

航空金属材料热加工仿真研究现状

孙小琪¹, 王大宏¹, 杨超¹, 徐以宁²

1. 大连长丰实业总公司 辽宁大连 116038,

2. 中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司 辽宁沈阳 110092

摘要: 目前, 双碳目标日益成为我国经济高质量发展的绿色引擎, 而热加工作为改善金属材料使用性能的重要基础工艺, 存在着影响因素众多、研发周期长的问题。因此, 开展模拟工艺参数优化设定、多场耦合实体仿真以及精细化控制工艺, 进行材料组织-变形-性能协同调控方法的研究是十分必要的。介绍了近年来国内外热加工数值模拟方法, 并对典型航空金属材料热加工数值模拟研究进展进行了介绍, 最后对未来发展方向进行了展望。

关键词: 航空金属材料; 热加工; 数值模拟

Research status of hot working simulation of aeronautical metal materials

SUN Xiaoqi¹, WANG Dahong¹, YANG Chao¹, XU Yining²

1. Dalian Changfeng Industrial Corporation, Dalian 116038, Liaoning, China

2. AVIC Shenyang Liming Aero Engine Co., Ltd., Shenyang 110092, Liaoning, China

Abstract: At present, the dual-carbon target has increasingly become a green engine for the high-quality development of Chinese economy, and hot working, as an important basic process to improve the performance of metal materials, has many influential factors and a long research and development cycle. Therefore, it is necessary to carry out the optimization setting of simulation process parameters, multi-field coupling entity simulation, and fine control process, and to study the cooperative control method of material organization, deformation, and property. In this paper, the numerical simulation methods of hot working at home and abroad in recent years are introduced, and the research progress of numerical simulation of typical aeronautical metal materials is introduced. Finally, the future development direction is projected.

Keywords: aeronautical metal materials; hot working; numerical simulation

1 序言

通常, 航空金属材料需要具备良好的高温强度、耐腐蚀、轻质化等性能, 因此在其生产制造过程中, 热加工工艺的优化显得尤为重要。热加工是控制金属组织和晶粒细化的有效途径^[1]。在工业生产中, 几乎所有的金属零件都要经过热加工, 或者在加工成形(用模具冲压、锻造、铸造成形或用切

削刀具加工成形)前后进行热处理。机械工业对热处理的要求与制造机械零件所用的钢铁材料和有色金属的需求量有关。热加工的数值模拟实际上是一个涉及温度、组织和应力相互影响的复杂多物理场的耦合过程。至今为止, 如相场法这样的介观尺度和分子动力学等原子尺度的热处理工艺模拟方法还没有形成一个完整和系统的体系, 有限元法(Finite

Element Method, FEM) 结合了温度场、相变场和应力场的交互影响,能够模拟整个热处理的工艺流程。航空材料的热加工涉及到温度场、应力场、变形场等多个物理场的相互作用,因此多物理场耦合仿真技术在航空材料热加工研究中具有极其重要的意义。

2 热加工数值模拟方法应用现状

2.1 有限元法

有限元法是利用数学近似的方法对真实物理系统进行模拟,可以有效地模拟复杂的热加工工艺,例如锻造、压铸等,帮助优化成形工艺参数,降低材料损伤风险,提高生产效率。DEFORM用于分析金属成形及其相关的各种成形工艺和热处理工艺。DEFORM-3D是在一个集成环境内综合建模、成形、热传导和成形设备特性进行模拟仿真分析。适用于热、冷、温成形,提供极有价值的工艺分析数据。SU等^[2]采用用户自定义的子程序来编译模型,并将其嵌入到DEFORM-3D有限元模拟平台中,该模型能够预测不同变形分区的微观组织特征及不同机制相互竞争的位错密度演化规律。FAN等^[3]利用有限元模拟软件DEFORM-3D对合金的热压缩过程进行模拟和再现,验证了本构方程的有效性。COMSOL Multiphysics的金属加工模块会自动建立多物理场耦合来分析潜热。SIMHEAT 侧重于监测电流频率、线圈几何形状或感应器对热影响区的影响。材料建模考虑了与温度相关的电学和磁学特性。HU等^[4]采用ABAQUS用户子程序UHARD完成二次开发,实现了均化态Mg-8.5Gd-4.5Y-0.8Zn-0.4Zr合金的等温单轴压缩有限元模拟,并通过试验测得的载荷-行程曲线和相应模拟结果的对比,验证了有限元模拟的正确性。

2.2 介尺度计算方法

随着科学的不断发展,研究者们发现一些仅用宏观经典物理学或微观量子力学无法解释的现象,因而产生了介于宏观与微观之间的新领域——介尺度。计算材料学从空间尺度的不同,分为微观尺度、介观尺度和宏观尺度。介观尺度指晶粒尺寸大小,介观模拟的尺度特征介于原子层次与连续体之间,主要方法有元胞自动机(Cellular Automaton, CA)法、相场法等。

元胞自动机是一种时间、空间、状态都离散的网格动力学模型,利用简单的、局部的规则和离散的方法,来描述复杂的、全局的、连续系统的高效算法。近年来,元胞自动机在生物、交通、气象,以及材料加工组织演化研究等众多领域得到了广泛应用^[5]。HE等^[6]考虑了粒子诱发形核(PSN)和溶质拖曳效应,建立了CA-FE模型,应用在Mg-Al-Zn-RE合金在热挤压过程中的动态再结晶(DRX)模拟中,如图1所示。模拟和试验发现,微观组织的不均匀分布与变形条件在不同挤压区域的差异密切相关。研究中,DRX模型的建立有助于深入理解和快速准确预测镁合金在实际热成形中的微观组织演变,进而推动镁合金产品微观组织控制和力学性能优化。

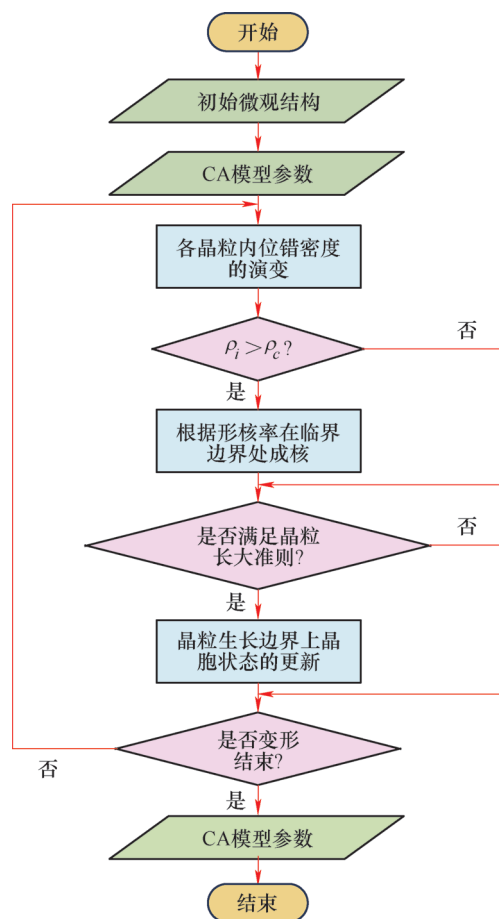


图1 DRX的CA模型流程^[6]

相场法也是一种基于密度的介尺度计算方法,可模拟预测材料加工过程微结构演变和性能,相场模型是基于热力学理论创建的。相场法模拟和预测材料微结构的时空演化及其对外部场响应,从而预

测材料性能。

通过分子动力学模拟可以深入理解材料热加工过程中的晶粒变形、再结晶行为、位错运动等微观机制，为设计优化热加工工艺提供重要依据。南京理工大学材料科学与工程学院 YUE等^[7]采用分子

动力学模拟方法研究了Cu₆₄Zr₃₆金属玻璃在950K下的等温过程（见图2），可以形成MgZn₂型Laves、MgCu₂型Laves和五重局部对称结构。在10K温度和 $5 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$ 应变速率下的结构模拟和分析表明，有序-无序转变引发剪切带。

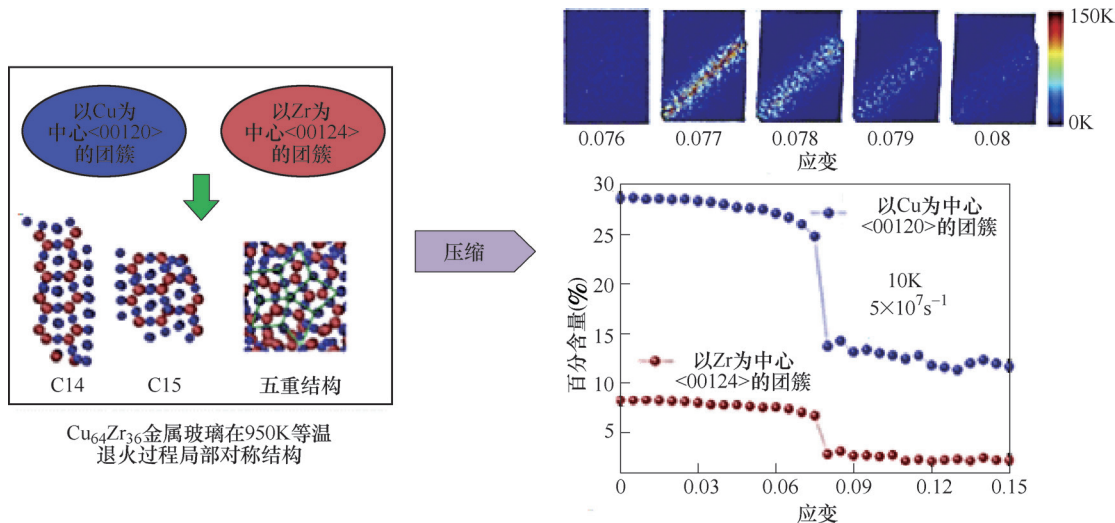


图2 Cu₆₄Zr₃₆金属玻璃在950K的等温退火过程^[7]

3 典型航空材料热加工数值模拟研究进展

3.1 结构钢及超高强度钢热加工仿真分析

韩浩锋^[8]采用 COMSOL 和 DEFORM 软件进行了 42CrMo 钢加热和冷却阶段的变形和应力变化规律研究。在获得了 BW 淬火液的淬火冷却曲线后，根据反传热法使用 COMSOL 和 Matlab 分别进行仿真模拟和拟合，获取了 BW 淬火液的对流换热系数，并得到加热阶段的热胀变形、冷却阶段的冷缩变形和淬火应力，以及装炉不合理是产生弯曲变形的重要原因。陈素明等^[9]利用 COMSOL 软件对 30CrMnSiNi2A 钢的感应回火进行了模拟，提出了一种采用分段加热法与增设导磁体相结合的方法，通过优化设计可使工件在感应加热过程中的径向温差基本消除，使轴向温差 $< 10^\circ\text{C}$ 。王亮^[10]利用激光入射热通量为热源分布于结构钢表面，获得结构钢瞬态热响应并判断热处理温度是否满足相变点温度且小于熔点，由此使结构件表面相变硬化并据此优化激光热处理工艺。徐路等^[11]利用有限元软件 MSC.Marc，建立 45 钢工件热处理温度场与热应力场数值模拟模型，对工件淬火温度场与热应力场分布进行研究。焦明^[12]采用 DEFORM-HT 软件，对 30CrMnSiNi2A 钢拉伸试样经 890°C 淬火， 200°C 、

250°C 和 300°C 回火处理后进行热处理模拟研究。得到当回火温度提高至 300°C 时，样品强度、硬度显著降低，塑性显著提高，其综合力学性能较为优良。马蓼奕等^[13]基于热处理模拟仿真的超高强度钢之间复杂零件构型进行了优化与验证，研究了不同构型状态下的热处理畸变，模拟结果显示，零件初始构型整体冷却先快后慢，厚壁部分应力较大，关键部位最大畸变量由最初的 2.16mm 减少到 0.90mm 。沈智等^[14]通过使用 Deform 有限元分析软件对 300M 钢飞机起落架的后热处理工艺进行了数值模拟后，得到其最佳热处理工艺是：在锻造后的 600°C 温度下，将其移至 925°C 的加热炉进行 2.5h 保温，然后进行空冷 35min，再次将其转移到 720°C 的热处理炉中进行 4h 的加热保温，最后取出并进行空冷，直至达到室温。陈华^[15]利用 Deform 软件对工件在不同部位的温度、结构和应力变化进行了深入分析。

图3所示为 720°C 保温 4h 后 300M 钢起落架珠光体分布云图。由图3可知，在保温完成后，工件中心部位珠光体不足 20%，工件上仍然存在大量的过冷残留奥氏体。考虑到工件的结构、温度和应力的综合因素，制定了起落架的热处理流程，并经过试验验证，能够满足晶粒细化和金相组织需求。

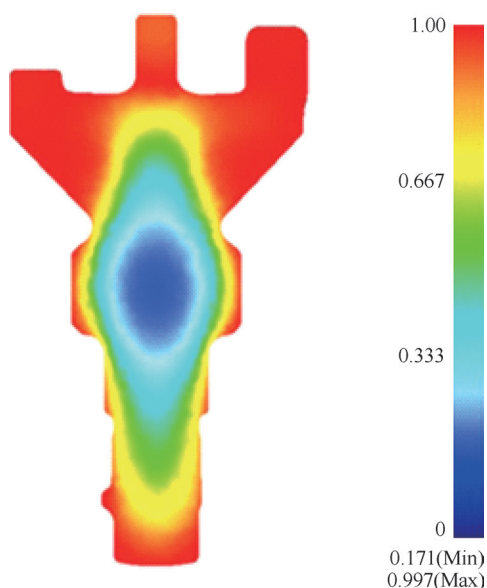


图3 720℃保温4h后300M钢起落架珠光体分布云图

温冠云等^[16]通过JMatPro软件的材料性能数据库来获取不同碳含量状态下12CrNi3钢的相变动力学参数及材料热物性参数，并结合实际斜齿轮的热处理工艺，应用DEFORM-HT软件模拟了斜齿轮的渗碳淬火工艺过程，确定齿根、齿顶和齿面表面碳含量分布信息，为后续斜齿轮磨削加工工艺参数的确定和优化提供了良好的理论指导。李承然^[17]通过对9310钢航空薄辐板齿轮热处理数值模拟，采用DANTE对齿轮热处理过程进行仿真计算，探究淬火过程中的相变规律与应力演变规律，以及冷处理和回火工艺对残余应力的影响，并获得最终的残余应

力分布，通过仿真计算得到齿轮热处理后的硬度、淬硬层深度、金相组织分布和变形等关键热处理指标。LI等^[18]采用MSC.Marc软件建立了38CrMoAl渗氮钢棒材热连轧三维多场耦合有限元模型（见图4）。利用自主开发的数据传递技术，解决了多道次轧制导致的网格畸变问题，实现了多达24道次的棒材热连轧工艺数值计算。同时，基于物理模拟试验，构建了38CrMoAl钢高温热变形再结晶和晶粒长大动力学模型。利用有限元软件的二次开发模块，基于组织演化动力学本构方程，编写奥氏体再结晶组织演化计算子程序，实现了热连轧全流程棒材微观组织演化的定量预测。

3.2 钛合金热加工仿真分析

钛合金在航空航天等对部件性能和精度有严格要求的行业有着广泛的应用，其热处理工艺仿真在固溶时效、退火、热校形等方面得到了深入的研究^[19]。如孙虹烨等^[20]采用分子动力学方法建立了TC4模型（见图5），基于混合嵌入式原子法势函数计算Ti、Al和V不同原子之间的结合力，得到退火和固溶时效处理提高了TC4模型的拉伸与剪切强度这一结论。刘馨宇等^[21]利用Jmatpro和Deform软件对“A”型TC4钛合金试件的固溶时效处理过程进行数值模拟，结果表明，在固溶时效处理后的畸变量为0.77mm，试件顶端螺栓孔处的温度梯度和应力最大，变形量呈迅速增大-稳定-迅速减小-增大-稳定-逐渐减小的趋势。徐昊^[22]等针对航空用紧固件抗剪

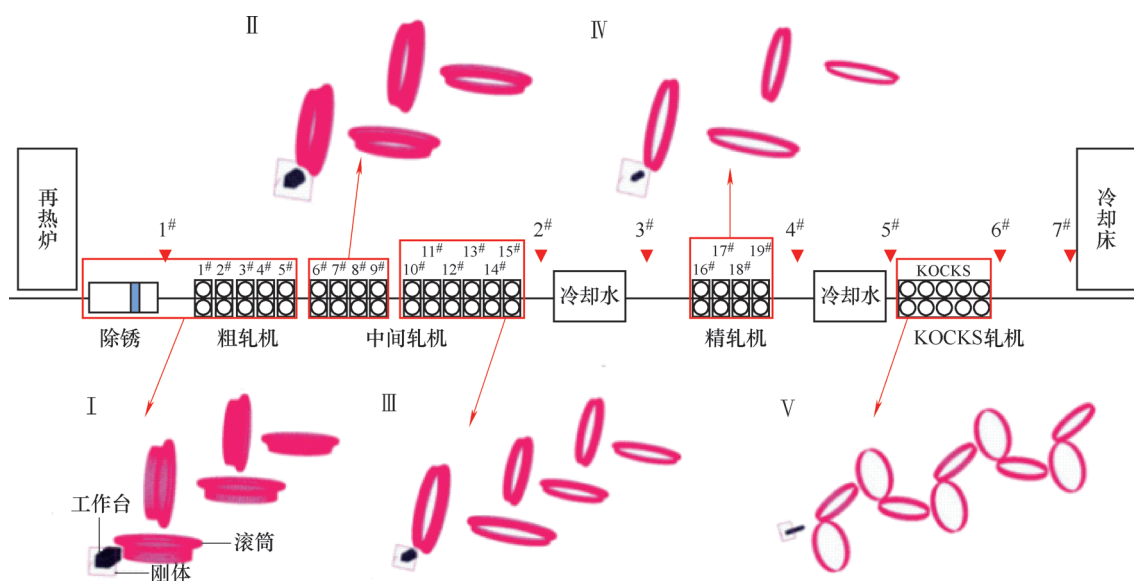


图4 实际生产线布置与模型建立^[18]

性能这一关键指标，分别建立了毛坯件和热处理工况航空用Ti-6Al-4V紧固件的双剪切三维数值模型，揭示了Ti-6Al-4V紧固件双剪切演化过程及抗剪失效机理。结果表明，该模型可以有效模拟钛合金紧固件双剪切工况下的载荷-位移曲线，剪切强度预测平均误差为0.5%。热处理后Ti-6Al-4V紧固件的剪切强度提升了35%。易吉豪等^[23]利用 ABAQUS 软件对某钛合金框零件在去应力退火处理过程中考虑了锻造、机械加工等前端工序带来的残余应力对后续零件热处理变形的影响，在考虑初始残余应力的情况下，自由放置的零件在热处理过程中伴随着内应力的释放和重新分布发生了蠕变，变形趋势同实际测量结果一致。此外，采用同材质的钛合金工装配合随形块的装夹方式，能够减小热处理过程中工装对零件的影响^[23]。

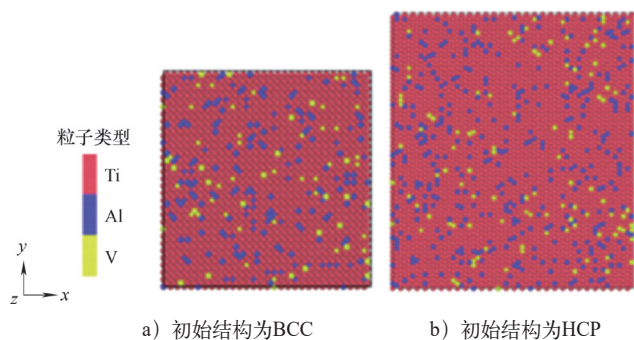


图5 TC4模型^[20]

3.3 铝合金热加工仿真分析

近年来，借助数值模拟的手段分析铝合金厚板内部固溶淬火残余应力分布状态是业界研究关注的焦点^[24]。张志伟等^[25]运用ABAQUS/Standard计算模块研究了不同厚度的2A12铝合金厚板固溶淬火过程。赵丽丽等^[26]对7075铝合金厚板生产过程进行了全流程仿真计算，发现在轧制、升温、保温各阶段中厚板内部应力均有明显变化，但历经升温、保温等工序过程后，板内所形成的热应力基本已将前期的轧制应力覆盖，最终残余应力表现为淬火应力。航空领域的发展对更大规格铝合金构件的需求越来越大。而金属凝固过程的尺寸效应，使宏观偏析、缩孔和缩松等冶金缺陷常有存在。葛宁^[27]利用ProCAST软件对ZAlSi9Mg铝合金的大型飞轮壳部件在挤压铸造过程中进行了模拟仿真研究，结果显示，在对凝固缓慢区域进行补压处理后，缩松和缩孔的体积明显缩小，缺陷的平均孔隙度也有所降

低，这为通过采用定域补压方法来减少或消除缺陷提供了有力的优化指导。丁悦等^[28]对航空结构件铣削加工过程中的变形预测方法进行了系统的研究，并对航空结构件铣削过程有限元模拟中涉及到的本构模型的建立问题进行了研究，进行切削载荷的施加以及网格细化和状态更新，并建立有限元模型对薄壁件的加工变形进行预测，达到了大型铝合金整体式薄壁结构件一次性加工达标的目的。

4 展望

由于航空领域对高性能和轻量级材料的需求持续上升，热加工数值模拟技术将逐渐成为优化材料生产流程、提升材料性能的关键途径。目前，航空金属材料热加工数值模拟已经发展到了一个全新阶段，并取得了丰硕的研究成果。未来发展方向可总结为以下几个方面。

1) 基于有限元理论的热加工仿真分析技术将得到快速发展并被广泛应用于复杂结构件的热加工模拟研究中，以便更全面地预测航空金属材料在加工过程中的行为模式。

2) 基于计算机图形学的三维可视化模拟将会逐渐取代二维图像显示，并且其应用范围也越来越广泛。热加工的数值模拟技术将与智能优化和控制策略相融合，以达到对整个生产线进行智能化管理的目的。

3) 由于航空金属材料热加工涉及领域广泛，不同学科之间相互交叉融合的趋势日益明显，因此需要加强跨学科知识间的集成与应用，以进一步拓展新的理论和分析方法。

5 结束语

综合来看，航空金属材料热加工数值模拟技术未来将向模拟结果准确性、多物理场相互耦合、数据驱动的方向发展，并将与智能优化和控制技术相融合，从而为航空材料的研发、制造和装备维修能力提升带来更为显著的突破。

参考文献：

- [1] CHATZIATHANASIOU D, CHEMISKY Y, CHATZIGEORGIOU G, et al. Modeling of coupled phase transformation and reorientation in shape memory alloys under non-proportional thermomechanical loading[J]. International Journal of

- Plasticity, 2016, 82: 192-224.
- [2] SU Z, SUN C, WANG M, et al. Modeling of microstructure evolution of AZ80 magnesium alloy during hot working process using a unified internal state variable method[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2022, 10 (1) : 281-294.
 - [3] FAN J, MA M, ZHANG K, et al. Hot deformation behavior and finite element simulation of Mg-8.3Gd-4.4Y-1.5Zn-0.8Mn alloy[J]. Journal of Rare Earths, 2022, 40 (5) : 831-839.
 - [4] HU L, LANG M, SHI L, et al. Study on hot deformation behavior of homogenized Mg-8.5Gd-4.5Y-0.8Zn-0.4Zr alloy using a combination of strain-compensated Arrhenius constitutive model and finite element simulation method[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2023, 11 (3) : 1016-1028.
 - [5] 詹梅, 李宏伟, 孙新新, 等. 基于晶体塑性的难变形材料不均匀变形多尺度建模研究进展[J]. 塑性工程学报, 2018, 25 (1) : 1-14.
 - [6] HE Y Y, BAI S W, FANG G. Coupled CA-FE simulation for dynamic recrystallization of magnesium alloy during hot extrusion[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2022, 10 (3) : 769-785.
 - [7] YUE X X, BRECHTL J, WANG F J, et al. Deformation behavior of annealed Cu64Zr36 metallic glass via molecular dynamics simulations[J]. Materials & Design, 2020, 191: 108660.
 - [8] 韩浩锋. 汽车后轴零件热处理变形研究与控制[D]. 西安: 西安工业大学, 2023.
 - [9] 陈素明, 杨平, 任树锋, 等. 30CrMnSiNi2A钢轴类零件感应热处理的数值模拟[J]. 金属热处理, 2023, 48 (4) : 235-244.
 - [10] 王亮. 结构钢表面激光热处理仿真分析[J]. 热加工工艺, 2014, 43 (12) : 177-180.
 - [11] 徐路, 唐义号. 结构钢热处理温度场与应力场仿真[J]. 科学技术创新, 2023 (1) : 100-103.
 - [12] 焦明. 30CrMnSiNi2A钢热处理过程的数值模拟及实验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
 - [13] 马蓼奕, 慈言海, 李世键, 等. 基于热处理模拟仿真的超高强度钢制复杂零件构型优化与验证[J]. 金属热处理, 2023, 48 (4) : 229-234.
 - [14] 沈智, 陈华, 张艳姝, 等. 300M钢制起落架锻后热处理工艺数值模拟[J]. 金属热处理, 2017, 42 (6) : 185-190.
 - [15] 陈华. 300M钢热处理晶粒度变化的实验研究及数值模拟[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2017.
 - [16] 温冠云, 杜晨, 麻瑜梁, 等. 12CrNi3斜齿轮渗碳淬火工艺有限元仿真关键技术研究[J]. 新技术新工艺, 2019 (6) : 20-26.
 - [17] 李承然. 9310钢航空薄辐板齿轮热处理数值模拟及工艺优化[D]. 长沙: 中南大学, 2022.
 - [18] LI F, ZHANG L W, ZHANG C, et al. Numerical simulation on recrystallization behavior and microstructure evolution during hot continuous rolling process of 38CrMoAl steel rod[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2022, 29 (10) : 1633-1645.
 - [19] 朱磊, 肖纳敏, 王浩, 等. 钛合金热处理工艺仿真研究进展[J]. 热处理技术与装备, 2021, 42 (1) : 33-39.
 - [20] 孙虹烨, 齐跃, 余传魁, 等. TC4钛合金的力学性能及热处理模拟[J]. 塑性工程学报, 2023, 30 (7) : 180-185.
 - [21] 刘馨宇, 谢本昌, 王业双, 等. 基于Jmatpro和Deform的钛合金试件热处理模拟[J]. 金属热处理, 2023, 48 (4) : 253-256.
 - [22] 徐昊, 马艳云, 袁娅, 等. 航空用Ti-6Al-4V紧固件抗剪性能数值模拟分析[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2023 (9) : 35-38.
 - [23] 易吉豪, 蔡明勇, 李栎森, 等. 钛合金零件去应力退火热处理变形研究[J]. 热加工工艺, 2024 (4) : 151-154.
 - [24] 祝楷, 熊柏青, 闫宏伟, 等. 航空铝合金厚板残余应力数值模拟研究现状[J]. 中国有色金属学报, 2020, 30 (5) : 961-973.
 - [25] 张志伟, 许东, 孙清汝, 等. 2A12铝合金厚板淬火残余应力的数值模拟[J]. 金属热处理, 2013, 38 (12) : 88-93.
 - [26] 赵丽丽, 张以都. 基于轧制应力分布的铝合金厚板淬火应力仿真[J]. 北京航空航天大学学报, 2006 (1) : 88-91.
 - [27] 葛宁. 大型铝合金飞轮壳构件挤压铸造成形与热处理工艺研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
 - [28] 丁悦, 刘畅. 航空结构件铣削加工变形仿真技术研究与应用[J]. 航空制造技术, 2019, 62 (3) : 81-89.

MW 20240301