分布。由图可看出，坯料温度由 580 °C 升高到 615 °C，等效应力逐渐降低，最大值由 88.5 MPa 降为 66.9 MPa。这是因为

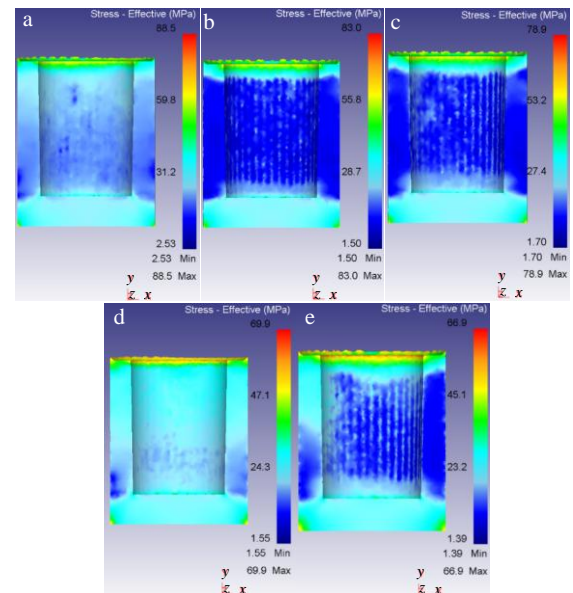


图 9 不同坯料温度下的等效应力分布

Fig.9 Equivalent stress distribution at different billet temperatures: (a) 580 °C, (b) 590 °C, (c) 600 °C, (d) 610 °C, and (e) 615 °C

坯料温度高，液相体积分数增大，坯料流动性好，等效应力值降低。在不同的温度下，坯料的等效应力分布呈现一定的规律：零件顶部等效应力值较大，而侧壁部位值较小。

2.5 模具温度对触变挤压成形过程的影响

图 10 是坯料温度 610 °C，加载速度 15 mm/s 时不同模具温度下等效应力分布。由图看出，模具温度升高，

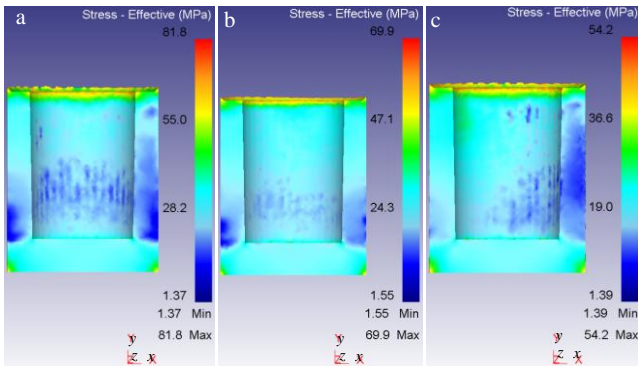


图 10 不同模具温度下的等效应力分布

Fig.10 Equivalent stress distribution at different mold temperatures: (a) punch/300 °C, concave/400 °C; (b) punch/350 °C, concave/400 °C; (c) punch/400 °C, concave/450 °C

坯料的等效应力显著降低，由 81.8 MPa 降到 54.2 MPa。这主要是因为模具温度升高，与模具直接接触的坯料温度上升，液相体积分数增加使得流动性变好，因此坯料的等效应力也较小。由此可知，适当提高模具温度，有利于减小半固态成形时所需的成形力，有助于成形复杂精密零件。但模具温度太高则会造成能源浪费，降低模具寿命。因此，7075 铝合金件成形时选取凸模 350 °C、凹模 400 °C 较为合理。

2.6 加载速度对触变挤压成形过程的影响

图 11 和图 12 是坯料温度 610 °C、凸模温度 350 °C、凹模温度 400 °C 时不同加载速度下等效应力及温度场分布。由图 11 看出，加载速度由 10 mm/s 增加到 20 mm/s 时，等效应力逐渐降低，最高值由 82 MPa 降至 67.8 MPa。这说明，加载速度提高，坯料的变形速率提高，充填性较好，材料的变形抗力减小。材料变形抗力减小能降低成形力，提高零件质量。

由图 12 看出，加载速度提高，坯料的整体温度略有

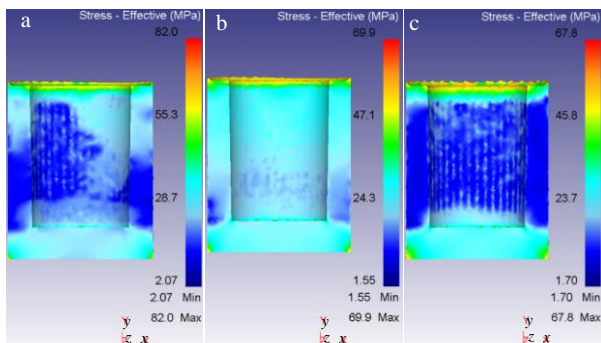


图 11 不同加载速度下的等效应力分布

Fig.11 Equivalent stress distribution at different loading speeds: (a) 10 mm/s, (b) 15 mm/s, and (c) 20 mm/s

升高。在筒型件底部温度最高，为 535 °C 左右；筒侧壁处温度较低，在 460 °C 左右。这主要是因为加载速度较大时，零件成形时间缩短，坯料的温度下降有限。但加载速度太大会导致坯料充型不稳，容易产生喷溅。综合考虑，选定加载速度为 15 mm/s。

2.7 物理实验

由数值模拟结果知，若坯料温度太低，则触变成形时合金的流动性差，零件容易产生缩孔、缩松等问题，同时，材料的变形抗力增加。而坯料温度过高，液相率增加，夹持强度降低，且容易使半固态坯料在成形过程中产生固-液偏析^[15]。综合分析，筒型件的触变成形试验中，选定如下工艺参数：坯料温度 610 °C，加载速度 15 mm/s，凸、凹模温度分别为 350，400 °C。

本实验在 200 t 液压机上进行，液压机能够提供的最大压力为 2000 kN。实验使用模具如图 13 所示，采用电阻加热的方式。将其安装在液压机上，在凹模套上安装加热管，同时在模具的周围包裹上层隔热石棉进行模具保温，上模通过下模的热传导来加热。

图 14 为 7075 铝合金筒型件的宏观形貌及剖切后的

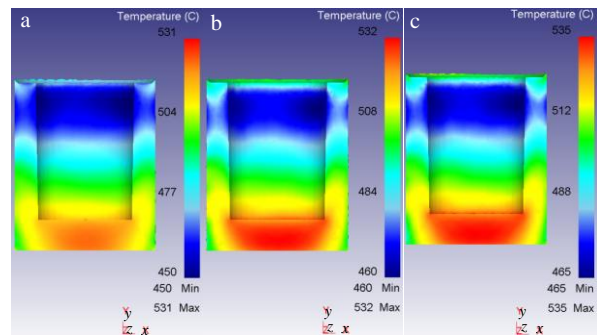
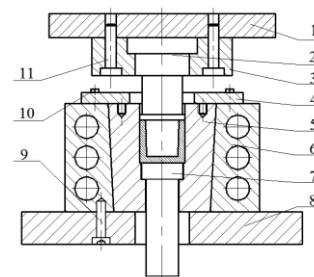


图 12 不同加载速度下的温度场分布

Fig.12 Temperature field distribution under different loading speeds: (a) 10 mm/s, (b) 15 mm/s, and (c) 20 mm/s



1-upper die base; 2-punch; 3-punch retainer; 4-plate; 5-die; 6-die set; 7-apical plate; 8-down die base; 9,11-bolt; 10-screw

图 13 实验模具示意图

Fig.13 Schematic of experimental mold

样貌。由图看出，采用有限元模拟优化后的参数进行半固态触变成形，零件的样貌完整，表面质量较好，内部组织较为致密，无明显成形缺陷。仅在在筒顶部位有轻微飞边产生，这和模拟结果是吻合的。

在筒型件不同部位截取试样，观察其微观组织。截取位置如图 15 所示，其各部位沿挤压方向的微观组织如图 16 所示。由图看出，在筒型件的 A、B、C、D 部位，



图 14 7075 合金半固态触变挤压件宏观形貌和截面剖切后的形貌

Fig.14 Macro and semi-section morphology of semi-solid thixotropic 7075 aluminum alloy part

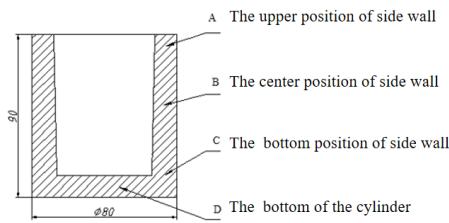


图 15 试样截取位置示意图

Fig.15 Schematic of sample interception position

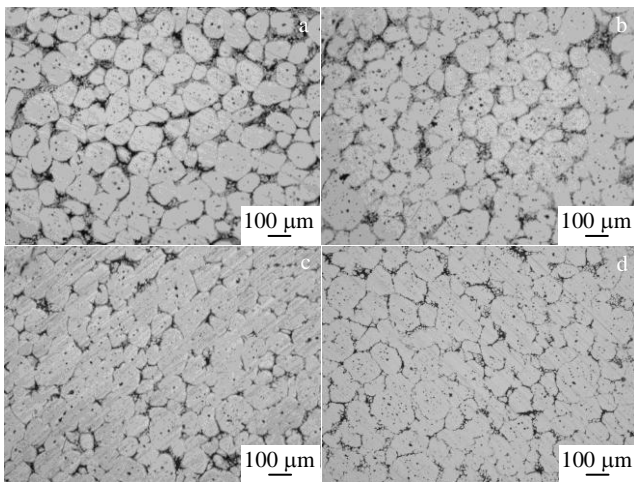


图 16 610 °C 时成形筒型件不同位置的金相组织

Fig.16 Metallographic microstructures of different positions of the cylinder formed at 610 °C: (a) upper position A of side wall, (b) center position B of side wall, (c) bottom position C of side wall, and (d) bottom D of the cylinder

晶粒呈近球形特点，圆整度较高，在侧壁上部 A 位置晶粒呈球状，晶界清晰。侧壁中部 B 处的显微组织由圆整度较好、晶粒较为细小的球状晶粒组成。在侧壁底部 C 位置和筒底部 D 位置，晶粒呈近球状形态，晶界略显模糊，存在一定塑性变形的痕迹。

3 结 论

1) 筒型件触变挤压变形开始阶段，坯料出现明显的墩粗现象，随着凸模位移量的增加，优先成形筒型件的筒壁部位，随后在模具的作用下成形筒底部位，最后，筒顶部位坯料由自由变形转为在模具的限制下快速成形。

2) 半固态触变挤压成形中，等效应力与凸模位移量、坯料温度和模具温度密切相关。凸模的位移量越大，坯料变形越大，材料的等效应力增加；坯料温度越高，液相率增加，材料的变形抗力降低，等效应力减小；提高模具温度有利于材料的充型流动，等效应力减小。

3) 采用有限元模拟优化后的参数进行半固态挤压试验验证：坯料温度 610 °C，凸模温度 350 °C、凹模温度 400 °C，加载速度 15 mm/s，制得的筒型件结构完整，表面质量较高，内部组织致密，无缺陷。

参考文献 References

[1] Wang Yongfei (王永飞), Zhao Shengdun (赵升吨), Fan Xiaoguang (樊晓光) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2020, 49(7): 2517

[2] Guan Renguo(管仁国), Ma Weimin(马伟民). *Theory and Technology of Semi-solid Metal Forming*(金属半固态成形理论与技术)[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2005: 3

[3] Wang Yongfei(王永飞), Zhao Shengdun(赵升吨), Zhang Chenyang(张晨阳). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2017, 46(12): 3875

[4] Wang Yongfei(王永飞), Zhao Shengdun(赵升吨), Fan Shuqin(范淑琴) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2017, 46(10): 2900

[5] Yan Hong, Fu Mingfu, Tao Xuchun et al. *Key Engineering Materials*[J], 2008, 367: 103

[6] Jiang Jufu(姜巨福), Wang Ying(王迎), Xiao Guanfei(肖冠菲) et al. *Special Casting & Nonferrous Alloys*(特种铸造及有色合金)[J], 2020, 40(7): 697

[7] Ragab K A, Bouaicha A, Bouazara M. *Journal of Materials Engineering & Performance*[J], 2017, 26(9): 4450

[8] Poolthong N, Qui P, Nomura H. *Science & Technology of Advanced Materials*[J], 2016, 4(5): 481

[9] Nea G A, Favie R V, Bigo T R et al. *Journal of Materials Processing Techlecal*[J], 2012, 212(7): 1472

- [10] Zhang Jingyu(张靖宇). *Dissertation for Master*(硕士论文)[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2016
- [11] Jia J, Zhang K, Liu L *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2014, 600: 215
- [12] Rokni M R, Zarei-Hanzaki A, Roostaei A A *et al. Materials & Design*[J], 2011, 32(10): 4955
- [13] Zhou M, Lin Y C, Deng J *et al. Materials & Design*[J], 2014, 59: 141
- [14] Chen Gang(陈刚). *Dissertation for Master*(硕士论文)[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013
- [15] Nafisi S, Lashkari O, Ghomashchi R *et al. Acta Materialia*[J], 2006, 54: 3503

Finite Element Simulation and Experimental Verification of Semi-solid Forming of 7075 Aluminum Alloy Cylinder Based on DEFORM-3D

Niu Haixia^{1,2}, Gan Guoqiang³, Li Ping³, Xue Kemin³

(1. School of Mechanical Engineering, Anhui Sanlian University, Hefei 230601, China)

(2. National Engineering Research Center for Vehicle Driving Safety, Hefei 230031, China)

(3. School of Materials Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Using 3D simulation software DEFORM-3D, the semi-solid forming process of 7075 aluminum alloy deep cavity cylinder was simulated, the effects of billet temperature, die temperature and loading speed on the forming process of cylinder were analyzed. The results show that, increasing the die temperature and billet temperature can significantly reduce the deformation resistance of billet during cylinder forming; increasing the mold temperature and loading speed can reduce the heat loss and improve the filling capacity of semi-solid billet. The optimal process parameters are as follows: billet temperature 610 °C, die temperature 350~400 °C, punch loading speed 15 mm/s, at this time, the maximum equivalent stress value of the material is 69.9 MPa. Tests have shown that, semi-solid forming is carried out under optimized process parameters. The shape of the cylinder is complete, the surface quality is high, the structure is compact and there is no forming defect.

Key words: 7075 aluminum alloy; semi-solid extrusion forming; finite element simulation; numerical simulation; temperature; loading speed

Corresponding author: Niu Haixia, Master, Associate Professor, School of Mechanical Engineering, Anhui Sanlian University, Hefei 230601, P. R. China, Tel: 0086-551-63890187, E-mail: niuhaixia2005@126.com