

Dynamic Recrystallization Behavior and Texture Control in High-Temperature Extrusion of 7075 Aluminum Alloy

Wei Teng

Jiangsu Solid Aluminum Technology Co., Ltd., Zhangjiagang, Jiangsu, 215600, China

Abstract

7075 aluminum alloy, renowned for its high specific strength, excellent fatigue resistance, and superior processability, is extensively utilized in aerospace, transportation, and advanced equipment manufacturing. High-temperature extrusion molding serves as a critical process for producing high-performance complex components, where dynamic recrystallization (DRX) behavior and texture evolution play decisive roles in achieving uniform microstructure and enhanced mechanical properties. This paper systematically reviews the DRX mechanisms of 7075 aluminum alloy under high-temperature deformation, investigates the influence of temperature, strain rate, alloy composition, and pre-treatment processes on recrystallization behavior and texture formation, and analyzes the microscopic mechanisms of grain refinement, dislocation evolution, and substructure development. The research demonstrates that optimizing process parameters and thermodynamic conditions can effectively regulate texture types, improve material strength and ductility, and provide theoretical foundations and process guidance for precision manufacturing of advanced aluminum alloy components.

Keywords

7075 aluminum alloy; high temperature extrusion; dynamic recrystallization

7075 铝合金高温挤压过程动态再结晶行为与织构控制

滕威

江苏固铝科技有限公司，中国·江苏 张家港 215600

摘要

7075铝合金以其高比强度、优良的耐疲劳性能和良好的加工性，被广泛应用于航空航天、交通运输及高端装备制造领域。高温挤压成形是实现其复杂构件高性能制造的重要工艺，其中动态再结晶（DRX）行为及织构演化对组织均匀化和力学性能具有决定性作用。本文系统综述了7075铝合金在高温变形下的DRX机制，探讨温度、应变速率、合金成分及预处理工艺等因素对再结晶行为和织构形成的影响，分析晶粒细化、位错演变与亚结构演化的微观规律。研究结果表明，通过工艺参数与热力学条件的优化，可有效调控织构类型，提升材料强度与塑性，为高端铝合金构件的精密制造提供理论依据与工艺指导。

关键词

7075铝合金；高温挤压；动态再结晶

1 引言

7075铝合金作为典型的Al-Zn-Mg-Cu系高强铝合金，兼具高比强度与优良的热加工性能，是航空结构件、轨道车辆及高端运动器材等关键装备的核心材料。高温挤压工艺在其复杂截面与大型构件成形中具有显著优势，而成形过程中的动态再结晶（DRX）与织构演化对组织均匀性、强度与塑性协同优化具有决定性作用。近年来，随着EBSD、原位显微分析及多尺度模拟技术的发展，DRX的演化规律及织构控制机制逐渐明晰，为高性能铝合金构件的组织调控提供了新思路。动态再结晶在细化晶粒、改善力学性能的同时，

也对织构类型及各向异性产生深远影响^[1]。本文以7075铝合金为研究对象，系统分析高温挤压过程中的再结晶机理与织构调控路径，探讨温度、应变速率及合金成分等关键因素对组织与性能的影响，旨在为实现高强铝合金的精密成形与性能优化提供理论支撑与技术参考。

2 高温挤压过程中7075铝合金的动态再结晶行为

2.1 高温挤压过程的物理本质与变形特征

7075铝合金的高温挤压过程涉及复杂的热—力耦合作用，在外部应力和高温环境下，材料内部晶格产生剧烈滑移，诱发大量位错的生成与运动。高温条件促进了材料的回复与再结晶，为晶粒结构的动态演化提供了能量基础。挤压过程中，由于温度和应变速率的梯度分布，材料内部形成不同的

【作者简介】滕威（1985-），男，中国江苏常熟人，本科，助理工程师，从事材料学研究。

再结晶区，表现出明显的区域性动态再结晶现象。动态再结晶的出现极大影响了材料的组织演化，推动原始粗大晶粒细化为等轴状再结晶晶粒，提高了材料的韧性与塑性。高温下的动态再结晶过程兼具热激活与应变诱导特征。材料在经历较大塑性变形后，内部储存的弹性能和位错密度达到临界值时，动态再结晶核的形成得以激活，进而在新生成的晶粒边界处推动亚晶的长大与旋转。挤压温度越高，动态再结晶越易发生，生成的再结晶晶粒尺寸趋于均匀，组织类型与强度随变形参数变化而调整。动态再结晶作为调控高温挤压组织演化的核心机制，对后续的组织控制和力学性能优化具有基础性意义。

2.2 动态再结晶的微观机制及其演化规律

动态再结晶过程涉及多种微观机制，包括位错的聚集与消除、亚晶的形成与长大、孪生的诱发以及高角度晶界的迁移。7075铝合金在挤压过程中，由于合金元素的固溶强化和第二相颗粒的钉扎作用，位错运动呈现复杂的动态演变。初期塑性变形阶段，位错密度快速上升，亚晶界在高应变区域形成，并不断吸纳周围位错。随着变形程度加深和热激活效应增强，亚晶通过吸收、旋转与合并等方式，最终演化为高角度再结晶晶界，实现新晶粒的生成和长大。晶粒细化的动态再结晶不仅提升了合金的综合力学性能，还有效改善了材料的加工塑性和后续热处理性能。不同工艺参数下，动态再结晶行为的演化规律有所差异。例如高应变速率下，动态再结晶过程加快，晶粒尺寸趋于细小；而高温环境则有助于再结晶晶粒的均匀生长^[2]。合金元素、第二相分布和初始组织状态等内在因素也对动态再结晶的核化与生长行为产生显著影响。动态再结晶的微观机制研究不仅有助于揭示组织演化的本质规律，还为工艺优化和组织调控提供理论依据。

2.3 动态再结晶对力学性能的影响

高温挤压过程中动态再结晶行为对7075铝合金的力学性能具有重要影响。首先，动态再结晶通过促进晶粒细化、消除组织缺陷、降低位错密度，显著提升了材料的塑性和韧性。细小均匀的再结晶晶粒有助于材料的强度—塑性协同提升，满足高端结构件对综合性能的苛刻要求。其次，动态再结晶改善了材料的各向异性，通过调控组织类型与取向，降低了挤压制品的组织偏析和力学性能波动^[3]。动态再结晶还可显著提升材料的疲劳性能和断裂韧性，延长构件服役寿命。值得注意的是，动态再结晶的过度发展可能导致晶粒粗化，进而影响材料的强度。因此，在实际高温挤压工艺中，需通过优化温度、应变速率、合金元素等参数，实现对动态再结晶过程的精准控制，以获得理想的组织细化效果和优异的力学性能。这对工艺参数的制定和生产过程的质量管控提出了更高要求。

3 影响7075铝合金动态再结晶行为的关键因素

3.1 挤压温度与应变速率的耦合作用

挤压温度和应变速率是影响7075铝合金动态再结晶行为的核心工艺参数。高温条件促进了材料内的热激活过程，提高了再结晶核的形成概率和迁移速率，促使再结晶过程加速，生成晶粒细小且均匀。挤压温度过高则可能导致晶粒粗化、再结晶区域过大，影响最终组织的均匀性。相反，低温挤压会使再结晶受阻，出现畸变带和亚晶结构，导致组织不均，塑性下降。应变速率对动态再结晶行为有重要调节作用。高应变速率加快了位错积累和能量储存，推动再结晶的早期启动与加速发展，但可能因应变集中导致局部组织不均。低应变速率有助于再结晶晶粒的充分长大，实现晶粒均匀分布。实际生产中，应结合产品性能需求和设备条件，优化挤压温度与应变速率的组合，获得最佳动态再结晶效果。

3.2 合金成分与第二相的作用

7075铝合金的主要强化元素包括Zn、Mg、Cu等，其含量及比例对动态再结晶行为具有显著影响。合金元素通过固溶强化、析出强化和第二相钉扎等机制，调控位错运动与再结晶晶界迁移。Zn和Mg有助于提高合金的热加工塑性，促进再结晶过程；Cu则增强合金的强度和耐蚀性，但可能对再结晶晶粒的均匀性产生影响。第二相颗粒的分布与尺寸对动态再结晶核的形成和晶界迁移具有钉扎作用。细小均匀的第二相有助于抑制晶粒长大，促进晶粒细化，实现更为理想的组织结构。相反，粗大不均的第二相易形成组织偏析，影响再结晶的均匀性和组织调控效果。因此，通过优化合金成分与热处理工艺，实现第二相的均匀分布，是提升7075铝合金高温挤压动态再结晶水平的关键路径。

3.3 初始组织状态与预处理工艺影响

7075铝合金挤压前的初始组织状态、热处理工艺及预变形工序，对后续动态再结晶过程有显著影响。细小均匀的初始晶粒结构有利于动态再结晶的均匀启动与晶粒细化，而粗大异质的初始组织则易导致再结晶的不均匀核化和晶粒长大。预热处理、均匀化处理等工艺可消除组织偏析，提高材料的塑性和再结晶能力。预变形工艺如轧制、拉伸等，通过引入位错和亚晶，有助于动态再结晶的早期启动和多核化，提高再结晶晶粒的均匀性。合理设计挤压前的预处理流程，结合不同热处理和预变形参数，可为7075铝合金高温挤压动态再结晶提供有利的组织基础，实现对微观组织和组织的精准调控。

4 动态再结晶过程中的组织演化与控制

4.1 挤压工艺对组织类型与取向的调节

7075铝合金高温挤压过程中的组织演化是动态再结晶行为的重要表现。不同的挤压温度、应变速率和工艺路线会

导致织构类型与强度的差异。高温挤压下,材料易形成 $\{111\} < 112 > \{001\} < 110 >$ 等面心立方织构分布,提升材料的等轴性和各向同性。低温高应变速率下,易形成纤维织构和强取向织构,导致材料力学性能的各向异性增强。织构调控的关键在于通过工艺参数的优化,实现织构类型与取向的合理匹配。例如,通过分级挤压、间歇变形等手段,可有效诱导再结晶织构的形成与强化,获得力学性能均衡的组织结构。基于织构调控的工艺设计,是提升7075铝合金挤压件各项性能的有效途径。

4.2 织构对力学性能及各向异性的影响

织构类型与分布对7075铝合金的力学性能有重要影响。特定织构如 $\{111\} < 112 >$ 可显著提升材料的延展性和抗断裂性能,降低屈服强度的各向异性。纤维织构则会导致材料在不同方向的强度与塑性差异增大,影响挤压构件的服役可靠性。织构还影响材料的抗疲劳性能、断裂韧性及耐蚀性等综合性能。通过动态再结晶过程中的织构调控,可实现材料性能的定向提升。不同应用场景对织构类型有差异化需求,如航空结构件需强调各向同性与韧性,而轨道交通部件则侧重高强度与耐蚀性。织构调控技术为满足多样化工程需求提供了工艺支撑和理论基础。

4.3 先进表征与数值模拟在织构控制中的应用

现代电子背散射衍射(EBSD)、X射线衍射(XRD)、三维重构等先进表征手段,为7075铝合金动态再结晶与织构演化的精细分析提供了强大工具。通过微观结构的定量分析,可揭示晶粒取向分布、亚结构演变及织构强化机制。数值模拟与多尺度建模技术则实现了动态再结晶和织构演化过程的预测与调控,为工艺优化与性能提升提供科学指导^[4]。结合实验与模拟,可实现动态再结晶行为的可控调节,推动高温挤压工艺向智能化、精细化发展。在线监测与反馈调控等前沿技术的引入,有助于实时把控组织演化进程,提升生产过程的稳定性和成品的一致性。

5 工艺优化与动态再结晶调控策略

5.1 温度-应变速率窗口的优化选择

针对不同产品性能与成形要求,合理选取高温挤压过程中的温度-应变速率窗口,是实现动态再结晶与织构优化的基础。通过实验与数值模拟,确定最佳挤压温度区间与应变速率范围,实现再结晶过程的均匀启动与晶粒细化。典型的温度-应变速率窗口设计应兼顾材料的塑性、强度与生产效率,避免晶粒粗化和组织不均现象的发生。温度-应变速率优化还需结合合金成分、初始组织等变量,形成多参数协

同的工艺调控策略。通过持续的工艺试验与数据分析,建立高温挤压工艺参数数据库,为实际生产提供精准指导,实现高性能7075铝合金挤压制品的批量制造和质量保障。

5.2 热处理与第二相调控的协同机制

热处理工艺与第二相颗粒调控对动态再结晶过程和织构形成具有重要协同作用。通过均匀化热处理、固溶处理等方式,可优化第二相颗粒的分布,提升动态再结晶能力和组织均匀性。细小分散的第二相有助于动态再结晶晶粒的多核化与细化,抑制晶粒长大,优化织构分布。热处理参数的精准调控,为实现高性能7075铝合金挤压件的组织设计和性能提升奠定基础。

5.3 多尺度模拟与智能工艺调控的应用

多尺度模拟技术结合材料微观结构、力学行为与工艺参数,实现动态再结晶过程的机理揭示与工艺优化。通过晶体塑性有限元、相场模拟等先进方法,可预测不同工艺参数下的再结晶行为和织构演化,为工艺路线的制定与组织性能的提升提供理论依据。智能制造与在线监测系统的引入,实现了高温挤压工艺的实时监控与智能调控,提升了生产过程的自动化水平和产品的一致性。基于人工智能与大数据的工艺优化方法,为动态再结晶和织构调控提供了新路径。数据驱动的工艺创新和跨学科集成,有望推动7075铝合金高温挤压技术向智能制造和绿色低碳方向发展。

6 结语

7075铝合金高温挤压过程中的动态再结晶行为与织构控制是决定材料最终性能和应用质量的核心环节。通过系统研究动态再结晶机制、影响因素及其对织构和力学性能的作用规律,可为高端装备制造领域的材料设计与工艺优化提供理论基础和技术支撑。未来,随着多尺度模拟、在线监测、智能调控等新技术的应用,7075铝合金的高温挤压工艺将实现更高效、更智能的组织调控与性能提升。围绕动态再结晶行为与织构控制的深入研究,将进一步推动高强铝合金材料在航空航天、交通运输等战略性新兴产业的广泛应用,为我国先进制造业发展注入新动能。

参考文献

- [1] 徐沛.7075铝合金热变形行为研究[D].哈尔滨理工大学,2023.
- [2] 张现亮.TiB₂颗粒增强7075铝基复合材料挤压型材组织与性能研究[D].山东大学,2023.
- [3] 熊盛开.铝合金挤压铸造扭转复合成形过程的多尺度研究[D].湖南科技大学,2023.
- [4] 刘明材.7075铝合金重复连续挤压组织与性能研究[D].湖南大学,2022.