

基于 DEFORM-3D 的 GH5188 卡箍热模锻造过程数值模拟

刘大海¹, 陈劲东¹, 柴浩瑞¹, 郭正华¹, 朱长安²

(1. 南昌航空大学 航空制造工程学院, 江西 南昌 330063; 2. 翔鹰航空工业有限公司, 江西 德兴 334200)

摘要: 通过 DEFORM-3D 软件对 GH5188 卡箍热模锻造过程进行数值模拟, 分析了卡箍热模锻造变形过程中的网格流动、应力场、应变场和温度场。GH5188 卡箍热模锻造成形分为 3 个阶段: 镦粗成形、毛边成形和再结晶。结果表明: 在 1000 °C 和变形速度为 20 mm · s⁻¹ 条件下进行热模锻得到的锻件的流线分布合理、变形均匀, 主体无应力集中, 锻件表面无缺肉、折叠等缺陷; 锻后晶粒细化现象主要存在于连皮拐角处和毛边中, 卡箍整体的晶粒尺寸一致。因此, 该工艺方案合理并可行, 为卡箍实际锻造生产提供了理论指导。

关键词: GH5188 高温合金; 卡箍; 热模锻造; DEFORM-3D; 镦粗; 毛边; 再结晶

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.06.002

中图分类号: TG316.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2022) 06-0009-08

Numerical simulation on hot die forging process for GH5188 clamp based on DEFORM-3D

Liu Dahai¹, Chen Jindong¹, Chai Haorui¹, Guo Zhenghua¹, Zhu Chang'an²

(1. School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;

2. Xiangying Aviation Industry Co., Ltd., Dexing 334200, China)

Abstract: The hot die forging process of GH5188 clamp was simulated by software DEFORM-3D, and the grid flow, stress field, strain field and temperature field during the hot die forging deformation process of clamp were analyzed. However, the hot die forging for GH5188 clamp was divided into three stages of upsetting forming, burr forming and recrystallization. The results show that the forgings obtained by hot die forging at 1000 °C and the deformation speed of 20 mm · s⁻¹ has reasonable streamline distribution, uniform deformation, no stress concentration on the main body, and no defects such as lack of material or folding on the surface of forgings, the grain refinement phenomenon after forging mainly exists in the corners and burrs of joint, and the grain size of the whole clamp is consistent. Thus, the process scheme is reasonable and feasible, which provides theoretical guidance for the actual forging production of clamps.

Key words: superalloy GH5188; clamp; hot die forging; DEFORM-3D; upsetting; burr; recrystallization

高温高压导管卡箍是飞机管路系统中不可缺少

的连接件, 是目前应用最为广泛的管路连接形式, 对系统的固定连接、流体传送和稳定性起着十分重要的作用^[1-4]。随着科学技术的发展, 航空工业对高温卡箍性能的要求也愈发苛刻, 对卡箍的耐高温高压性能、耐脉冲压力、耐温度冲击性能以及可靠性均提出了更高的要求, 需对卡箍的关键结构尺寸、材料、工艺及其他技术要求进行优化, 而且传统材料已无法满足日益严苛的条件, 需要使用性能更好的高温合金^[5-7]。

收稿日期: 2021-05-19; 修订日期: 2021-08-25

基金项目: 江西省重点研发计划项目 (20202BBEL53011); 江西省重大科技研发专项项目 (20194ABC28001)

作者简介: 刘大海 (1981-), 男, 博士, 副教授

E-mail: liudahai.hit@gmail.com

通信作者: 陈劲东 (1996-), 男, 硕士研究生

E-mail: 15079906265@163.com

Liu W D, Qu H. Metallographic measurement and theoretical calculation of $(\alpha + \beta) / \beta$ transformation temperature of TC4 alloy [J]. Special Casting and Nonferrous Alloys, 2014, 34 (11): 1210-1213.

[16] GB/T 3075—2021, 金属材料—疲劳试验—轴向力控制方法 [S].

GB/T 3075—2021, Metallic materials—Fatigue testing—Axial force-controlled method [S].

[17] Dong S, Liu X D, Shan Y C, et al. Research on the stamping residual stress of steel wheel disc and its effect on the fatigue life of wheel [J]. International Journal of Fatigue, 2016, 93: 173-183.

[18] 方秀荣, 邵艳茹, 陆佳, 等. 锻造工艺参数对 TC4 钛合金锻件残余应力的影响 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (3): 1-8.

Fang X R, Shao Y R, Lu J, et al. Influence of forging process parameters on residual stress of TC4 titanium alloy forgings [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (3): 1-8.

GH5188 高温合金是一种固溶强化型钴基高温合金,以碳化物 (M_6C 、 $M_{23}C_6$) 为弥散强化相^[8-10]。相比于镍基高温合金,该合金具有更好的抗蠕变性能、抗热腐蚀性能、抗热疲劳性能和高温强度。钴基高温合金作为典型的高热强性合金,在镍基高温合金无法工作的环境下仍具有良好的服役性能,因此,对于钴基高温合金卡箍的研究势在必行。在金属材料工艺领域^[11],通过建立合理的数值模型,不仅可以在进行加工之前分析和优化金属流动并进行模具应力分析、降低开发成本,而且能够进行新工艺的预先验证。因此,采用有限元分析技术进行 GH5188 卡箍热模锻造过程的研究。

Brand A J 等^[12]建立了 IN718 合金的数值分析模型,对涡轮盘锻造工艺进行了有限元模拟,对实际工艺具有一定的指导作用。Cho J R 等^[13]通过数值分析研究了多工步锻造过程中的再结晶行为,制定了适合大尺寸锻件的成形工艺路线。曲敬龙等^[14]基于 MTS 热模拟压缩试验,建立了 GH4720Li 高温合金的本构

方程,然后利用有限元模拟研究了 GH4720Li 高温合金的等温锻造过程,优化了等温锻造工艺,成功制造出组织均匀的涡轮盘,晶粒度达到 8 级以上。付晓杰等^[15]针对 Q345B 高强度低合金钢热连轧模拟过程,基于弹塑性增量理论及混合强化理论,借助真应力-真应变数学模型及微观组织模型,对 ABAQUS 有限元软件进行了二次开发,模拟了微观组织的演变过程。

本文以 GH5188 高温合金为研究对象,利用 DEFORM-3D 有限元专业分析软件对卡箍热模锻造过程进行模拟。通过模拟锻造过程中的内部应力变化、金属流动、组织演变等过程,观察构件上是否产生组织缺陷,并对锻后的晶粒组织进行分析,检验锻造工艺参数的合理性,从而为卡箍实际生产提供理论指导和技术支持。

1 材料与方法

本试验采用锻造开坯后的 GH5188 高温合金棒材,其化学成分如表 1 所示。

表 1 GH5188 高温合金化学成分 (%, 质量分数)

Table 1 Chemical compositions of alloy superalloy GH5188 (% , mass fraction)

C	Cr	Ni	W	Fe	B	Mn	Si	La	Co
0.1	20.0~24.0	20.0~24.0	13.0~16.0	≤3.0	≤0.015	≤1.25	≤0.20	0.1	余量

本文通过单道次热压缩试验来获得热模锻造的材料参数。试验中,将尺寸为 $\Phi 10\text{ mm}\times 15\text{ mm}$ 的圆柱试样放在 Gleeble-1500 热模拟试验机上进行单道次热压缩试验,两端用 MoS_2 粉进行润滑,将热电偶焊接在试样表面,以 $20\text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ 的加热速率升温至保温温度,并保持 180 s,使各组试样保持一致的状态。然后进行降温,缓慢达到试样的变形温度,保温 30 s 后在所在温度下进行压缩试验。压缩结束后立刻水淬,以保留变形后的组织形貌。为达到良好的预测效果,试验温度在锻造过程中的温度区间内选取,试验参数如表 2 所示。

2 有限元模拟方法与模拟过程

2.1 几何模型的建立

根据 AS1865D—2016^[16]卡箍规范标准,本文所研究的 GH5188 高温合金卡箍模座零件的三维图如图 1 所示。可以看出,该零件内有开放式腔体,且左右不对称,形状较为复杂。为了使坯料在锻造过程中受力均匀,材料流动合理,本文采用了一模两腔的设计思路,将锻件左右对称排布。为了便于

表 2 单道次热压缩试验参数

Table 2 Parameters of single pass hot compression test

编号	应变速率 $\dot{\epsilon}/\text{s}^{-1}$	温度 $T/^\circ\text{C}$	应变 ϵ
1	0.2	1080	0.7
2	0.2	1130	0.7
3	0.2	1180	0.7
4	1	1080	0.7
5	1	1130	0.7
6	1	1180	0.7
7	5	1080	0.7
8	5	1130	0.7
9	5	1180	0.7
10	10	1080	0.7
11	10	1130	0.7
12	10	1180	0.7

发现模锻中的错移,锻件的分模位置选取在卡箍模座的最大半径圆上,使金属坯料以镦粗的方式填充型腔,同时可以保证锻件容易从型槽中取出。

通过以上参数的选取与计算,在 UG 软件中进行卡箍模锻型腔三维实体造型设计,图 2 为 GH5188 卡箍模座的上、下模及锻件的三维图。根据锻件的体



图 1 卡箍模座零件的三维形状示意图
Fig. 1 Schematic diagram of three-dimensional shape for clamp mold base part

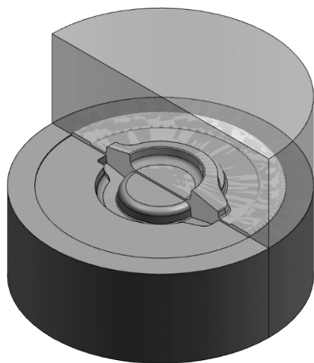


图 2 GH5188 高温合金热模锻造型槽型腔三维图
Fig. 2 Three-dimensional diagram of groove and cavity for superalloy GH5188 hot die forging

积以及实际的棒料尺寸，确定坯料为直径为 $\Phi 110\text{ mm}$ 、高度为 28 mm 的圆柱体。

2.2 DEFORM-3D 的材料输入

将模具材料设为刚性体，坯料设为塑性体。模具材料使用默认参数。由于 DEFORM-3D 中没有 GH5188 高温合金的材料参数，本文利用 DEFORM-3D 软件，通过自定义 GH5188 高温合金的流变应力本构模型和动态再结晶模型，将 GH5188 高温合金材料添加到材料库中。式（1）为本次模拟使用的 GH5188 高温合金变形流变应力本构方程。动态再结晶模型采用 DEFORM-3D 中提供的 Avrami 模型。

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

式中： A 和 α 为常数，分别取值为 $3.82 \times 10^{12}\text{ s}^{-1}$ 和 0.00323 MPa^{-1} ； ΔH 为激活能，取值为 $398000\text{ J} \cdot \text{mol}^{-1}$ ； n 为应力指数，取值为 7.98 ； R 为摩尔气体常数，取值为 $8.314\text{ J} \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}$ ； $\dot{\epsilon}$ 为应变速率， s^{-1} ； σ 为流变应力， MPa ； T 为加载条件下的相对温度， K 。

2.3 其他参数的设置

在热模锻造过程中，除材料参数的设置，还要给定模具以及环境温度、热交换系数、摩擦因数等，这均与实际生产过程息息相关。为了提高模拟精度，

本文使用绝对网格划分法，设定单元尺寸比为 2，最小单元尺寸为 0.90 mm ，并进行体积补偿，避免模拟后出现体积损失。然后设置模拟控制基本参数，采用控制模具行程的方式，步长以最小网格边长的 $1/3$ 为参考标准，上模移动速度设为 $20\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。卡箍热模锻造成形属于热塑性体积成形，在模具与坯料之间存在较大的摩擦，采用剪切摩擦模型较为合适，摩擦因数取热锻成形的默认值，并通过系统产生接触关系。表 3 为前处理的相关参数。

表 3 前处理相关参数
Table 3 Related parameters of pre-process

参数	数值
坯料始锻温度/ $^{\circ}\text{C}$	1000
模具温度/ $^{\circ}\text{C}$	1000
环境温度/ $^{\circ}\text{C}$	20
模具热传导系数/ $(\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1})$	5000
环境热交换系数/ $(\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1})$	20
坯料网格数	80000
步长/ mm	0.3
储存步数	20
上模运动速度/ $(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	20
摩擦因数	0.3
初始晶粒尺寸/ μm	40

3 模拟结果与分析

3.1 载荷曲线分析

通过 DEFORM-3D 后处理模块中的曲线功能可以获得模拟过程中上模的载荷-行程曲线，如图 3 所示。根据曲线的斜率特征，可将卡箍热模锻造成形基本分为以下 3 个阶段。

- （1）从开始到下压量为 18.5 mm 之间为第 I 阶段，为卡箍锻粗成形阶段，金属坯料开始流动并充满型腔。从图 3 可以看出，上模载荷较小且增加缓慢，最大成形力为 5000 kN 。
- （2）从第 II 阶段开始进入毛边成形阶段，上模行程在 $18.5 \sim 24.0\text{ mm}$ 之间，该阶段内金属坯料在挤压的作用下以很快的速度充进毛边槽，使锻件的水平投影面积骤增，因此，第 II 阶段的载荷迅速增加，最大成形力达到了 24124.85 kN 。
- （3）当材料的变形能量累积到再结晶激活能时，将会发生动态再结晶，使变形抗力降低，成形过程进入第 III 阶段。在这个阶段内，由于加工硬化

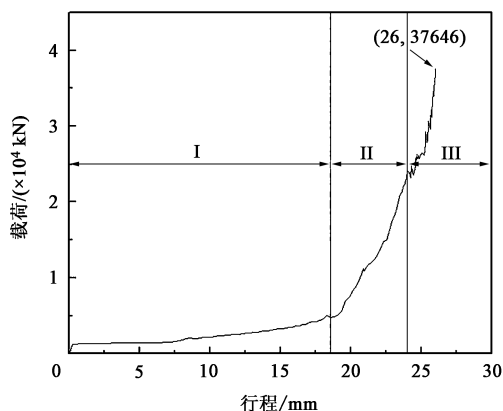


图 3 上模的载荷-行程曲线

Fig. 3 Load-stroke curve of upper die

与再结晶软化的交替进行, 载荷曲线表现为上下波动的锯齿状, 最终成形力为 37646 kN。

3.2 材料流动网格分析

图 4 为卡箍热模锻造过程中的流动网格内部变化示意图。在锻造的第 I 阶段, 流动网格的划分在后处理模块中进行, 坯料的网格取自过切面中点的 Z-Y 平面, 网格数量为 50×20 , 如图 4a 所示。从图 4b 可以看出, 在锻造成形的第 II 阶段, 坯料中心处的网格高度减小、宽度增加, 这说明在此阶段主要以材料的径向流动为主, $1/2$ 半径处的材料向外部弓出, 外缘材料的高度几乎没有变化。随着锻造过程的进行, 进入锻造的第 III 阶段, 材料的径向流动更加显著, 中心部分的材料网格被压为条状, 边缘网格发生严重变形, 具有向外流动的趋势, 如图 4c 所示, 说明在第 III 阶段中毛边开始形成。由于惯性作用, 与上、下模接触位置的金属流动速度最快, 而中间材料的流动速度较慢, 网格为向外凸出的形状。

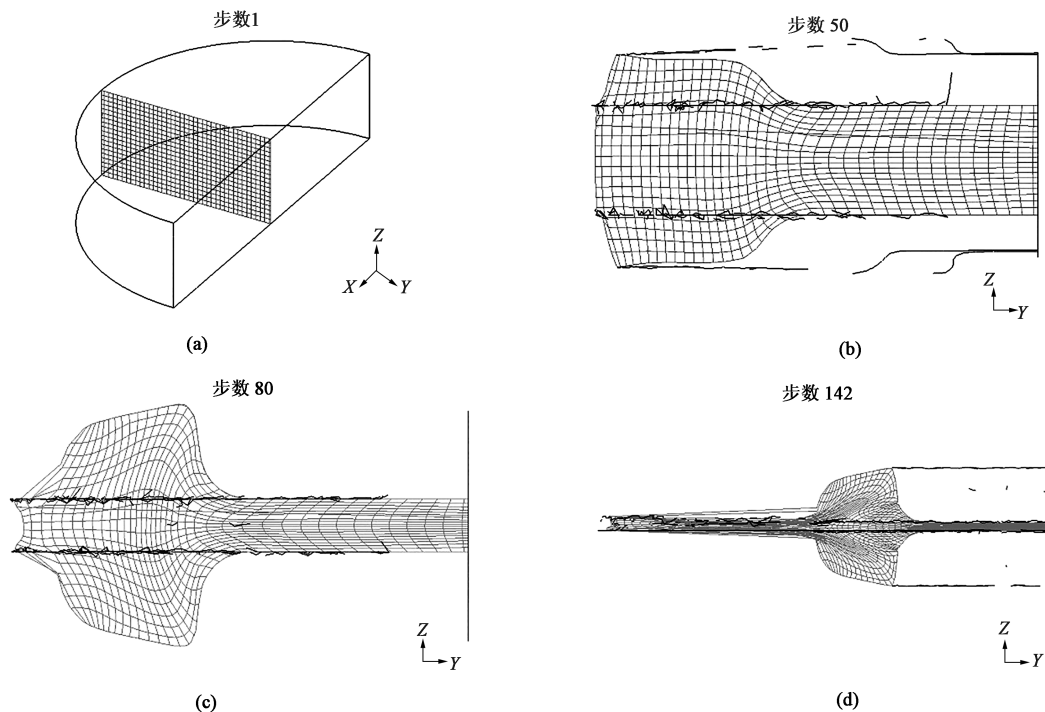


图 4 网格变形追踪结果

(a) 第 I 阶段 (b) 第 II 阶段 (c) 第 III 阶段 (d) 最终成形结果

Fig. 4 Mesh deformation tracking results

(a) Phase I (b) Phase II (c) Phase III (d) Final forming result

图 4d 为锻件的最终成形结果, 锻件本体的内部材料发生流动, 具有与外部轮廓相似的形状, 形成良好的流线分布, 如图 4d 所示。流线使金属的力学性能出现各向异性, 当流线与外加的剪切应力和冲击方向垂直时, 零件才具有较好的服役性能。从网格的流动情况可以看出, 使用该工艺参数可以成形

出流线合理、无明显折叠缺陷的零件。

3.3 等效应力场分析

图 5 为卡箍热模锻造过程中不同分析步的等效应力分布图, 通过模拟分析可以预测出热模锻造过程中可能出现的问题。在第 I 阶段, 金属坯料的中心部位首先与上模接触, 最先产生变形, 等效应力在圆角处

达到了最大值, 如图 5a 所示。随着上模继续向下运动, 金属坯料开始向外扩张, 与型槽外缘轮廓产生接触, 如图 4b 所示, 边缘处的等效应力明显大于其他部位, 达到 624 MPa, 如图 5b 所示。在上、下模的挤压作用下进入第 III 阶段, 坯料向更深的型槽圆角处聚拢, 等效应力值达到最大, 卡箍已基本成形, 如图 5c 所示。毛边槽上的等效应力较大, 说明毛边槽的圆角半径设计合理, 产生的流动阻力能够促进金属向内流动, 填充型腔。若半径过小, 则容易压塌内陷, 影响锻件出模。图 5d 为锻件的最终成形结果, 金属全部充满型腔, 没有明显缺陷, 等效应力的分布比较均匀, 等效应力在毛边与型腔的连接处达到最大。

图 5c 所示。毛边槽上的等效应力较大, 说明毛边槽的圆角半径设计合理, 产生的流动阻力能够促进金属向内流动, 填充型腔。若半径过小, 则容易压塌内陷, 影响锻件出模。图 5d 为锻件的最终成形结果, 金属全部充满型腔, 没有明显缺陷, 等效应力的分布比较均匀, 等效应力在毛边与型腔的连接处达到最大。

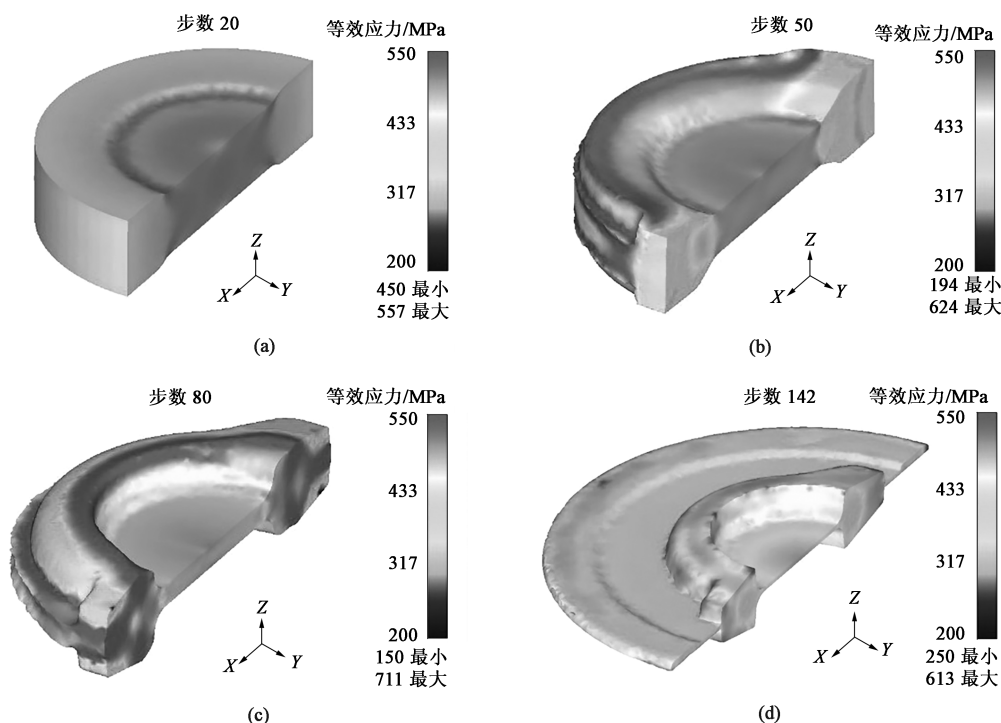


图 5 等效应力分布云图

(a) 第 I 阶段 (b) 第 II 阶段 (c) 第 III 阶段 (d) 最终成形结果

Fig. 5 Cloud maps of equivalent stress distribution

(a) Phase I (b) Phase II (c) Phase III (d) Final forming result

3.4 等效应变场分析

应变是指变形的程度, 通过对应变的分析, 可以了解热模锻造过程中各部位的变形情况, 对生产过程有一定的指导意义。在变形初期, 总体等效应变较小, 最大等效应变仅为 0.6640, 发生在上、下模接触面的圆角处, 材料中心也发生了一定程度的变形, 坯料外部的等效应变较小, 为 0.0365, 如图 6a 所示。从图 6b 中可以看出, 随着上模向下移动, 型腔外缘挤压坯料, 产生了较大的等效应变, 达到了 6.3300; 中心部位变形比较均匀, 等效应变在 0.500 左右; 两端的等效应变较小, 无明显变形。在变形第 III 阶段, 锻件主体的等效应变处于较小范围, 而两端拐角处的等效应变值高, 这符合正常锻件的实际情况, 如图 6c 所示。图 6d 为锻件的最终成形结果, 由于毛边在毛边槽内变形剧烈, 等效应

变量达到 10.300; 锻件整体的等效应变比较均匀, 等效应变在 1 左右, 与毛边和连皮的连接处的等效应变较大, 约为 2.700。

3.5 温度场分析

热模锻造模拟过程中不同阶段的温度分布情况如图 7 所示。在热模锻造成形过程中, 由于打击速度较快, 坯料温度下降并不明显, 反而由于剧烈变形导致局部温度升高, 锻件温度较为稳定, 保持在 1000 ℃ 左右, 符合 GH5188 高温合金的锻造要求。图 7a 为变形第 I 阶段, 由于模具与坯料的接触, 在热传导的作用下, 未变形的坯料温度略有下降, 最低温度为 991 ℃; 在变形第 II 阶段, 由于上模的压力, 促使材料发生流动, 同时也产生热量, 导致变形区域的局部温升, 最高温度为 1080 ℃, 如图 7b 所示; 随着上模的下压, 材料的流动越来越剧烈,

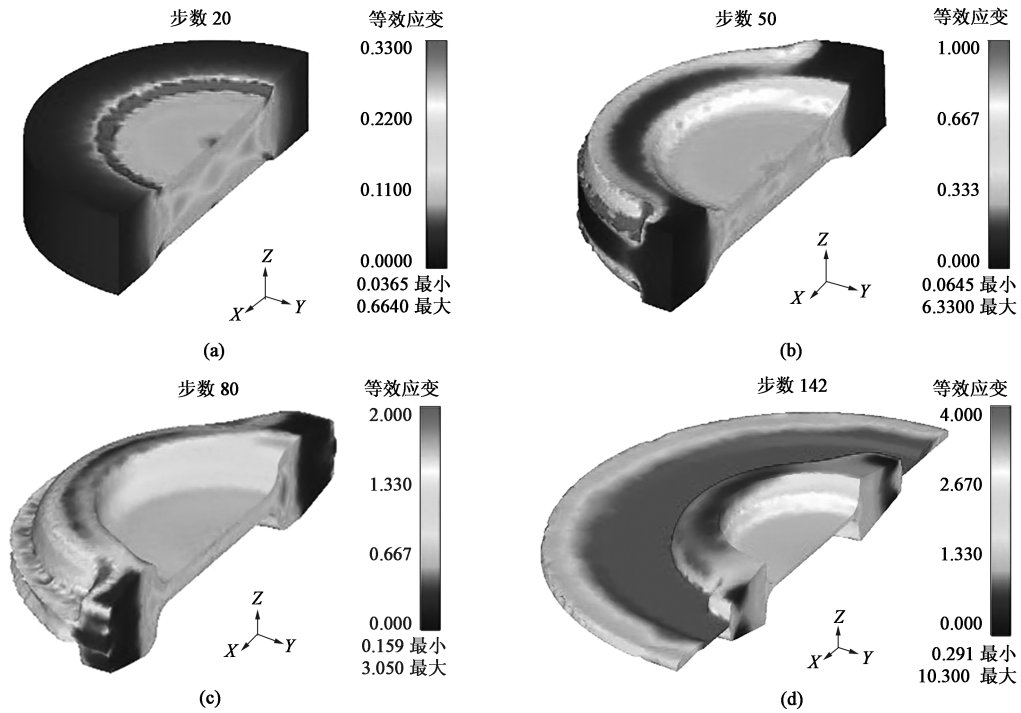


图 6 等效应变分布云图

(a) 第 I 阶段 (b) 第 II 阶段 (c) 第 III 阶段 (d) 最终成形结果

Fig. 6 Cloud maps of equivalent strain distribution

(a) Phase I (b) Phase II (c) Phase III (d) Final forming result

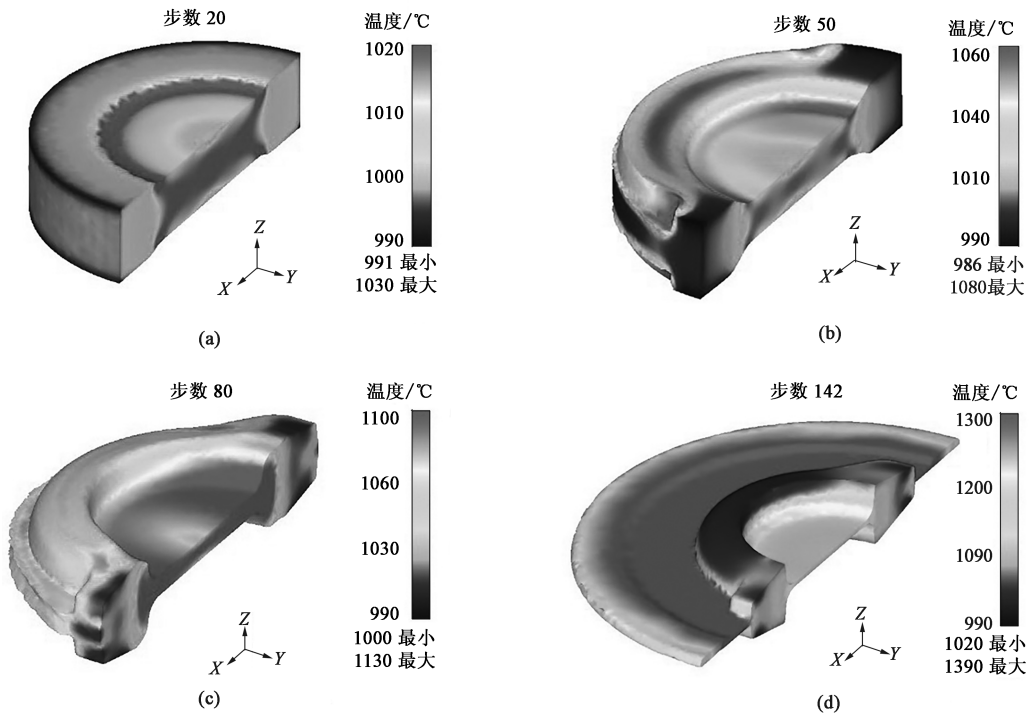


图 7 温度分布云图

(a) 第 I 阶段 (b) 第 II 阶段 (c) 第 III 阶段 (d) 最终成形结果

Fig. 7 Cloud maps of temperature distribution

(a) Phase I (b) Phase II (c) Phase III (d) Final forming result

最高温度均在材料厚度变化最大处, 如图 7b 中的连皮内圆角处、图 7c 中的卡箍外缘处、图 7d 中的毛边槽处。

3.6 微观组织分析

图 8 和图 9 分别为模拟卡箍热模锻造成形不同阶段下的平均晶粒尺寸图和再结晶体积分数分布云图。从图 8 和图 9 中可以看出, 随着坯料不断发生变形, 锻件的环形外部和环形内部均发生了不同程度的晶粒细化。从图 8c 中可以看出: 锻件的大部分

区域的晶粒尺寸与初始晶粒尺寸一致, 为 $40\text{ }\mu\text{m}$; 而毛边仓部、毛边与卡箍的连接处和连皮的圆角处的晶粒尺寸发生了变化, 最小晶粒尺寸为 $32.5\text{ }\mu\text{m}$ 。图 9 表明晶粒变小是由于在相应位置发生了动态再结晶。锻件整体再结晶比例较小, 动态再结晶主要发生在毛边槽处和毛边与锻件的连接处, 在连皮与锻件的部分连接部位也发生了动态再结晶。总体来说, 锻后卡箍的微观组织比较均匀, 未出现晶粒异常长大的现象, 达到了服役要求。

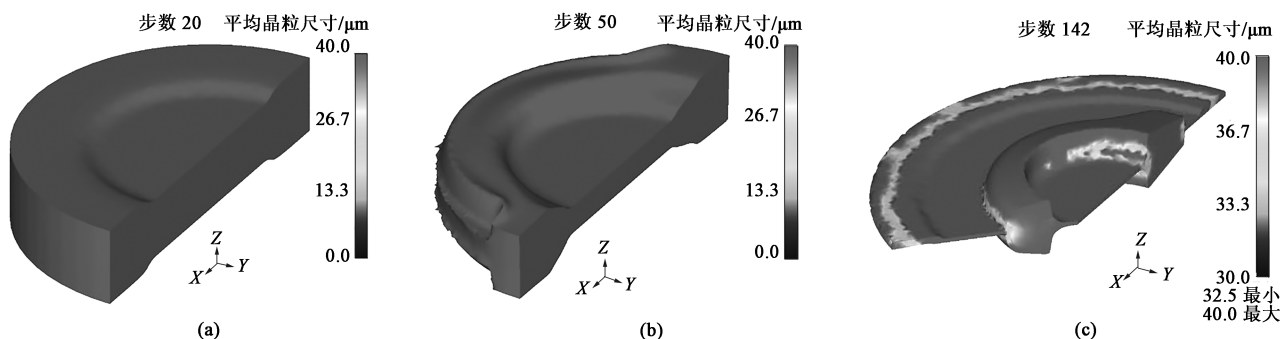


图 8 平均晶粒尺寸分布图

(a) 第 I 阶段 (b) 第 II 阶段 (c) 最终成形结果

Fig. 8 Diagrams of average grain size distribution

(a) Phase I (b) Phase II (c) Final forming result

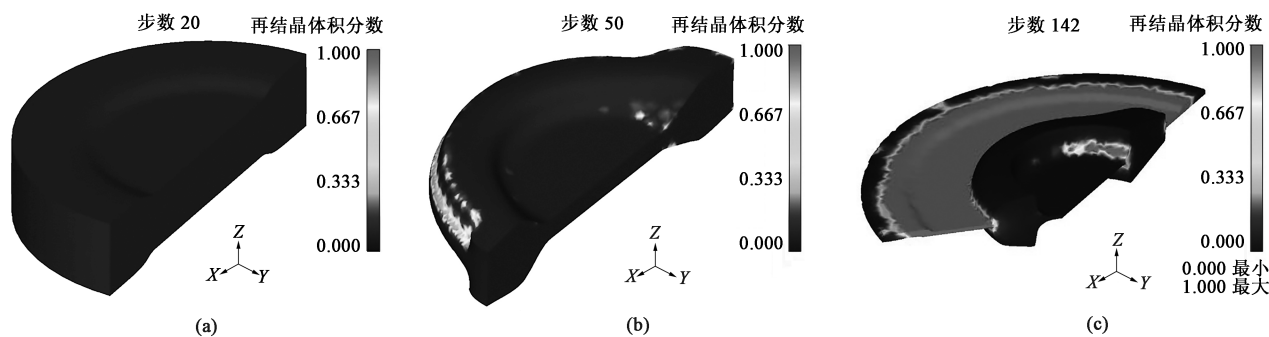


图 9 再结晶体积分数分布图

(a) 第 I 阶段 (b) 第 II 阶段 (c) 最终成形结果

Fig. 9 Diagrams of recrystallization volume fraction distribution

(a) Phase I (b) Phase II (c) Final forming result

3.7 实验验证

图 10 为实际热模锻造成形后的锻件图。从图 10 中可以看出, 通过 40 MN 曲柄压力机在设定温度为 $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、变形速度为 $20\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 条件下成形的锻件, 其流线分布合理、变形均匀, 金属充型良好, 表面无缺陷。实际锻造结果与模拟得到的结果十分接近, 可见采用有限元方法得出的锻造参数即温度为 $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、变形速度为 $20\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 的热模锻造工艺是

可行的。

4 结论

(1) 通过 DEFORM-3D 软件对卡箍热模锻造过程进行数值模拟, 对影响锻造质量的工艺参数进行了分析, 验证了工艺参数及模具设计的合理性和可行性。



图 10 卡箍热模锻造成形锻件

Fig. 10 Forgings of hot die forging for clamp

(2) 卡箍热模锻造变形过程分为 3 个阶段：墩粗成形阶段、毛边成形阶段和再结晶阶段。在采用热模锻造成形时，GH5188 高温合金材料的锻造参数为温度为 $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、变形速度为 $20\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时，锻件的流线分布合理、变形均匀，主体无应力集中，金属充型良好，内外均无缺陷。

(3) 再结晶主要发生在厚度剧烈变化处，如毛边和连皮的连接处，最大的晶粒直径为 $\Phi 40.0\text{ }\mu\text{m}$ ，最小的晶粒直径为 $\Phi 32.5\text{ }\mu\text{m}$ ，整体晶粒组织比较均匀。

参考文献：

- [1] 干正烈, 朱绍荷. 国外新型导管连接快卸卡箍 [J]. 航空标准化与质量, 1998, (5): 45-48.
Gan Z L, Zhu S H. Foreign new type conduit connection quick release clamp [J]. Aeronautic Standardization & Quality, 1998, (5): 45-48.
- [2] 朱绍荷. 铝合金柔性导管连接卡箍简介 [J]. 航空标准化与质量, 2004, (3): 35-37.
Zhu S H. Brief introduction of aluminum alloy flexible conduit connecting clamp [J]. Aeronautic Standardization & Quality, 2004, (3): 35-37.
- [3] 郑敏, 景绿路, 孙忠志. 新型不锈钢导管连接卡箍的研制 [J]. 飞机设计, 2008, (3): 69-75.
Zheng M, Jing L L, Sun Z Z. Development of new coupling clamps for stainless steel pipes [J]. Aircraft Design, 2008, (3): 69-75.
- [4] 张振. 飞机管路系统连接卡箍可靠性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
Zhang Z. Reliability Study on Coupling Clumps in Piping System of the Aircraft [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [5] 李志广, 张健, 翟海, 等. 铝卡箍模锻优化方案 [J]. 模具技术, 2009, (1): 21-23.
Li Z G, Zhang J, Zhai H, et al. Optimized scheme for die forging process of aluminum clamp [J]. Die and Mould Technology, 2009, (1): 21-23.
- [6] 郑敏, 张爽, 吴超. 国内外导管连接卡箍发展动态研究 [J]. 航空标准化与质量, 2010, (4): 15-18.
Zheng M, Zhang S, Wu C. Development trends of coupling clamps for pipes at home and abroad [J]. Aeronautic Standardization & Quality, 2010, (4): 15-18.
- [7] 胡杰, 刘凯泉. 大型卡箍弯曲成形工艺 [J]. 锻造与冲压, 2019, (15): 39-41.
Hu J, Liu K Q. Bending forming process of heavy lamp [J]. Forging & Metalforming, 2019, (15): 39-41.
- [8] Lee W S, Kao H C. High temperature deformation behaviour of Haynes 188 alloy subjected to high strain rate loading [J]. Materials Science and Engineering: A, 2014, 594: 292-301.
- [9] 高亚伟, 董建新, 姚志浩, 等. GH5188 高温合金组织特征及冷热加工过程组织演变 [J]. 稀有金属材料与工程, 2017, (10): 2922-2928.
Gao Y W, Dong J X, Yao Z H, et al. Microstructure characteristics and microstructure evolution during hot and cold working process of GH5188 superalloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2017, (10): 2922-2928.
- [10] 何龙, 张冉阳, 赵刚要, 等. 基于 BP 神经网络的 GH5188 高温合金本构模型 [J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41 (2): 223-226.
He L, Zhang R Y, Zhao G Y, et al. Constitutive model of GH5188 superalloy based on BP neural network [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41 (2): 223-226.
- [11] 龚龙清. 钛合金多向锻造数值模拟及实验研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.
Gong L Q. Experiment and Numerical Simulation Studies on the Multi-directional Forging of Titanium Alloy [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017.
- [12] Brand A J, Karhausen K, Kopp R. Microstructural simulation of nickel base alloy Incone[®] 718 in production of turbine discs [J]. Materials Science & Technology, 1996, 12 (11): 963-969.
- [13] Cho J R, Jeong H S, Cha D J, et al. Prediction of microstructural evolution and recrystallization behaviors of a hot working die steel by FEM [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 160 (1): 1-8.
- [14] 曲敬龙, 毕中南, 杜金辉, 等. GH4720Li 合金盘锻件的等温锻造工艺优化研究 [J]. 钢铁研究学报, 2011, 23 (S2): 243-246.
Qu J L, Bi Z N, Du J H, et al. Research on process optimization of isothermal forging for superalloy GH4720Li disc [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2011, 23 (S2): 243-246.
- [15] 付晓杰, 杜晓钟, 黄庆学. 基于 ABAQUS 二次开发的轧制过程组织性能预测 [J]. 太原科技大学学报, 2015, 36 (5): 362-368.
Fu X J, Du X Z, Huang Q X. Performance prediction of rolling process based on ABAQUS secondary development [J]. Journal of Taiyuan University of Science and Technology, 2015, 36 (5): 362-368.
- [16] AS1895D—2016, Coupling assembly, V-retainer, high pressure, high temperature, pneumatic tube [S].