

变形高温合金表面换热系数的系统性测定研究

李昕^{1,2}, 江河¹, 王晓博², 董建新¹

(1 北京科技大学 材料科学与工程学院, 北京 100083)

(2 中国联合重型燃气轮机技术有限公司 先进技术研究中心, 北京 100016)

摘要: 为了准确预测变形高温合金在制造过程的升温与降温过程, 实现热应力准确评估与损伤控制, 降低能源消耗与生产成本, 有必要围绕变形高温合金各类换热情况进行系统性的表面换热系数研究, 并确定可靠的表面换热系数供实际工艺设计与模拟计算使用。本文以 GH4169 合金盘锻件制造过程所涉及的 10 种典型换热情况为例, 采用实验测温与有限元参数优化方法确定了 GH4169 合金的表面换热系数。研究发现, 直接升温过程测定的表面换热系数可以全面地描述合金在不同升温过程中的温度变化规律; 炉冷过程可以使用直接升温过程测定的表面换热系数进行描述; 保温包套可使得合金具有极低的表面换热系数, 并且在较大的温度区间范围保持稳定; 采用实验室小试样测定的表面换热系数能够准确描述工业大型铸锭的升降温过程。

关键词: 表面换热系数, 变形高温合金, 参数优化, 数值模拟

中图分类号: TG132.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2017)0?-0???-0?

在变形高温合金生产制造过程中, 升温与降温过程是每个环节所必须涉及的内容, 是决定高温合金生产质量与成本的关键因素, 因此要设计可靠的生产工艺, 就必须准确预测升温与降温过程。目前, 严重缺少变形高温合金表面换热系数数据, 学术界与工业界多采用经验或预估的换热系数进行工艺研究, 易导致合金锭过烧、欠烧、反复烧等问题, 浪费能源并增加了生产成本。同时, 不准确的换热系数也使得热应力的计算不可靠, 易导致合金损伤开裂, 直接掣肘了自主重型燃气轮机关键热端部件的低成本、高质量制造, 因此有必要围绕变形高温合金的表面换热系数开展系统性研究, 并为高温合金换热系数数据库的建设奠定方法基础。

变形高温合金的表面换热系数研究最早可追溯至 1969 年, Cabot 公司 Stellite 事业部(今 Haynes 公司)的 Sun^[1]采用经验公式计算了 Hastelloy X 的表面换热系数, 分析了 $\Phi 1016$ mm 尺寸 Hastelloy X 合金铸锭在升温过程中的应力大小, 并通过优化升温制度有效避免了真空自耗锭的内部开裂现象。1992 年 Srinivasan^[2]采用相同方法计算了 $\Phi 508$ mm 尺寸 Incoloy 901 合金锭的表面换热系数, 并采用有限元方法计算了铸锭升温曲线, 结果与 Teledyne Allvac 公司(今 ATI 公司)的实测曲线吻合。由于 Sun 的经验公式涉及火焰表面积、铸锭尺寸以及无量纲几何因子等参数, 对设备结构、工件尺寸和加热环境具有较强依赖性, 因此得到的换热系数缺乏普适性, 难以推广到不同规格、不同冷却介质的复杂工况。

进入 21 世纪后, 随着数值模拟和实验测试技术的发展, 基于实测温度曲线反向求解换热系数的方法逐渐成为换热系数测定的主流方法。Oliveira 等人^[3]基于神经网络的换热系数反算算法, 通过对淬火实验数据外推, 实现了镍基高温合金气雾化过程冷却速率的精准预测。Cihak 等人^[4]在研究残余应力过程中, 通过将实测降温曲线和计算数据对照, 确定了 Inconel 718 合金淬火表面换热系数。张家峰等人^[5]利用热电偶测定了 FGH96 合金空冷和油冷过程的温度曲线, 并通过数值计算反向求解了 FGH96 合金空冷和油冷的表面换热系数。Hasan 等人^[6]利用钢探头和热力学数据库, 确定了多种铁镍基合金的淬火表面换热系数, 并验证了小样品测定的系数在大样品计算分析中的适用性。张哲维^[7]通过反传热方法获得了 FGH96 盘件冷却换热系数, 并应用于残余应力预测。付佩等人^[8]采用经验公式、反传热以及流固耦合等方法, 分别确定了 CSU-A1 型镍基高温合金在端淬实验中的换热系数, 发现使用反传热法获得的换热系数计算冷却曲线误差最小。Rahimi 等人^[9]通过非均匀淬火实验反算出 Inconel 718 合金板的区域换热系数, 为非均匀淬火过程残余应力预测提供了边界条件支撑。

近年来, 反传热方法进一步被应用于钛合金、钢和不锈钢等多类材料及换热工况。孟斌等人^[10]通过热电偶测温 and 反传热计算获得了钛合金升降温换热系数, 并考虑了润滑剂、保温棉等实际生产保护措施对坯料温降的影响。高鑫洲等人^[11]采用实验测温 and 反传热计算方法获

收到初稿日期:

基金项目: 国家科技重大专项资助(项目号 2019-VI-0021-0137)

作者简介: 李昕, 男, 1995 年生, 博士, 工程师, 北京科技大学材料科学与工程学院, 北京 100083, E-mail: lixin17@spic.com.cn

通讯作者: 江河, 女, 副教授, 博士生导师, 北京科技大学材料科学与工程学院, 北京 100083, E-mail: jianghe@ustb.edu.cn

得了 Q235 钢锻件空冷综合换热系数, 并成功应用于大尺寸锻件锻造温度场预测。Ferguson 等人^[12]采用反传热法确定了 304 不锈钢探头在强水流、搅拌水和静水条件下的表面换热系数, 实现了高频率表面温度采集与换热系数确定。Szajding 等人^[13]基于钢圆柱端面油流冲击淬火实验和自研反传热软件求解了不同油速下的局部换热系数。

除反传热方法外, 流固耦合模拟也被用于确定换热系数。Fu 等人^[14]通过实验与流固耦合数值模拟研究镍基高温合金空气端淬换热系数, 建立了换热系数与温度、空气流量之间的经验关联式。Kacem 等人^[15]结合场流测试和 Inconel 718 平板淬火实验, 揭示了水浴搅拌强度对瞬态换热系数的影响, 证明强搅拌主要在沸腾中后期和对流阶段显著提高换热。Kamenicky 等人^[16]采用 IN718 圆柱热电偶测温实验和 CFD 计算方法, 研究了膜态沸腾、过渡沸腾、核态沸腾和自然对流对换热系数的贡献。Wang^[17]建立了镍基高温合金厚截面零件水淬过程的流固耦合模型, 实现了小尺寸和大尺寸试样的温度预测。流固耦合方法能够揭示流场、介质扰动对换热行为的影响, 具有较强的物理解释能力, 但建模过程复杂, 对流体边界条件、相变模型、网格质量和计算资源要求较高, 在工程应用中仍需依赖实验数据进行校准和验证。

目前, 针对高温合金开展的表面换热系数研究多针对淬火过程, 对铸锭或锭坯的加热、空冷、炉冷等过程较少涉及, 也较少考虑包套使用对铸锭换热的影响, 无法满足变形高温合金盘锻件等产品制造需要。此外, 表面换热系数的确定方法繁多, 多种方法确定的参数之间无法比较和混用, 因此迫切需要开展一次系统、全面的表面换热系数测定工作。本文以 GH4169/ Inconel 718 合金^[18]为例, 采用反传热方法, 通过设计实验和计算优化, 系统研究了实际工业生产环节所涉及各类升温与降温过程换热系数, 并结合生产实际需求考虑了保温包套和强迫对流的影响。

1 实验材料与方法

图 1 为本研究所采用的表面换热系数测定技术路线。首先, 在实验室条件下对小尺寸样品进行温度测量实验, 以获取样品在升温及冷却过程中的温度-时间曲线数据。随后, 建立与实验条件一致的有限元计算模型, 通过不断调整换热系数, 使计算得到的温度-时间历程曲线与实验测量曲线基本吻合, 从而确定样品的表面换热系数。该换热系数是联系实验室小样品测温实验与工业级大尺寸合金锭应用之间的关键参数, 可用于实际大尺寸合金锭的换热计算, 指导高温合金的生产制造过程。此外, 通过与工业级测温数据的对比, 可对换热系数的准确性

进行验证。

测定表面换热系数所使用的样品全部取自 $\Phi 508$ mm 的 GH4169 真空自耗锭 (Nb 含量为 5.2 wt.%) 边部位置, 样品尺寸为 $\Phi 60$ mm $\times$ 60 mm, 如图 2 所示。在样品的 30 mm 高的位置进行钻孔, 孔深 30 mm, 孔径 4 mm, 用于插入 K 型热电偶。

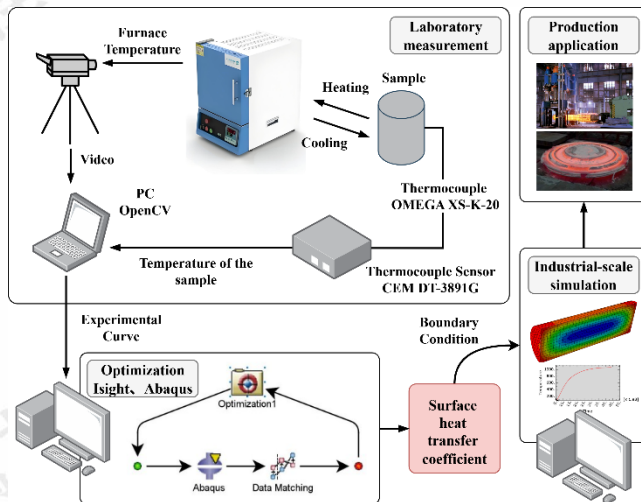


图 1 表面换热系数测定技术路线

Fig. 1 Technical route for determining the surface heat transfer coefficient

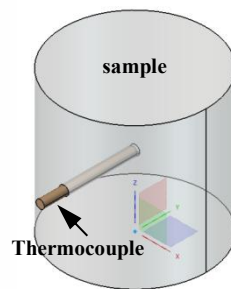


图 2 $\Phi 60$ mm 样品示意图

Fig. 2 Schematic diagram of a $\Phi 60$ mm sample

为了全面获取与实际工业生产相关的表面换热系数, 设计了如表 1 所示的实验方案。其中, 1~4 号研究升温过程, 分别为: 直接入炉升温、随炉升温、台阶升温、包套后升温。5~10 号研究冷却过程, 分别为: 空冷、炉冷、水冷、油冷、包套后空冷、强迫对流空冷。

采用多根 OMEGA XS-K-20 型热电偶 (K 型) 精确测定样品芯部温度, 为确保测试准确, 每根热电偶仅用于一次测定工作。热电偶信号采集器选用 CEM DT-3891G 型四通道测温记录仪, 并将温度数据传输到计算机。采用 SX-G04133 型高温炉进行所有样品的预氧化与加热处理。炉温数据采用图像识别的方式获取, 即采用摄像头实时采集加热炉的炉温仪表盘, 利用 OpenCV 库^[19]实现炉温的实时获取。识别算法为: (1) 从采集的视频画面中提取炉温显示区域; (2) 将炉温显

示区域分割为单个数字,并转换为黑白二值图;(3)对7段数码管显示的数字进行像素检查,根据7个位置的交点存在情况快速识别出炉温数字,如图3所示。

表1 表面换热系数测定实验方案

Table 1 Experimental Plan for Surface Heat Transfer

Coefficient Measurement		
Type	Testing Item	
Heating	1)	Directly into the furnace for heating 400、600、800、1000、1100、1200℃
	2)	Heating up with furnace 800、1000、1200℃
	3)	Step Heating 800℃→1000℃→1200℃
	4)	After covering, directly into the furnace for heating 1100℃
Cooling	5)	Air cooling 400、600、800、1000、1100、1200℃
	6)	Furnace cooling 1200℃→800℃
	7)	Water quenching 1000℃
	8)	Oil quenching 1000℃
	9)	Air cooling after wrapping 1100℃
	10)	Forced convection air cooling 1000、1200℃

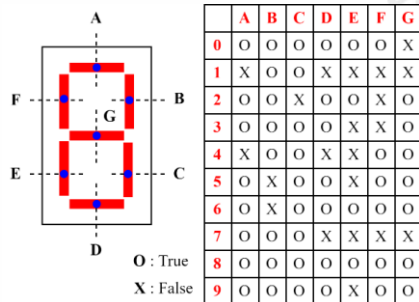


图3 7段数码管的视觉识别方法

Fig.3 Visual identification method of 7-segment digital tube

为确保表面换热系数测定的准确性,进行了炉温准确性检查,通过放置K型热电偶于高温炉热电偶下方1 cm位置,实测温度差在-1℃以内,高温炉温度准确度满足实验要求。在实验过程中,为确保温度测量的准确性,样品均放置于高温炉热电偶正下方位置。由于样品的氧化与否会明显影响合金的换热情况(辐射系数),结合实际生产情况,对所有样品均进行了预氧化操作,预氧化制度为1120℃/1h,确保样品表面均覆盖有氧化层。为了提高实验的准确性和简化表面系数测定,在高温炉底放置了一层10 mm厚的含ZrO₂硅酸铝纤维隔热垫(原炉底为SiC),并在实验室地面也放置了一块相同的隔热垫,以消除地面对空冷样品下表面的影响。在实际实验过程中,还使用了另一台加热炉加热同尺寸样品以提前烘烤隔热垫。

2 计算与参数优化方法

变形高温合金的换热过程通常涉及对流换热与辐射换热。其中,对流换热过程一般是指流体(如空气、水)与固体表面(合金锭表面)之间的热传输过程^[20],由牛顿冷却定律^[21]来描述,对流换热过程的热通量与流体和固体表面的温度差成正比,即:

$$q_c = h_c(T_{ingot} - T_{air}) \quad (1)$$

式(1)中, q_c 为单位时间和单位接触面积的热流量(W/m²), h_c 为对流换热系数(W/m²K), T_{ingot} 为固体(锭坯)表面的温度(℃), T_{air} 为流体(空气)的温度(℃)。其中,对流换热系数 h_c 是由流体(空气)的物理性质,流动速度,固体表面性质等方面决定的复杂系数。

辐射换热是材料由于自身温度或热运动而激发产生电磁波向外传递能量的过程。辐射换热过程一般由Stefan-Boltzmann定律^[22]描述,即:

$$q_r = \varepsilon \sigma (T_{ingot}^4 - T_{air}^4) \quad (2)$$

式(2)中, q_r 为单位时间和单位接触面积的热流量(W/m²), ε 为辐射发射率, σ 为黑体辐射常数(5.67×10^{-8} W/m²K⁴)。根据已有研究,固体物体表面性质(氧化层)能够明显影响发射率的大小。

在实际应用的过程中,为了简化实验测定的难度,通常采用等效换热的概念,将辐射换热系数视为一种对流换热过程,定义辐射换热系数 h_r ,因此具有式(3~4):

$$q_r = h_r(T_{ingot} - T_{air}) \quad (3)$$

$$h_r = \varepsilon \sigma (T_{ingot}^2 + T_{air}^2)(T_{ingot} + T_{air}) \quad (4)$$

根据式(3),可以将两种换热过程统一起来,得到等效换热系数 h ,如式(5)所示,因此只需要测定系数 h 即可全面描述合金的升温 and 降温过程,在本工作中将系数 h 称为表面换热系数。在实际运用等效换热系数进行有限元计算的过程中,需将辐射发射率设置为0。

$$q = q_c + q_r = h(T_{ingot} - T_{air}) \quad (5)$$

本工作选择有限元方法构建换热分析模型,采用Hooke-Jeeves直接搜索算法优化获得最佳的表面换热系数数值。Hooke-Jeeves算法^[23]由Westinghouse Research Laboratories的Robert Hooke和T. A. Jeeves于1960年公布,该方法是非常成功的模式搜索算法,在过去的60余年中被广泛用于工程研究中,其可靠性得到了充分的验证。在本工作中,定义以下实函数为目标函数:

$$f(h_{T_1}, h_{T_2}, \dots, h_{T_n}) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(\theta_i - \theta_i^*)^2}{N}} \quad (6)$$

式(6)中, $h_{T_1}, h_{T_2}, \dots, h_{T_n}$ 为合金在不同温度下的表

面换热系数, N 为实验数据点数, $\hat{\theta}_i$ 为预测的温度数据点, θ_i 为实验测定的温度数据点。可见, 寻找最可能的表面换热系数的问题本质上是寻找一组 n 维向量 $(h_{T_1}, h_{T_2}, \dots, h_{T_n})$ 使得函数 $f(h_{T_1}, h_{T_2}, \dots, h_{T_n})$ 在问题研究的区间内具有最小值的问题。

由于表面换热系数的优化搜索需要大量计算, 因此需要实现工作流程自动化。本工作采用 Isight 软件和 Abaqus 软件来构建表面换热系数优化搜索 workflow, 其由三部分组成: (1) Abaqus 计算换热过程; (2) Data Matching 模块将温度时间历程曲线与实测温度曲线进行比较; (3) Optimization 模块负责实施 Hooke-Jeeves 算法并给出下一次有限元计算所需的表面换热系数向量。

优化搜索初始值设置为: 升温过程 $200 \text{ W/m}^2\text{K}$; 降温过程 $T/10 \text{ W/m}^2\text{K}$, 其中 T 为样品表面温度。表面换热系数的初始试探区间为 $[1, 10000]$, 后续根据优化后的效果进行缩小或放大区间范围。在实际优化过程中, 对每个测温数据均执行了 300~500 次 workflow, 并确保实验曲线与计算曲线完全重合。

有限元计算使用的 GH4169 合金热物性参数为 Mills 提供的建议值^[24]。有限元网格类型为 DC3D8, 网格尺寸为 6 mm (根据网格无关性测试结果确定), 如图 4 所示, 并选择模型芯部位置结点作为温度-时间历程曲线的监控点。模型换热面根据对应的实验情况设置, 假设在炉内加热和空冷过程中样品与隔热垫不发生换热。计算使用的工作站配置为 Intel® Core™ i9 12900KS @ 5.5 GHz + 64 GB RAM , 软件版本为 Abaqus 2023、Isight 2023 以及 Intel oneAPI HPC Toolkit 2023 等。

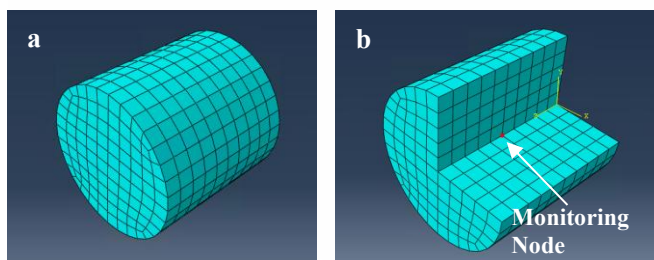


图 4 表面换热系数的有限元计算模型

Fig. 4 Finite element model of surface heat transfer coefficient: (a) mesh, (b) monitoring node location

3 结果与讨论

3.1 升温过程表面换热系数

升温过程主要包括直接入炉升温、随炉升温以及台阶升温等情况。本小节针对这三种情况依次开展了测温实验, 并通过计算优化确定了表面换热系数值。

图 5 为 GH4169 合金室温样品直接入炉升温的实验结果, 其中灰色曲线为实测炉温曲线。可以发现随着炉

温的升高, 样品芯部位置的到温时间 ($\pm 5^\circ\text{C}$) 不断缩短, 并与炉温之间具有自然指数的函数关系:

$$T_f = 2613.69 \exp(-t/759.69) + 366.9 \quad (7)$$

式(7)中, T_f 为炉温 ($^\circ\text{C}$), t 为芯部到温时间 (s)。

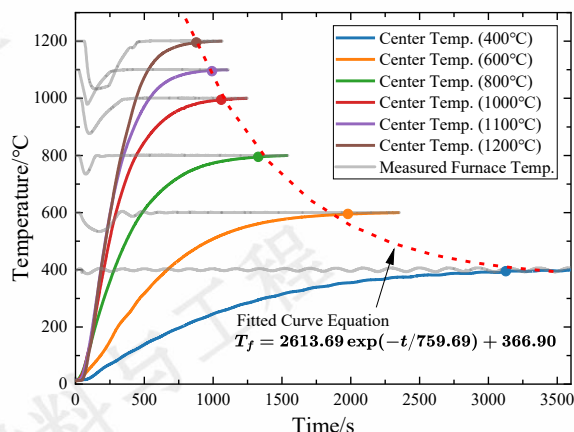


图 5 直接入炉升温过程的 GH4169 合金样品芯部位置的实验温度变化曲线

Fig.5 Experimental temperature change curve of the core position of the GH4169 alloy sample directly put into the furnace during the heating process

图 6 为优化得到的直接入炉升温过程的表面换热系数, 可以发现表面换热系数有明显的炉温相关性, 随着炉温的上升, 表面换热系数也变大。通过拟合, 发现直接入炉升温过程的表面换热系数符合以下模型:

$$h(T_f, T) = 41.265 + (4.32 \times 10^{-4} T_f - 0.0708) T \quad (8)$$

式(8)中, $h(T_f, T)$ 为与炉温和样品表面温度相关的表面换热系数 ($\text{W/m}^2\text{K}$), T_f 为炉温 ($^\circ\text{C}$), 范围为 $400\text{--}1200^\circ\text{C}$, T 为样品表面温度 ($^\circ\text{C}$), 范围为室温- 1200°C 。通过与 Incoloy 901 合金^[2] (国内牌号 GH4901) 与 Hastelloy X 合金^[1] (国内牌号 GH3536) 的升温过程表面换热系数对比, 发现表面换热系数与合金种类 (成分) 相关, 因此对于不同的高温合金需要针对性的进行表面换热系数测定, 不能随意使用其他合金的表面换热系数来预测不同合金的换热问题。

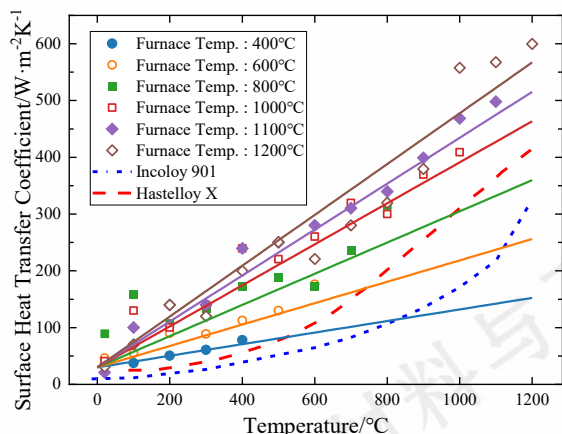


图6 直接入炉升温过程 GH4169 合金的表面换热系数
Fig. 6 Surface heat transfer coefficient of GH4169 alloy directly put into the furnace during heating process

图7为GH4169样品自室温(实测12.1℃)随炉升温的温度测量结果,其中灰色为炉温曲线。可以发现升温过程与炉温存在明显的相关性。由于该种情况炉温随时间不断变化,而炉温变化规律又与加热炉设备条件密切相关,因此直接对随炉升温过程进行优化无法得到普适的规律。本工作采用直接入炉的表面换热系数进行计算,观察随炉升温过程是否遵循与直接入炉升温过程一样的表面换热系数规律。

为了能够实现随炉升温过程的计算分析,利用FILM子程序写入了直接随炉升温过程的实测炉温变化曲线和直接升温过程得到的耦合炉温变化的换热系数。其中,采用拉格朗日插值算法^[25]计算任意时刻的炉温,如式(9)所示:

$$T_f(t) = T_{f,i} \frac{t-t_{i+1}}{t_i-t_{i+1}} + T_{f,i+1} \frac{t-t_i}{t_{i+1}-t_i} \quad (9)$$

式(9)中, $T_f(t)$ 为 t 时刻的炉温(℃), t 为时间(s), t_i 为第 i 个炉温数据点的时间(s), t_{i+1} 为第 $i+1$ 个炉温数据点的时间(s), $T_{f,i}$ 为第 i 个炉温数据点的炉温(℃), $T_{f,i+1}$ 为第 $i+1$ 个炉温数据点的炉温(℃)。

图7展示了800℃、1000℃、1200℃随炉升温过程的GH4169合金样品芯部位置温度预测曲线,可以发现计算结果与实测结果吻合,因此可以认为直接入炉升温的表面换热系数适用于随炉升温过程。

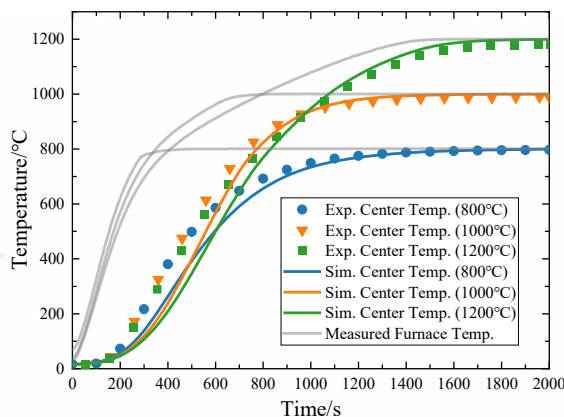


图7 随炉升温过程样品芯部位置实验与计算温度曲线
Fig. 7 The experimental and calculated temperature curve of the core position during the furnace heating process

图8为GH4169合金样品自800℃台阶升温至1000℃、1200℃的芯部位置温度测量数据,可以发现台阶升温过程本质上与随炉升温过程类似,因此这里采用类似随炉升温的研究方法进行研究,即采用直接入炉升温过程的表面换热系数模型,预测和比较样品芯部位置的温度变化情况,可以发现计算预测曲线能够准确描述实验测定的样品温度变化情况,因此直接升温过程的表面换热系数模型适用于台阶升温过程。通过以上研究,发现直接入炉升温实验测得的表面换热系数模型可描述直接入炉升温、随炉升温、台阶升温等三种常见升温过程,为减少重复实验、降低实验成本,仅开展直接入炉升温实验就可满足升温条件的换热系数测定需求。

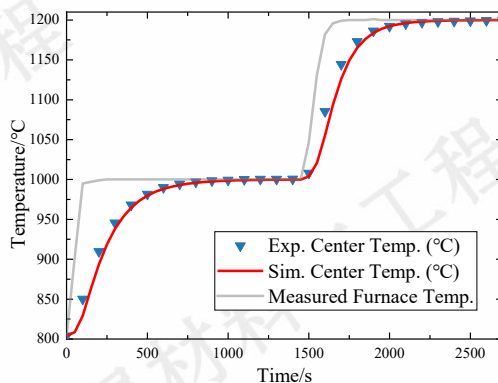


图8 台阶升温过程样品芯部位置实验与计算温度曲线
Fig. 8 Experimental and calculated temperature curves of the sample core position during the step heating process

3.2 冷却过程表面换热系数

在变形高温合金实际生产过程中,主要涉及的冷却过程有:空冷、炉冷、水冷以及油冷等过程,冷却方法的选择将直接影响铸锭的损伤开裂情况,以及残余应力产生,因此有必要针对四种常见冷却过程开展表面换热系数测定工作。

图9为GH4169合金样品空冷过程芯部位置的实测

温度曲线(室温 12.1℃),发现不同初始温度的空冷曲线符合自然指数的数学规律,在空冷初期样品冷却速率较高,随着空冷时间延长,样品温度下降速率明显减小。

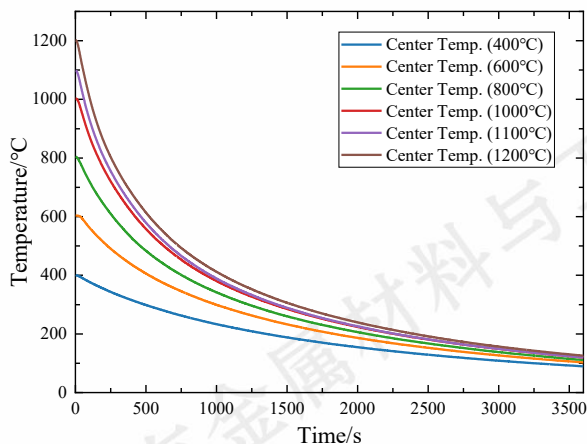


图9 空冷过程 GH4169 合金样品芯部位置实验温度变化

Fig. 9 Temperature curve at the core position of GH4169 alloy sample during air cooling process

图10为优化得到的GH4169合金空冷过程表面换热系数,经过数据拟合,可以确定表面换热系数满足如式(10)所示的关系。

$$h(T) = \exp(2.75446 + 0.00214T) \quad (10)$$

式(10)中, $h(T)$ 为表面换热系数 ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$), T 为样品表面温度 ($^{\circ}\text{C}$), 范围为室温-1200℃。图10中提供了 FGH96 合金^[5]的空冷表面换热系数数据,可以发现 GH4169 合金具有与其类似的规律,但 GH4169 合金表面换热系数随表面温度的升高并没有 FGH96 合金快。结合图6的直接入炉升温过程的表面换热系数,可以发现环境温度(包括炉温和空冷环境温度)是影响合金表面换热系数的重要因素。

在变形高温合金实际生产过程中,例如 GH4169 合金的均匀化过程,一般在均匀化过程结束后需要将锭坯冷却下来,已有研究证实 1190℃ 直接空冷会给锭坯带来较大热应力^[26],导致合金开裂,因此均匀化结束后一般需要炉冷至 800~900℃,然后再空冷至室温。为了确定炉冷过程的表面换热系数,先将样品在 1200℃ 附近进行长时间均温处理(芯部到温后保温 10 min),然后关闭加热炉,采集到了样品芯部位置温度及炉温变化数据,如图11所示,发现随着炉冷过程的进行,样品芯部与炉温的温差大致稳定(略有缩小),温度差约为 50℃。

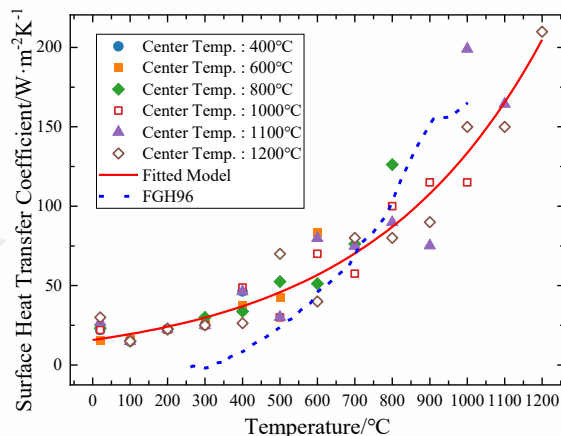


图10 空冷过程的 GH4169 合金的表面换热系数

Fig. 10 Surface heat transfer coefficient of GH4169 alloy during air cooling process

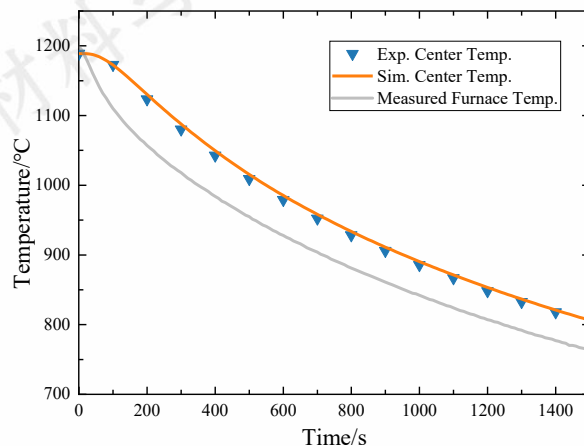


图11 炉冷过程的样品芯部位置实验与计算温度曲线

Fig. 11 Experimental and calculated temperature curves of the sample core position during furnace cooling process

式(11)为优化得到的炉冷过程 GH4169 合金表面换热系数,表面换热系数与样品表面温度呈线性关系:

$$h(T) = 1.035T - 580.875 \quad (11)$$

式(11)中, $h(T)$ 为与样品表面温度相关的换热系数 ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$), T 为样品表面温度 ($^{\circ}\text{C}$), 范围为 800-1200℃。结合空冷过程数据(图10),可以发现炉冷过程的表面换热系数要明显比空冷过程的大,这与热空气中分子热运动更为剧烈有关,说明了合金表面换热系数与环境温度密切相关。通过将直接升温过程测定的表面换热系数运用到炉冷过程计算,结果如图11所示,发现能够准确描述炉冷过程温度变化,因此可以选用直接升温过程表面换热系数来进行炉冷过程计算。

热处理过程除了空冷与炉冷,水冷和油冷也是常见的冷却方式。结合 GH4169 合金盘锻件实际淬火温度范围,制定了以 1000℃ 为淬火初始温度的水冷和油冷实验方案。图12为 GH4169 合金水冷和油冷过程样品芯部温

度变化曲线,可以发现水冷情况下冷速最快,其次是油冷过程,两种淬火方式冷速均比空冷过程大。

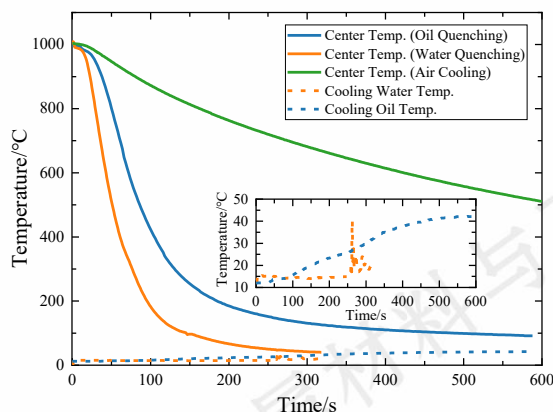


图 12 水冷与油冷过程样品芯部位置实验温度变化曲线
Fig. 12 Experimental temperature curve of the core position during water cooling and oil cooling processes

图 13 为优化得到的 GH4169 合金水冷、油冷表面换热系数,可以发现两种换热系数曲线均呈现单峰分布特征。水冷换热系数在 300~400℃附近数值最大,在更高和更低温度区间,表面换热系数不断减小。通过与已有研究数据^[4,27-29]进行对比,发现本实验结果与 Cihak 等人^[4]测定的模型更为接近。对比纯镍^[27]和 Inconel 600 合金^[27]表面换热系数,发现三种镍基高温合金之间的水冷表面换热系数较为接近。

图 13 也给出了 GH4169 合金油冷过程的表面换热系数,该曲线也呈单峰分布特征,但其表面换热系数峰值比水冷过程小了一个数量级,并且在更大的温度区间内(300℃, 700℃)具有最大值。通过与 FGH96 合金^[5]结果进行对比,发现两种合金规律相似且数值接近。

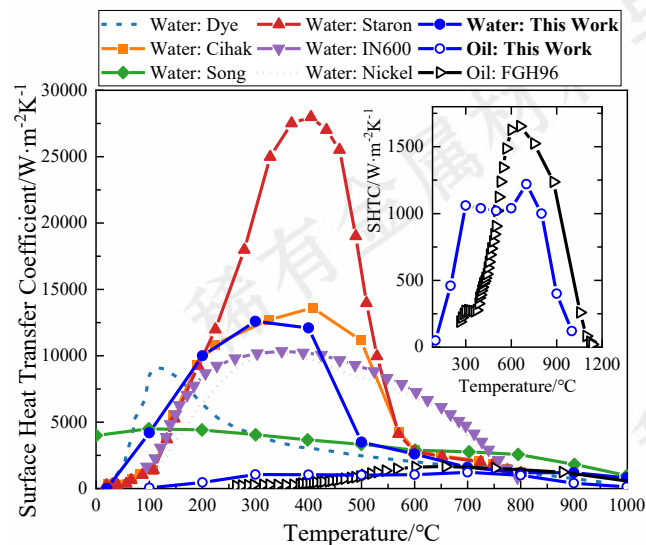


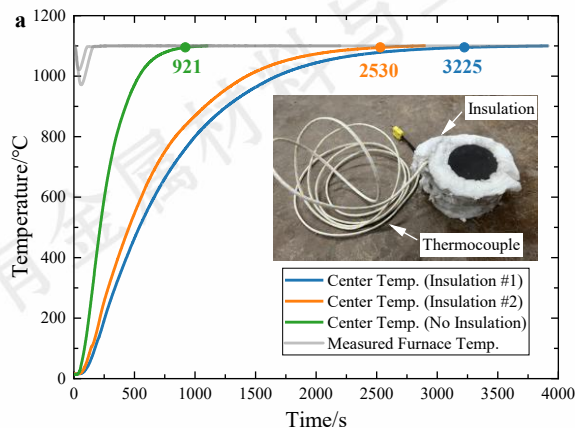
图 13 不同合金的水冷和油冷过程的表面换热系数对比
Fig. 13 Comparison of surface heat transfer coefficients of different alloys during water and oil cooling process

3.3 包套与强迫对流影响

在变形高温合金盘锻件制造过程中,特别是锻拔开坯和锻造过程,锭坯表面温降较快。对于 GH4169 合金,其开坯出炉温度为 1120℃,当表面温度低于 920℃时就不再适合进行锻造了,可见生产过程需要在 920~1120℃的狭窄温度区间^[30]内完成。对于 GH4738^[31]、GH4720Li^[32]、GH4151^[33]等变形高温合金,其锻造温度区间更小,因此在实际生产中都需要在锭坯表面包裹隔热材料来减缓温度下降。根据这些实际生产情况,设计了系列实验来评估保温包套包覆情况下的合金换热系数。在前期的测试性实验中,由于全包套后的样品升温速度过慢,因此在本部分的实验中选择了部分包套方案,即只对除样品顶面的其他表面包覆保温材料,样品顶面不包套,如图 14(a)所示。为了将隔热材料进行固定,本工作采用铁丝在其表面进行紧固(图 14(b))。在优化表面换热系数的环节,选择了直接升温过程以及空冷过程的表面换热系数作为样品顶部未包套面的表面换热系数。

本工作选择了企业生产过程中常使用的两种硅酸铝纤维材质的保温包套作为研究对象,其中包套#1 为含有 ZrO₂ 的硅酸铝纤维包套(厚度约为 2 cm),包套#2 为不含 ZrO₂ 的硅酸铝纤维包套(厚度约为 1.5 cm)。

图 14(a)为两种包套包覆的 GH4169 样品在 1100℃直接入炉升温过程的样品芯部位置温度变化曲线,可以发现两种包套均对样品的升温过程起到了明显阻碍,其中含有 ZrO₂ 的包套#1 的隔热能力比包套#2 更强。图 14(c)提供了经过优化计算得到的两种包套情况下的直接入炉升温过程的表面换热系数,发现相比未包套的直接入炉升温过程,两种包套均导致了样品具有较低的表面换热系数,均保持在 100 W/m²K 以下。包套#1 使得合金具有较为稳定的换热系数,在 200~1100℃范围内,该表面换热系数随样品表面温度上升仅为 10 W/m²K。



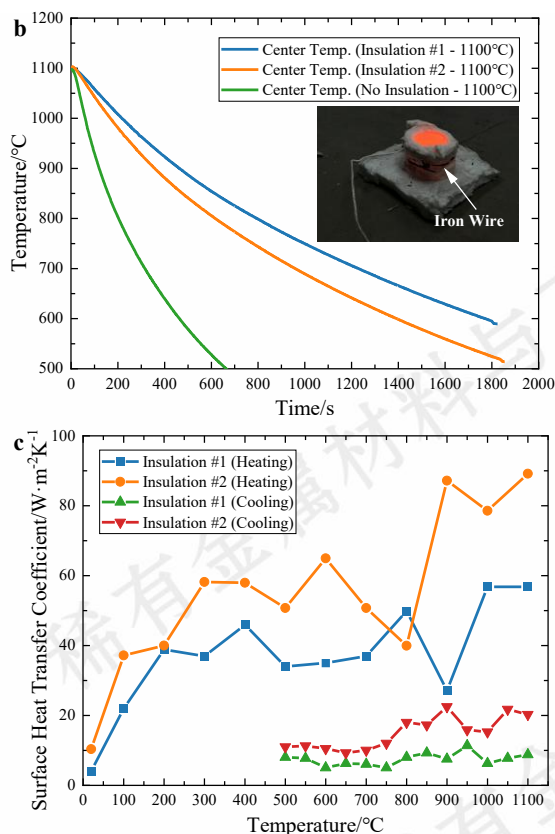


图 14 包套包覆下样品实验温度曲线与表面换热系数
Fig. 14 Experimental temperature curve and surface heat transfer coefficient of covered GH4169 alloy sample (a) temperature curve of heating process (b) temperature curve of air cooling process (c) surface heat transfer coefficient

图 14(b)为两种包套包覆的 1100℃样品在空冷过程中芯部位置的温度变化曲线,发现包套有效减缓了样品的冷却过程,其中包套#1 具有更好的隔热作用,使得样品冷却过程比包套#2 更加缓慢。图 14(c)为两种包套包覆下的空冷过程表面换热系数,发现相比加热升温过程,空冷过程的表面换热系数更小。此外,含有 ZrO_2 的包套#1 的样品表面具有更低的表面换热系数,在 500~1100℃温度范围内保持在 $7 \text{ W/m}^2\text{K}$ 附近。包套#2 的样品表面换热系数在 800~1100℃范围内约为包套#1 的 2 倍。

在实际生产中,会因为车间布局不当发生空气对流,以及合金锭被操作车夹持快速移动从而在锭坯表面产生空气流动,这是典型的强迫对流现象。为了研究流动空气对合金锭坯的表面换热系数影响,选择了 GH4169 合金开坯和锻造的两个典型温度(1100℃和 1000℃)作为样品冷却初始温度,并用热电偶测定了样品芯部位置的温度变化曲线。实验选用管道风机制造样品表面空气流动,如图 15(a)所示,利用 Greener 分体式风速计测定了样品表面的空气流速,约为 3.19 m/s (风力等级 2 级)。

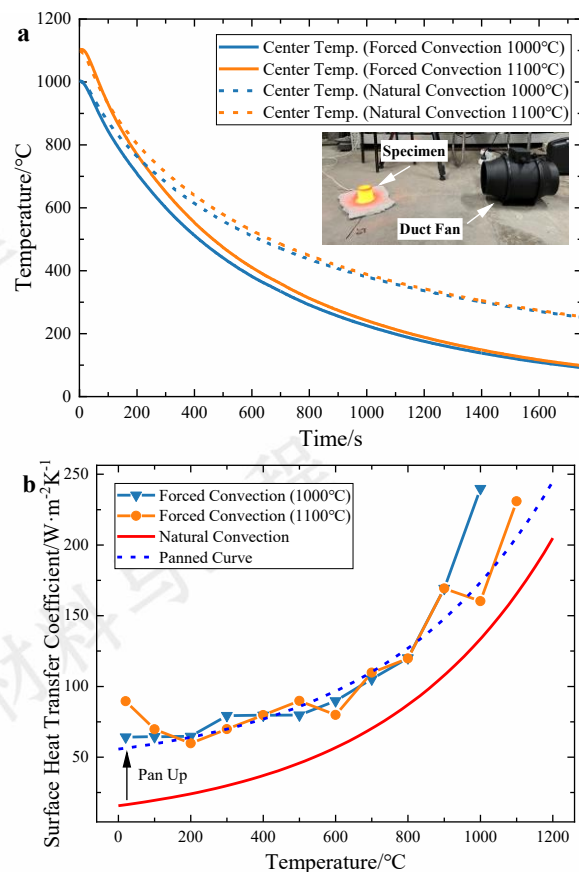


图 15 强迫对流空冷实验及表面换热系数确定
Fig. 15 Experiment of forced convection air cooling and determination of surface heat transfer coefficient (a) Experimental temperature curve (b) Surface heat transfer coefficient

图 15(a)展示了实验测定的 1000℃和 1100℃样品在 3.19 m/s 空气流速下芯部位置的温度变化曲线,可以发现两个初始温度的强迫对流空冷过程均比自然对流空冷过程更快冷却到 50℃以下,强迫对流过程能够明显加快样品的换热冷却过程。

图 15(b)为利用 Hooke-Jeeves 算法优化得到的 GH4169 合金在 2 级风力下的空冷表面换热系数,可以发现 1000℃和 1100℃样品的表面换热系数基本一致,并具有自然指数的规律。通过将自然对流空冷表面换热系数曲线上移 $40 \text{ W/m}^2\text{K}$,可以较好的描述强迫对流下空冷表面换热系数,如式(12)所示,其中 T 为样品表面温度,范围为室温-1200℃,因此强迫对流并不改变表面换热系数随温度变化的自然指数规律,而是将自然对流空冷的表面换热系数曲线向上平移了。

$$h(T) = \exp(2.75446 + 0.00214T) + 40 \quad (12)$$

3.4 工业合金锭的升降温验证

通过实验室小样品实验确定了 GH4169 合金在各种情况下的表面换热系数,由于相关系数最终要用到实际

工业生产中指导工艺设计,因此有必要验证优化得到的系数能否准确描述工业级合金锭坯的升降温过程。本小节收集整理国内外 Inconel 718/GH4169 合金锭的实测温度数据,并利用优化得到的表面换热系数进行了有限元计算验证。

图 16(a)为 $\Phi 508$ mm 和 $\Phi 914$ mm 的 Inconel 718 合金锭直接送入 1080°C 高温炉升温的实验和计算结果^[34],可以发现本实验确定的表面换热系数能够准确描述工业大尺寸合金锭的升温过程。1992 年 Teledyne Allvac 公司(今 ATI 公司)委托俄亥俄州立大学分析了 $\Phi 508$ mm $\times$ 2489 mm 尺寸的 Inconel 718 合金锭升温过程^[2],其根据已有的 Incoloy 901 合金表面换热系数进行了 Inconel 718 合金锭的预测计算,但并未进行实验验证。本工作进行了类似计算,发现用 Incoloy 901 合金表面换热系数并不能准确计算 Inconel 718 合金升温过程温度变化规律,因此对于不同牌号的高温合金都应当进行表面换热系数的测定工作。

图 16(b)为 $\Phi 508$ mm 尺寸 GH4169 合金锭表面位置在不同初始温度空冷的实测数据与计算温降曲线,发现本工作测定的空冷表面换热系数具有较高的预测准确性,可以准确描述工业合金锭的空冷降温过程。图 16(c)为 $\Phi 914$ mm 尺寸 Inconel 718 合金锭自 1040°C 空冷 60 min 的温度变化实验数据和计算结果^[34],可以发现两者高度吻合,说明本工作测定的空冷表面换热系数能够对 $\Phi 914$ mm 尺寸的特大合金锭的空冷换热过程进行准确描述。

图 16(d)为 $\Phi 914$ mm Inconel 718 合金锭 1040°C 出炉空冷 15 min 然后回炉升温的实验数据和计算结果^[35]。通过利用 FILM 子程序实现了空冷过程和升温过程表面换热系数自动切换计算,具体算法是通过判断表面温度与环境温度大小选择不同的换热系数模型,当锭坯表面温度高于环境温度时自动切换为空冷换热系数,反之则切换为直接入炉升温的表面换热系数。从结果中可以看到,有限元计算结果与实验数据高度吻合,因此本工作测定的表面换热系数具有较高的预测准确性,能够用于实际工业生产中复杂变温过程的工艺设计中。

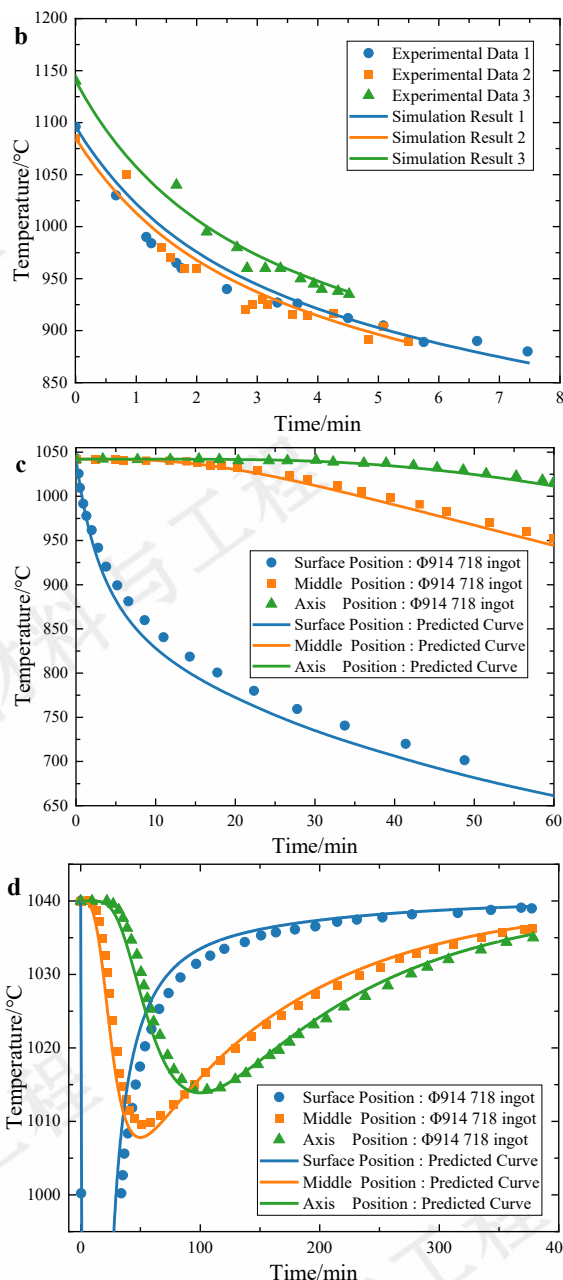
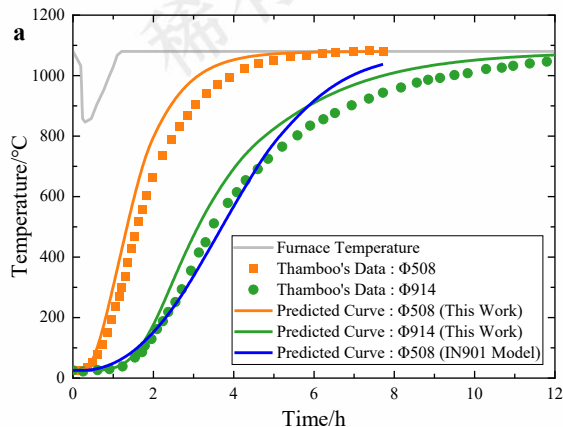


图 16 表面换热系数的工业合金锭验证结果
Fig. 16 Verification of surface heat transfer coefficient with industrial GH4169/Inconel 718 alloy ingot
(a) Heating process of $\Phi 508$ mm and $\Phi 914$ mm ingot (b) Air cooling process of $\Phi 508$ mm
(c) Air cooling process of $\Phi 914$ mm ingot (d) heating process of 914 mm ingot after being air-cooled for 15 min and returned to the furnace

目前,企业多在生产过程中采用保温包套,因此有必要验证确定的包套后表面换热系数的可靠性。图 17 为 $\Phi 400$ mm $\times$ 200 mm 尺寸的 GH4169 合金锭在部分包套(顶部不包套)和全包套情况下锭坯芯部位置的升温数据^[36],可以发现本工作测定的包套换热系数(含 ZrO_2)能够准确描述部分包套和全包套的 GH4169 合金锭的升温过程,因此能够用于实际工艺设计环节中。

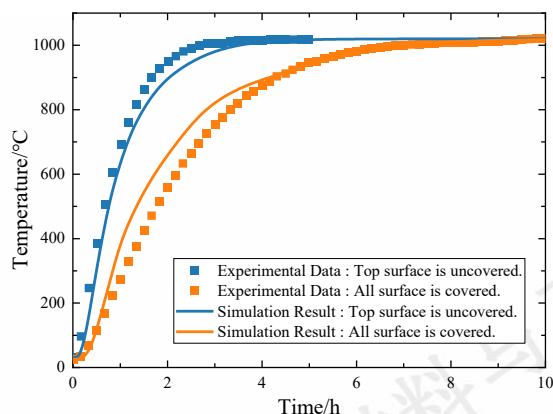


图 17 直接入炉升温过程的 $\Phi 400$ mm 的部分包套和全包套的 GH4169 合金锭芯部位置的实验与预测温度变化结果的对比

Fig.17 Comparison of the experimental and predicted temperature change results of the core position of the $\Phi 400$ mm partially-covered and fully-covered GH4169 alloy ingots that directly enter the furnace during the heating process

4 结论

本文以 GH4169 合金为例,提出了一种可靠的实验室级表面换热系数确定方法,系统测定了 GH4169 合金的升温 and 降温过程表面换热系数,为变形高温合金的表面换热系数的准确测定提供了研究基础,结果表明:

1) 通过直接升温过程测定的表面换热系数可以全面地描述合金在不同升温过程中的温度变化规律,因此在测定工作中可以只进行直接入炉升温实验,而不用再做随炉升温 and 台阶升温等实验。直接入炉升温过程的表面换热系数与炉温、样品表面温度间的关系为: $h(T_f, T) = 41.265 + (4.32 \times 10^{-4} T_f - 0.0708) T$ 。

2) GH4169 合金空冷过程表面换热系数与样品表面温度满足关系 $h(T) = \exp(2.75446 + 0.00214 T)$ 。1200℃-800℃ 炉冷过程表面换热系数满足关系 $h(T) = 1.035 T - 580.875$,也可以使用直接升温过程测定的表面换热系数进行描述。水冷与油冷过程表面换热系数呈现单峰分布特征,水冷换热系数约为油冷换热系数的 10 倍。

3) 保温包套可使得合金具有极低的表面换热系数,并且在较大的温度区间范围保持稳定。强迫对流空冷过程 (3.19 m/s) 不改变自然对流空冷的表面换热系数曲线形式,只是将自然对流空冷的表面换热系数曲线向上移动了约 40 W/m²K。

4) 工业合金锭的测温数据验证结果表明,本工作设计的实验室级测定表面换热系数的研究方法具有较高可靠性,测定的表面换热系数可用于变形高温合金去应力

退火、均匀化、锻造开坯、锻造及热处理等环节所涉及的升温、冷却过程计算分析。

参考文献 References

- [1] Sun R. *Metallurgical Transactions*[J], 1970, 1: 1881
- [2] Chandrasekharan S. *Optimization of Preheating Schedule for Nickel Base Superalloy Ingots Using Finite Element Analysis*[D]. Columbus: Ohio State University, 1992
- [3] Sundén B, Brebbia CA. *Heat Transfer VII Advanced Computational Methods in Heat Transfer*[M]. WIT Press, 2002, 251
- [4] Cihak U, Staron P, Stockinger M *et al. Advanced Engineering Materials*[J], 2006, 8(11): 1088
- [5] Zhang JiaFeng(张家锋), Zou JinWen(邹金文), Kang JinWu(康进武) *et al. Journal of Aeronautical Materials* (航空材料学报)[J], 2010, 30: 26
- [6] Hasan H S, Peet M J, Jalil J M *et al. Heat Mass Transfer*[J], 2011, 47: 315
- [7] Zhang Zhewei(张哲维). *Study on the evolution of three-dimensional residual stress field in turbine discs by using neutron/X-ray diffraction and finite element method*(基于中子/X射线衍射与有限元法的涡轮盘模拟件三维残余应力场演变研究)[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2021, 51
- [8] Fu Pei(付佩), Zhou Ping(周萍), Zhao Tianyang(赵天阳) *et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2023, 33: 4118
- [9] Rahimi S, King M, Amir S M *et al. Materials & Design*[J], 2025, 250: 113615
- [10] Meng Bin(孟斌), Zhang Haicheng(张海成), Luo Hengjun(罗恒军). *Forging & Metalforming* (锻造与冲压)[J], 2023, 23: 26
- [11] Gao Xinzhou(高鑫洲), Yue Fengli(岳峰丽), Xu Bin(徐斌) *et al. Forging & Stamping Technology* (锻压技术)[J], 2017, 42(12): 3
- [12] Ferguson B L, Freborg A, Li Z *et al. 6th International Quenching and Control of Distortion Conference* [C]. Chicago: ASM, 2012: 792
- [13] Szajding A, Gołdasz A, Telejko T. *Computer Methods in Materials Science* [J], 2020, 20(4): 157
- [14] Fu P, Zhou P, Zhao T *et al. International Journal of Thermal Sciences* [J], 2020, 155: 106416
- [15] Kacem A, Bourouga B, Moutar A O E. *Journal of Heat Transfer* [J], 2021, 143: 122101
- [16] Kamenicky R, Rahimi S, Violatos I *et al. International Journal of Heat and Mass Transfer* [J], 2024, 235: 126158
- [17] Wang Tongyu. *Quenching Heat Treatment Modelling of*

- Thick-Section Parts by CFD Methods with a Semi-mechanistic Boiling Model* [D]. Sheffield: The University of Sheffield, 2024
- [18] Eiselstein H. *Age-hardenable nickel alloy*: US3046108[P]. 1958-11-13
- [19] Bradski G. Dr. *Dobb's Journal of Software Tools*[J], 2000. 25(11): 122
- [20] Li Changyou(李长友). *Engineering Thermodynamics and Heat Transfer*(工程热力学与传热学)[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2024: 169
- [21] Davidzon M. *International Journal of Heat and Mass Transfer*[J], 2012, 55(21-22): 5397
- [22] Viskanta R. *Advances in Heat Transfer*[J], 2014. 46: 10
- [23] Hooke R, Jeeves T A. *Journal of the ACM*[J], 1961, 8(2): 212
- [24] Mills K C. *Recommended Values of Thermophysical Properties for Selected Commercial Alloys*[M]. Ohio: ASM international, 2002: 181
- [25] Li Chenliang(李郴良), Li Jiaofen(李姣芬). *Introduction to Engineering Numerical Analysis*(工程数值分析引论)[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2023: 66
- [26] Bond B J, Jackman L A. *Method for Producing Large Diameter Ingots of Nickel Base Alloys*: US6416564[P], 2002-07-09
- [27] Hasan H S. *Evaluation of Heat Transfer Coefficient during Quenching of Steels*[M]. Cambridge: University of Cambridge, 2009
- [28] Staron P, Cihak U, Stockinger M *et al. Journal of Neutron Research*[J], 2007, 15(3-4): 185
- [29] Song Runhua(宋润华). *Study on constitutive behavior of GH4169 alloy and Evolution and mechanism of residual stress in turbine disk*(GH4169 合金本构行为及涡轮盘残余应力的演化 and 作用机制研究)[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022
- [30] Open die Forging Institute. *Open die forging manual*[M], Cleveland: Forging Industry Association, 1982
- [31] Sun Panhe(孙攀贺), Zhang Hengnian(张亨年), Zhang Shaohui(张少辉) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2026, 55(7): 1807
- [32] Fan Haiyan(范海燕). *Optimization of homogenizing preforming process for GH4720Li alloy*(GH4720Li 合金的均匀化开坯工艺优化)[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2018, 35
- [33] Wang Fa(王法). *Effect of high content of γ' on microstructure and properties of refractory GH4151 alloy and Exploration of alloy with Higher operating temperature*(高含量 γ' 特性对难变形 GH4151 合金组织性能影响及更高使用温度合金探索)[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2023, 92
- [34] Thamboo S V, Schwant R C, Yang L *et al. Superalloys 718,625,706 and Various Derivatives*[C]. Pittsburgh: TMS, 2001: 57
- [35] Uginet J J, Jackson J J. *Superalloys 718, 625, 706 and Derivatives 2005*[C]. Pittsburgh: TMS, 2005: 57
- [36] Zhou Dianhua(周奠华), Jin Xin(金鑫), Xie Wei(谢蔚) *et al. Pastable adiabatic cotton and its preparation method*(可粘贴绝热棉及其制备方法): ZL200510023801.0[P], 2008-05-07

Research on Systematic Determination of Surface Heat Transfer Coefficient of Wrought Superalloys

Li Xin^{1,2}, Jiang He¹, Wang Xiaobo², Dong Jianxin¹

(1. School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

(2. Advanced Technology Research Center, China United Gas Turbine Technology Co., Ltd, Beijing 100016, China)

Abstract: In order to accurately predict the heating and cooling process of wrought superalloys during the manufacturing process, accurately evaluate thermal stress and control damage, and reduce energy consumption and production costs, it is necessary to perform a systematic study on the surface heat transfer coefficient of various heat transfer conditions of wrought superalloys, and determine a reliable surface heat transfer coefficient for actual process design and simulation calculation. In this paper, 10 typical heat transfer conditions involved in the manufacturing process of GH4169 alloy disc forgings are taken as examples, and the surface heat transfer coefficient of GH4169 alloy is determined by experimental temperature measurement and finite element parameter optimization method. The study found that the surface heat transfer coefficient measured by the direct heating process can comprehensively describe the temperature change of the alloy in different heating processes; the furnace cooling process can be described by the surface heat transfer coefficient measured by the direct heating process; the insulation materials can make the alloy have an extremely low surface heat transfer coefficient and remain stable in a large temperature range; the surface heat transfer coefficient measured by a small laboratory sample can accurately describe the heating and cooling process of industrial large ingots.

Key words: Surface Heat Transfer Coefficient, Wrought Superalloy, Parameter Optimization, Numerical Simulation

Corresponding author: Jiang He, Ph. D., Professor, School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, P. R. China, Tel: 13811910685, E-mail: jianghe@ustb.edu.cn