

文章编号:1673-9469(2026)01-0093-11

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2026.01.012

GH4169 大型铸坯加热过程温度场与晶粒度演变研究

张飞¹,李丽¹,王守明²,张欣杰²,申文飞^{1*},王艳辉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:基于 DEFORM-3D 有限元软件,针对 GH4169 合金大型铸坯加热过程中表面至芯部传热不均匀问题,建立了大型铸坯温度场模型,研究了加热工艺参数对合金内部传热特性和温度场分布规律的影响。模拟结果表明,不同表面综合换热系数对传热效率具有显著影响,对于不同固定值表面综合换热系数,随着表面综合换热系数的升高,表面至芯部的传热效率明显提升;而对于变化值表面综合换热系数,截面温差相对较小,表面至芯部的传热效率相对较低,但传热过程相对较为均匀。为了研究 GH4169 合金加热过程中晶粒度变化规律,制备了 GH4169 合金试样,并系统实施多组热处理试验,通过金相观测法对热处理后的组织及晶粒结构演变规律展开分析,试验结果显示,经多组热处理后,材料表面组织的晶粒出现显著粗化现象,具体表现为:在 1 000 °C 以下热处理时,晶粒呈现缓慢长大趋势,保温时间越长,晶粒长大越为明显,尺寸为 3~8 μm;而在 1 100 °C 以上热处理时,晶粒呈现显著粗化趋势,尺寸增长到 75~100 μm,随着保温时间的加长,晶粒长大逐渐缓慢。

关键词:GH4169 合金;DEFORM-3D;温度场;传热;晶粒

中图分类号:TG132.3

文献标识码:A

Research on Temperature Field and Grain Size Evolution During Heating of GH4169 Large Casting Billet

ZHANG Fei¹, LI Li¹, WANG Shouming², ZHANG Xinjie², SHEN Wenfei^{1*}, WANG Yanhui¹

(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: Based on the DEFORM-3D finite element software, a temperature field model of the large casting billet was established for the problem of uneven heat transfer from the surface to the core during the heating process of the large casting billet of GH4169 alloy. The influence of heating process parameters on the internal heat transfer characteristics and temperature field distribution law of the alloy was studied. The simulation results show that the comprehensive heat transfer coefficients of different surfaces have a significant impact on the heat transfer efficiency. For the comprehensive heat transfer coefficients of surfaces with different fixed values, as the comprehensive heat transfer coefficients of the surfaces increase, the heat transfer efficiency from the surface to the core is significantly improved. For the variable surface comprehensive heat transfer coefficients, the cross-sectional temperature difference is relatively small, the heat transfer efficiency from the surface to the core is relatively low, but the heat transfer process is relatively uniform. In order to study the variation law of grain size of GH4169 alloy

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-科技研发平台专项(24461001D);河北省自然科学基金资助项目(E2022402107)

第一作者:张飞(1998—),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。

during the heating process, GH4169 alloy samples were prepared, and multiple sets of heat treatment tests were systematically carried out. The microstructure and the evolution law of grain structure after heat treatment were analyzed through metallographic observation. The test results showed that after multiple sets of heat treatment, the grains of the surface microstructure of the material showed a significant coarsening phenomenon. The specific manifestations are as follows: When heat-treated below 1 000 °C, the grains show a slow growth trend. The longer the holding time, the more obvious the grain growth, with a size range of 3~8 μm. When heat-treated above 1 100 °C, the grains show a significant coarsening trend, and the size increases to 75~100 μm. With the extension of the holding time, the growth of the grain structure gradually slows down.

Key words: GH4169 alloy; DEFORM-3D; temperature field; heat transfer; grain

GH4169 是一种沉淀硬化型镍基高温合金,兼具强度高、韧性佳、抗蠕变性能与耐腐蚀性优异的特点,广泛应用于航空航天、石油化工及核工业等领域,尤其适用于航空发动机涡轮盘等关键部件^[1-5]。铸坯锻造是高温合金生产中的关键工序,可有效消除铸坯内部的疏松、缩孔与偏析等缺陷,从而提升材料的力学性能和疲劳寿命^[6]。锻前加热^[7]作为锻造的重要环节,旨在使铸坯达到适宜变形温度,其内部温度场分布对锻坯质量具有显著影响:均匀合理的温度场有助于缺陷消除与组织均匀化,而不均匀分布则易引发组织不一致乃至裂纹等缺陷^[8]。GH4169 大型铸坯尺寸大、质量高,加之该合金热导率较低^[2],加热时热量传递缓慢且温度梯度显著^[8],进一步增加了加热控制的难度。在此过程中,有限元方法^[9-14]可用于模拟分析各类工艺工况,预测潜在问题,为优化加热与锻造过程提供有效支持。

张子越等^[15]通过 DEFORM 有限元模拟研究了 GH4169 大型铸锭的开坯工艺,结果表明:提高初始温度有助于改善变形均匀性;增大压下速率会引起内部温升和应变增加;道次压下量对应变的影响呈先降后升趋势;减小进给量则可使应变分布更均匀并减小高温区范围。李帮松等^[16]结合实验与 DEFORM-3D 模拟,分析了锻造态 GH4169 在 950 °C~1 100 °C 和 0.01~5 s⁻¹ 条件下的动态再结晶行为,发现低温高应变速率会导致明显温升和组织不均匀,芯部始终处于高温、高应力应变状态。Qi 等^[17]建立了 GH4169 电火花加工的温度场有限元模型,指出提高电压可显著提升加工点温度,随着电压的增加,材料去除体积也随之增加。Zhou 等^[18]研究了感应加热对 GH4169 组织与性能的影响,发现该工艺能促进静态再结晶,优化晶界特征分布,并提高材料的韧性与耐腐蚀性,其效果优于传统热处理。Wang 等^[19]则针对 GH4169 热

锻过程开展模拟与实验,发现锻造温度、加载速率与冷却速度的提高均会增大残余应力;同时,变形速率越高、传热越快、温度越高,再结晶晶粒长大驱动力越大,晶粒度也越粗大。

目前,针对 GH4169 高温合金大型铸坯在热加工过程中温度场分布规律的研究仍较为欠缺,尤其是在加热过程中由内外温差引起的升温 and 冷却缓慢问题,不仅制约生产效率,还可能影响晶粒组织演变,进而对合金力学性能的稳定性造成潜在影响。为此,本研究基于 DEFORM-3D 软件构建了 GH4169 大型铸坯的温度场模型,系统分析了表面综合换热系数等关键工艺参数对内部传热行为及温度场均匀性的影响机制,为理解铸坯内部热状态提供了量化依据。同时,通过开展关键温度点下不同保温时间的热处理实验,系统考察了微观试样的晶粒组织演变规律。模拟结果揭示了铸坯在低温及升温阶段存在显著温度梯度,为解释实际生产中可能出现的晶粒尺寸梯度提供了热力学背景;实验结果表明,在 1 100 °C 条件下晶粒发生剧烈粗化,凸显高温对组织演变的关键作用。模拟与实验相结合,共同验证了控制加热温度均匀性及避免局部过热的重要性,为优化加热工艺参数(如表面换热系数、升温速率和保温条件)提供了理论与实验支撑,从而有效提升传热效率、改善温度均匀性,最终实现铸坯质量与生产效率的协同提高。

1 模拟与试验

1.1 有限元模型建立

1.1.1 初始条件设定

该材料为 GH4169 合金大型铸坯,见图 1(a),坯料尺寸为 Φ508 mm×1 640 mm,利用 DEFORM-3D 有限元软件建立 GH4169 大型铸坯三维有限元模型,如图 1(b)所示。模型中采用三维四面体单元,

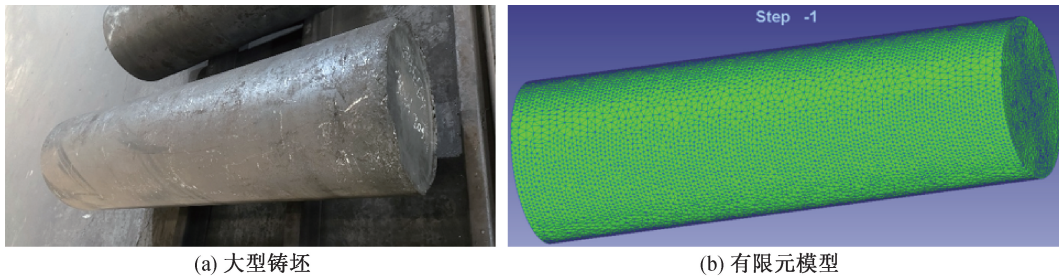


图 1 GH4169(Φ508 mm×1 640 mm)
Fig. 1 GH4169(Φ508 mm×1 640 mm)

网格约划分为 200 000 个单元,并导入相应的热物性参数,如表 1 所示,坯料的初始温度为 20 °C,内外温度均匀。

表 1 GH4169 合金试样热物性参数

Tab. 1 Thermophysical properties of GH4169 alloy samples

温度 $T/^\circ\text{C}$	热扩散系数 $\alpha/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	比热容 $c/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	热导率 $\lambda/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$
100	3.1×10^{-6}	434.6	11.1
200	3.3×10^{-6}	428.5	11.7
300	3.6×10^{-6}	427.5	12.6
400	3.9×10^{-6}	431.7	13.7
500	4.1×10^{-6}	441.1	15.0
600	4.4×10^{-6}	456.6	16.4
700	4.5×10^{-6}	475.2	17.8
800	4.6×10^{-6}	500.1	19.1
900	4.7×10^{-6}	529.9	20.6
1 000	4.9×10^{-6}	565.1	22.9
1 100	5.4×10^{-6}	605.3	27.0
1 200	6.5×10^{-6}	650.7	35.0

注:GH4169 合金试样的密度 ρ 为 8 240 kg/m³。

热物性参数通过实验方法测得,图 2 为测定 GH4169 热扩散系数 α 和比热容 c 的试样,热导率 λ 通过公式 $\lambda = \alpha \cdot c \cdot \rho$ 求得,测得的数据符合技术要求^[2]。

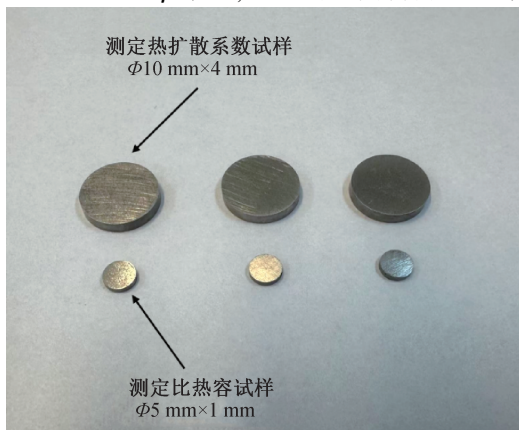


图 2 测定热扩散系数和比热容的 GH4169 试样
Fig. 2 GH4169 samples for the determination of thermal diffusivity and specific heat capacity

1. 1. 2 边界条件

(1) 辐射与对流综合换热——表面综合换热系数
坯料外表面受到炉壁、炉顶高温辐射传热和热空气对流换热(即受表面综合换热系数的影响),如图 1(b)所示,综合考虑两者对表面传热的影响,表面综合换热系数大小按照以下设定:①固定值(有保护措施)设定,分别设置 50、100、200、300、400 W/(m²·°C);②变化值(无保护措施)设定,设置随温度变化的表面综合换热系数,如图 3 所示。

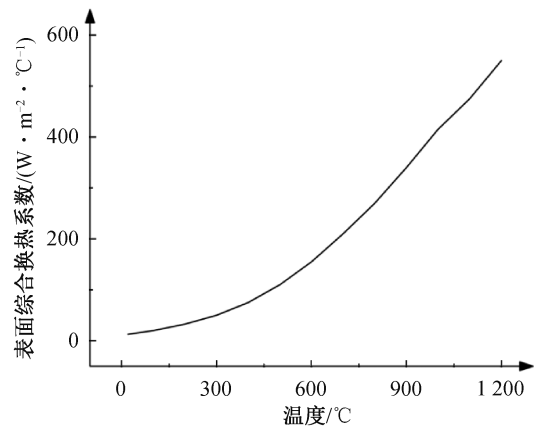


图 3 炉内随温度变化的表面综合换热系数
Fig. 3 Temperature-dependent surface comprehensive heat transfer coefficient during furnace heating

通过工程防护措施调控坯料表面热边界条件,具体实施方法与对应换热系数范围参考如下:

① 铝箔反射隔热层:在坯料表面喷涂或粘贴厚度为 0.1~0.3 mm 的铝箔复合材料,利用其高反射率($\varepsilon < 0.1$)显著抑制辐射传热,使表面综合换热系数降至 50~100 W/(m²·°C)。使用时需确保铝箔与坯料紧密贴合,防止热空气穿透。② 水冷夹套强制冷却:在坯料关键区域设置螺旋式水冷夹套,通过流速为 2~3 m/s 的冷却水强化对流换热,换热系数可达 200~400 W/(m²·°C)。应注意控制冷却水温度(≤ 30 °C),以避免局部过冷引发热应力开裂^[20-21]。③ 陶瓷纤维隔热毯覆盖:采用

50~100 mm 厚陶瓷纤维毯(导热系数 $\leq 0.12 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)包裹非加工面,阻断辐射传热路径,将综合换热系数控制在 $80 \sim 150 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 。可复合铝箔层进一步提升反射效果。④惰性气体保护罩:通过通入氮气(流量 $0.5 \sim 1 \text{ m}^3/\text{h}$)形成保护层,削弱对流传热,使换热系数降至 $50 \sim 100 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 。为防止热空气渗入,建议将保护气体压力控制在比炉膛压力高 $0.05 \sim 0.1 \text{ MPa}$ 的范围内^[20]。

(2) 加热工艺

炉气温度按照加热规范设定,如图4所示的实际炉内加热工艺曲线,它是典型的五段式加热类型,即三个保温阶段和两个升温阶段。炉气热量通过与坯料表面综合换热传递至坯料内部。

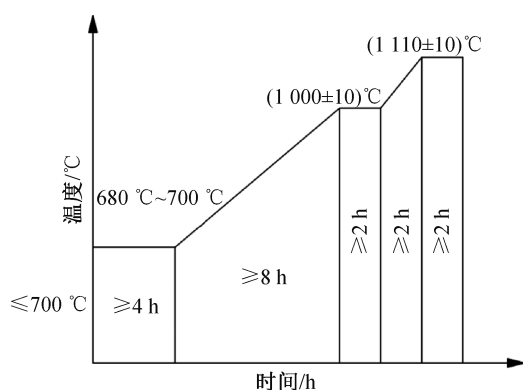


图4 GH4169 实际炉内加热过程炉气温度变化
Fig. 4 Furnace atmosphere temperature variations during actual heating of GH4169

1.2 试验材料制备和试验方法

本试验以电火花线切割加工制备的 GH4169 合金试样为研究对象(试样尺寸为 $\Phi 8 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$,如图5所示),其化学成分见表2。考虑到金相观察需准确表征晶粒的尺寸、形态及取向分布,试样经线切割后,首先采用不同目数砂纸逐级打磨至表面无明显划痕,随后以 $0.5 \mu\text{m}$ 金刚石膏在绒布抛光盘上进行精密抛光,最终获得光亮无损伤的观察面,确保后续晶粒边界清晰可辨。

为系统研究热处理工艺对晶粒组织的影响,所有试样在箱式电阻炉中进行加热,严格控制温度与时间,以避免温度骤变引起的晶粒异常长大。具体热处理工艺如下(温度波动控制在设定值

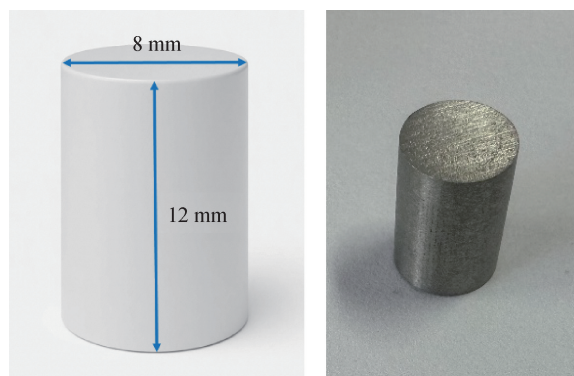


图5 GH4169 合金试样
Fig. 5 GH4169 alloy sample

$\pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ 以内): (1) 按图4所示的实际炉内加热工艺曲线进行加热,试样从室温以 $\leq 5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 的速率随炉升温至 $680 \text{ }^\circ\text{C} \sim 700 \text{ }^\circ\text{C}$ 保温区,保温时间 $\geq 4 \text{ h}$;随后以 $37.5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{h}$ 的平均速率经 8 h 升温至 $1000 \text{ }^\circ\text{C}$,保温时间 $\geq 2 \text{ h}$;再以阶梯升温模式(平均速率 $55 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$)经 2 h 升至 $1110 \text{ }^\circ\text{C}$ 终温区,维持恒温 $\geq 2 \text{ h}$ 。整个加热过程总时长约 20 h 。热处理结束后,试样分别采用水淬(常温自来水)和空冷(常温)两种方式进行冷却。(2) 试样随炉升温至 $1000 \text{ }^\circ\text{C}$,分别设定两种保温时间:① $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ 保温 1 h ,水淬;② $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ 保温 2 h ,水淬。(3) 试样随炉升温至 $1100 \text{ }^\circ\text{C}$,分别设定两种保温时间:① $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ 保温 1 h ,水淬;② $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ 保温 2 h ,水淬。

热处理完成后,试样再次经上述打磨抛光流程处理,采用溶液浸湿的方法来观察表面组织晶粒的变化,以浓盐酸(HCl)和浓硝酸(HNO_3)按体积比 $3:1$ 混合而成的王水腐蚀 $3 \sim 5 \text{ min}$ (精确控制腐蚀时间以避免过腐蚀),最终通过光学显微镜观察晶粒度、晶粒形态及晶界特征。

2 结果与分析

2.1 模拟结果与分析

将 GH4169 大型铸坯有限元模型沿垂直方向进行切面,如图6所示,分别选定 P1(表面)、P2(近表面,距离表面 50 mm)、P3(1/2 中心,距离表面 127 mm)、P4(中心,距离表面 254 mm)四点位置展示其实时温度的变化。图7所示为模拟结

表2 GH4169 合金的化学成分质量分数

(单位:%)

Tab. 2 Mass fraction of chemical composition of GH4169 alloy

(unit:%)

C	Mn	Si	S	P	Ni	Cr	Mo	Al	Ti	Cu	B	Nb	Co	Ta	Fe
0.03	0.02	0.07	0.001	0.01	53.32	18.14	2.99	0.58	1.02	0.04	0.0037	5.29	0.30	<0.03	余量

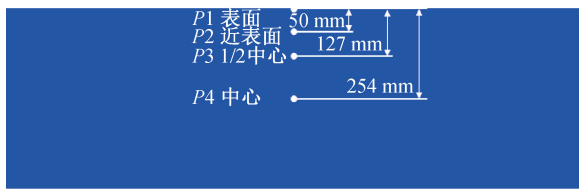


图 6 模拟结果中 P1、P2、P3、P4 四点位置示意图

Fig. 6 Schematic diagram of P1, P2, P3 and P4 positions in simulation results

果在加热工艺曲线上的位置,其中(a)—(f)分别对应初始阶段、第一阶段保温结束、第二阶段升温结束、第三阶段保温结束、第四阶段升温结束、第五阶段保温结束。

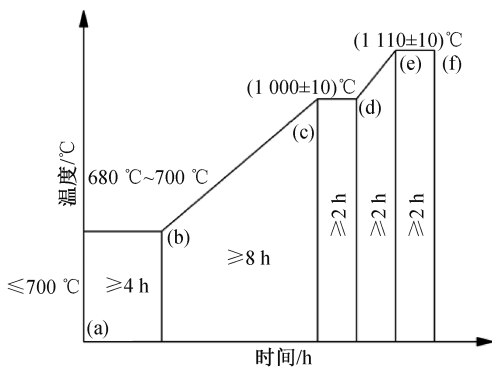


图 7 模拟结果在加热工艺曲线上的位置

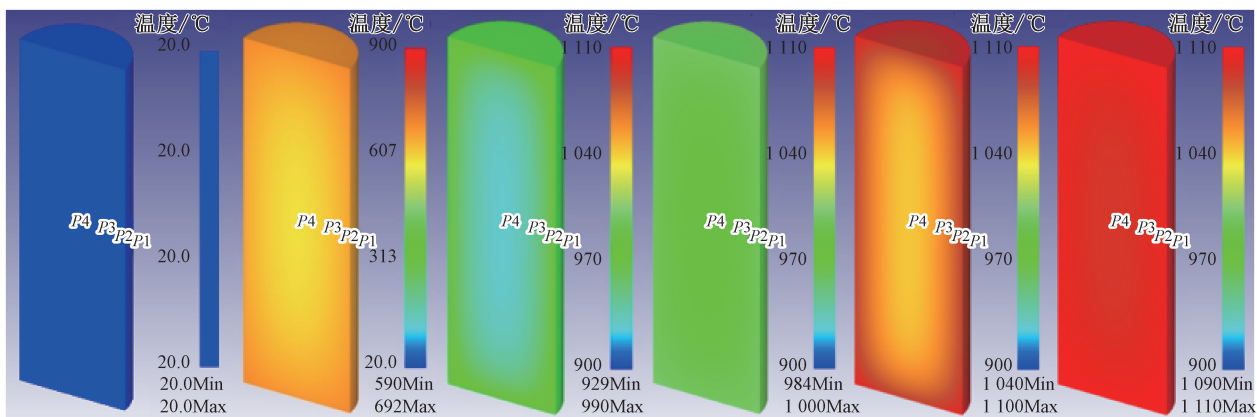
Fig. 7 Positions of the simulation results on the heating process curve

2. 1. 1 有保护措施

对不同固定值的表面综合换热系数下的传热情况进行对比分析,模拟结果发现各阶段温度分布并不均匀,表现为芯部温度较低,表面温度较高,尤其是坯料端部棱角位置温度最高,总体呈现“阶梯式”温度分布。这是因为表面直接与炉气发生热交换,热量进入坯料内部,热量再通过热传导

作用到达坯料芯部,热传导具有一定滞后性,导致芯部热量小,而表面棱角位置同时受到端面和侧面两个方向热量传递,使其热量较大。这种由传热条件决定的内外热量差,通过材料比热容转化为坯料内部的温度梯度,形成了不均匀的温度场。

分别观察图 8 至图 12 的(b)(c)(d)(e)可以发现,随着表面综合换热系数的升高,坯料的表面至芯部的传热效率加快,这说明表面综合换热系数影响着内外传热的效率。通过观察图 11 和图 12 的(c)(d)可以发现,当表面综合换热系数为 300、400 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 时,坯料的表面至芯部的传热效率差距很小,这说明并不是把表面综合换热系数设定得越高,传热效率就越好,实际加热过程中将表面综合换热系数控制在 300~400 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 相对合适。从图 8 至图 12 的(b)可以发现,在第一阶段保温结束时,坯料内外温差较大,温差最大表现为表面综合换热系数为 50 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 的时候,内外温差达到 100 $^\circ\text{C}$ 左右。随着表面综合换热系数的升高,第一阶段保温过程中的内外温差缩小,最后在表面综合换热系数为 300、400 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 时,内外温差最小且趋于一致,温差为 35 $^\circ\text{C}$,这再一次表明将表面综合换热系数控制在 300~400 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 是相对合适的。通过比较图 8 至图 12 的(e)(f)可以发现,在温度较高时,坯料内外传热的温差较小,具体表现在第四阶段升温结束时,内外温差在 50 $^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$ 之间;在第五阶段保温结束时,内外温差在 10 $^\circ\text{C}$ 左右,这说明随着保温时间延长,最后温度逐渐趋于一致,且在温度较高时,不同表面综合换热系数对于坯料内外传热效率影响不大。



(a) 初始阶段 (b) 第一阶段保温结束 (c) 第二阶段升温结束 (d) 第三阶段保温结束 (e) 第四阶段升温结束 (f) 第五阶段保温结束

图 8 在表面综合换热系数为 50 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 的各阶段温度场分布

Fig. 8 Temperature field distributions at various stages with surface heat transfer coefficient of 50 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$

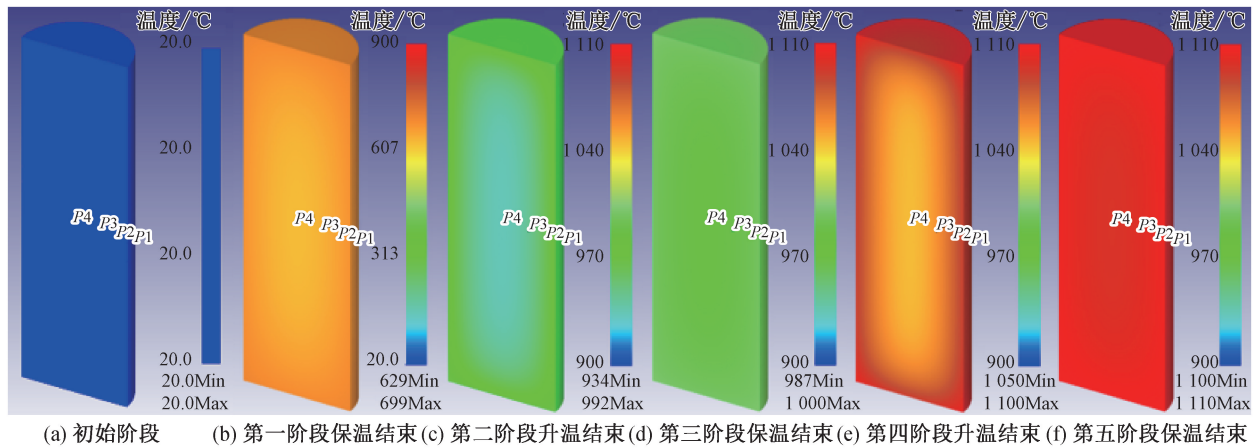


图9 在表面综合换热系数为 $100 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 的各阶段温度场分布

Fig. 9 Temperature field distributions at various stages with surface heat transfer coefficient of $100 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$

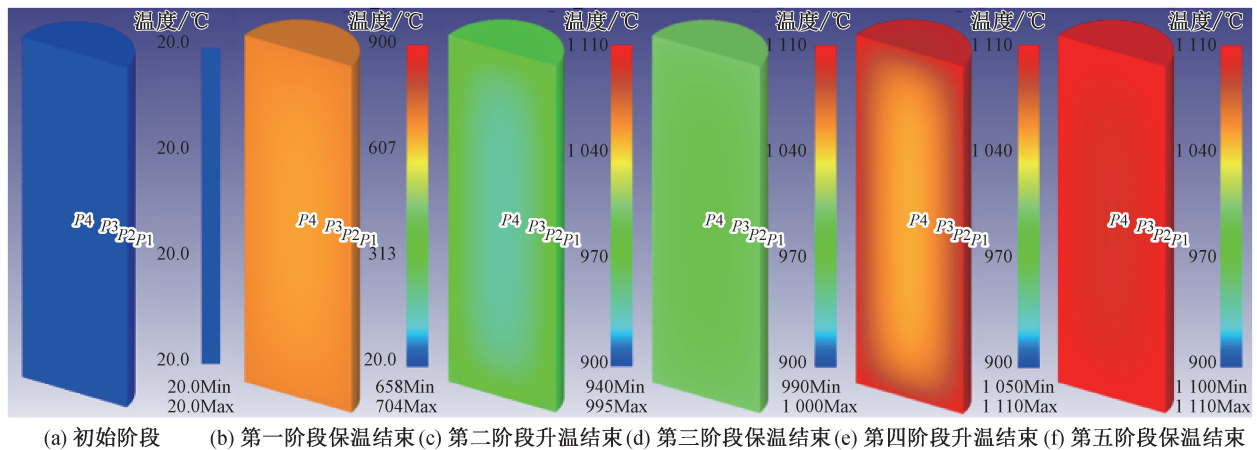


图10 在表面综合换热系数为 $200 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 的各阶段温度场分布

Fig. 10 Temperature field distributions at various stages with surface heat transfer coefficient of $200 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$

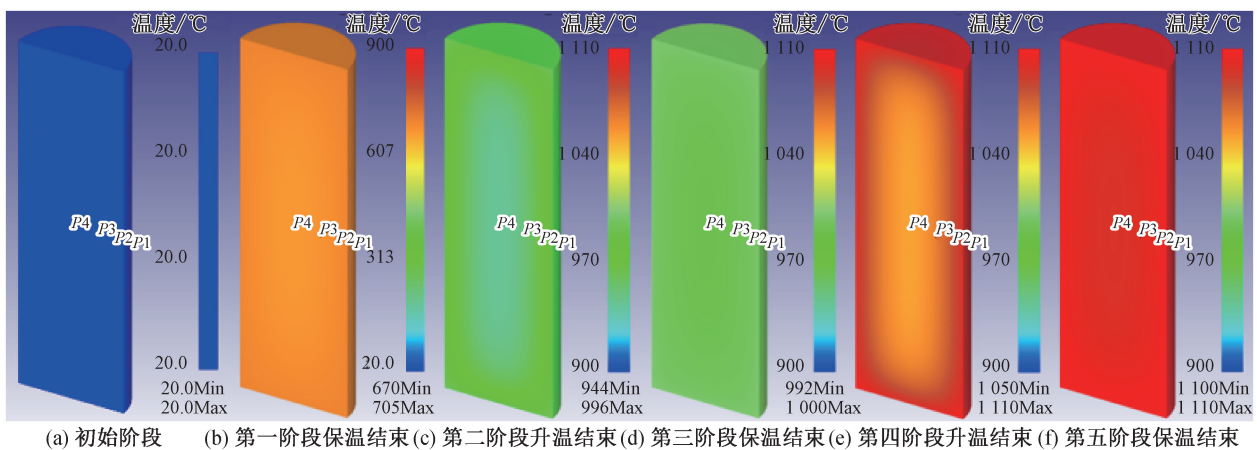


图11 在表面综合换热系数为 $300 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 的各阶段温度场分布

Fig. 11 Temperature field distributions at various stages with surface heat transfer coefficient of $300 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$

2.1.2 无保护措施

对于随温度变化的表面综合换热系数而言,坯料内外传热相对于固定值表面综合换热系数的内外传热来说,坯料内外温差相对较小。通过观察图

13(b)发现,第一阶段保温结束时,坯料内外温差较大,这是由于温度较低时,表面综合换热系数较低,故内外传热较为缓慢。随着温度的升高,表面综合换热系数越来越高,通过观察图 13(c)(d)(e)(f)发现,

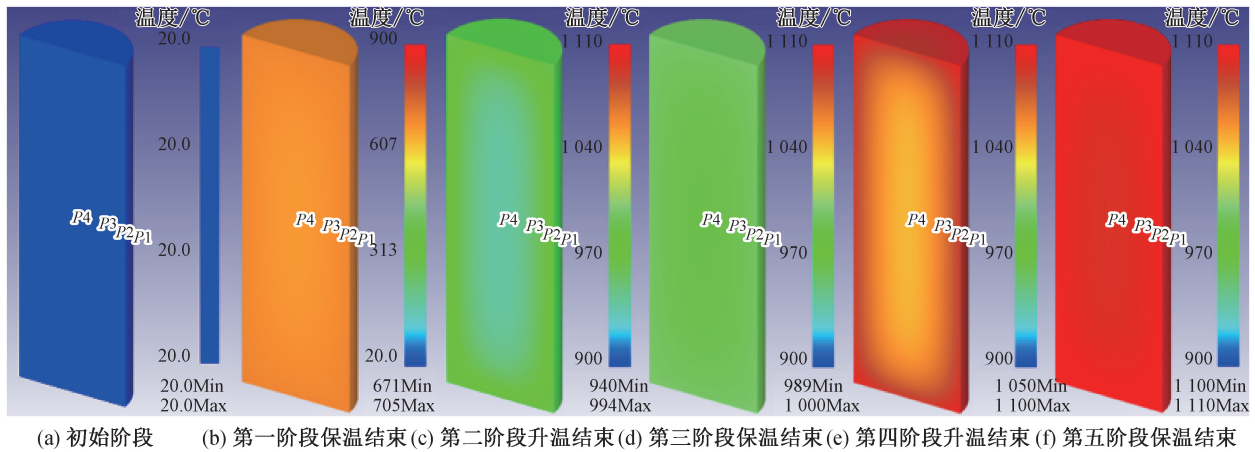


图 12 在表面综合换热系数为 400 W/(m²·°C)的各阶段温度场分布

Fig. 12 Temperature field distributions at various stages with surface heat transfer coefficient of 400 W/(m²·°C)

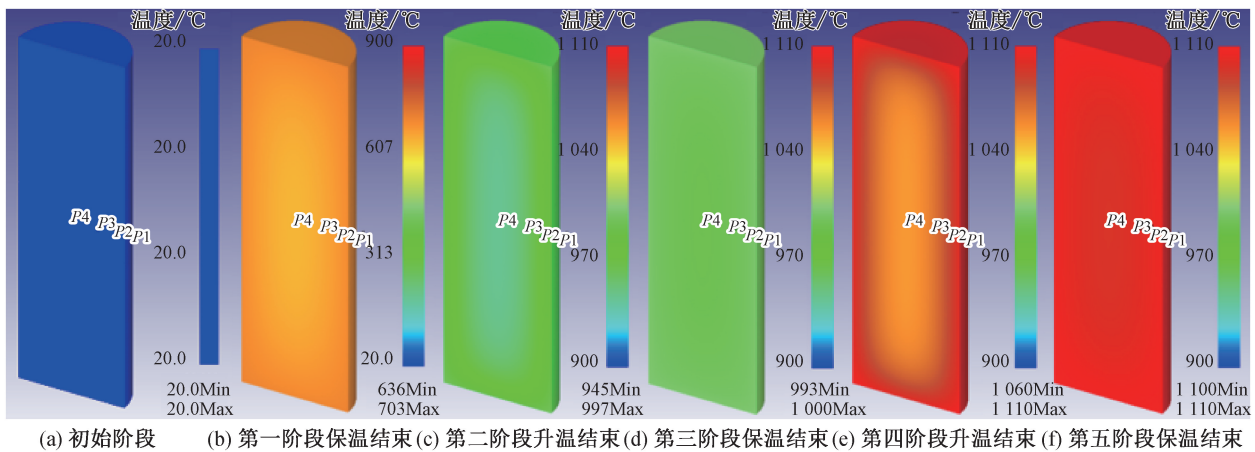


图 13 在随温度变化表面综合换热系数的各阶段温度场分布

Fig. 13 Temperature field distributions at various stages with temperature-dependent surface heat transfer coefficient

坯料内外温差逐渐减小,最后也会趋于一致。

2. 1. 3 不同表面综合换热系数下温度随时间的变化曲线分析

表面综合换热系数大小与流体属性、坯料表面质量、坯料形状、坯料位置等有关。图 14 展示了在不同表面综合换热系数条件下,坯料四个特征位置(P1、P2、P3、P4)的温度随时间的变化曲线,所选用的表面综合换热系数包括固定值 50、100、200、300、400 W/(m²·°C)以及一个随温度变化的曲线(图 3)。

整体上看,坯料温度与加热工艺曲线(图 4)基本保持一致,呈现五个温度阶段。温度变化的差异主要体现在第一阶段,而后续阶段的曲线基本重合,差异不显著。观察图 14 的 6 组曲线可以发现,随着表面综合换热系数的增大,坯料温度的上升速度逐渐加快,随着保温时间的延长,温度逐渐趋于一致。当表面综合换热系数为 50 W/

(m²·°C)时,最终坯料整体温度达不到设定温度。当表面综合换热系数为 300 和 400 W/(m²·°C)时,坯料的温度相差不大,几乎趋于一致。这也间接说明了在表面综合换热系数为 300~400 W/(m²·°C)时,坯料表面至芯部的传热效率相差不大。

2. 2 试验结果与分析

2. 2. 1 实际加热工艺热处理

图 15 为试样初始态表面组织在金相显微镜下放大 200 倍的成像。通过显微分析可见,初始晶粒结构呈现细化特征,典型晶粒度分布大致在 2~5 μm 范围内。组织中存在多种物相,包括 γ'、γ''、δ 相及 MC 碳化物等复杂相结构,形成多相复合体系。特别值得注意的是,在晶界区域可观察到明显的孪晶纹路及微裂纹网络,这表明初始态组织具有较高的内应力水平。

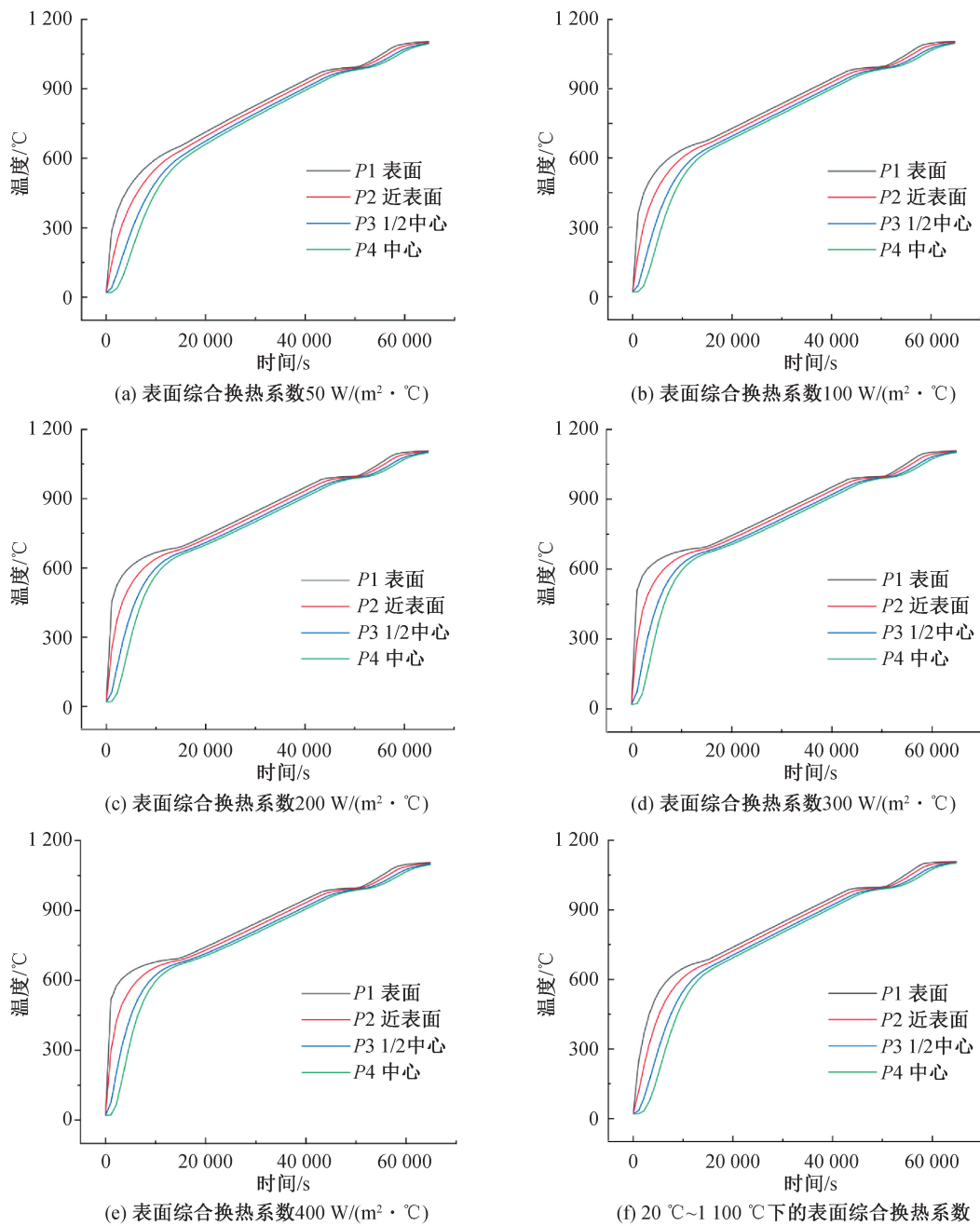


图 14 不同表面综合换热系数下典型位置处温度随时间的演变曲线

Fig. 14 Temperature evolution curves at characteristic locations with varying surface comprehensive heat transfer coefficients over time

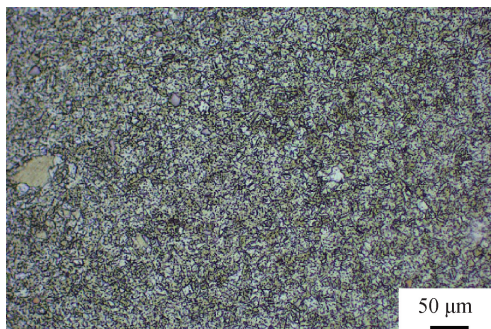


图 15 初始态金相表面组织

Fig. 15 Initial state microstructural surface morphology

试样依据实际炉内加热工艺曲线进行热处理后,经空冷处理与水淬处理,在金相显微镜下获得100倍显微组织结构,见图16(a)(b)。显微组织分析表明,两种冷却方式所得表面显微组织差异不大。与初始态相比,材料表现出显著的晶粒粗化现象,原始细小的等轴晶结构已转变为粗大的多边形晶粒形态,且基体相完全固溶,特征相含量显著降低。

2.2.2 不同固定温度热处理

通过对比分析图16、图17发现,上述晶粒

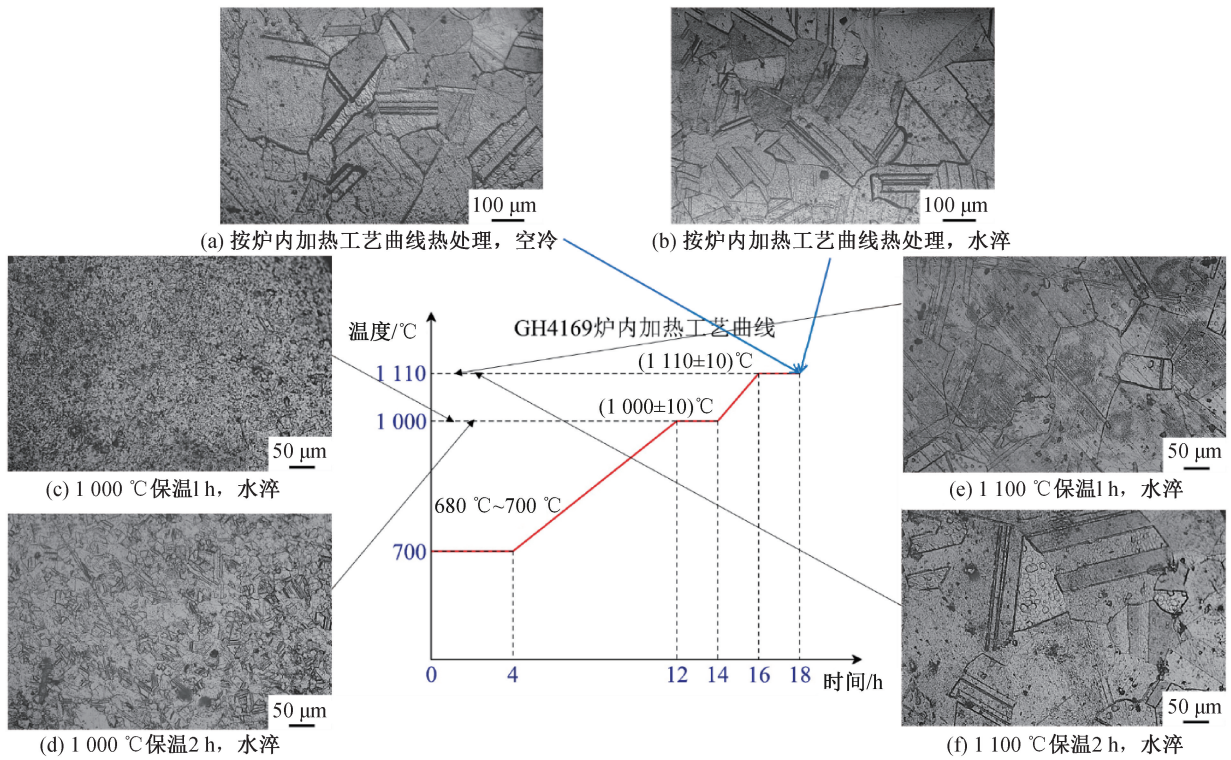


图 16 不同温度、不同保温时间热处理的金相表面组织

Fig. 16 Heat-treated microstructural surface morphology with different temperatures and holding durations

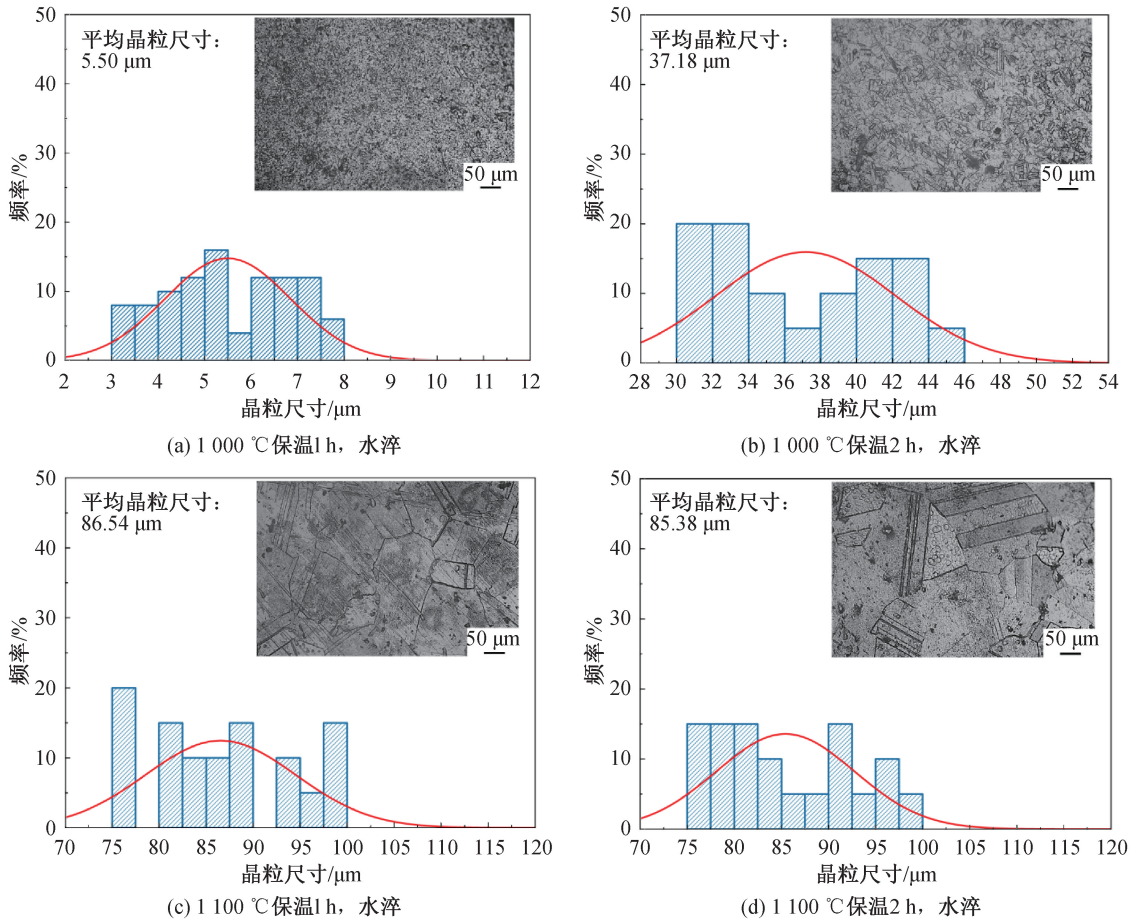


图 17 不同温度、不同保温时间热处理下的晶粒分布直方图

Fig. 17 Grain distribution histograms under heat treatment at different temperatures and holding times

度变化规律主要受控于再结晶动力学与第二相粒子(如 γ' 、 γ'' 、 δ 相)的钉扎效应:在1 000℃以下热处理时,温度相对较低,动态再结晶或静态再结晶的驱动力不足,晶界迁移速率较低:(1)如图16(c)所示,当保温时间 ≤ 1 h时,未完全溶解的细小第二相粒子(特别是 γ'' 相)对晶界迁移产生显著的钉扎效应,有效抑制了晶粒的快速长大,导致晶粒呈现缓慢长大趋势,晶粒度呈现细化特征,基本维持在3~8 μm ,见图17(a),表明该温度下奥氏体相变主导晶粒重构过程。(2)如图16(d)所示,当保温时间延长至2 h时,晶粒发生粗化(约小于30%增幅),增长到30~45 μm ,见图17(b),显示此时晶界迁移速率相对较高,晶粒组织长大。

随着温度升高至1 100℃以上,热激活能显著提高,晶界迁移能垒降低,晶粒长大驱动力急剧增强:(1)短时保温(1 h, 2 h)即诱发剧烈晶粒长大,形成典型粗化组织形态,这是因为大部分第二相粒子(特别是 γ' 和 γ'' 相)发生显著溶解,其对晶界的钉扎效应大幅减弱甚至消失,见图16(e)(f)。保温时间到达2 h时,晶粒度达到75~100 μm ,见图17(c)(d)。(2)进一步延长保温时间至2 h之后,晶粒度增长趋缓,呈现饱和状态,这可能是由于晶粒度接近该温度下的热力学稳定尺寸,晶界迁移驱动力减小,或者高温下可能存在动态再结晶或抑制剂析出机制。

值得注意的是,结合模拟结果可知,在加热过程中,尤其是升温阶段和低温保温阶段,铸坯截面存在显著的温度梯度(芯部温度低于表面)。这种温度不均匀性很可能导致晶粒组织演变的梯度现象。在铸坯表面区域,温度较高且达到目标温度更快,晶粒粗化启动早且程度可能更剧烈;而在芯部区域,升温滞后且温度相对较低,晶粒粗化过程启动晚且程度相对较轻。本研究主要观察了试样表面组织,未来研究需进一步关注大型铸坯截面不同位置(如表面、近表面、1/2半径处、芯部)在热处理后的晶粒度分布,以量化温度梯度对最终组织均匀性的影响,这对于保证大型锻件整体性能均匀性至关重要。

3 结论

1)GH4169合金大型铸坯在固定值表面综合换热系数条件下,各阶段温度分布不均匀,表现为芯部温度较低,表面温度较高,总体呈现“阶梯式”的温度分布:表面至芯部传热效率随表面综合换热系数增大而提高。表面综合换热系数在300~

400 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 时截面温差较小、升温均匀,较为合理。在随温度变化的表面综合换热系数条件下,截面温差相对较小。建议通过隔热层控制低温段换热系数,同时允许高温段换热系数自然升高,以平衡均匀性与加热效率。

2)GH4169合金在加热过程中的晶粒演变表现出强烈的温度依赖性:低于1 000℃时,晶粒长大缓慢(3~45 μm),主要受第二相粒子的钉扎效应抑制。超过1 100℃临界温度,第二相粒子溶解,晶界迁移加速,晶粒急剧粗化(75~100 μm),保温超过2 h后增长趋于饱和。需严格控制高温段温度与时间以抑制晶粒过度粗化。

3)综合模拟与试验结果发现,截面温度梯度(尤其在低温和保温阶段)是组织不均匀的主要原因;表面高温区晶粒粗化可能更早发生且程度更甚,而芯部低温区则相对滞后。应优化加热工艺(如优化换热系数、合理设计升温/保温曲线),减小截面温差,提升铸坯整体温度均匀性,从而实现晶粒组织的均匀细化,并确保力学性能在整体上保持一致。

参考文献:

- [1] DU J H, LU X D, DENG Q, et al. Progress in the research and manufacture of GH4169 alloy[J]. Journal of Iron and Steel Research(International), 2015, 22(8): 657-663.
- [2] 《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册:第2卷 变形高温合金 铸造高温合金[M]. 第2版. 北京:中国标准出版社, 2002.
Editorial Committee of China Aeronautical Materials Handbook. Chinese aeronautical materials handbook: volume 2 deformed superalloys and cast superalloys[M]. 2nd Edition. Beijing: China Standards Press, 2002.
- [3] 赵新宝, 谷月峰, 鲁金涛, 等. GH4169合金的研究新进展[J]. 稀有金属材料与工程, 2015, 44(3): 768-774.
ZHAO X B, GU Y F, LU J T, et al. New research development of superalloy GH4169[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2015, 44(3): 768-774.
- [4] 张北江, 黄烁, 张文云, 等. 变形高温合金盘材及其制备技术研究进展[J]. 金属学报, 2019, 55(9): 1095-1114.
ZHANG B J, HUANG S, ZHANG W Y, et al. Recent development of nickel-based disc alloys and corresponding cast-wrought processing techniques[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2019, 55(9): 1095-1114.
- [5] ZHAO Z W, LI J X, WANG X T, et al. Thermal deformation behavior of a Ni-Cr-Fe superalloy and its effect on corrosion resistance: a comprehensive analysis of strain rate and temperature effects[J]. Journal of Alloys and

- Compounds, 2024, 1006: 176370.
- [6] 张北江, 黄烁, 张文云, 等. 变形高温合金盘材及其制备技术研究进展[J]. 金属学报, 2019, 55(9): 1095-1114.
ZHANG B J, HUANG S, ZHANG W Y, et al. Recent development of nickel-based disc alloys and corresponding cast-wrought processing techniques[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2019, 55(9): 1095-1114.
- [7] DU J H, LYU X D, DENG Q. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of GH4169 superalloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2014, 43(8): 1830-1834.
- [8] 苏春民, 魏志坚, 杨晋, 等. GH4169轴类件锻造成形过程中的温度场及应变场模拟[C]//中国航空学会. 探索 创新 交流——第五届中国航空学会青年科技论坛论文集(第5集). 贵州: 贵州安大航空锻造有限责任公司, 2012: 606-608.
SU C M, WEI Z J, YANG J, et al. Simulation of temperature field and strain field during the forging forming process of GH4169 shaft parts[C]//Chinese Society of Aeronautics and Astronautics. Exploration, Innovation and Exchange-Proceedings of the 5th Chinese Society of Aeronautics and Astronautics Youth Science and Technology Forum (Volume 5) Guizhou: Guizhou Anda Aviation Forging Co., Ltd., 2012: 606-608.
- [9] 杨亮, 喻健, 董建新, 等. GH4169合金锻件组织控制模型及工艺模拟[J]. 钢铁研究学报, 2011(S2): 166-169.
YANG L, YU J, DONG J X, et al. Modeling of microstructure control and forging progress simulation of GH4169 alloy[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2011(S2): 166-169.
- [10] 李雪芝, 周建平, 王恪典, 等. GH4169镍基合金短电弧加工温度场数值模拟[J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(8): 30-36+116.
LI X Z, ZHOU J P, WANG K D, et al. Numerical simulation for temperature field of short electric arc milling process of nickel-based alloy GH4169[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(8): 30-36+116.
- [11] 郭玉, 曹宇, 白朴存. GH4169镍基高温合金激光增材制造过程温度场应力场研究[J]. 内蒙古工业大学学报(自然科学版), 2020, 39(5): 336-344.
GUO Y, CAO Y, BAI P C. Study on temperature field and stress field of GH4169 nickel-base superalloy in laser additive manufacturing[J]. Journal of Inner Mongolia University of Technology (Natural Science Edition), 2020, 39(5): 336-344.
- [12] 梁晟. GH4169热加工过程应力应变及组织演变数值模拟[D]. 重庆: 重庆大学, 2021.
LIANG S. Numerical simulation of stress, strain and microstructure evolution in hot working process of GH4169 [D]. Chongqing: Chongqing University, 2021.
- [13] SHI B, ATTIA H. Current status and future direction in the numerical modeling and simulation of machining processes: a critical literature review[J]. Machining Science and Technology, 2010, 14(2): 149-188.
- [14] 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.
- [15] 张子越, 姚志浩, 姚凯俊, 等. 大型GH4169高温合金铸锭开坯模拟研究[J]. 大型铸锻件, 2024(5): 20-29.
ZHANG Z Y, YAO Z H, YAO K J, et al. Research on cogging simulation of large GH4169 superalloy cast ingot [J]. Heavy Casting and Forging, 2024(5): 20-29.
- [16] 李帮松, 曾祥帅, 曾梦婷, 等. 锻造态GH4169高温合金热变形行为的有限元模拟[J]. 热处理, 2023, 38(3): 18-24.
LI B S, ZENG X S, ZENG M T, et al. Finite element simulation of hot deformation behavior of as-forged GH4169 superalloy[J]. Heat Treatment, 2023, 38(3): 18-24.
- [17] QI X D, DU L M, LU C J, et al. Simulation study on temperature field of superalloy during electrical discharge machining[C]//Third International Conference on Advanced Manufacturing Technology and Manufacturing Systems (ICAMTMS 2024). Bellingham, WA, USA: SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2024: 140.
- [18] ZHOU H P, LI J L, ZHANG P, et al. Effect of induction heating temperature on the microstructures and properties of GH4169 alloy[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2025, 34(13): 12641-12650.
- [19] 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.
- [20] 高鑫洲. 柴油机曲轴模锻模拟及界面换热研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2018.
GAO X Z. Forging simulation & interfacial transfer on diesel engine's crankshaft[D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2018.
- [21] 王彩山, 张雪姣, 杨康, 等. 9Cr钢正火过程换热系数的计算及数值模拟[J]. 一重技术, 2018(2): 30-36.
WANG C S, ZHANG X J, YANG K, et al. Calculation and numerical simulation of heat transfer coefficients during normalizing heat treatment of 9Cr steel[J]. CFHI Technology, 2018(2): 30-36.

(责任编辑 唐彦彦)