

高温合金涡轮盘制备数值模拟方法研究进展

姚凯俊¹, 姚志浩¹, 王 强², 董建新¹, 赵文源¹, 潘崇林¹

(1. 北京科技大学 材料科学与工程学院, 北京 100083)

(2. 中国航发湖南动力机械研究所, 湖南 株洲 412002)

摘要: 通过数值模拟的方式可以研究涡轮盘制备各个工艺环节的影响因素, 实现对涡轮盘成品性能的严格控制。本文综述了涡轮盘典型制备路线: 真空感应熔炼、电渣重溶、真空电弧重熔、均匀化处理、开坯、锻造和热处理 7 个工艺阶段的数值模拟计算方法的发展现状, 归纳了各工艺阶段的模型构建方法和研究重点。阐述了目前对合金产品制备过程集成模拟的研究进展, 并介绍了本课题组进行的涡轮盘制备全流程数值模拟工作。最后分析了多工艺集成化模拟的难点, 为未来涡轮盘制备过程的全流程集成模拟提供借鉴。

关键词: 涡轮盘制备; 数值模拟; 集成建模

中图法分类号: TG132.3⁺³

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2022)11-4347-11

涡轮盘是航空发动机和燃气轮机中承受高温大应力的核心热端部件, 工作环境十分复杂, 需要在高温下兼备抗氧化性能、高温持久强度以及良好的组织稳定性, 这就必须保证合金材料的成分和组织均匀^[1]。在高温合金涡轮盘从熔炼到加工的整个工艺过程中, 对于每个工艺阶段的组织与性能都要严格控制^[2], 通过微观组织、缺陷含量、机械性能、残余应力状态等关键特征对涡轮盘质量进行评估, 这无疑极大地增加了工程设计的时间成本和经济成本。

随着计算方法的更新进步, 数值模拟技术在高温合金涡轮盘的制备过程中得到广泛应用, 从而最大程度地降低开发成本, 缩短开发时间跨度。近年来, 有众多学者对涡轮盘制备过程中的各个工艺阶段进行过数值模拟^[3-9], 极大程度地改进了工艺方法。尽管每个单独的工艺阶段的数值模拟都已实现, 但很少有致力于完整制备过程的全流程模拟。依托计算机辅助工程 (computer aided engineering, CAE) 技术开发联合性的集成计算材料工程 (integrated computational materials engineering, ICME), 是统筹多种学科理论、涵盖产品制造复杂工艺的仿真计算方法^[10], 可以明晰的显示仿真数据的变化和转移, 探究各项工艺流程的不同工艺参数对涡轮盘最终性能的影响。

本文旨在综述国内外的涡轮盘制备的单工艺模拟和多工艺集成化模拟, 详细阐述数值模拟计算方法在高温合金涡轮盘制备中的应用及其发展方向。

1 熔炼过程的数值模拟

合金熔炼的目标是使合金中的有害元素低于一定含量, 消除大尺寸非金属夹杂物, 获得化学成分准确且纯净度高的合金。高质量的合金熔炼包括单联、双联及三联工艺, 对于合金化程度很高的合金, 通常都采用真空感应熔炼 (vacuum induction melting, VIM), 然后再经真空电弧重熔 (vacuum arc remelting, VAR) 或电渣重熔 (electroslag remelting, ESR) 进行二次熔炼; 对于优质高温合金, 国际上通常采用 VIM+ESR+VAR 三联工艺冶炼生产^[11]。近年来国内外的合金熔炼方法和熔炼水平如表 1 所示。

目前, 数值模拟已成为熔炼过程设计和优化的标准^[12], 主要包括使用模拟计算协助流槽和熔炉的设计建造, 以及使用多相和多物理场来描述熔炼过程的具体细节^[9]。多相问题的研究范围包括凝固过程中柱状晶/等轴晶的形成分布以及气泡和非金属夹杂物的运动状态, 多物理场问题的研究则侧重于凝固过程中流场、温度场和电磁场之间的相互作用及其对糊状区的影响^[13]。然而, 与实际熔炼过程的联合工艺不同, 目前熔炼过程的数值模拟侧重于对单个工艺的具体研究。

1.1 VIM 工艺的数值模拟

涡轮盘用高温合金的性能对元素成分高度敏感, 作为原料的高温合金铸锭必须严格控制合金成分, 同时需要具有极低的气体和夹杂物含量, 以保证良好的

收稿日期: 2021-11-25

基金项目: 国家科技重大专项 (2017-VI-0017-0089, J2019-VI-0021-0137); 国家自然科学基金 (51771017)

作者简介: 姚凯俊, 男, 1998 年生, 博士生, 北京科技大学材料科学与工程学院, 北京 100083, E-mail: d202110255@xs.ustb.edu.cn

热加工组织均匀性和综合力学性能。VIM 是高温合金涡轮盘生产的重要工艺, 在真空下熔炼容易将合金中的残余气体元素 (N、H、O 等) 和非金属夹杂物形成元素 (S、P 等) 去除到远比常压冶炼下更低的水平, 同时挥发杂质金属元素 (Pb、Sn、Sd 等), 可明显地提高合金材料的韧性、疲劳强度、耐腐蚀性能和抗高温蠕变性能^[14]。

感应熔炼后的浇注过程中, 非金属夹杂物可能会落入熔池中并进入糊状区形成夹杂缺陷, 所以采用流槽对合金液导流, 同时去除非金属夹杂物, 获得均匀纯净的合金液^[15]。流槽是作为连铸中间包的改良而出现的, 集中于流动特征的定量计算和停留时间分布理论^[16]。基于对流槽的研究理论, 可以建立合金液流动状态及夹杂物运动状态的模型, 探究浇注流槽内合金液流场和温度场分布规律, 追踪导致缺陷形成的夹杂物的行为过程以及解决办法。研究表明^[15,17]同时使用堰和坝结构的控流装置 (见图 1), 以及改变堰坝结构的尺寸和分布, 可以通过改变流动状态提高流槽内合

金温度和成分的均匀性, 同时改善夹杂物的上浮条件, 实现对夹杂物的高效去除。

VIM 铸锭凝固过程中, 伴随着溶质贫乏的固相与溶质富集的液相之间的相对运动, 宏观偏析现象严重, 且完全凝固后会产生缩孔疏松等缺陷^[18]。根据凝固过程不同区域的计算原理和建模方法, 对凝固过程的模拟需要综合连续模型和多相模型, 实现对流体流动和溶质运动的模拟分析, 准确描述铸锭的宏观偏析行为和凝固晶粒状态 (见图 2)^[19]。Tu 等^[20]通过在二元合金的基础上增加元素组分, 推导多组元溶质元素平衡关系, 计算多组元合金凝固路径, 实现合金铸锭多组分的宏观偏析模拟。Wu 等^[21]通过对连续模型耦合考虑补缩流和热溶质对流的影响, 并在等轴晶—柱状晶—液相三相模型的求解框架上增加空气相, 综合考虑凝固补缩流、热溶质对流、等轴晶转移以及柱状晶—等轴晶转变的影响, 同时可以实现对凝固过程中的收缩现象的模拟。

凝固过程的最后阶段, 铸锭芯部很容易出现难以

表 1 近年来国内外合金熔炼方法及熔炼水平

Table 1 Alloys smelting methods and smelting levels of china and overseas in recent years^[11]

Countries	Smelting methods	Smelting levels/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$		
		S	O	N
Abroad	VAR	1	1	1
	VIM (CaO crucible)	<10	< 10	10
	EBCHR (electron beam cold hearth refining)	(4~5)	(4~5)	(20~40)
	VIM+ESR+VAR	-	-	-
China	VIM+EBR (electron beam remelting)	-	7	60
	VIM+EMS (electromagnetic stirring)	< 10	1	4
	VIM+VAR	(10~19)	(10~19)	52
	VIM+ESR	(8~19)	(5~9)	-
	VIM+VAR+ESR	11	24	65
	VIM+VAR+ESR (Ar shield)	7	5	53
	VIM (CaO crucible)	3	< 5	< 5

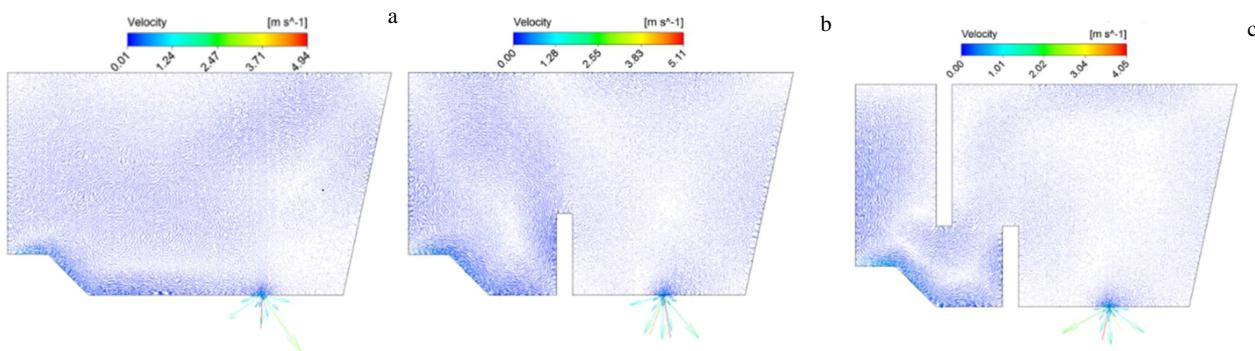


图 1 3 种控流设计下合金液的流动状态

Fig.1 Flow pattern of molten alloy for three flow control devices: (a) normal configuration, (b) with dam, and (c) dam and weir^[15]

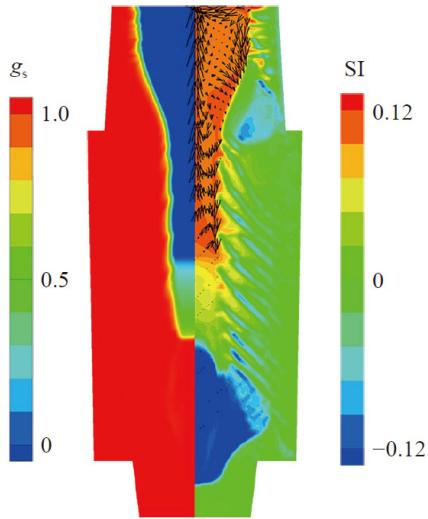


图 2 合金铸锭的凝固行为预测

Fig.2 Predicted solidification behavior of ingot, left part: solid volume fraction g_s (contours), right part: macrosegregation index SI (contours) and liquid fluid flow (arrows)^[19]

探测到的热裂缺陷,严重影响后续重熔工艺的熔炼质量。热裂缺陷的形成与元素偏析、组织型貌、流动补缩等密切相关^[22],研究铸锭热裂形成的机理和判据具有重要的理论意义和实用价值。基于非力学原理的热裂判据主要认为热裂的形成原因是补缩不足而无法抵消凝固应力释放^[22,23],着力于建立凝固过程中凝固时间、液相温度、冷却速度、补缩量等实际铸造参数与热裂缺陷的关系。此外,还有观点认为热裂缺陷产生是由于应力、应变、应变率等力学参数达到了临界值导致,倾向于结合材料本身的力学特性和液相温度场历程建立起基于力学原理的热裂判据^[24,25]。随着理论发展,研究人员综合考虑元素偏析、微观缩孔、流动补缩、组织结构,建立起非力学和力学原理结合的热裂趋势(hot cracking potential, HCP)判据^[26]和收缩开裂趋势(shrinkage crack potential, SCP)判据^[27](见图3),可以准确地预测热裂纹敏感性分布。

1.2 ESR 工艺的数值模拟

为了最大程度地减少熔炼的相关缺陷,使铸锭具有适合于热加工的微观结构,通常将 VIM 生产的铸锭进行重熔。ESR 是一种采用电加热方式对合金进行精炼的工艺,自耗电极插入装有熔渣的铜质水冷结晶器内,施加电流后熔渣由于具有极高的电阻率升温熔化,当液态熔渣的温度超过自耗电极的熔点时,熔融金属在自耗电极底端逐渐聚集形成熔滴滴落,穿过熔渣在其下方形成熔池,最终在铜质水冷结晶器的强制冷却作用下凝固成铸锭。渣池的流动为合金液的冶金反应

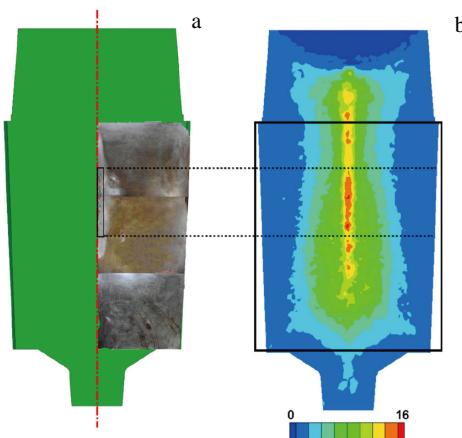


图 3 合金铸锭中心收缩裂纹形成的模拟和验证

Fig.3 Simulation of central shrinkage crack formation in ingot and experimental verification: (a) experiment results showing part of sliced ingot and (b) SCP on longitudinal ingot plane^[27]

提供了良好的热力学和动力学条件^[28],熔池的稳定凝固有效地避免了疏松和缩孔等内部缺陷的产生,也一定程度上抑制了宏观偏析^[29],同时渣壳的存在提升了铸锭的表面质量。

ESR 工艺涉及温度场、流场、电磁场等多个物理场的交互作用,同时存在化学反应及相变过程,机制复杂。目前针对 ESR 进行的模拟计算涵盖了电磁场^[30-32]、流场^[30-32]、温度场^[30,32]、电极熔化(熔滴滴落)^[33]、界面反应^[34]、铸锭凝固组织^[35]、铸锭元素偏析^[36]等内容。目前,一种发展趋势是在多物理场耦合计算的基础上,紧密结合工艺实际情况,开发全过程模拟的通用模型。李青等^[4]基于流体动力学方法对电渣重溶过程进行稳态或者瞬态模拟,得到 ESR 过程的温度场、熔池及糊状区尺寸以及凝固参数信息(见图 4),并将预测的熔池形状和二次枝晶臂间距分布与剖锭分析结果相对比,在此基础上对电极缩孔对 ESR 影响进行探讨^[37],体现出数值模拟应用于 ESR 工艺过程分析、工艺开发以及优化的重要作用。

1.3 VAR 工艺的数值模拟

VAR 是利用电弧高温进行精炼的重熔工艺,电极熔化以熔滴的形式向下滴入,过程中发生一系列的物理化学反应,使金属得到精炼。熔滴滴入结晶器内形成一定量的熔池,随着熔池量的增加,熔池底部便在水冷却的作用下逐渐凝固,形成铸锭。所以,真空自耗熔炼是电极加热熔化→熔滴形成熔池→熔池冷却凝固的连续过程,直至电极全部熔化完毕,铸锭全部凝

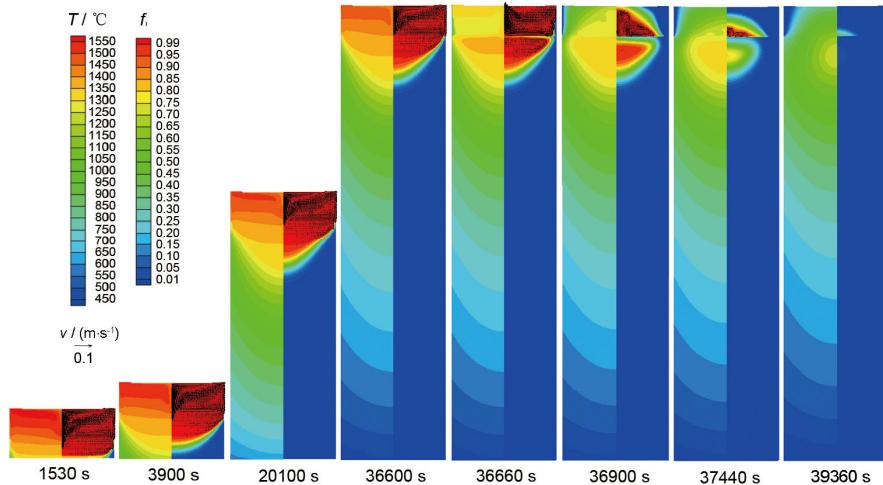


图 4 ESR 全程的流场、温度及液相体积分数分布的模拟计算结果

Fig.4 Numerical simulation results for distributions of flow field (the upper right of each picture), temperature (the left part) and liquid fraction, (the right part) during the whole ESR process^[4]

固完毕。由于在凝固过程中始终保持强烈的水冷作用, 铸锭结构主要是发达的枝晶组织^[38-40]。

VAR 工艺主要包括起弧、稳态熔炼和热封顶 3 个阶段, 整个冶炼流程涉及多种物理现象及其相互作用, 包括电极尖端放电、电极熔化和熔池凝固以及电磁场对熔池中流动的影响等, 工艺参数难以控制, 微小变动都会对铸锭的最终组织和性能产生巨大影响^[41]。确定重熔冶炼过程工艺参数对熔池温度场、熔池形貌的作用规律, 阐明真空中耗铸锭凝固过程微观组织演变机制, 是进行 VAR 工艺数值模拟的主要目的。国内外研究人员采用不同模拟方法对真空电弧重熔凝固过程进行了多尺度的模拟, 如图 5 所示。宏观尺度方面主要研究电弧分布^[41,42]、熔融速率^[43-45]、冷却速率^[41,46,47]等工艺参数以及电极放置^[48]、断电^[49]、铸锭裂纹^[50,51]等工艺事故对电磁场、流场和温度场以及熔池形状的影响, 微观尺度方面则模拟组织分布以及柱状晶向等轴晶转变 (columnar-to-equiaxed transition, CET) 现象^[43,44,46], 研究缺陷的形成机理^[49,50], 模拟结果与实验结果具有较高的吻合度。

2 加工过程的数值模拟

高温合金涡轮盘的加工过程包含均匀化、开坯、热成形和热处理, 工艺非常复杂。首先, 对铸锭进行均匀化处理, 以降低偏析程度; 然后通过开坯对粗大晶粒进行初步细化, 将均质锭转变为半成品坯料; 再对坯料进行夹杂物和相关缺陷的检查之后, 将坯料锻造成接近最终形状的锻件, 以实现成品的完整性和性能要求; 锻造后继续对锻件进行固溶和时效热处理,

优化锻造部件的机械性能。高温合金涡轮盘的加工涉及多层次加热, 并需要保证良好的微观组织结构, 同时防止裂纹及其他缺陷, 对工艺控制有很高的要求。因此, 加工过程的数值模拟很早便实际应用于工业生产中, 并且由于各工艺之间联系紧密, 在数值模拟的发展过程中整个过程集成化程度逐渐提高, 容易实现多工艺的集成化模拟^[2]。

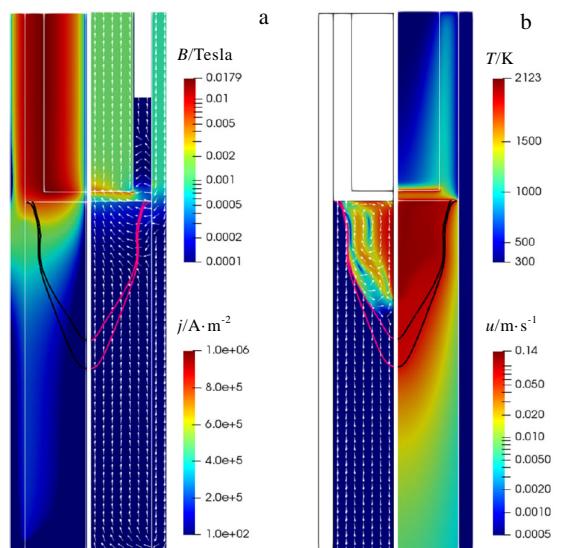


图 5 VAR 物理场分布模拟

Fig.5 Simulation of VAR physical field distribution: (a) magnetic flux density (left half) and electric current density (right half); (b) velocity field (left half) and thermal field (right half) (in each contour, isolines of liquid fraction ($fl = 0.98, 0.07$) are plotted)^[41]

2.1 均匀化处理工艺的数值模拟

大型合金产品的热机械加工始于对铸锭进行均匀化处理。均匀化处理工艺最重要的是要实现对加热过程的稳定控制, 加热温度、加热速率、加热时间和加热均匀性的确定可以保证均匀化处理的质量和良好的微观组织。加热炉内的坯料升温是热传导、热对流和热辐射多种传热方式共同作用的过程, 受到坯料尺寸、物性参数、加热时间、温度控制等多种因素的影响, 其控制过程不仅是非线性过程, 而且存在响应滞后、外界扰动因素多等问题。夏琴香等^[52]和张志元等^[53]对合金坯料加热过程进行数值模拟, 得到坯料内部的温度场和应力场, 从而对加热规范各项参数进行优化, 提高了加热效率同时防止坯料出现过热过烧的现象。Thamboo 等^[54]和 Uginet 等^[55]分别对 Inconel 718 合金坯料的加热过程和回炉加热过程进行了模拟, 预测 508 mm 锭型需要 12 h 才能完全热透, 而 900 mm 锭型经过 15 min 冷却后需要返热 6 h, 并依据此结果优化加热规范用于指导实际加热工艺过程。

均匀化处理可以回溶拓扑密排 (topologically close-packed, TCP) 相和非平衡共晶相, 降低宏观和微观偏析程度, 同时也会使晶粒一定程度长大^[56]。进行均匀化处理的数值模拟, 可以分析工艺参数对偏析组织的影响, 改进均匀化程度的评价标准, 并在此基础上研究均匀化程度对合金组织结构的影响, 提出兼顾偏析消除与组织演变的均匀化工艺优化控制原则。Du 等^[57]创造性地在 PFT (pseudo-front tracking) 模型和 KWN (Kampmann-Wagner numerical) 模型的基础上将二者耦合, 并用于合金的均匀化处理过程中偏析情况和微观组织演变的研究, 其预测结果如图 6, 随后基于此耦合模型对不同类型合金的均匀化过程进行了大量研究^[58,59]。

2.2 开坯工艺的数值模拟

开坯工艺可以减少原始铸锭中的内部微裂纹, 降低铸锭缩松率, 提高坯料的结构完整性, 同时由于各种再结晶机理, 晶粒组织得到细化, 合金的综合性能获得提升。开坯过程的数值模拟在于根据开坯工艺实况建立控制模型, 表现开坯过程中坯料的变形传热状态, 预测坯料微观组织结构的演变规律, 优化各项开坯工艺参数。众多学者对开坯过程中坯料的变形行为进行了研究, 分析了变形过程中工艺参数对动态、亚动态和静态再结晶的综合影响规律^[60-62], 并对不同砧型的作用效果进行了模拟^[63]。此外, Feng 等^[64]对开坯过程中内部空洞演化规律进行了系统的研究, 构建了内部空洞压实的多尺度预测方法, 并通过实验验证了所提出的模型和方法的正确性。

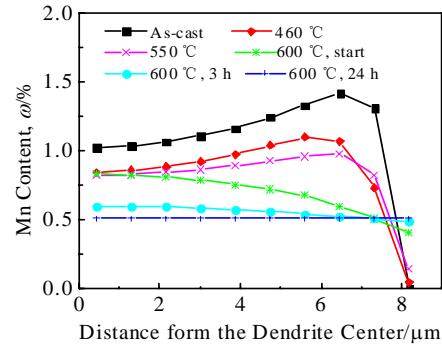


图 6 均匀化过程中从枝晶臂中心到外围的 Mn 固溶水平变化
预测

Fig.6 Predictive variation of the Mn solid solution level from the center to the periphery of the dendrite arm for the homogenization heat treatment^[57]

高温合金的组成元素多样, 晶间作用复杂, 再加上成形窗口窄, 开坯过程中坯料内部的微孔、微裂纹和夹杂物很容易导致微裂纹的产生, 所以对高温合金开坯过程中的开裂行为研究具有重要意义。目前通用的开裂判据主要包括以下几种: 基于微孔聚集原理的 Oyane 判据^[65], 基于最大拉应力原理的 C&L 判据^[66]和基于应变累积原理的 J&C 判据^[67]。Bi 等^[68]和 Fan 等^[69]利用 C&L 判据分别构建了合理的高温合金铸锭开裂预测模型, 定量预测开坯过程中不同热加工参数下开裂倾向和开裂位置 (见图 7), 为制定合理的开坯工艺提供了依据。

2.3 锻造工艺的数值模拟

锻造是高温合金涡轮盘热成形的主要方式, 其中温度是这个过程的一个重要工艺参数, 温度计算的准确性将直接影响力学参数以及组织计算的准确性。研究热锻过程的温度场需要建立传热学模型, 尤其重要的是选取合适的锻件与环境和模具之间的换热系数。在实际的锻造过程中, 由于锻造温度、模具的初始温度、外界温度、运输过程中和吊具的接触传热等因素的影响, 准确地控制锻件的温度是很困难的。虽然已经对锻件和模具之间接触换热系数做了大量理论研究^[70,71], 但实际的锻造过程常会附加软包套保温, 换热参数与理论研究得到的实验值仍有很大差距。高鑫洲等^[72]和刘晓飞等^[73]基于实际测量值对换热边界条件进行倒推, 得到锻件黑度、锻件与环境和模具的对流换热系数等关键参数, 再在冷却过程模拟中对换热边界条件进行定义, 能够比较准确模拟锻件转移和锻压等实际工艺过程中的冷却行为。

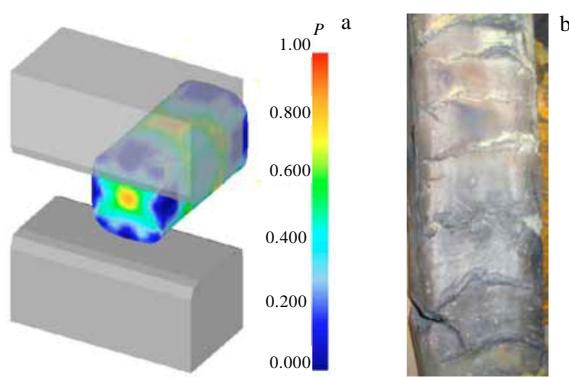


图 7 开坯过程的开裂预测及验证

Fig.7 Fracture prediction and experimental verification of cogging: (a) numerical simulation and (b) actual surface fracture image^[68]

热成形过程伴随着回复和再结晶的过程，可以获得含较少内应力和加工硬化的细晶组织。但是合金的加工条件严格，在实际生产中还常常出现组织不均匀现象，所以需要在微观组织演变模型的基础上把变形流动和热传导的计算结合起来进行热变形耦合分析，对热成形主要工艺参数进行优化设计，筛选出最优的工艺方案，以期获得微观组织比较均匀的热加工产品。利用有限元法进行变形 \Rightarrow 传热 \Rightarrow 组织演变的耦合模拟，综合考虑变形过程中的传热和变形因素建立热力耦合方程组，这种方法可以准确地获得热变形过程中温度

场、应力应变场和组织场的分布。众多学者基于实验建立的微观组织演变模型对各种合金的锻造工艺进行模拟，包括 GH2674^[74]、GH4169^[75,76]、GH4738^[8]等合金的模锻工艺以及 GH4169 合金的摆动碾压锻造工艺^[77]，其模拟结果均与实际热变形过程有较高程度的吻合。图 8 示意了 GH4738 合金涡轮盘锻造成形数值模拟中的组织演变云图。

2.4 热处理工艺的数值模拟

高温合金经热变形后会进行复杂的热处理，热处理工艺一般包括固溶处理和时效处理，目的是稳定合金最终的微观结构，缓解存在的残余应力，优化涡轮盘部件的机械性能。模拟热处理工艺过程主要是进行温度场和残余应力场的综合模拟^[78,79]，并通过二次开发将组织场与温度、应变等物理参数耦合，获得最终热处理过程中材料组织的演变规律。Wang 等^[80] 使用相场法 (phase field method, PFM) 模拟了不同热处理条件下多晶镍基高温合金的晶粒生长行为，Tian 等^[9] 则结合 MC (Monte Carlo) 方法建立热处理过程微观组织演变的全过程多尺度数值模型，模拟高温合金涡轮盘热处理过程中微观组织的演变规律 (见图 9)。

3 多工艺集成化数值模拟

多工艺集成化数值模拟是指将合金产品制备流程分解为多个阶段，综合多种热力学和动力学模型，依次建立熔炼、均匀化处理、开坯、锻造和热处理的仿

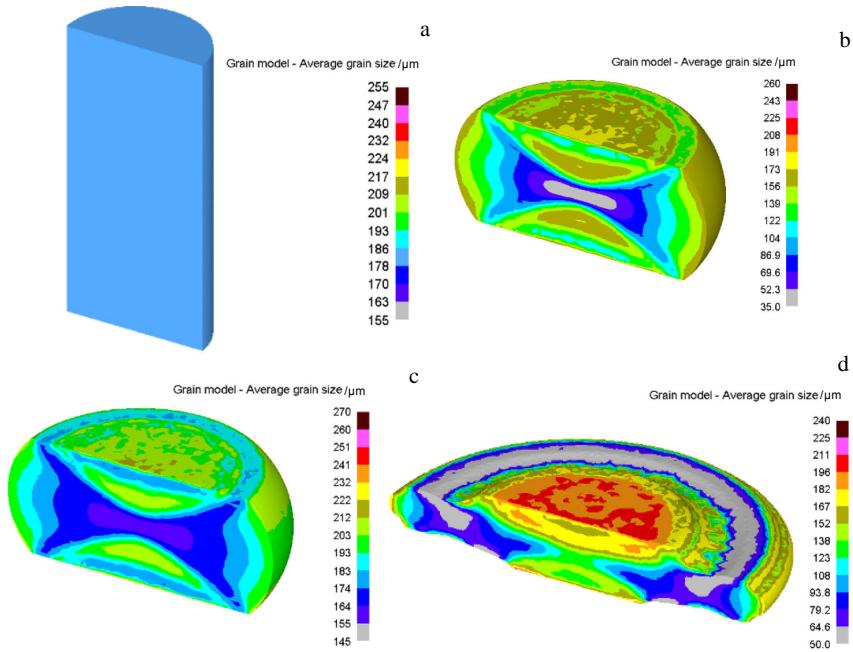


图 8 GH4738 合金涡轮盘锻造成形模拟中坯料的平均晶粒尺寸分布

Fig.8 Distribution of average grain size of billet for forging simulation of GH4738 alloy turbine disc: (a) after heating billet, (b) after free forging, (c) after heating pancake, and (d) after die forging^[8]

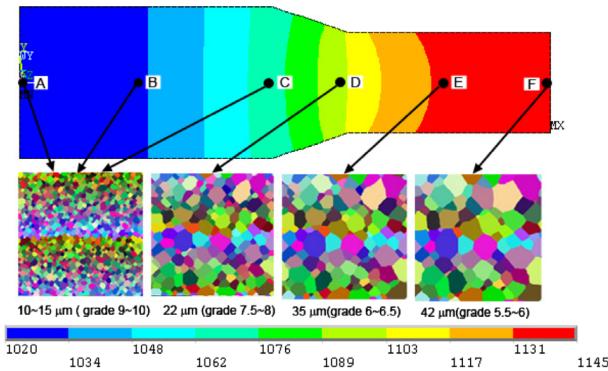


图 9 涡轮盘锻件热处理后的微观组织模拟结果

Fig.9 Simulation result for microstructure of turbine disc forgings after heat treatment^[9]

真模拟方案，并通过多种接口实现各个阶段工艺仿真数据的完全链接，串联各个阶段的模拟模型，系统建立全流程集成模拟方案，实现合金产品制备工艺的端到端模拟，掌握各阶段各工艺参数对合金微观结构和机械性能的影响规律，为最终过程工艺参数的设定给出理论依据。

对于各个工艺模拟的集成化，最大的难题在于实现熔炼过程到加工过程的数据传输，从而方便探究熔炼后形成的偏析现象、冶金缺陷以及微观组织结构对

成形过程的影响。在现有的商业模拟软件中，大部分之间可以实现宏观物理参数的数据传输，在此基础上，Abdullin 等^[81]和 Skripalenko 等^[82,83]实现了合金从铸造到热成形的端到端模拟，综合考虑整个生产流程的各项工艺对产品最终的温度、密度、残余应力等物理参数的影响。

目前，如何进一步集成熔炼和成形过程，使之能够传递有关累积应变、平均晶粒尺寸、枝晶臂间距以及合金元素偏析的数据，国内外对这一项目的研究还比较少。Tin 等^[2]使用元胞自动机（cellular automata, CA）法作为 VAR 和均匀化处理工艺之间的过渡，并通过构建微观结构参数关于半径的简单函数，实现了晶粒尺寸模拟数据从铸态到锻态的传递，建立起涡轮盘制备的集成过程模型，并对复杂结构锻件中的残余应变作出预测，同时跟踪各个阶段引入的夹杂物和其他有害缺陷。Terhaar^[84]等考虑到 VAR 工艺的凝固组织具有的不均匀性和各向异性，将铸造工艺参数同变形准则判据结合，分析了铸造过程产生的微观结构对后续热加工的影响。Erisov 等^[85]利用汇编程序实现不同模拟软件之间微观结构参数的数据对接，此方法已经得到了很好地实践^[86]。本课题组针对不同模拟软件的特点，探究实现合金制备的全流程模拟方法，实现

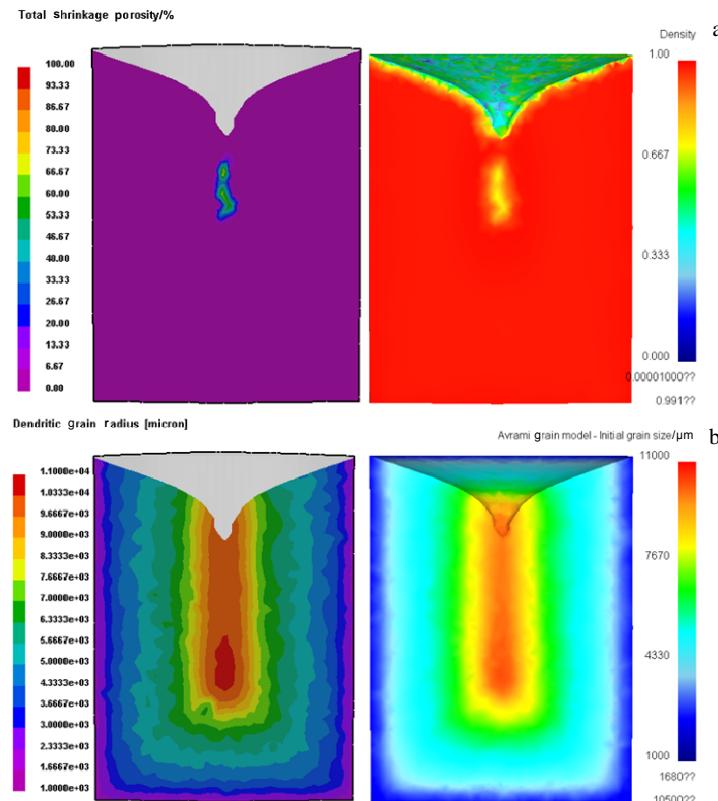


图 10 集成模拟中的铸锭数据传输方法

Fig.10 Data transfer method of ingot in integrated simulation: (a) shrinkage porosity in ProCAST (left) and density in Deform (right); (b) grain size in ProCAST (left) and in Deform (right)^[87]

了合金熔炼过程到加工过程数值模拟中合金铸锭的最终几何形状以及材料参数的数据传输(见图 10), 为“熔炼→变形”加工链的全流程模拟提供技术支持, 并使用汇编程序对数据进行处理, 实现了从铸态到锻态的集成模拟^[87]。

4 结语

高温合金涡轮盘制备过程中的数值模拟技术随科技进步不断发展, 其方法在研究对象、研究内容与研究手段等方面与时俱进。为适应工业生产的需求, 模型的集成化成为了数值模拟技术发展的主要特征。模型集成包括结构集成和过程集成两种, 前者指建模过程的连接, 即合并不同模型体系以创立一个新模型, 后者指求解过程的连接, 即一个模型的输入是另一个模型的输出。

对于合金产品制备过程中的数值模拟来说, 结构集成主要针对于现象复杂的单一工艺, 而过程集成则是考虑整个制备过程各个工艺的串行连接。结构集成涉及到单一工艺的建模, 尤其是对于熔炼过程, 包括多种物理现象及其相互作用, 需要运用不同的模型来研究每种现象, 包括熔炼加热、区域传热、熔化凝固、流体运动等, 并将模型结构集成, 综合考虑不同模型中的物理量对宏观偏析、熔池形状等工艺参数的影响。而对于过程集成, 即整个合金制备过程来说, 难度在于统筹多种学科理论, 开发涵盖产品制造中复杂计算的仿真方法, 进行联合性的全流程过程集成模拟, 从而可以明晰地显示仿真数据的变化和转移, 以及如何对产品的最终性能产生影响。

模型集成的难点具体在于:

(1) 全流程模拟的过程集成中, 需要将前一工艺过程的结果输出作为下一工艺过程的参数输入, 各个工艺阶段之间的参数传递包括温度、变形量、应力、应变、晶粒度等, 这些参数直接决定了合金产品的工艺性能, 所以开发各个阶段之间参数传递的接口, 尤其是熔炼过程到加工过程的参数接口是建立集成模型的关键。

(2) 模拟仿真要尽可能真实模拟环境特性, 但大型合金产品生产复杂, 在进行数值模拟时边界条件呈现极大的不稳定性, 所以在建立集成模型的过程中, 需要详细掌握各个工艺设备的具体参数, 在材料模型添加细致的属性数据, 在边界约束提供精确的约束条件。

(3) 工业实际中遇到的问题非常复杂, 这就要求用户自身依照生产工艺的实况, 对有限元模拟软件进行二次开发, 使之能够适应复杂的生产环境, 工艺制

定者需要根据工艺方法开发新的计算模型, 得到更加准确的计算结果, 并改进环境初始化文件, 使得添加的约束条件不受模拟软件的限制。

使用高度集成化的模型进行模拟, 可以全局把握合金产品制备过程, 使制定工艺时可以在更加宏观整体层面定量掌控各参数变化和影响, 在微观结构层面获得合金材料的组织特征, 并实现精确定点、跨阶段的数据追踪, 让工艺制定优化更科学合理。

参考文献 References

- [1] Yao Zhihao(姚志浩), Dong Jianxin(董建新), Zhang Maicang(张麦仓) et al. *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2017, 46(11): 3382
- [2] Tin Sammy, Lee Peter D, Kermanpur Ahmad et al. *Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 2005, 36(9): 2493
- [3] Ludwig Andreas, Wu Menghuai. *Materials Science and Engineering A*[J], 2005, 413-414: 109
- [4] Li Qing (李青), Wang Zixing (王资兴), Xie Shuyuan(谢树元). *Acta Metallurgica Sinica(金属学报)*[J], 2017, 53(4): 494
- [5] Karimi-Sibaki Ebrahim, Kharicha Abdellah, Wu Menghuai et al. *Metallurgical and Materials Transactions B*[J], 2020, 51(4): 222
- [6] Du Qiang, Poole Warren J, Wells Mary et al. *Acta Materialia*[J], 2013, 61(13): 4961
- [7] Yeom Jong-Taek, Lee Chong Soo, Kim Jeoung Han et al. *Materials Science and Engineering A*[J], 2007, 449-451: 722
- [8] Yao Zhihao, Li Linhan, Zhang Maicang et al. *Proceedings of the 8th International Symposium on Superalloy 718 and Derivatives*[C]. Pittsburgh, PA: TMS, 2014: 129
- [9] Tian Gaofeng, Jia Chengchang, Liu Jiantao et al. *Materials & Design*[J], 2009, 30(3): 433
- [10] Ludwig Andreas, Wu Menghuai, Kharicha Abdellah et al. *JOM*[J], 2016, 68(8): 2191
- [11] Wang Xiaofeng(王晓峰), Zhou Xiaoming(周晓明), Mu Songlin(穆松林) et al. *Materials Reports(材料导报)*[J], 2012, 26(7): 108
- [12] Rappaz Michel, Bellet Michel, Deville Michel. *Numerical Modeling in Materials Science and Engineering*[M]. Berlin: Springer, 2002
- [13] Shen Houfa (沈厚发), Chen Kangxin (陈康欣), Liu Baicheng (柳百成). *Acta Metallurgica Sinica(金属学报)*[J], 2018, 54(2): 151
- [14] Wang Jiamin(王嘉敏). *Development and Application of Materials(材料开发与应用)*[J], 1981(10): 3
- [15] Jose Rene de Sousa Rocha, Emerson Edilson Barros de Souza,

Francisco Marcondes *et al.* *Journal of Materials Research and Technology*[J], 2019, 8(5): 4209

[16] Yogeshwar Sahai, Toshihiko Emi. *ISIJ International*[J], 1996, 36(6): 667

[17] Wang Yihang(汪易航), Li Jingyuan(李静远), Yang Shufeng(杨树峰). *China Metallurgy(中国冶金)*[J], 2020, 30(7): 23

[18] Liu Hongwei, Fu Paixian, Kang Xiuhong *et al.* *China Foundry*[J], 2014(1): 46

[19] Chen Zhuo, Shen Houfa. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*[J], 2020, 27(2): 200

[20] Tu Wutao, Duan Zhenhu, Shen Bingzhen *et al.* *JOM*[J], 2016, 68(12): 3116

[21] Wu Menghuai, Ludwig Andreas, Fjeld A. *Computational Materials Science*[J], 2011, 50(1): 43

[22] Hatami N, Babaei R, Dadashzadeh M *et al.* *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2008, 205(1): 506

[23] Katgerman Laurens. *JOM*[J], 1982, 34(2): 46

[24] Rappaz M, Drezen J M, Gremaud M. *Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 1999, 30(2): 449

[25] Bellet Michel, Cerri Olivier, Bobadilla M *et al.* *Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 2009, 40(11): 2705

[26] Yang Jing'an, Liu Baicheng, Shen Houfa. *Metallurgical Research & Technology*[J], 2018, 115(3): 308

[27] Yang Jing'an, Wang Yueqiao, Shen Houfa *et al.* *China Foundry*[J], 2017, 14: 365

[28] Cao Yulong, Dong Yanwu, Jiang Zhouhua *et al.* *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*[J], 2016, 23(4): 399

[29] Rao Lei, Zhao Jianhua, Zhao Zhanxi *et al.* *Journal of Iron and Steel Research International*[J], 2014, 21(7): 644

[30] Li Baokuan, Wang Bo, Tsukihashi Fumitaka. *Metallurgical and Materials Transactions B*[J], 2014, 45(3): 1122

[31] Wang Qiang, He Zhu, Li Baokuan *et al.* *Metallurgical and Materials Transactions B*[J], 2014, 45(6): 2425

[32] Liu Fubin(刘福斌), Chen Xu(陈旭), Jiang Zhouhua(姜周华). *Journal of Northeastern University, Natural Science(东北大学学报, 自然科学版)*[J], 2014, 35(4): 539

[33] Sun Mengru(孙梦茹), Chen Yunjian(陈云建), Mu Taorong(慕讨荣) *et al.* *Journal of University of Science and Technology Liaoning(辽宁科技大学学报)*[J], 2018, 41(6): 419

[34] Kharicha A, Mackenbrock A, Ludwig A *et al.* *Proceedings of the 2007 International Symposium on Liquid Metal Processing and Casting*[C]. Nancy: LMPC, 2007: 107

[35] Li Baokuan, Wang Qiang, Wang Fang *et al.* *JOM*[J], 2014, 66(7): 1153

[36] Fezi Kyle, Yanke Jeffrey, Krane Matthew John M. *Metallurgical and Materials Transactions B*[J], 2015, 46: 766

[37] Wang Zixing, Li Qing, Lei Wang *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2018, 47(12): 3579

[38] Bertram L A, Schunk P R, Kempka S N *et al.* *JOM*[J], 1998, 50(3): 18

[39] Nastac Laurentiu, Sundarraj Suresh, Yu Kuang-O *et al.* *JOM*[J], 1998, 50(3): 30

[40] Yuan Lang, Djambazov Georgi, Lee Peter D *et al.* *International Journal of Modern Physics B*[J], 2009, 23(6-7): 1584

[41] Karimi-Sibaki Ebrahim, Kharicha Abdellah, Wu Menghuai *et al.* *Metallurgical and Materials Transactions B*[J], 2020, 51(4): 222

[42] Risacher Aurore, Chapelle Pierre, Jardy Alain *et al.* *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2013, 213(2): 291

[43] Xu X, Zhang W, Lee Peter D. *Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 2002, 33(6): 1805

[44] Kermanpur Ahmad, Evans D G, Siddall R J *et al.* *Journal of Materials Science*[J], 2004, 39(24): 7175

[45] Zhao Xiaohua, Li Jinshan, Yang Zhijun *et al.* *Journal of Shanghai Jiaotong University(Science)*[J], 2011(3): 272

[46] Wang Baoshun(王宝顺), Dong Jianxin(董建新), Zhang Maicang(张麦仓) *et al.* *Journal of Materials Engineering(材料工程)*[J], 2009, 10: 85

[47] Delzant P O, Baque B, Chapelle Pierre *et al.* *Metallurgical and Materials Transactions B*[J], 2018, 49: 958

[48] Williamson R L, Schlienger M E, Hysinger C L *et al.* *Proceedings of the 4th International Symposium on Superalloys 718, 625, 706 and Various Derivatives*[C]. Pennsylvania: TMS, 1997: 37

[49] Patel Ashish D, Minisandram Ramesh S, Evans David G. *Proceedings of the 10th International Symposium on Superalloys*[C]. Pennsylvania: TMS, 2004: 917

[50] Zhang W, Lee Peter D, Mclean M. *Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 2002, 33(2): 443

[51] Mir Hafid El, Jardy Alain, Bellot Jean Pierre *et al.* *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2010, 210(3): 564

[52] Xia Qinxiang(夏琴香), Shan Huixing(单会星), Zhu Yuchen(朱羽辰) *et al.* *Modern Manufacturing Engineering(现代制造工程)*[J], 2012(6): 55

[53] Zhang Zhiyuan(张志元), Yu Xinhong(余心宏), Fu Zhenglong(付正龙). *Journal of Plasticity Engineering(塑性工程学报)*[J], 2019, 26(2): 119

[54] Thamboo S V, Schwant R C, Yang L *et al.* *Proceedings of the*

5th International Symposium on Superalloys 718, 625, 706 and Various Derivatives[C]. Pennsylvania: TMS, 2001: 57

[55] Uginet J F, Jackson J J. Proceedings of the 6th International Symposium on Superalloys 718, 625, 706 and Various Derivatives[C]. Pennsylvania: TMS, 2005: 57

[56] Miao Zhujun, Shan Aidang, Wu Yuanbiao et al. Transactions of Nonferrous Metals Society of China[J], 2011, 21(5): 1009

[57] Du Qiang, Poole Warren J, Wells Mary A et al. *Acta Materialia* [J], 2013, 61(13): 4961

[58] Du Qiang, Liu Yanjun. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2014, 24(7): 2145

[59] Liu Chenglu, Azizi-Alizamini Hamid, Parson Nick C et al. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2017, 27(4): 747

[60] Yeom Jong Taek, Lee Chong Soo, Kim Jeoung Han et al. *Materials Science & Engineering A*[J], 2007, 449-451: 722

[61] Zhang Haiyan(张海燕), Zhang Shihong(张士宏), Cheng Ming(程明). *Ordnance Material Science and Engineering* (兵器材料科学与工程)[J], 2012, 35(2): 19

[62] Freund Ludovic, Langlois Laurent, Bigot Regis et al. *Procedia Manufacturing*[J], 2020, 50: 658

[63] Kukuryk Marcin, Winczek Jerzy, Gucwa Marek et al. *MATEC Web of Conferences*[J], 2019, 254: 02 008

[64] Feng Chao, Cui Zhenshan. *International Journal of Plasticity* [J], 2015, 74: 192

[65] Oyane Moriya. *Bulletin of JSME*[J], 1972, 15(90): 1507

[66] Oh S I, Chen C C, Kobayashi Shiro. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*[J], 1979, 101(1): 36

[67] Johnson Gordon R, Cook William H. *Engineering Fracture Mechanics*[J], 1985, 21(1): 31

[68] Bi Zhongnan, Qu Jinglong, Du Jinhui et al. *Procedia Engineering*[J], 2012, 27: 923

[69] Fan Haiyan, Jiang He, Dong Jianxin et al. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2019, 269: 52

[70] Zhu Decai(朱德才), Zhang Liwen(张立文), Pei Jibin(裴继斌) et al. *Forging and Stamping Technology*(锻压技术)[J], 2008(1): 139

[71] Zhang Ju(张举), Cui Zhenshan(崔振山). *Journal of Plasticity Engineering(塑性工程学报)*[J], 2015, 22(6): 32

[72] Gao Xinzhou(高鑫洲), Yue Fengli(岳峰丽), Xu Bin(徐斌) et al. *Forging and Stamping Technology*(锻压技术)[J], 2017, 42(12): 1

[73] Liu Xiaofei(刘晓飞), Pan Liyong(潘利永), Zhang Fengguang(张风光). *Forging and Stamping Technology*(锻压技术)[J], 2013, 38(2): 112

[74] Ma Tianjun(马天军). *Numerical Simulation on the Forming Process of the GH2674 Alloy Large Turbine Disk*(GH2674 合金大型涡轮盘成形过程的数值模拟)[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007

[75] Na Young Sang, Yeom Jong Taek, Park Nho Kwang et al. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2000, 141(3): 337

[76] Kermanpur A, Lee P D, Tin S et al. *Materials Science and Technology*[J], 2005, 21(4): 437

[77] Loyda A, Reyes L A, Hernandez-Munoz G M et al. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2018, 97: 2383

[78] Pan Weiping(潘伟平), Wang Zhongyu(王中钰), Zheng Zhiqiang(郑志强) et al. *Heat Treatment Technology and Equipment* (热处理技术与装备)[J], 2018, 39(4): 47

[79] Hardin Mikhail, Burtsev Sergey. *Key Engineering Materials* [J], 2016, 684: 120

[80] Wang Xin, Huang Zaiwang, Cai Biao et al. *Acta Materialia* [J], 2019, 168: 287

[81] Abdullin A D, Ershov Alexander A. *Metallurgist*[J], 2014, 58 (5-6): 339

[82] Skripalenko M M, Bazhenov V E, Romantsev B A et al. *Metallurgist*[J], 2014, 58(1-2): 86

[83] Skripalenko M M, Bazhenov V E, Romantsev B A et al. *Materials Science and Technology*[J], 2016, 32(16): 1711

[84] Terhaar Jan, Poppenhager Jorg, Bokelmann Dieter et al. *Proceedings of the 7th International Symposium on Superalloy 718 and Derivatives*[C]. Pennsylvania: TMS, 2010: 65

[85] Erisov Yaroslav Aleksandrovich, Surudin Sergey, Shlyapugin Aleksey et al. *Key Engineering Materials*[J], 2016, 685: 167

[86] Erisov Yaroslav Aleksandrovich, Surudin Sergey, Bobrovskij Igor N et al. *Key Engineering Materials*[J], 2019, 822: 11

[87] Yao Zhihao(姚志浩), Yao Kaijun(姚凯俊), Wang Hongying(王洪瑛) et al. *Chinese Patent*(中国专利), CN111783324A[P], 2020

Research Progress of Numerical Simulation Methods for Manufacture Technologies of Superalloy Turbine Disks

Yao Kaijun¹, Yao Zhihao¹, Wang Qiang², Dong Jianxin¹, Zhao Wenyuan¹, Pan Chonglin¹

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

(2. AECC Hunan Aviation Powerplant Research Institute, Zhuzhou 412002, China)

Abstract: The influencing factors in various stages of the turbine disk manufacture have been considered by numerical simulation to tightly control performance of finished turbine disk. This paper reviewed the developing status of numerical simulation method of superalloy turbine disks manufacturing way, including seven process stages of vacuum induction melting (VIM), electroslag remelting (ESR), vacuum arc remelting (VAR), homogenization treatment, cogging, forging and heat treatment, and summarized the modeling methods and research focus of each stages. Then the research progress of integrated modeling of superalloy products manufacture were introduced, and our simulation research for the whole manufacture process of turbine disk was illustrated. Finally, the difficulties of multi-process integrated modeling were analyzed, which may provide references for the whole process integrated simulation of turbine disks manufacture in the future.

Key words: manufacture technologies of turbine disks; numerical simulation; integrated modeling

Corresponding author: Yao Zhihao, Ph. D., Associate Professor, School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, P. R. China, E-mail: zhihaoyao@ustb.edu.cn