

文章编号:1673-9469(2026)01-0104-09

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2026.01.013

大规格 GH4169 合金棒材锻造过程数值模拟研究

袁嘉澳¹, 梁增帅², 李丽¹, 李爱民², 王艳辉¹, 申文飞^{1*}

(1. 河北工程大学 机械与装备工程学院, 河北 邯郸 056038;

2. 中航上大高温合金材料股份有限公司 河北省高温合金再生技术重点实验室, 河北 邢台 054800)

摘要: 针对 GH4169 大型棒材开坯锻造过程, 采用有限元模拟软件 Simufact Forming 对 GH4169 合金锻造全过程进行仿真模拟, 研究了锻造过程中工件应变场和温度场的分布, 并对镦粗和拔长过程中工件整体外形变化情况进行了分析。结果表明: 镦粗过程中试样各个位置等效应变分布不均匀, 大致呈现“X”型分布, 砧子与锻件接触的区域基本不变形, 该区域温度和等效应变均较低。拔长过程中, 锻件表面区域与空气和上下砧子存在热交换, 等效应变高而温度低, 且等效应变呈一定周期性分布。锻件的头尾区域形成往内凹陷的状态, 是内外金属流动性差异较大所致。

关键词: 数值模拟; GH4169 合金; 锻造; 温度场; 应变场

中图分类号: TG316

文献标识码: A

Numerical Simulation Research on the Forging Process of Large-Sized GH4169 Alloy Bars

YUAN Jia'ao¹, LIANG Zengshuai², LI Li¹, LI Aimin², WANG Yanhui¹, SHEN Wenfei^{1*}

(1. School of Mechanical and Equipment Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China;

2. Key Laboratory of Superalloys Recycling Technology of Hebei Province, Zhonghangshangda

Superalloys Co., Ltd., Xingtai, Hebei 054800, China)

Abstract: For the roughing forging process of the large GH4169 billet, the finite element simulation software Simufact Forming was adopted to conduct a simulation of the entire forging process of the GH4169 alloy. The distribution of the strain field and temperature field during the forging process was studied, and the overall shape changes of the workpiece during the upsetting and elongation processes were analyzed. The results show that during the upsetting process, the equivalent strain distribution at various positions of the sample is uneven, roughly presenting an “X” shape distribution. The area where the anvil contacts the workpiece remains basically undistorted, and the temperature and equivalent strain in this area are relatively low. During the elongation process, there is heat exchange between the surface area of the forged piece and the air and the upper and lower anvils. The equivalent strain is high while the temperature is low, and the equivalent strain shows a certain periodic distribution. The head and tail areas of the workpiece form an inwardly concave state, which is due to the significant difference in metal fluidity between the inside and outside.

Key words: numerical simulation; GH4169 alloy; forging; temperature field; strain field

收稿日期: 2025-07-16

基金项目: 河北省高等学校科学技术研究产学研合作专项(CXY2024040); 河北省创新能力提升计划-中航上大高温合金材料股份有限公司特种合金产业创新创业团队项目(235A1001D); 河北省创新能力提升计划-科研研发平台专项(24461001D); 河北省自然科学基金资助项目(E2022402107)

第一作者: 袁嘉澳(2000—), 男, 河北邯郸人, 硕士研究生, 从事高温合金方面的研究。

* 通信作者: 申文飞(1988—), 男, 河北邯郸人, 博士, 讲师, 从事材料加工成形方面的研究。

GH4169 属于镍基高温合金, 与美国牌号为 Inconel 718 的合金成分相似^[1], 是所有高温合金中应用最广泛、生产最稳定的合金之一。GH4169 合金因其优异的综合性能和高温稳定性被广泛应用于航空航天、石油化工和核能发电等多个领域。作为航空航天领域的重要材料, GH4169 合金主要应用于涡轮盘、压气机叶片和机匣等热端动力零部件。这些结构件通常服役于交变载荷、交变温度等恶劣条件^[2], 要求其具有良好的抗疲劳和抗蠕变性能^[3]。

锻造是根据金属本身的塑性特性^[4], 对其开展变形工艺处理, 利用金属处于高温状态下的可塑性, 将其塑造成特定形状, 是有效调控合金组织与性能的关键工序^[5]。而 GH4169 合金有着较大的变形抗力和较小的加工温度区间, 故其加工性能较差。因其复杂的热加工^[6]变形过程, 有限元模拟软件^[7]逐渐成为分析工件在其复杂加工工况下各参数变化的热门工具。

乔世昌等^[8-9]通过实验与数值模拟结合的手段, 系统研究了高温合金在热变形过程中的动态再结晶 (Dynamic Recrystallization, DRX) 行为及其与热力参数的关联性。乔世昌等利用 Gleeble-3800D 热模拟机对 Ni-Co-Cr 基粉末高温合金进行热压缩试验, 结合 DEFORM-3D 有限元模拟及微观表征 (金相、电子背散射衍射技术) 分析, 发现合金的软化机制主要由 DRX 主导, 其中不连续动态再结晶 (Discontinuous Dynamic Recrystallization, DDRX) 因晶界弓出形核效应成为关键机制。类似地, Chamanfar 等^[9]针对镍基合金的等温锻造过程, 采用 DEFORM-3D 软件构建了包含热力耦合效应的有限元模型, 探讨了 980 °C ~ 1 140 °C 及 0.01 ~ 1 s⁻¹ 条件下 DRX 的动力学响应。在所研究的条件下, 锻件内部热变形参数和温度的分布是不均匀的。最大应变、应变速率和温度主要出现在锻件的边缘和中心。锻件组织不均匀, 即 DRX 体积分数和平均晶粒尺寸分布不均匀。

魏振等^[10]利用 Fortran 语言将修正前后的组织模型分别写入程序, 并经 Simufact Forming 软件调用后对 GH4169 合金的环轧过程进行了微观组织模拟, 建立了可实现各工艺流程间组织遗传的数值模拟方法, 并通过实验验证了适配性修正后组织演化模型的正确性和该模拟方法的可行性。靳盛哲等^[11]为探究孔挤压工艺在镍基高温合金上

的应用, 建立了镍基高温合金 GH4169 孔挤压工艺的数值模拟方法, 并通过试验验证了方法的有效性, 讨论了芯棒材料、挤压量和摩擦因数对周向残余应力分布的影响规律, 并得到了挤压量和摩擦因数的优选范围。

综上所述, 大多数学者都是针对合金热变形的单一工序进行仿真模拟^[12], 并没有针对一整套工艺流程进行模拟。大规格 GH4169 合金锻件的锻造加工全流程模拟研究也较少。如果通过实际生产方式确定合理的工艺参数, 不仅耗时长、成本高, 而且难以观察到锻件芯部区域的变形情况, 难以确定工件芯部性能是否达标。而本研究使用 Simufact Forming 有限元软件^[13]实现了对 GH4169 合金完整锻造过程的仿真模拟^[14], 数值模拟的方法不仅节省了时间和成本, 而且获得了锻造变形过程中整个锻件的温度场和应变场分布情况, 对工艺方案的制定提供了帮助, 为实际锻造生产提供参考价值。

1 有限元模型建立

1.1 几何模型

根据某企业生产的工件实际尺寸, 在 Simufact Forming 软件中设置 GH4169 工件尺寸为 $\phi 508 \text{ mm} \times 1\,000 \text{ mm}$, 砧子尺寸为 $450 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 650 \text{ mm}$, 机械夹持手尺寸为 $300 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$, 实际有限元模型、实际锻造生产过程以及模拟锻造示意图如图 1 所示, 模型划分网格采用六面体单元, 网格数量为 30 000。

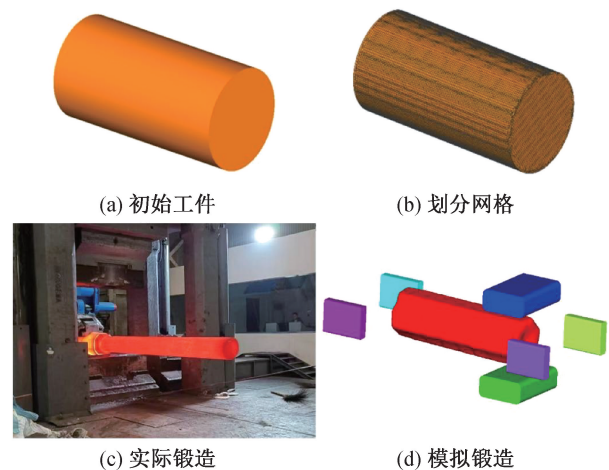


图 1 初始工件、实际锻造与模拟锻造过程示意图
Fig. 1 Initial workpiece, actual forging and simulated forging process illustration

1.2 参数的设定

1.2.1 材料参数的输入

在 Simufact Forming 材料库中选择 Inconel 718 合金,将 GH4169 的化学成分(表 1)以及热物性参数(图 2)导入,完成材料的热导率、比热容等参数的设定。工件初始温度设置为 1 100 °C、砧子初始温度设置为 400 °C,根据相关资料选取摩擦系数为 0.4^[15-16],其他参数按照默认不进行修改。

在热加工过程中,金属材料应变速率、变形温度和应变是影响其流变应力的重要因素,而本构方程能够准确地描述这些参数之间的关系。目前使用最为广泛的一种模型是 Arrhenius 方程^[17],该模型的表达形式如下:

$$\dot{\varepsilon} = A [\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp(-Q/RT) \quad (1)$$

式中 A 、 α 、 n —分别为材料常数,其中 $\alpha = \beta/n$, β 为高应力区的应力敏感系数; $\dot{\varepsilon}$ —应变速率, s^{-1} ; σ —流变应力, MPa; Q —热变形激活能, J/mol; R —气体常数,取值为 8.314 J/(mol·K); T —变形温度, K。

在低应力状态下,该模型可以简化为如下指数函数形式:

$$\dot{\varepsilon} = A_1 \sigma^n \exp(-Q/RT) \quad (2)$$

在高应力状态下,该模型可以简化为如下指数函数形式:

$$\dot{\varepsilon} = A_2 \exp(\beta\sigma) \exp(-Q/RT) \quad (3)$$

结合上述 GH4169 的本构方程,对 Simufact Forming 材料库中 Inconel 718 材料的属性进行修改,使其符合模拟 GH4169 锻造所需的流变应力

方程。

1.2.2 锻造工艺的设置

某企业实际锻造生产工艺由七个火次构成(表 2),该锻造工艺前三个火次包含了镦粗、拔长与加热过程,后四个火次只涉及拔长和加热过程。使用 Simufact Forming 软件开展模拟时,初始镦粗过程采用热锻模块(该模块集成镦粗功能),而拔长工艺的模拟需调用自由锻模块中的开坯锻造或径向锻造功能^[18]。在选取相应模块开展第一火次镦粗过程模拟时,需依次导入锻件三维初始几何模型、材料参数、初始温度场、摩擦因子,以及砧子与机械夹持手的几何模型^[19]。工件、砧子与机械夹持手的位置关系需进行精确定位调整,通过软件内置的定位功能,借助旋转、平移及重合约束等操作实现三者空间位置的协同优化^[20]。在设置单火次内的多道次工艺时,由于存在往复锻造,需在每一道次中选择软件的固定送料模式,并对坯料旋转角度进行参数化设置,以使模拟过程能够自动识别位置参数,完成道次间的工艺衔接。

实际生产的锻造流程具有连续性特征^[21]。为等效实现模拟过程的工艺,利用 Simufact Forming 软件的多工序耦合功能。具体而言,在完成每个火次模拟,以及同一火次内镦粗、拔长等不同工步的模拟后,需重新生成包含该阶段结束时锻件的应变、温度等信息的几何模型。为后续模拟过程提供可直接调用的几何模型,从而实现多工序间的数据传递与耦合,确保模拟结果的物理真实性。

表 1 GH4169 合金化学成分质量分数

(单位: %)

Tab. 1 Chemical composition of GH4169 alloy

(unit: %)

C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	Al	Ti	Cu	Nb	Co	P	Fe	...
0.03	0.02	0.07	53.32	18.14	2.99	0.58	1.02	0.04	5.29	0.30	0.01	18.16	...

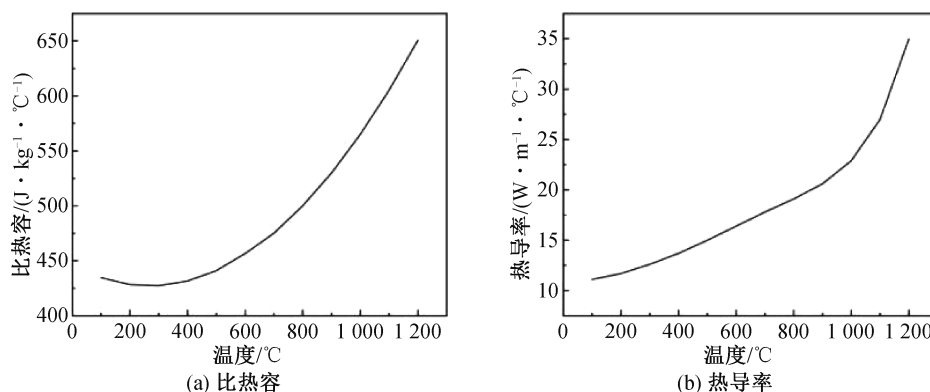


图 2 GH4169 合金的热物性参数

Fig. 2 Thermal physical parameters of GH4169 alloy

表 2 实际锻造工艺

Tab. 2 Actual forging process

火次	操作说明	锻前规格/mm	锻后规格/mm	加热温度/℃	保温时间/h
1	镦粗拔长	508	530	1 110	4
2	镦粗拔长	530	550	1 080	3
3	镦粗拔长	550	630	1 020	3
4	拔长	630	500	1 000	3
5	拔长	500	410	1 000	3
6	拔长	410	365	1 000	3
7	拔长	365	325	1 020	3

1. 2. 3 确定划分网格数量

划分不同网格数量对第一火次的镦粗 1、拔长 1 过程进行模拟。划分网格数量为 (20 000、30 000、40 000), 图 3、图 4 为不同网格数量的模拟结果。

从模拟结果分析可得, 在 30 000 与 40 000 网格数量下模拟结果相差较小, 但与 20 000 网格数量下的模拟结果差别大^[22]。在 30 000 网格数量下, 相较于 20 000 网格数量, 其等效应变分布能更细致地反映材料变形的局部特征, 精准度有较大提升, 可更准确地反映镦粗拔长过程中的变化规律; 另一方面, 与 40 000 网格数量相比, 30 000 网格数量在保证较高模拟精度以满足工程分析需求的

同时, 能有效控制计算规模, 降低计算时间与资源消耗, 实现了模拟精度与计算效率的较好平衡, 更适用于工程实际中的镦粗拔长工艺模拟分析。

2 模拟结果与分析

2. 1 锻件变形分析

如图 5 与图 6 所示, 数值模拟所得的完整锻造工艺流程和工件外形演变过程, 与实际工艺规范呈现高度吻合性^[23-24]。模拟结果表明: 在镦粗变形阶段, 初始圆柱状坯料因上下端面与砧块间的摩擦约束效应, 导致端面区域金属流动受阻, 等效

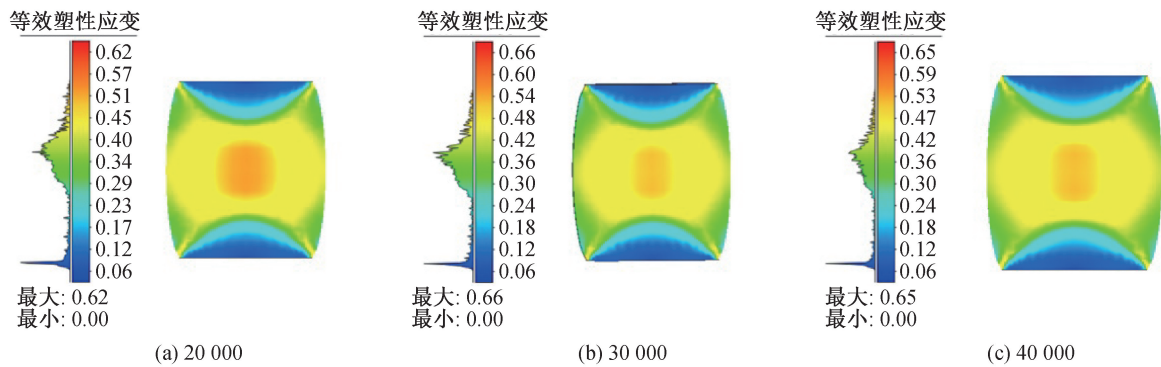


图 3 镦粗 1 在不同网格数量下的模拟结果

Fig. 3 Simulation results of upsetting 1 under different grid quantities

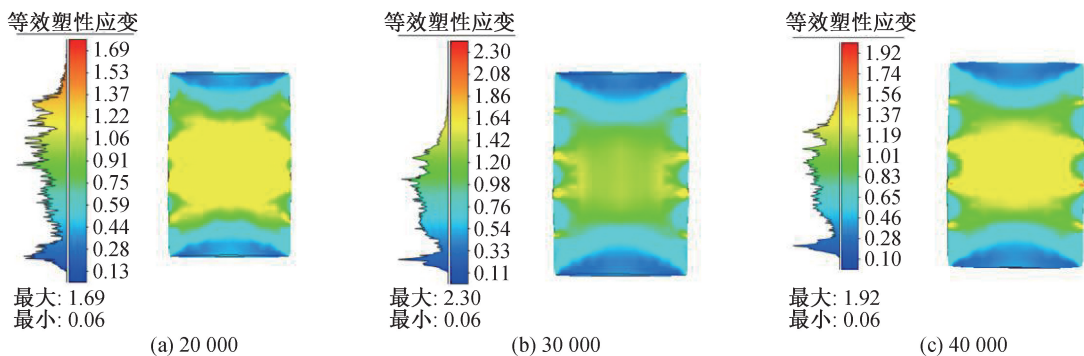


图 4 拔长 1 在不同网格数量下的模拟结果

Fig. 4 Simulation results of swaging 1 under different grid quantities

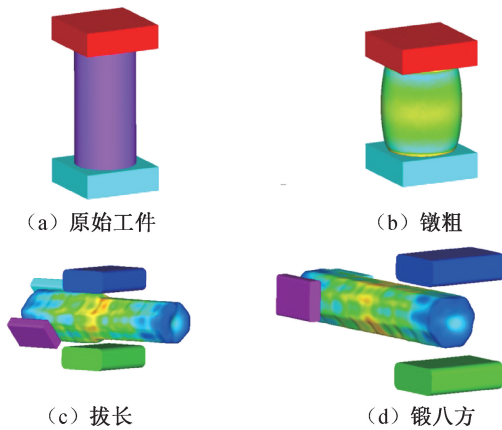


图5 模拟锻造工艺流程

Fig. 5 Simulated forging process flow

应变分布呈现显著梯度。中心区域因变形量较大产生更高的变形热,促使金属流动性增强,进而形成中部外凸的鼓形。在多道次拔长工艺实施过程中,坯料经往复锻造逐步演变为八边形截面,其轴向长度随变形累积呈现规律性延展。值得注意的是,当工艺完成后,工件头尾端出现的中心凹陷,本质是由于芯部金属在应力状态下的流动滞后于表面金属,在表面变形的牵引作用下,中心区域因金属补充不充分而形成几何凹陷。该演变规律与基于金属流动理论的分析具有良好的一致性,验证了模拟工艺参数设置的合理性与变形机制分析的准确性。

2.2 温度场分析

锻造生产中,锻件温度对锻件成形质量至关重要,合理的温度可以加快锻造效率和提高产品良率,同时考虑到由于锻造引起的内部升温对芯部区域的影响,确保芯部不会因为温度太高(过烧)而影响最终性能。

为了更好了解整个锻件不同部位的温度、

等效应变的变化,从锻件中选取了标号为2、1和3的三个点,分别位于端面区域、芯部区域和侧表面区域,运用后处理点追踪技术分析三个区域温度、应变的变化规律。

图7与图8所示为模拟结果及镦粗1阶段锻件特征点追踪温度分布曲线,通过分析可知,三次镦粗过程均呈现显著的温度梯度特征:工件外表面温度较低,且由表层向芯部呈现递增趋势。该现象归因于镦粗变形过程中,芯部区域经历了更大的塑性变形,累积的变形功转化为热能,导致显著的温升效应。与此同时,锻件端面与低温砧具及外界空气直接接触,通过热传导和对流作用形成高效散热通道,致使表层温度快速下降;加之镦粗过程持续时间较短,芯部产生的变形热尚未形成有效热传导至表面区域,从而维持了内外层的温度差异。特征点温度演化曲线进一步表明:端面与砧子接触初期即出现急剧降温,芯部温度随镦粗进程保持稳定并略有上升,外表面温度则呈现持续小幅下降趋势。

在多道次拔长工艺阶段,工件芯部温度场表现出良好的一致性,主体区域温度波动幅度较小。然而,工件表面因与砧子及环境空气的散热作用,形成明显的低温边界。值得关注的是,工件头尾端与其他部位存在显著温度差异,该区域因散热面积相对较大且约束条件特殊,导致温度衰减速率高于主体部分,进而在内外层间形成较大的温度梯度。这种非均匀温度分布可能导致材料边缘与芯部的显微组织和力学性能出现显著差异,对获得组织均匀、性能优异的锻件产生不利影响。此外,部分芯部区域温度的上升现象,可解释为随着变形量的累积,塑性变形能转化的热能逐渐超过热耗散速率,使得材料内部温度因变形功的持续输入而呈现阶段性升高。

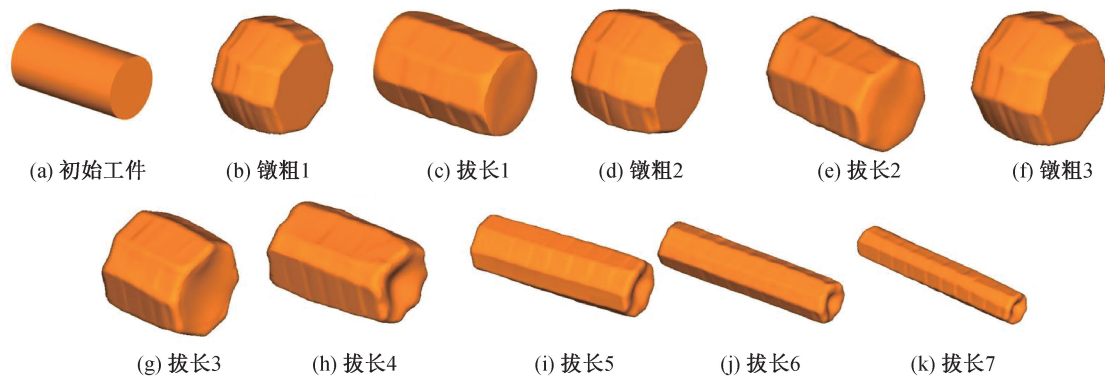


图6 锻造整流程中工件外形变化

Fig. 6 Changes in the shape of the workpiece during the entire forging process

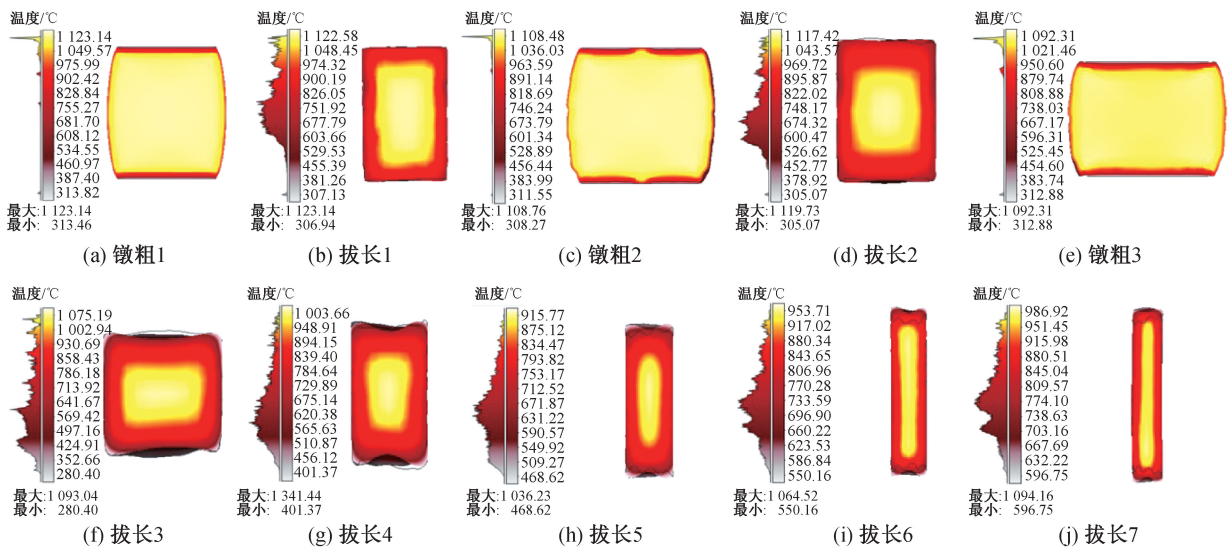


图 7 锻造过程阶段温度分布

Fig. 7 Temperature distribution during different forging stages

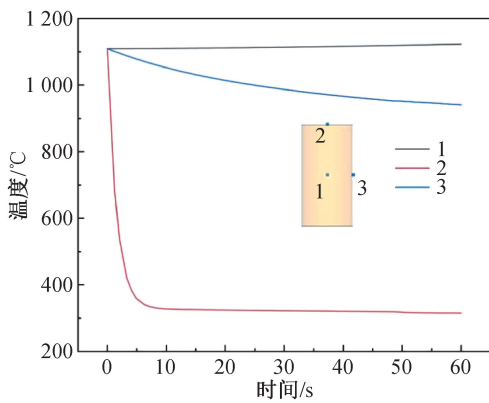


图 8 点追踪镦粗 1 温度变化趋势

Fig. 8 Temperature variation trend of the point-tracking upsetting process 1

2.3 等效应变分析

等效应变的大小是评价锻件锻透性的重要指标,锻件芯部发生较大的应变,有助于消除缺陷,改善组织性能。通过镦粗工艺增加芯部应变,也可以改善后续拔长初期表面应变高而芯部应变低引起的不均匀变形,提高拔长过程中材料整体变形均匀性。

图 9、图 10 为不同道次等效应变分布图及镦粗 1 阶段特征区域应变变化趋势图,由图可知,镦粗变形过程中存在显著的应变梯度:上下端面因受砧面摩擦约束作用,金属径向流动受阻,形成低应变区(应变值基本维持初始状态),而芯部区域因受边界摩擦影响较小,成为主要变形区,其等效

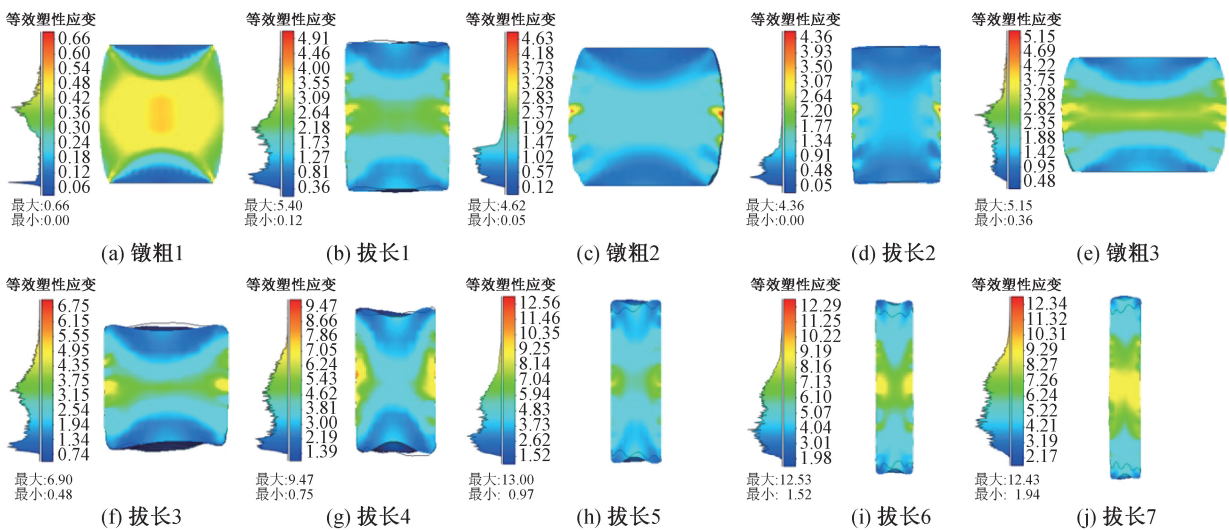


图 9 不同道次下的等效应变分布

Fig. 9 Equivalent strain distribution during different forging stages

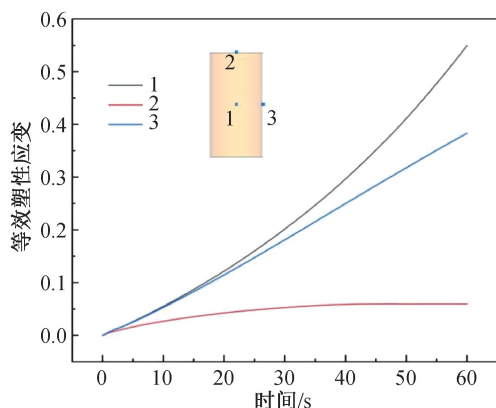


图 10 镦粗 1 中点追踪等效塑性应变变化趋势

Fig. 10 The variation trend of equivalent plastic strain at the midpoint during upsetting 1

应变值显著高于端面及表层区域。这种由摩擦导致的变形不均匀性,使得应变在截面内呈现“X”型分布特征,与砧子接触的端面区域几乎无变形,应变值由边缘向中心逐渐增大,最终导致圆柱体坯料形成典型的鼓形畸变。

从应变幅值演变规律来看,镦粗 1、2、3 阶段的应变范围分别为 0.00~0.66、0.05~4.63、0.36~5.15,后两个镦粗过程的峰值应变与平均应变显著高于首次镦粗。这是由于在镦粗 2 和镦粗 3 前经历了拔长工序,前期累积的塑性变形与当前道次应变发生叠加,体现了多工序耦合作用下的应变累积效应。

在拔长过程的等效应变分布中,坯料经镦粗-拔长循环后,整体应变水平显著提升,主体区域等效应变可达 1.75 以上,仅头尾局部区域因边界约束保持较低应变值。各拔长道次的峰值应变均出现在工件上下表面,这是由于砧面接触时的摩擦阻力不仅限制了表面金属的横向流动,还促使变形能量在接触区域集中释放。芯部作为传统认知中的“难变形区”,其应变值随拔长次数增加而逐步增大,且沿工件轴向呈现近似周期性分布特征,

表明多次拔长工艺有效促进了芯部材料的塑性流动。对比拔长阶段可见,首道拔长的芯部应变幅值最小,而最后两道次的芯部应变分布更为均匀,标志着工件芯部在多道次变形中逐渐实现“锻透”,其截面应变分布呈现典型的“X”型分层特征,反映出表面强变形区与芯部弱变形区的动态演化过程。

2.4 关键点温度变化分析

在 Simufact Forming 软件中选取工件的芯部、端面以及表面三点,如图 11 所示。在后处理中提取三点在整个锻造过程中的温度数据,分析整理出温度随时间变化的曲线图,见图 12。

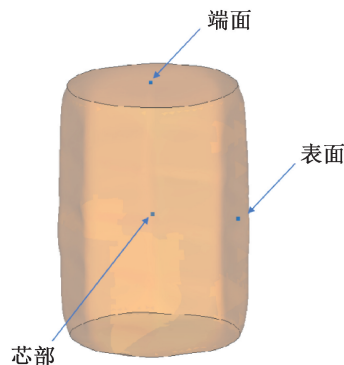


图 11 工件上三点示意图

Fig. 11 Schematic diagram of three points on the workpiece

GH4169 圆柱件锻造时,芯部、表面及端面温度随时间呈周期性波动,与火次工艺紧密相关。前三个火次中,镦粗、拔长阶段塑性变形产生,变形热使各部位升温,芯部因变形热直接作用且热传导滞后,升温更显著;保温阶段,表面和端面因与外界热交换强而降温更明显,芯部温度相对稳定,形成芯部与表、端面的温度差。后四个火次,拔长变形生热使温度上升,保温阶段热传递与热交换规律同前,表面、端面散热快,中心温度仍

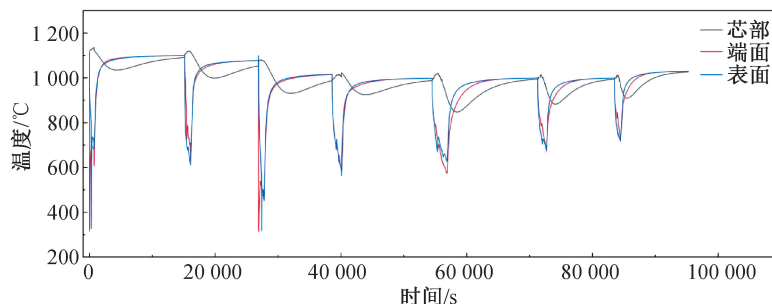


图 12 锻造过程上工件上三点温度变化曲线

Fig. 12 Temperature changes at three points in the workpiece during forging

相对更高。整体上,多次塑性变形生热与保温阶段热传导、热散失的交互作用,驱动温度场随工艺动态演化,中心温度因热传导滞后和变形热直接作用,始终相对高于表面与端面,表面和端面温度更易受外界热交换影响。

3 结论

1)基于 Simufact Forming 有限元平台,构建了包含工件、砧子及机械夹持手的三维热力耦合模型,针对 GH4169 合金开坯锻造工艺,成功模拟了镦粗-拔长多工序耦合过程。通过数值模拟获得的锻件温度场与等效应变场分布。对实际生产工艺的改进优化具有指导意义,为复杂合金锻造过程的工艺优化提供了可靠的数值分析依据。

2)镦粗变形阶段,工件端面因与低温砧具接触产生强烈热传导,同时受边界摩擦约束导致变形量受限,形成温度与等效应变的双低值区;芯部区域则因集中的塑性变形产生显著的变形热效应,且热量难以向表面耗散,使得该区域的温度与等效应变均显著高于周边区域,呈现典型的“中心高、边缘低”的梯度分布特征。

3)拔长过程中,工件表面因直接参与砧面接触变形及环境热交换,表现为高应变值与低温度值的耦合特征;芯部作为难变形区,其塑性应变随拔长道次增加而逐步累积,随着变形能量的深入传递,芯部材料逐渐被“锻透”,等效应变呈现沿轴向的周期性分布规律。这种多工序耦合作用下的变形-传热行为,揭示了复杂锻件内部组织性能调控的关键机制。

参考文献:

- [1] 董兆伟,徐奎奎,孙立辉,等. 大型GH4169合金锻造棒组织缺陷分析[J]. 铸造技术, 2021, 42(3): 180-183+187.
DONG Z W, XU K K, SUN L H, et al. Defect analysis of large GH4169 alloy forged bar[J]. Foundry Technology, 2021, 42(3): 180-183+187.
- [2] 张士宏,刘家旭,张海燕,等. GH4169合金塑性加工成形与组织调控方法综述[J]. 塑性工程学报, 2024, 31(4): 74-91.
ZHANG S H, LIU J X, ZHANG H Y, et al. Review of plastic processing and microstructure control method of GH4169 alloy [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2024, 31(4): 74-91.
- [3] WANG J G, LIU D, YUAN Y J, et al. Deformation characteristic and microstructure evolution of GH4169 alloy induced by axial upsetting and axial rotary forging [J]. Materials Characterization, 2022, 191: 112136.
- [4] 裴丙红. GH4169合金锻造工艺对晶粒尺寸影响研究[J]. 特钢技术, 2015, 21(2): 34-37.
PEI B H. Influence of forging process on grain size of GH4169 alloy [J]. Special Steel Technology, 2015, 21(2): 34-37.
- [5] 姚彦军,叶宁. 锻造参数对GH4169叶片成形及组织的影响[J]. 锻造与冲压, 2022(23): 30+32+34+36+38.
YAO Y J, YE N. Effect of forging parameters on the formability and microstructure of GH4169 steel blade [J]. Forging & Metalforming, 2022(23): 30+32+34+36+38.
- [6] WANG Z B, HOU G S, ZHAO Y, et al. Characterization of residual stresses and grain structure in hot forging of GH4169[J]. Aerospace, 2022, 9(2): 92.
- [7] MA B Q, JIN W J, KANG J, et al. Hot deformation behavior of GH4169 superalloy with high proportion of recycled material addition and initial dendrite structure [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2024, 1007: 176352.
- [8] 乔世昌,王岩,吕良星,等. Ni-Co-Cr基粉末高温合金动态再结晶的有限元模拟与实验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(10): 3405-3418.
QIAO S C, WANG Y, LYU L X, et al. Finite element simulation and experimental research on dynamic recrystallization of Ni-Co-Cr-based PM superalloy [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(10): 3405-3418.
- [9] CHAMANFAR A, VALBERG H S, TEMOLIN B, et al. Development and validation of a finite-element model for isothermal forging of a nickel-base superalloy [J]. Materials, 2019, 6: 100319.
- [10] 魏振,李昕,江河,等. GH4169合金环轧过程组织模型适配性研究及应用[J/OL]. 金属学报, 1-18 [2025-05-10]. <https://link.cnki.net/urlid/21.1139.tg.20241125.1700.004>.
WEI Z, LI X, JIANG H, et al. Study on the adaptability of microstructure models in the ring rolling process of GH4169 alloy and its application [J/OL]. Acta Metallurgica Sinica, 1-18 [2025-05-10]. <https://link.cnki.net/urlid/21.1139.tg.20241125.1700.004>.
- [11] 靳盛哲,胡殿印,刘辉,等. 镍基高温合金GH4169孔挤压强化数值模拟方法及参数影响[J]. 航空动力学报, 2020, 35(1): 30-40.
JIN S Z, HU D Y, LIU H, et al. Numerical simulation method and investigation of cold expansion processing parameters of nickel-based superalloy GH4169 [J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(1): 30-40.

- [12] WEI Z,JIANG H,DONG J X. A new evaluation method of mixed-grain in finite element simulation during ring-rolling of superalloy[J]. *Journal of Materials Research and Technology*,2025,36:1912-1916.
- [13] 张炯,华成强. 基于 Simufact Forming 的细长轴连续径向锻造数值仿真[J]. *热加工工艺*,2019,48(23):126-129.
ZHANG J,HUA C Q. Numerical simulation of continuous radial forging for slender shaft based on Simufact Forming[J]. *Hot Working Technology*,2019,48(23):126-129.
- [14] 曲雪琴. 基于 Simufact Forming 的涡轮叶片热锻模具磨损计算机仿真分析[J]. *热加工工艺*,2018,47(21):196-198+202.
QU X L. Computer simulation analysis on wear of hot forging die for turbine blade based on Simufact Forming[J]. *Hot Working Technology*,2018,47(21):196-198+202.
- [15] YANG X W,LI W Y,LI J,et al. FEM analysis of temperature distribution and experimental study of microstructure evolution in friction interface of GH4169 superalloy[J]. *Materials & Design*,2015,84:133-143.
- [16] 刘明哲. 资源节约型 GH4169 合金热变形行为及锻造模拟研究[D]. 秦皇岛:燕山大学,2022.
LIU M Z. Study on hot deformation behavior and forging simulation of resource-saving GH4169 alloy[D]. Qinhuangdao:Yanshan University,2022.
- [17] SELLARS C M,MCTEGART W J. On the mechanism of hot deformation[J]. *Acta Metallurgica*,1966,14(9):1136-1138.
- [18] 刘宇,徐亮,左世斌,等. GH4169 高温合金十二角头螺栓锻造工艺数值模拟研究[J]. *机电产品开发与创新*,2025,38(1):161-164.
LIU Y,XU L,ZUO S B,et al. Numerical simulation research on forging processing of GH4169 high temperature alloy 12-point head bolt[J]. *Development & Innovation of Machinery & Electrical Products*,2025,38(1):161-164.
- [19] JIAO Y X,QI Q Q,GONG Y M,et al. Research on hot deformation behavior and microstructure evolution mechanism of GH4169 superalloy[J]. *Materials Today Communications*,2024,40:109958.
- [20] 冯璐,冯晓花,宗师,等. GH4169 合金大型涡轮盘模锻件环轧制坯锻造工艺研究[J]. *锻造与冲压*,2022(11):59-62.
FENG L,FENG X H,ZONG S,et al. Study on forging process of a heavy GH4169 alloy turbine disk forging with a preform made by ring rolling[J]. *Forging & Metalforming*,2022(11):59-62.
- [21] WANG J G,LIU D,YUAN Y J,et al. Deformation characteristic and microstructure evolution of GH4169 alloy induced by axial upsetting and axial rotary forging[J]. *Materials Characterization*,2022,191:112136.
- [22] BARTON G,LI X,HIRT G. Finite-element modeling of multi-pass forging of nickel-base alloys using a multi-mesh method[J]. *Materials Science Forum*,2007,539/540/541/542/543:2503-2508.
- [23] 杨杰. 大锻件用 26Cr₂Ni₄MoV 钢热变形行为研究[D]. 马鞍山:安徽工业大学,2021.
YANG J. Research on hot deformation behavior of 26Cr₂Ni₄MoV steel used for large forgings[D]. Ma'anshan:Anhui University of Technology,2021.
- [24] 马小丽,孙红旗. 高温合金 GH4169 高速铣削力试验研究[J]. *佳木斯大学学报(自然科学版)*,2017,35(4):611-613+636.
MA X L,SUN H Q. The high-speed milling force experiments on high temperature alloy GH4169[J]. *Journal of Jiamusi University (Natural Science Edition)*,2017,35(4):611-613+636.

(责任编辑 唐彦彦)