

AlSi7Mg 半固态触变模锻数值模拟及试验验证

董 健¹ 姜巨福¹ 王 迎² 张逸浩¹

(1.哈尔滨工业大学材料科学与工程学院; 2.哈尔滨工业大学机电工程学院)

摘 要 借助 Deform-3D 软件,对 AlSi7Mg 铝合金工件进行半固态触变模锻数值模拟及试验研究。结果表明,坯料的温度随模具速度的升高而升高,工件的成形力随着温度的升高而逐渐降低,参数改变对应变没有产生明显的影响。最佳的工艺参数:模具温度为 450 ℃,坯料温度为 593 ℃,上模速度为 15 mm/s。半固态触变模锻相比于高温固态模锻能够有效地降低成形力,试验工件的显微组织具有明显的半固态组织特征,其屈服强度、抗拉强度和伸长率分别为 98.9 MPa、175.9 MPa 和 6.52%。

关键词 AlSi7Mg 铝合金;半固态模锻;数值模拟;显微组织

中图分类号 TG146.21;TG249.2⁺6 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.06.009

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Numerical Simulation and Experimental Verification of AlSi7Mg Semi-solid Thixotropic Die Forging

Dong Jian¹, Jiang Jufu¹, Wang Ying², Zhang Yihao¹

(1.School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology;
2.School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology)

Abstract: Numerical simulation and experimental investigation on semi-solid thixotropic die forging of AlSi7Mg aluminum alloy workpieces were carried out by Deform-3D software. The results indicate that the temperature of blank is increased with the increase of die speed, and the forming force of workpiece is decreased with the increase of temperature, while parameters have no obvious effect on the strain. The optimized process parameters were obtained as follows: mold temperature of 450 ℃, blank temperature of 593 ℃ and upper mold speed of 15 mm/s. Moreover, semi-solid thixotropic die forging can effectively reduce the forming force compared with high-temperature solid state die forging, and the microstructure of experimental workpiece is significantly characterized by semi-solid microstructure. The yield strength, tensile strength and elongation of the workpiece reach up to 98.9 MPa, 175.9 MPa and 6.52%, respectively.

Key Words: AlSi7Mg Aluminum Alloy, Semi-solid Forging, Numerical Simulation, Microstructure

20 世纪 90 年代, MERTON C F^[1] 发明了半固态加工技术,其包含了触变成形和流变成形^[2],该工艺具有成本低、能耗低和模具寿命长等特点^[3-6]。半固态成形的工件不仅缺陷少,而且成分、组织以及性能均匀,能够实现近净成形^[7-8]。目前,该技术已在交通运输、航空航天和其他工业领域得到应用^[9-12]。

数值模拟在半固态成形中能够对工艺参数优化提供参考^[13-15]。路贵民等^[16]对半固态数值模拟技术进行了综述。NEAG A 等^[17]利用 FORGE 进行半固态流变成形模拟,对缩松、缩孔等常见铸造缺陷进行预测和分

析。YAN H 等^[18]研究了 ZK61 合金高温挤压和半固态触变挤压的数值模拟。ZHANG F 等^[19]研究了流变压铸充型过程的数值模拟及成形缺陷分析。以上研究均证明了数值模拟在半固态成形中的重要作用。

本研究对坯料温度、模具温度以及模具速度对 Al-Si7Mg 合金半固态触变成形工艺的影响进行数值模拟,得到最佳的成形工艺参数,并将固态模锻与半固态触变模锻进行比较,最后采用优化的工艺参数进行半固态触变模锻工艺验证,旨在为数值模拟应用于实际生产提供参考。

收稿日期:2023-03-27
基金项目:国家自然科学基金资助项目(U2241232);国家重点研发计划资助项目(2022YFB3404204)
第一作者简介:董健,男,1997 年出生,博士研究生,哈尔滨(150001),E-mail:22B909131@stu.hit.edu.cn
通信作者:姜巨福,男,1976 年出生,教授,哈尔滨(150001),E-mail:jiangjufu@hit.edu.cn
引用格式:董健,姜巨福,王迎,等. AlSi7Mg 半固态触变模锻数值模拟及试验验证[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(6):768-777.
DONG J, JIANG J F, WANG Y, et al. Numerical simulation and experimental verification of AlSi7Mg semi-solid thixotropic die forging[J].
Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(6):768-777.

1 试验方法

利用 UG 软件绘制出上模、下模和坯料,坯料尺寸为 $\phi 60\text{ mm}\times 37\text{ mm}$ 。图 1 为上模、下模和坯料的 1/4 模型,为了减少计算量,后续将使用 1/2 模型进行模拟。半固态坯料为刚、粘塑性体材料,上、下模为刚体材料。坯料温度分别设定为 581、584、588、593 和 599 $^{\circ}\text{C}$,下模温度分别设定为 250、300、350 和 450 $^{\circ}\text{C}$ 。

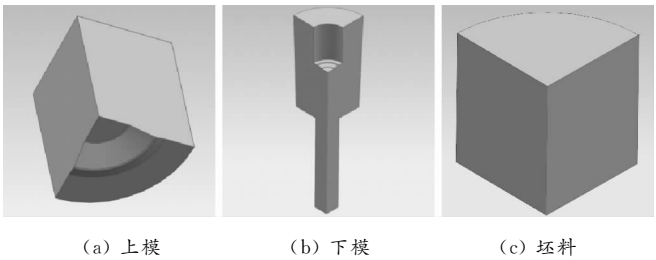


图 1 上、下模及坯料模型图

Fig.1 Schematic diagram of upper and lower die as well as workpieces

半固态坯料的材料采用自定义模型,通过试验得到真应力-真应变关系输入到模型中。上、下模的材料为 AISIH13 钢。坯料划分成 5 万个网格,最小单元长度为 0.522 487 mm,步长设定为 0.1 mm。坯料与空气的传热系数为 20 $\text{W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$ 。

上模移动速度分别设置为 5、10 和 15 mm/s。由于剪切摩擦模型适用于与模具接触的塑性变形区部分,因此摩擦边界条件选用剪切摩擦模型,摩擦因数 m 设为 0.3,该值为热锻有润滑时使用的缺省值。半固态坯料与上、下模传热系数设为 $5\times 10^3\text{ W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$ 。

图 2 为 Deform-3D 模拟后处理结果的坯料示意图。由于摩擦力的影响,坯料原端面边部的径向变形会受到一定限制,只能移动到 1 处,1 与 5 之间是由坯料端面内部和侧表面的金属填充所形成。

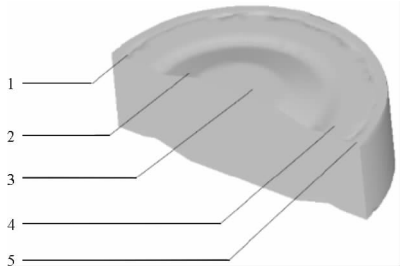


图 2 坯料示意图

Fig.2 Schematic diagram of workpieces

- 1.翻边区 2.坯料台阶 3.坯料小平台 4.坯料大平台 5.坯料端面边部充填区

2 试验结果分析

2.1 各参数对半固态触变模锻的影响

2.1.1 模具温度对半固态触变模锻的影响

图 3 为不同下模温度下坯料的温度场云图及其相对应的统计直方图。上模温度为 230~430 $^{\circ}\text{C}$,坯料温度为 593 $^{\circ}\text{C}$ 。可以看出,成形件的最高温度出现在端面的边部充填区域和翻边区。当下模温度为 350 $^{\circ}\text{C}$ 时,最高温度超过了 593 $^{\circ}\text{C}$,而下模温度为 450 $^{\circ}\text{C}$ 时,成形件的最高温度并未出现在边部,而是出现在心部。

图 4 为不同下模温度下的坯料温度最小值、最大值和均值的变化图。可以看出,随着下模温度升高,坯料

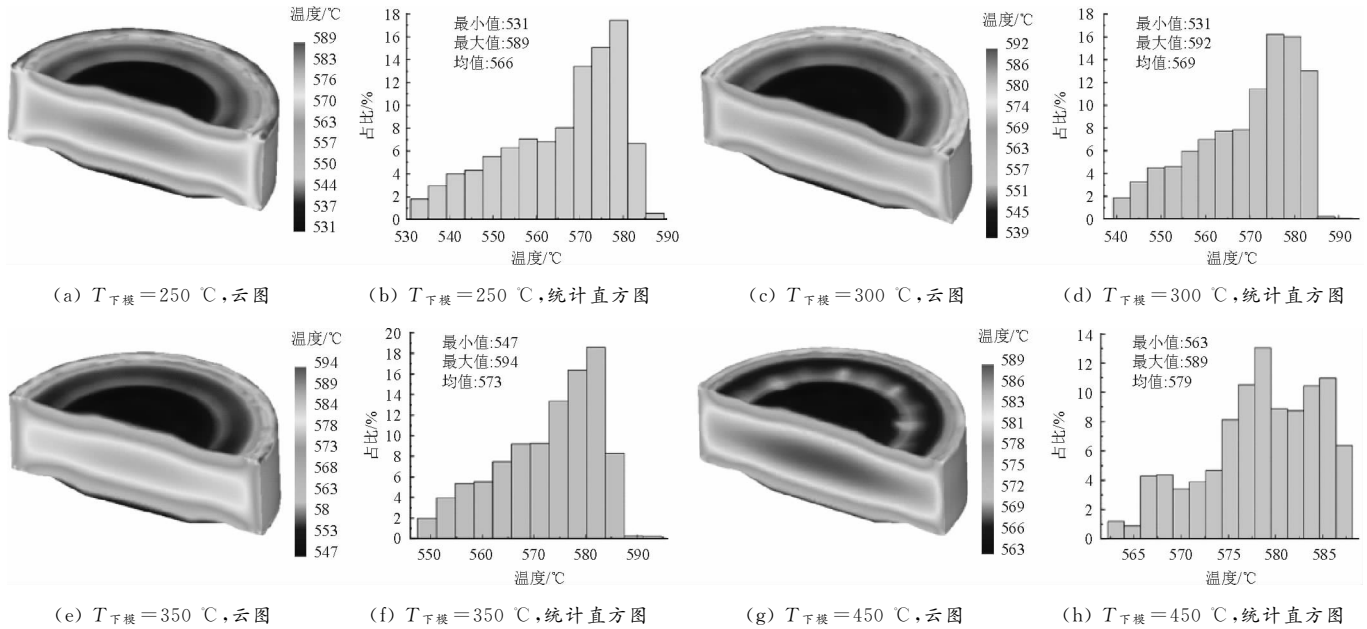


图 3 不同下模温度下坯料的温度场图

Fig.3 Temperature field nephogram of workpieces at different lower mold temperatures

温度的最小值和均值不断升高,而最大值先升高后降低。坯料温度的最大值出现在成形件端面边部和坯料端面原边界。当模具温度为 250、300 和 450 ℃ 时,坯料的最高温度均未超过 593 ℃,但前两者边部温度有激增的趋势。模具温度为 350 ℃ 时,坯料端面边部充填区出现了温度的异常升高。此处变形困难,坯料在充填过程中需要克服较大的变形抗力,释放大量的变形热,引起坯料端面边部充填区的温度异常升高。在其他参数下模具与坯料发生热交换^[20],坯料最高温度低于 593 ℃。AlSi7Mg 半固态温度区间为 574.5~636.2 ℃,当模具温度为 450 ℃ 时,可以保证平均温度为 579 ℃,即坯料大部分都在半固态温度区间进行成形,而其余各模具温度下的坯料平均温度均低于 574.5 ℃。因此从加工性能的角度出发,450 ℃ 是较为合理的模具温度。

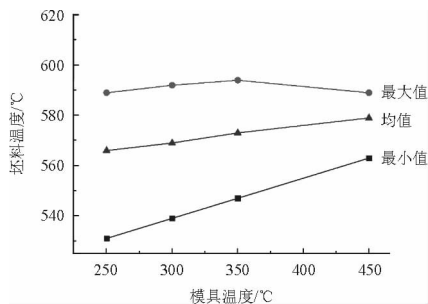


图 4 不同下模温度下的坯料温度变化
Fig.4 Variation of temperature at different lower mold temperatures

图 5 为不同下模温度下坯料的等效应变分布图。可以看出,坯料纵截面等效应变分布接近圆柱体锻粗应变分布,截面处有 45° 的剪切带。对比发现,各下模温度对坯料的影响相似,成形件端面边部、坯料端面原边

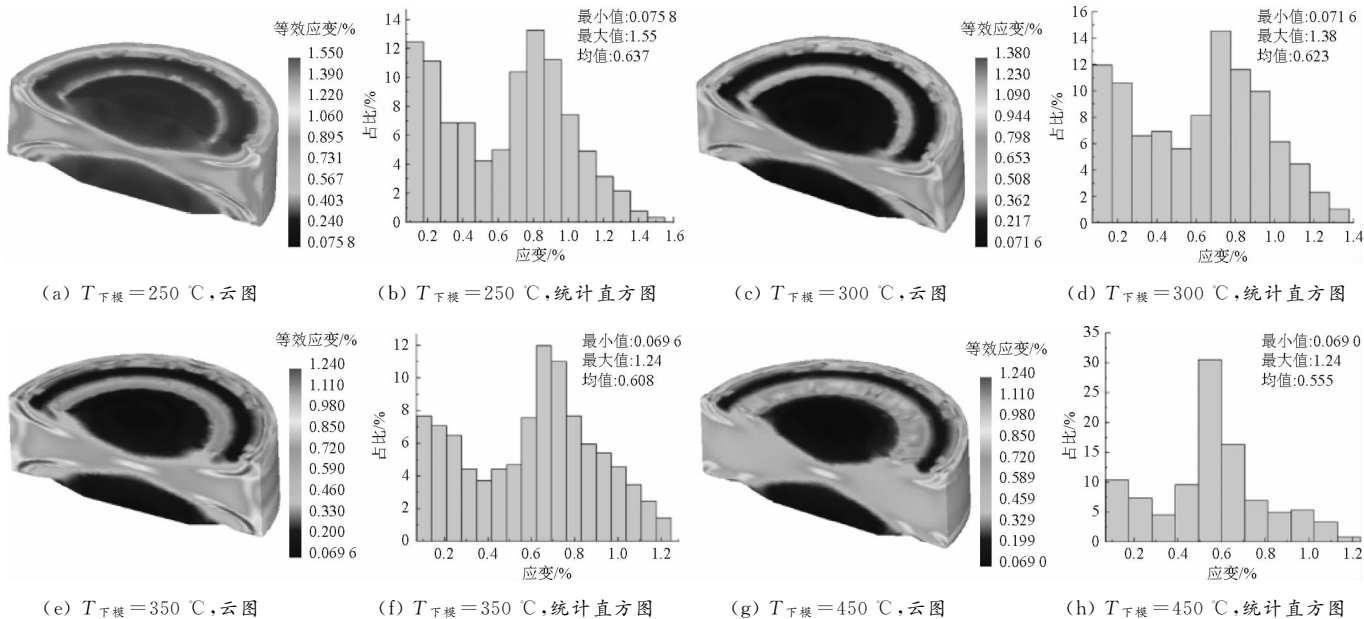


图 5 不同模具温度下坯料的等效应变分布图

Fig.5 Effective strain distribution of workpieces at different mold temperatures

界和截面剪切带的应变均较大。坯料的最小应变变量均在 0.2% 左右,随着模具温度的升高,最大应变变量从 1.55% 逐渐降低到了 1.24%。

图 6 为平均等效应变随下模温度的变化。可以看出,平均等效应变随下模温度上升而不断减小。在 250~350 ℃ 下降较慢,而在 350~450 ℃ 下降较快。下模温度对坯料温度的影响较大,而坯料温度直接影响其自身的固相率,进而对自身的应力-应变关系和变形机制产生影响。在其他条件不变时,随着下模温度上升,截面处的剪切带逐渐消失,表明由塑性变形主导的变形逐渐转变为半固态触变成形。因此 450 ℃ 是合理的下模温度。

图 7 为不同下模温度的等效应力分布图及其对应直方图。可以看出,成形件端面的边缘和坯料端面原边

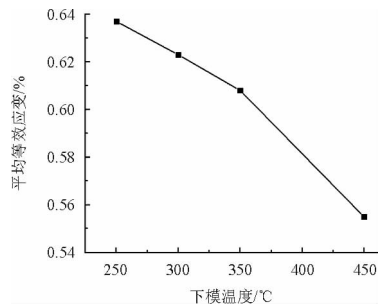


图 6 坯料平均等效应变随下模温度变化图
Fig.6 Variation curve of average effective strain with lower mold temperature

界等效应力最大。由图 7b、图 7d、图 7f 和图 7h 可知,应力值越高的节点其数量越少,整个应力分布的形状在直方图中呈近似指数分布。

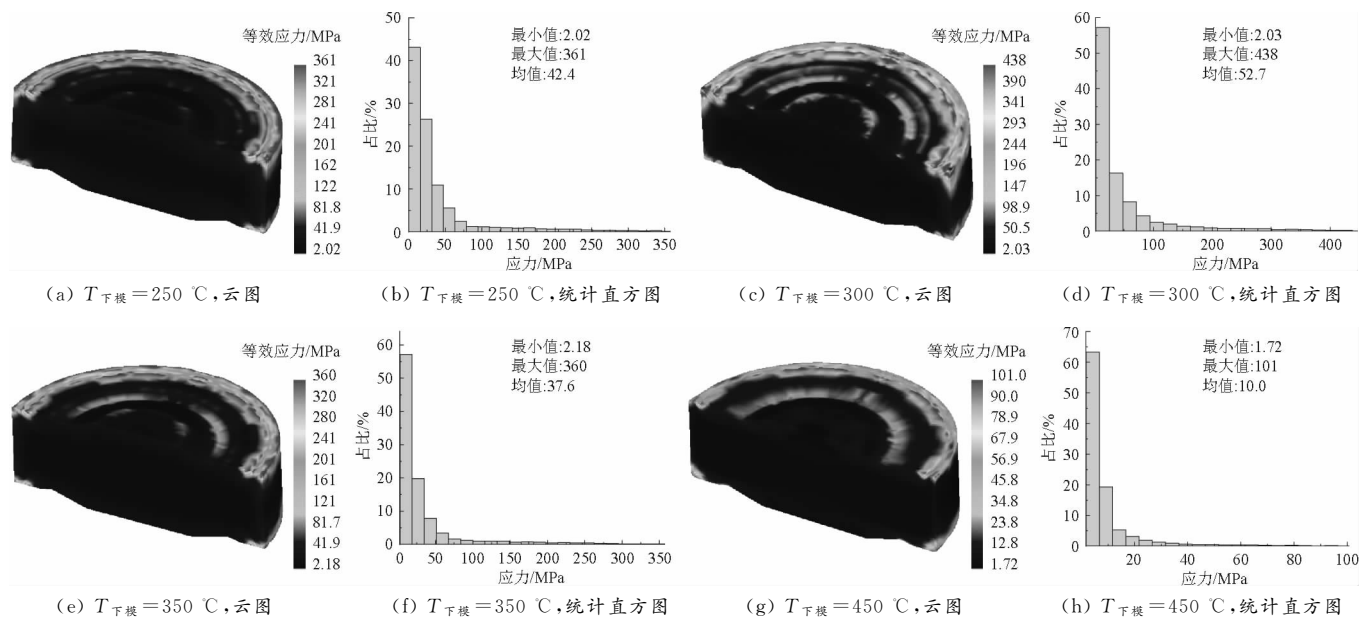


图 7 不同下模温度下坯料的等效应力分布图

Fig.7 Effective stress distribution of workpieces at different lower mold temperatures

图 8 为不同下模温度下坯料的等效应力均值和最大值的变化图。可以看出,随着下模温度上升,平均等

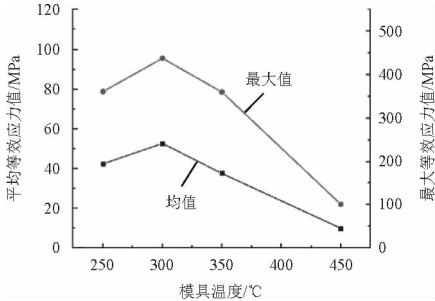


图 8 不同下模温度下坯料的等效应力变化

Fig.8 Variation curves of effective stress at different lower mold temperatures

效应力先增加后减小。随下模温度升高,坯料温度下降变缓,在相同的应变下其流动应力会下降,而在 250~300 °C 时,等效应力均值和最大值均增大。从图 7 中还可以看出,最大等效应力分布在成形件端面边部。端面等效应力大与端面散热较快有密切的关系。在 300 °C 下,等效应力的最大值高达 438 MPa,应力明显增大。结合温度、应变和应力的云图可知, $T_{\text{模}} = 450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时应变和应力均最低,且能够保证模锻成形处于半固态温度区间,其充填性能较好。因此 450 °C 是较为合理的下模温度。

2.1.2 坯料温度对半固态触变模锻结果的影响

图 9 为不同坯料温度下的温度云图及其对应的统

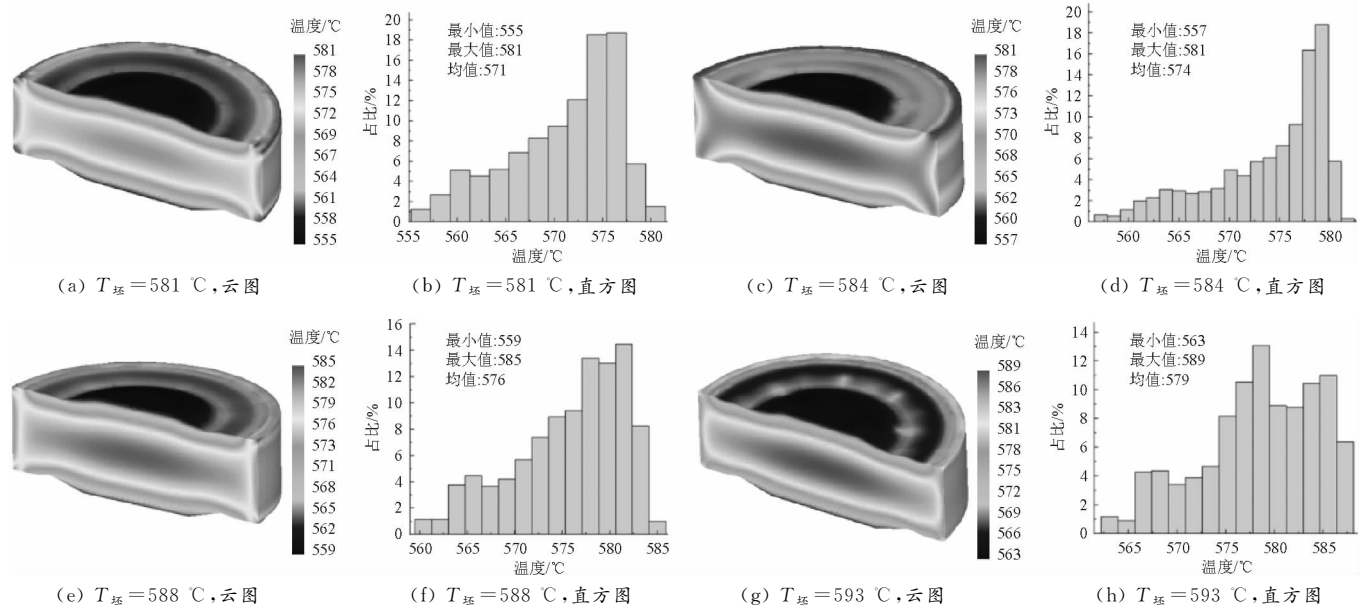


图 9 不同坯料温度下的温度场图

Fig.9 Temperature field nephogram at different billet temperatures

计直方图。各组模具温度均为 450 ℃,上模速度为 15 mm/s,坯料温度为 581~599 ℃。云图中坯料温度由心部往表面逐渐降低,而端面和翻边区的温度随着坯料温度的上升逐渐降低。

图 10 为不同坯料初始温度下温度场的变化图。可以看出,坯料温度最小值和平均值随坯料初始温度上升而上升,而最大值则先不变后上升。出现平行段是由于当坯料初始温度为 581℃时,坯料的边部在充填时温度激增超过了其设定温度,由于该处充填困难,变形时释放了较大的变形热,由此导致了温度的激增。图 9c 和图 9e 对应的平均温度均超过了半固态温度区间起始温度 574.5 ℃,因此可以在这些参数下进行选取。593 ℃与 588 ℃相比,前者的坯料平均温度高,且边部未出现明显温度激增,因此舍去 588 ℃。而 593 ℃与 599 ℃相比,后者的平均温度更高,但是温度过高会影响夹持强度,因此 593 ℃是更合理的坯料温度。

图 11 和图 12 分别为不同坯料温度的等效应变分

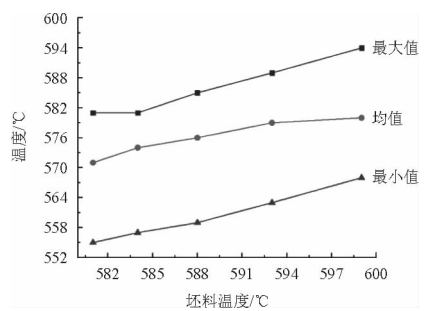


图 10 不同坯料温度下温度场变化图
Fig.10 Variation of temperature field at different billet temperatures

布图以及平均等效应变随坯料温度变化图。直方图中的等效应变均值未见明显规律。可以看出,581 ℃时的平均等效应变最低,只有 0.555%,说明此时坯料最容易变形。但是由于其温度过低,难以保持在半固态区间进行加工。593 ℃时的平均应变高于 581 ℃,为 0.555%,但是低于其他几个温度的。由于本试验中成形件形状

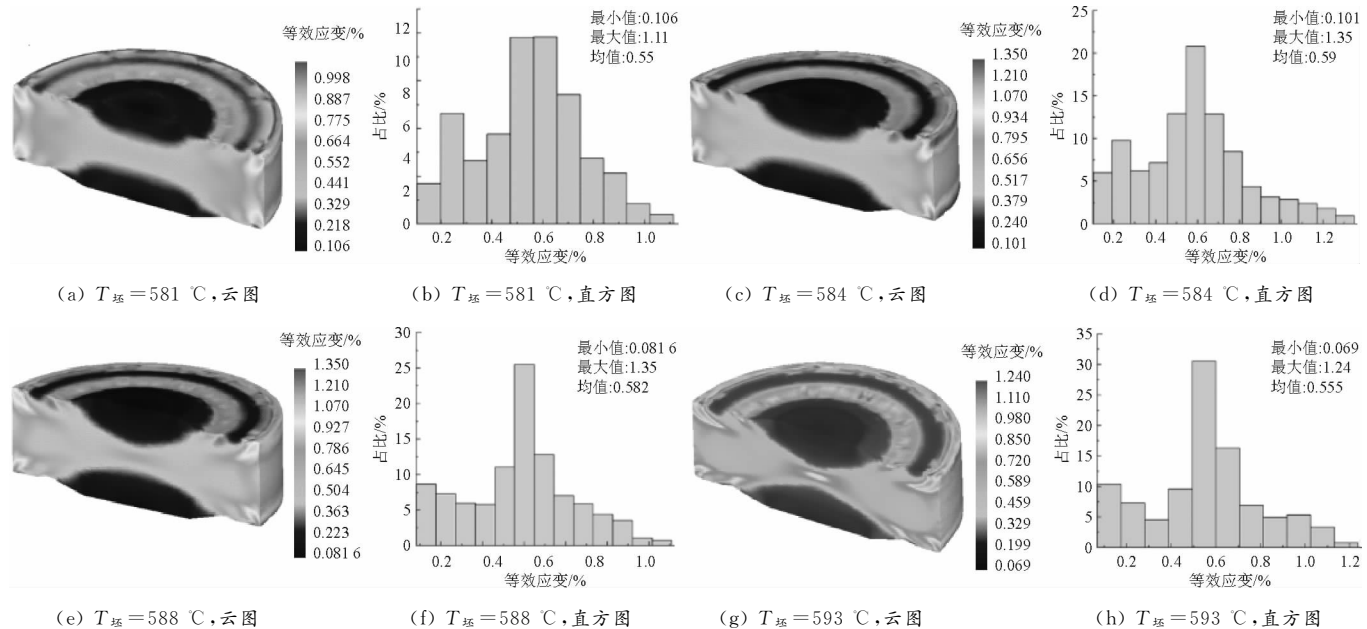


图 11 不同坯料温度下的等效应变分布图

Fig.11 Effective strain distribution of workpiece at different temperatures

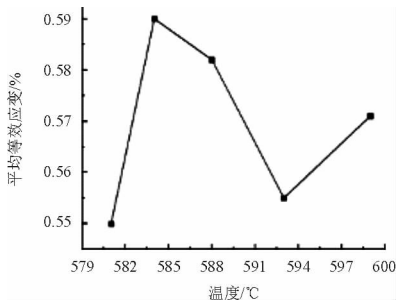


图 12 平均等效应变随坯料温度变化图

Fig.12 Variation of average equivalent strain with billet temperature

较为简单,变形能力并不是最优先考虑的,主要考虑不同参数对于等效应力大小的影响,因此需要比较各参数下应力值再确定最佳工艺参数。

图 13 和图 14 分别为不同坯料温度的等效应力分布图和平均等效应变随坯料温度变化图。可以看出,除翻边区的等效应力较大外,其他区域的等效应力基本一致,并且等效应力随温度的变化不明显,因此只考虑等效应力的大小。坯料温度为 599 ℃时等效应力最小,但是考虑到半固态触变成形的坯料处于固液两相区间,夹持时容易受到触变性的影响而使坯料发生较大变形,损害坯料完整性,因此选择 593 ℃。

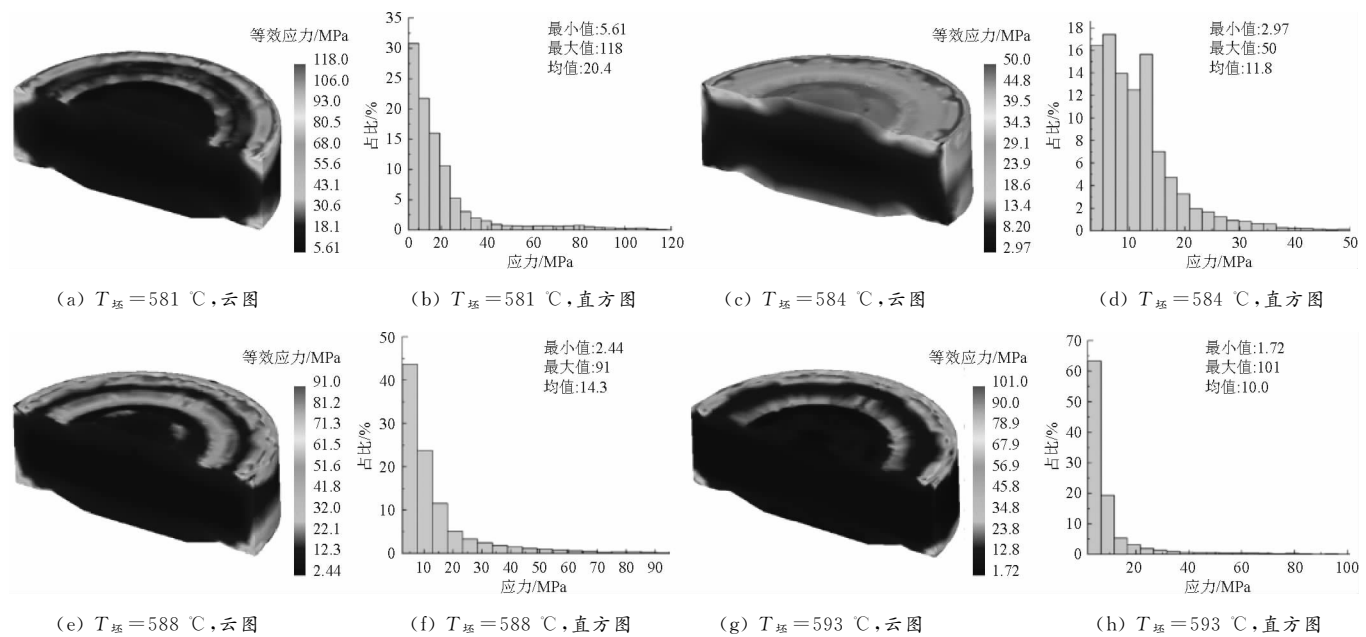


图 13 不同坯料温度下的等效应力分布图

Fig.13 Effective stress distribution of workpiece at different temperatures

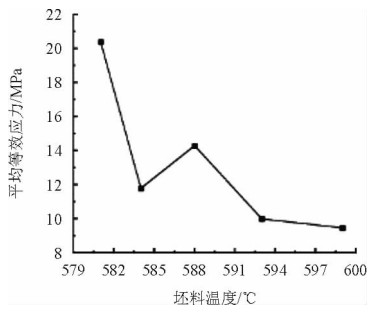


图 14 平均等效应力随坯料温度变化图

Fig.14 Variation of average equivalent stress with billet temperature

2.1.3 上模速度对半固态触变模锻结果的影响

上模速度对变形的影响有两方面,一方面上模速度会对应变速率有影响,进而影响坯料的本构关系。在温度不变的前提下,上模速度越小,应变速率越小,在相同的应变下,其流动应力会较低。另一方面,由于模具温度与坯料温度不同,在变形过程中会发生传热,上模速度也会对坯料温度产生影响。上模速度越高,温度下降速度越慢,原子动能越大,位错开动越容易,因此在相同的应变下,其流动应力较低。

图 15 为不同上模速度的温度场及温度变化图。各

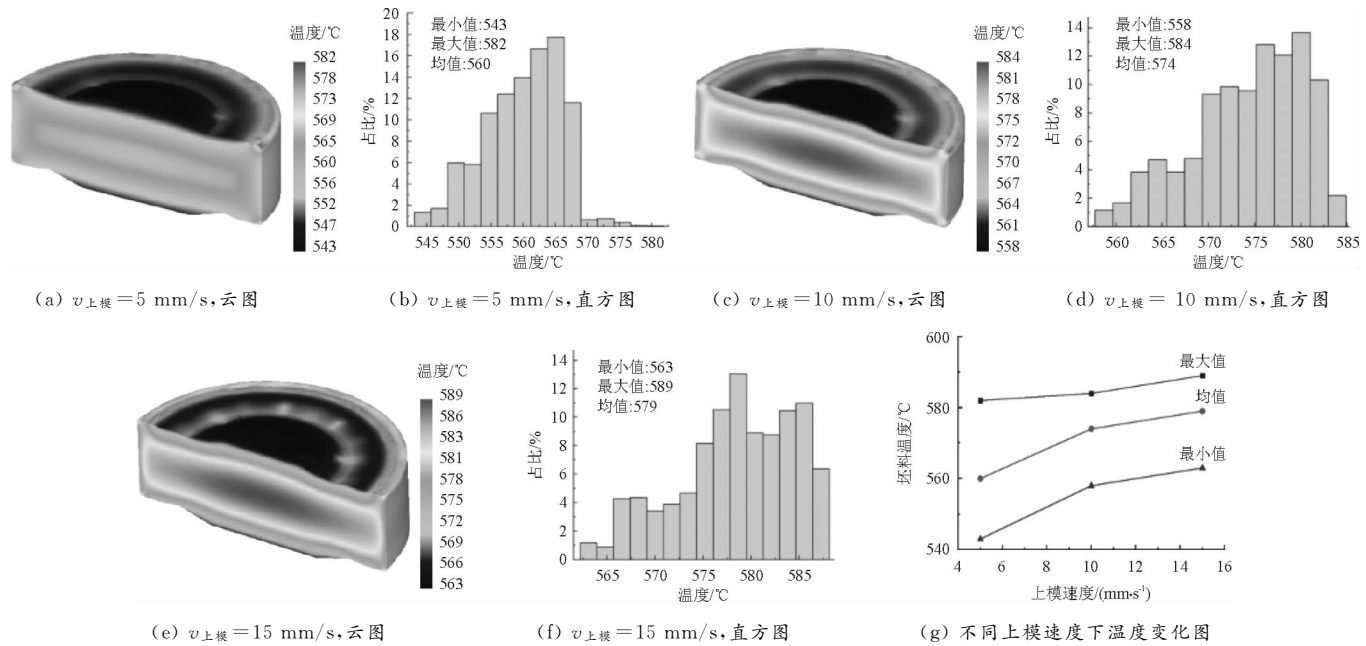


图 15 不同上模速度下温度场及温度变化图

Fig.15 Temperature field and temperature variation at different upper mold speeds

组坯料设定温度均为 593 ℃,模具温度均为 450 ℃。各组对应的上模速度分别为 5、10 和 15 mm/s。随着上模速度升高,温度的最大值、平均值和最小值均增大。这是由于上模速度升高导致产生大量的变形热,温度下降减缓,进而对实际变形产生影响。当上模速度为 15 mm/s 时,坯料的平均温度为 577 ℃,可以保证坯料在半固态温度区间进行加工。因此从温度的角度考虑,上模速度为 15 mm/s 是较为合理的参数。

图 16 为不同上模速度时等效应变分布及平均等效应变变化图。从图 16a~图 16f 可以发现,翻边区的等效应变最大,与模具接触的地方在摩擦力的影响下应变较小,其他部位应变由内向外逐渐增大。上模速度为 15 mm/s 时等效应变最小。变形所需的等效应变越小,说明坯料越容易成形,但是研究主要考察成形力的大小,需要在满足应力较小的条件下综合分析。

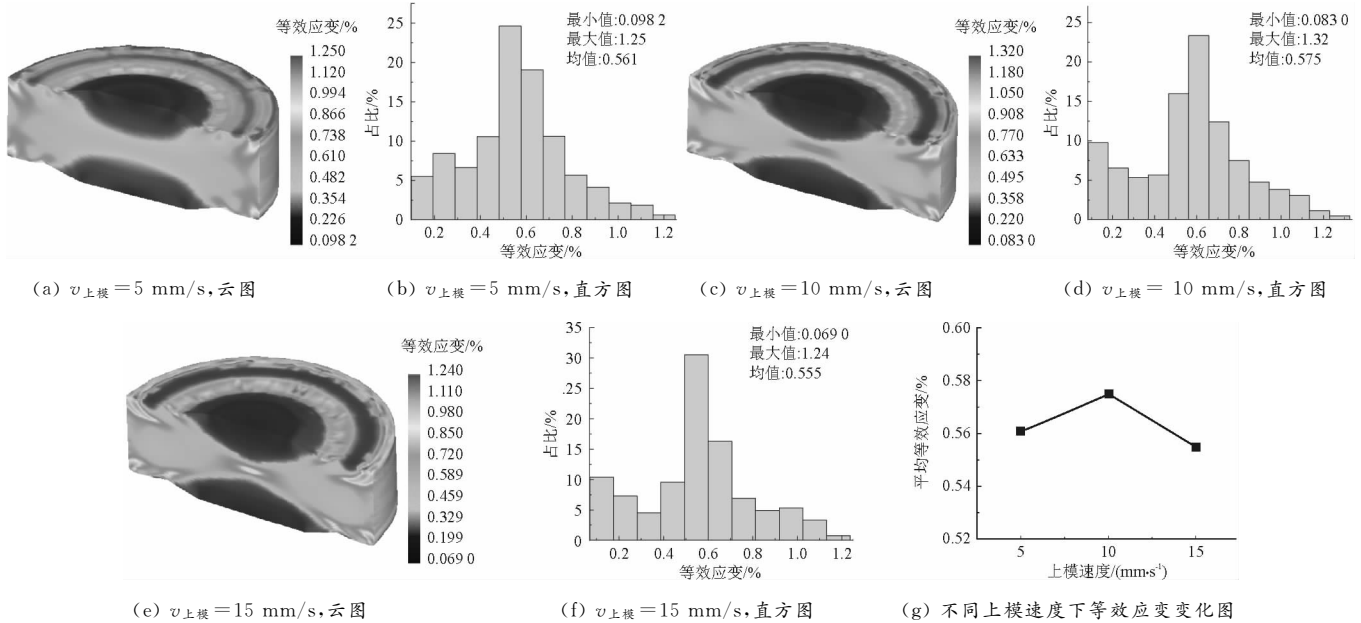


图 16 不同上模速度时等效应变分布及平均等效应变变化图

Fig.16 Distribution of effective strain and average effective strain variation at different upper mold speeds

图 17 为不同上模速度下等效应力分布及平均等效应力变化图。从图 17g 可以看出,随着上模速度增加,平均等效应力逐渐下降,且当上模速度从 10 mm/s 上

升到 15 mm/s 时,平均等效应力下降速度变缓。说明当上模速度在 5~15 mm/s 时,上模速度增加会有效降低等效应力,但是这种降低的效果会逐渐减弱。等效应力

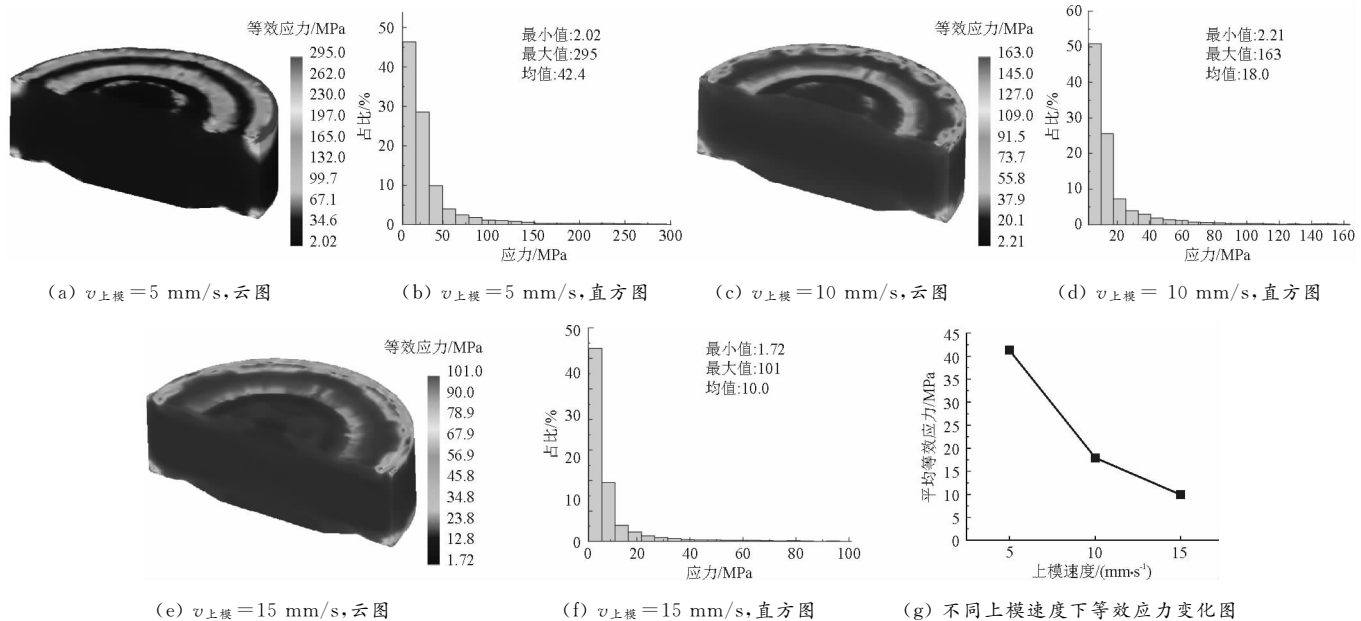


图 17 不同上模速度的等效应力分布及平均等效应力变化图

Fig.17 Effective stress distribution and average effective stress variation at different upper mold speeds

的降低与液相分数有密切的关系,上模速率较低时,由于坯料与模具的热传导导致液相减少,所以等效应力上升。当上模速度较快时,热传导时间短,液相分数高,所以等效应力小,并且有利于型腔的填充。

2.2 高温固态模锻与半固态触变模锻对比分析

图 18 是上模温度为 430 ℃、下模温度为 450 ℃、上模速度为 15 mm/s 时,高温固态模锻与半固态触变模锻的温度场及其直方图。图 18a 和图 18b 中 $T_{\text{坯}}=550\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为高温固态模锻,图 18c 和图 18d 中 $T_{\text{坯}}=593\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为半固态触变模锻。可以看出,高温固态模锻与半固态触变模锻的模具温度和上模速度一致,只改变了坯料温度。高温固态模锻的坯料最高温度略微超过坯料设定

温度,半固态触变模锻的最高温度低于坯料设定温度。两者的最高温度均出现在坯料纵截面中心,前者温度为 551 ℃,后者温度为 589 ℃。两者的最高温度未出现在端面边角位置,说明在设定的参数下,高温固态模锻与半固态触变模锻的坯料边角充填均未对坯料的最高温度产生影响。之所以前者的最高温度超过设定温度,是因为在高温固态模锻条件下,坯料的变形抗力较高,位错开动的难度较大,需要较高的成形力,形变的能量一方面转化为坯料内部的储存能,另一方面转化为变形热被坯料吸收,故前者的最高温度会出现一定的升高。后者的温度未超过最高设定温度,是因为半固态模锻的成形力较低,形变转化的变形热亦较低,坯料的心部发生

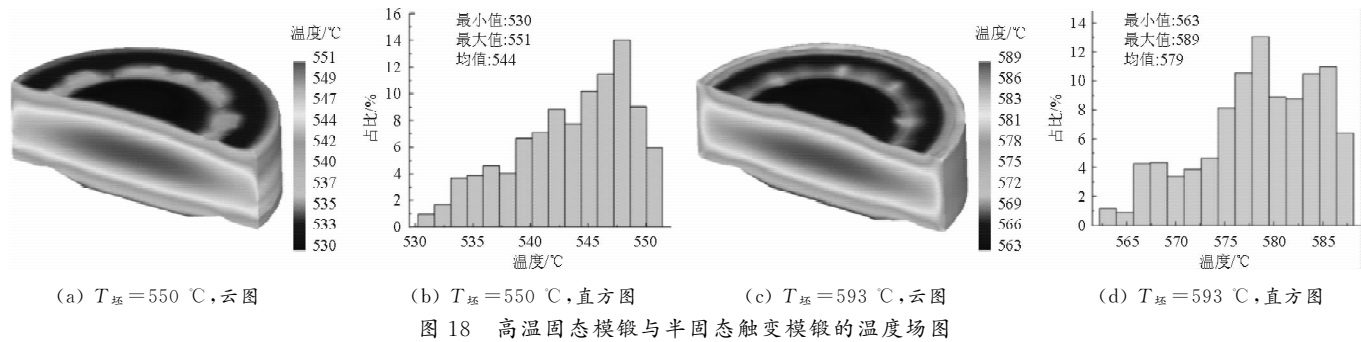


Fig.18 Temperature field of high-temperature die forging and semi-solid thixotropic die forging

了自然散热。

图 19 为高温固态模锻与半固态触变模锻的等效应力分布图。两者的坯料端面边部均出现了较高的应力分布,说明两者的边角处变形抗力较大,边角的变形抗力大与此处的快速散热紧密相关。从图 19d 可以看出,

随着坯料温度升高,从高温固态模锻转向半固态触变模锻后,等效应力明显下降。坯料的等效应力越低,变形所需的成形力越小,因此半固态模锻的所需的设备挤压力明显小于高温固态模锻的。

图20为高温固态模锻与半固态触变模锻的等效应

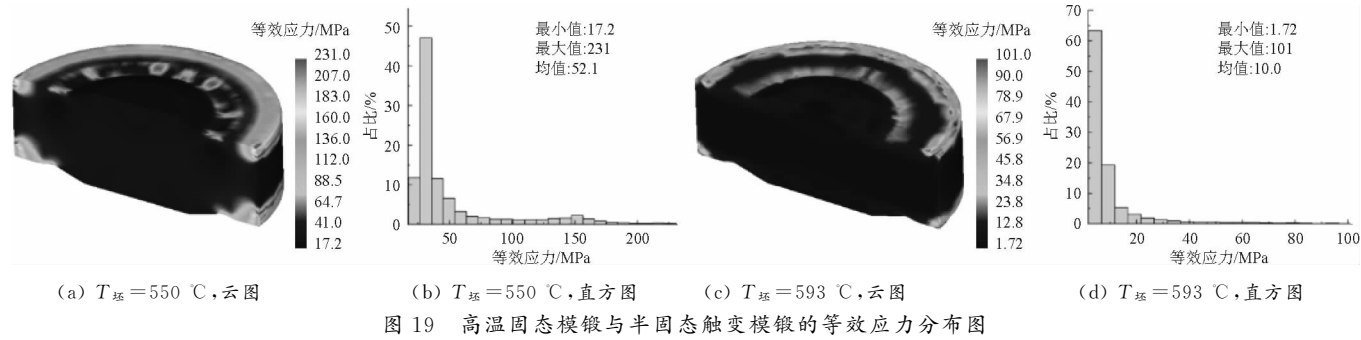


Fig.19 Effective stress distribution of high-temperature die forging and semi-solid thixotropic die forging

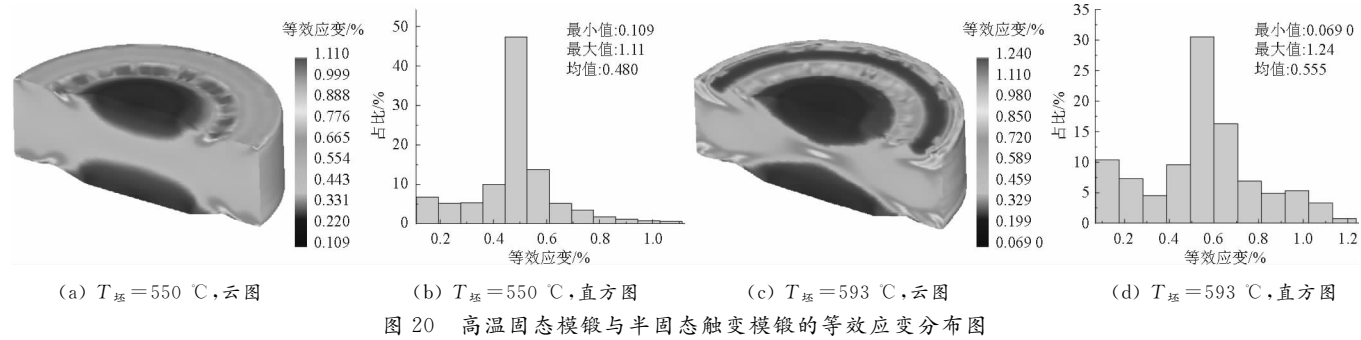


Fig.20 Effective strain distribution of high-temperature die forging and semi-solid thixotropic die forging

变分布图。两者的等效应变分布云图中,前者仅在坯料大平台与台阶相交的位置出现了较大的等效应变,后者在坯料端面边部和坯料大平台与台阶相交的位置均出现了较大的等效应变。坯料温度从高温固态模锻转向半固态触变模锻后,等效应变均值明显增大。变形所需的等效应变越高,说明其变形难度越大,即在该试验条件下,与半固态模锻相比,高温固态更难成形。

图21为不同坯料温度时的载荷-位移图。随着上

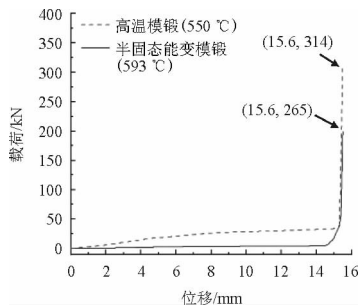


图 21 不同坯料温度时的载荷-位移图

Fig.21 Load-displacement diagram at different workpiece temperatures

模位移不断增大, $T_{\text{坯}} = 550\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时载荷不断增大并在 15.6 mm 时出现激增,最大载荷为 315 kN,高于 $T_{\text{坯}} = 593\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的最大载荷 265 kN,两者均可以通过 2 000 kN 压力机进行模锻,但是高温固态模锻所需的成形力更大。

2.3 试验验证

通过对半固态触变模锻的数值拟,得到了模具温度、坯料温度以及模具速度对模锻的影响。综合考虑温度场的分布、变形过程中应力的分布、应变的均匀性和成形过程中坯料的固相率因素等,发现当模具温度为 $450\text{ }^{\circ}\text{C}$,坯料温度为 $593\text{ }^{\circ}\text{C}$,上模速度为 15 mm/s 时能够得到成形良好的工件。

为了验证半固态模锻数值模拟得到的最佳工艺参数的准确性,进行了验证工艺试验。图 22 为 $593\text{ }^{\circ}\text{C}$ 保温不同时间的触变成形边部金相组织、工件示意图和力学性能,对应的固相率为 60%。由图 22a 可知,优化工艺参数下生产的工件表面光滑且完整。图 22b 为取样位置示意图,在对应的位置分别取拉伸试样和显微组织

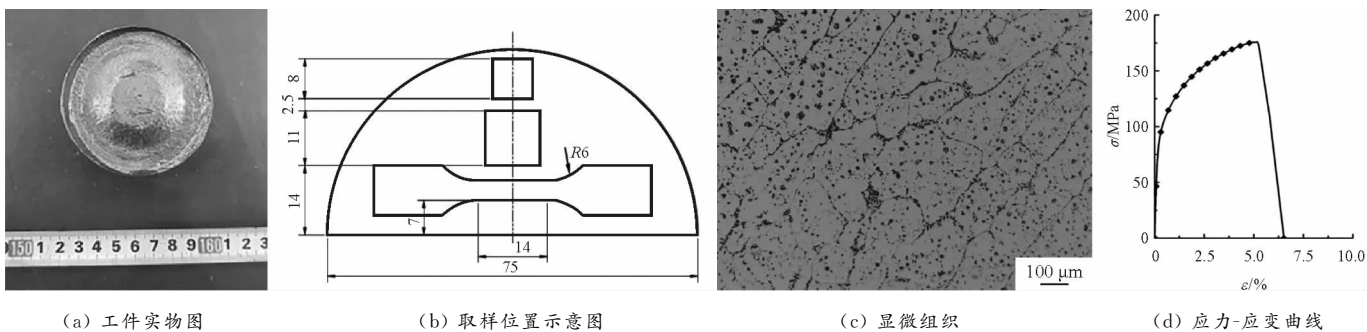


图 22 $593\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的实物图、边部金相组织和应力-应变曲线

Fig.22 Images of workpiece, metallographic structure at the edge and stress-strain curves

观察试样。图 20c 为保温 26 min 后的半固态显微组织形貌,可以看出,显微组织具有明显的半固态组织特征,晶粒与晶粒之间的区分明显。随后对试样进行力学性能测试,屈服强度为 98.9 MPa,抗拉强度为 175.9 MPa,伸长率为 6.52%,见图 22d。

3 结 论

(1)不同模具温度、坯料温度和模具速度对温度场的分布规律没有影响,由心部向表面温度逐渐降低,另外翻边区温度较高。坯料温度的上升和模具速度的上升能够降低工件的成形力,而以上因素对于应变并没有明显的影响。

(2)通过对模拟结果的对比分析,得出合理的工艺参数:模具温度为 $450\text{ }^{\circ}\text{C}$,坯料温度为 $593\text{ }^{\circ}\text{C}$,上模速度为 15 mm/s。

(3)半固态触变模锻相比于高温固态模锻需要的成形力更小,并且半固态触变模锻的温度分布加均匀,能够提供更大的应变量。

(4)在最佳工艺参数下,工件成形良好。成形件的显微组织具有明显的半固态组织特征。其屈服强度为 98.9 MPa,抗拉强度为 175.9 MPa,伸长率为 6.52%。

参 考 文 献

- [1] FLEMINGS M C. Behavior of metal alloys in the semisolid state [J]. Metallurgical & Materials Transactions, 1991, B22: 269-293.
- [2] 胡南,苏勇,吴楠. 高固相率半固态成形铝合金轮毂的数值模拟[J]. 热加工工艺, 2021, 50(21): 54-57.
- [3] WANNASIN J, MARTINEZ R A, FLEMINGS M C. Grain refinement of an aluminum alloy by introducing gas bubbles during solidification[J]. Scripta Materialia, 2006, 55(2): 115-118.
- [4] WU S S, XIE L, ZHAO J W, et al. Formation of non-dendritic microstructure of semisolid aluminum alloy under vibration[J]. Scripta Materialia, 2008, 58(7): 556-559.

- [5] JANUDOM S, WANNASIN I, BASEM I, et al. Characterization of flow behavior of semisolid slurries containing low solid fractions in high pressure die casting[J]. Acta Materialia, 2013, 61(16): 6 267-6 275.
- [6] FAN Z. Semisolid metal processing[J]. International Materials Reviews, 2002, 47(2): 49-85.
- [7] 杜平,李双寿,唐靖林,等. 半固态铝合金触变压铸技术中关键问题的讨论[J]. 铸造技术, 2006, 27(6): 545-549.
- [8] 李涛,张博或,王鹏,等. ZL201 合金半固态压铸成形过程数值模拟[J]. 材料科学与工艺, 2018, 26(5): 54-58.
- [9] 杨明波,代兵,伍光凤,等. 铝合金半固态压铸触变成形技术的研究进展[J]. 铸造, 2003(8): 533-537.
- [10] 田战峰,杨必成,张志峰,等. 铝合金半固态触变压铸试验研究[J]. 轻金属, 2005(9): 42-46.
- [11] KIUCHI M, KOPP R. Mushy/semi-solid metal forming technology-present and future[J]. CIRP Annals, 2002, 51(2): 653-670.
- [12] DONG J H, CHEN M, WANG N. Characteristics of fluid flow and temperature field of twin-roll steel strip casting with anovel-type delivery system[J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2015, 22(10): 885-891.
- [13] 裴恒伟,张树国,刘旭波,等. 半固态流变成形数值模拟研究现状及展望[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(10): 1 264-1 268.
- [14] WU S S, ZHAO J W, WAN L, et al. Numerical simulation of mould filling in rheo-diecasting process of semisolid magnesium alloys[J]. Semi Solid Processing of Alloys and Composites, 2006, B (116-117): 554-557.
- [15] YAN H, WANG T, FU M F. Numerical simulation of rheo-diecasting mould filling process of semisolid magnesium alloys[A]. In International Conference on Physical and Numerical Simulation of Materials Processing[C]. 郑州, 2008.
- [16] 路贵民,赵大志,崔建忠. 半固态金属成形过程的数值模拟技术概况[J]. 铸造, 2006(12): 1 221-1 226.
- [17] NEAG A, FAVIER V, BIGOT R, et al. Comparison between numerical simulation of semisolid flow into a die using FORGE^{CF} and in situ visualization using a transparent sided die[J]. Journal of Materials Processing Tech., 2016, 229: 338-348.
- [18] YAN H, FU M F, TAO X, et al. Study on thixo-extrusion of semi-solid wrought magnesium alloy[J]. Key Engineering Materials, 2008, 367:103-106.
- [19] ZHANG F, SONG N N, ZHANG J, et al. Numerical simulation on the filling process of rheological die casting and forming defect-sanalysis[J]. Solid State Phenomena, 2012, 192-193 (6): 293-298.
- [20] 牛海侠,甘国强,李萍,等. 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[J]. 稀有金属材料与工程, 2022, 51(5): 1 697-1 704.

(编辑:彭瑾)

《特种铸造及有色合金》征订启事

《特种铸造及有色合金》杂志是中国科学技术协会主管、中国机械工程学会铸造分会和武汉机械工艺研究所共同主办的全国性科技期刊,是对国内外公开发行的中文核心期刊,中国科技论文统计与分析用刊,SA、CA、MA、AJ、Scopus 等国内外权威数据库及检索系统收录期刊,并获得全国优秀科技期刊一等奖、国家期刊奖、新中国 60 年有影响力的期刊、湖北省十大有影响力的自然学术期刊等。

本刊主要报道各种(黑色和有色合金)特种铸造方法、各种有色合金及复合材料成形的理论、工艺、设备、材料、测试与控制、计算机应用等方面的科技成果、生产技术和现场经验,并报道各相关学科和交叉学科,如挤压铸造(液态模锻)、半固态加工、电子封装、高熵合金、非晶合金(金属玻璃)、焊接、粉末冶金、合金化、热处理、表面处理等方面的学术研究和最新技术信息以及上述内容的国内外发展动向、行业活动、学术会议、消息动态等。

本刊诚征国内外广告,业务范围:铸造及有色合金材料、辅助材料、铸造及相关设备、铸造生产线、测控与控制设备、仪器仪表、计算机应用软件、铸造展会等。

本刊为月刊,标准(大)16 开,邮发代号 38-109。邮发订价每期 20 元,全年 240 元,如须快递,费用另计。全国各地邮局均可订阅,也可直接向本刊编辑部邮购,本刊还提供过刊、压铸宝典和年会专刊邮购服务。

特种铸造及有色合金杂志社(武汉)有限公司



地址:武汉市江岸区九万方路 26 号

邮编:430019

电话:027-85358206,85486024

传真:027-85358127

投稿网址:www.special-cast.com

邮箱:tzzz@special-cast.com

