

# Dynamic recrystallization behavior of steel materials and optimization process design of hot working diagram

Shuqing Liu

Shougang Ili Iron & Steel Co., Ltd., Ili, Xinjiang, 835800, China

## Abstract

The hot working process of steel materials is an indispensable part of modern manufacturing, and its properties and quality directly affect the performance of end products. Dynamic recrystallization, as a significant phenomenon in the hot working process of steel, plays a crucial role in optimizing hot working processes. This paper analyzes the dynamic recrystallization behavior of steel materials at different temperatures and strain rates, explores the impact of various alloying elements on dynamic recrystallization, and proposes an optimized hot working diagram design based on this analysis. The study shows that by precisely controlling heating temperature, deformation degree, and cooling rate, the microstructure of steel can be effectively optimized, enhancing its mechanical and processing properties. Combining experimental data with theoretical analysis, this paper presents an optimized hot working diagram scheme suitable for high-strength steels and special steels, providing a theoretical basis for further improving the accuracy of steel hot working processes.

## Keywords

steel material; dynamic recrystallization; hot working diagram; process design; microstructure

# 钢铁材料动态再结晶行为及热加工图优化工艺设计

刘树清

首钢伊犁钢铁有限公司, 中国·新疆伊犁 835800

## 摘要

钢铁材料的热加工过程是现代制造业中不可或缺的环节,其性能和质量直接影响到终端产品的使用性能。动态再结晶作为钢铁热加工过程中的重要现象,其行为的研究对于优化热加工工艺具有重要意义。本文通过分析钢铁材料在不同温度和应变率下的动态再结晶行为,探讨了不同合金元素对钢铁动态再结晶的影响,并在此基础上提出了热加工图优化设计方案。研究表明,通过精确控制加热温度、变形程度和冷却速度,可以有效优化钢铁的显微结构,提升其机械性能和加工性能。本文结合实验数据与理论分析,提出了一套适用于高强度钢和特殊钢的热加工图优化方案,并为进一步提高钢铁热加工工艺的精确性提供了理论依据。

## 关键词

钢铁材料; 动态再结晶; 热加工图; 工艺设计; 显微结构

## 1 引言

钢铁作为一种重要的结构材料,广泛应用于航空、汽车、建筑、船舶等多个行业。钢铁的性能与其加工工艺密切相关,尤其是热加工过程中材料的动态再结晶行为,直接决定了最终材料的力学性能和显微结构。因此,研究钢铁材料的动态再结晶行为,探索其对热加工工艺的影响,具有重要的学术价值和意义。

动态再结晶是指在高温条件下,金属材料发生形变后,经过一定时间的退火作用,晶粒发生恢复和再结晶的过程。该过程通常与温度、应变率和应变程度密切相关。钢铁材料

的动态再结晶行为不仅受到温度和应变率的影响,还与钢中的合金元素、碳含量等因素密切相关。对于钢铁的热加工工艺,了解并掌握这些因素的作用机制,可以有效提高材料的加工性能和最终的力学性能。

热加工图作为优化钢铁材料热加工工艺的重要工具,能够帮助工程师合理选择加工温度、变形量以及冷却条件,进而得到所需的显微结构和性能。通过优化热加工图,可以有效避免一些不利的热加工现象,如晶粒粗大、裂纹和内应力等,进一步提高钢铁材料的质量和加工效率。

本文将从动态再结晶的基本理论入手,分析不同因素对钢铁动态再结晶行为的影响,结合实验数据,提出优化的热加工图设计方法,以期钢铁材料的热加工工艺提供新的思路和技术支持。

【作者简介】刘树清(1973-),男,中国黑龙江齐齐哈尔人,本科,工程师,从事金属材料研究。

## 2 动态再结晶的基本理论

### 2.1 动态再结晶的定义与机制

动态再结晶是指在高温条件下，金属材料经历塑性变形后，发生晶粒细化的过程。在热加工过程中，金属材料经历高温变形，晶粒发生拉长、扩展并出现变形晶粒界面，随着时间的推移，变形区域会发生再结晶，形成新的晶粒。这一过程的本质是通过热能和应变共同作用下，原有的变形晶粒被新的、无变形的晶粒替代，从而恢复金属的可塑性并提高其力学性能。

动态再结晶的机制可以通过以下几个方面来解释：

**晶粒恢复：**变形晶粒在高温下会逐渐恢复，形成晶界的重结晶，晶粒尺寸逐渐增大。

**再结晶细化：**随着温度的升高和应变的增加，晶粒在原有基础上逐步细化，最终形成较为均匀的细小晶粒结构。

**动态再结晶晶界的迁移：**高温下，变形引起的位错密度较高，位错在晶界聚集，导致晶界迁移并形成新的晶粒。

动态再结晶的研究可以帮助理解钢铁材料在不同加工条件下的显微结构演变，从而为热加工工艺的优化提供理论支持。

### 2.2 影响动态再结晶的主要因素

**温度：**温度是影响动态再结晶的最重要因素之一。随着温度的升高，材料的内能增加，原子迁移能力增强，有助于位错的消除和晶粒的恢复。通常，较高的温度有助于加快再结晶过程，但过高的温度可能会导致晶粒过度粗化，从而影响材料的力学性能。

**应变率：**应变率的大小对动态再结晶的过程和效果具有重要影响。较高的应变率通常会导致材料的位错密度增加，使得再结晶过程变得更加复杂。较低的应变率有利于再结晶的发生，但过低的应变率可能导致晶粒过于细小，影响材料的加工性。

**合金元素的影响：**不同的合金元素对钢铁的动态再结晶行为有不同的影响。例如，钒、铌等微合金化元素通过固溶强化作用抑制晶粒长大，提高再结晶的起始温度。此外，碳、氮等元素会通过形成碳化物、氮化物等相，影响钢铁的再结晶行为，从而调控其显微结构。

**应变程度：**较大的应变通常会导致更多的位错和变形区域，在高温下有利于再结晶的发生。适当的应变程度能够促进晶粒细化，但过度的应变可能导致晶粒长大，影响再结晶的效果 [1]。

### 2.3 动态再结晶的动力学模型

为了更好地理解动态再结晶行为，研究人员提出了多种动力学模型来预测和模拟再结晶过程。这些模型通常基于位错运动、晶粒重结晶等物理过程，通过数学公式描述温度、应变率、应变等因素对再结晶的影响。常用的模型包括 Avrami 模型、Zener-Hollomon 因子模型等。这些动力学模型能够准确描述再结晶过程中的不同阶段，例如再结晶的起

始阶段、扩展阶段以及最终的平衡阶段。通过这些模型，研究人员可以预测在不同温度和应变率条件下，材料的晶粒细化和力学性能的变化规律，从而帮助制定更加优化的热加工工艺参数。

Avrami 模型是一种经典的动力学模型，广泛用于描述相变过程中的晶粒生长行为。它通过数学公式量化了再结晶过程中的相变动力学，包括相变的速度、晶粒尺寸的分布以及最终的相变程度。通过这个模型，可以有效预测在不同变形条件下，材料的再结晶行为，以及不同合金元素的作用机制。Zener-Hollomon 因子模型则更加关注应变率和温度对材料动态再结晶过程的影响 [2]。

## 3 热加工图的优化设计

### 3.1 热加工图的基本概念

热加工图是描述金属在不同温度、应变和应变率下的力学行为和显微结构演变的图示工具。通过热加工图，工程师能够根据具体的工艺要求，选择合适的热处理工艺参数，以获得所需的材料性能和显微结构。这种图示工具对于金属加工中的工艺优化起到至关重要的作用，能够为钢铁材料的生产提供实际的工艺指导。热加工图通常包括了温度、应变、应变率等因素的变化范围，并根据这些变化展示了不同区域内材料的相变、晶粒变化以及强化机制等多种反应。

热加工图的设计不仅要求理论上的精确性，还需基于实验数据和动力学模型，真实反映不同温度、应变率下钢铁材料的实际表现。通过热加工图，工程师可以预测材料在特定加工条件下的行为，避免因温度过高或过低而导致的晶粒粗化、裂纹形成以及其他不利现象的发生。热加工图通常根据实验测定的动态再结晶温度、应力—应变曲线、流变曲线等数据，通过数学建模和模拟进行绘制。通过这些图示，工程师能够在工艺选择时，明确不同加工窗口和临界区域的变化，进而优化加工工艺，确保钢铁材料达到最优的物理和力学性能 [3]。

在钢铁材料的热加工过程中，了解不同温度和应变率下的再结晶行为和相变规律，可以帮助工程师优化加工工艺。特别是在高温变形中，晶粒的动态再结晶行为对钢铁的强度和韧性至关重要。如果工艺控制不当，可能会导致钢材产生过度粗化的晶粒结构，影响钢材的整体性能。通过热加工图的指导，能够为钢铁生产过程中的加热、变形、冷却等各环节提供科学依据，避免因工艺参数不当造成的性能下降。

### 3.2 热加工图的优化工艺设计

优化热加工图的核心目标是确保钢铁材料在生产过程中实现最佳的力学性能和显微结构，进而满足不同领域和应用的需求。在这一过程中，变形温度、应变率的选择，以及合金元素的优化配比，都直接影响最终钢材的性能。通过合理的工艺设计，可以在保证强度的同时，避免材料产生过大

或过小的晶粒,进而改善其塑性、韧性和耐疲劳性等。

**温度与应变率的选择:**在热加工过程中,温度和应变率是影响钢材显微结构和力学性能的关键因素。较高的变形温度有助于促进钢铁材料的动态再结晶过程,而适中的应变率则有利于钢材在变形过程中保持良好的塑性和韧性。高温下,钢铁的位错密度减少,材料的流动性增加,进而推动再结晶的发生。然而,过高的变形温度可能会导致晶粒的粗化,降低钢材的强度,因此,选择合适的变形温度至关重要。同样,应变率的选择也要根据实际工况进行优化。较低的应变率有助于材料的塑性变形,避免了高应变率下材料的脆性破坏[4]。

**合金元素的优化配比:**合金元素在钢铁材料的热加工过程中发挥着重要作用,尤其是钒(V)、铌(Nb)、钛(Ti)等微合金化元素,它们通过影响钢的晶粒细化、析出强化等机制,优化钢铁材料的性能。合理的合金元素配比能够提高钢材的强度、韧性、耐磨性等综合性能。例如,铌、钛等元素通过细化晶粒,增强材料的抗拉强度和耐腐蚀性。钒元素则能通过强化相析出作用,提高钢材的热稳定性和抗疲劳性能。通过微合金化元素的精确配比,能够控制钢材的晶粒尺寸和强化相的析出,从而达到增强钢材性能的目的。

**工艺窗口的确定:**工艺窗口的确定是优化热加工图的关键步骤。通过实验研究和数值模拟,可以确定不同工艺条件下的工艺窗口,帮助工程师在生产过程中选择最佳的加热、变形和冷却参数。在该窗口内,钢铁材料能够在满足力学性能要求的同时,保持良好的显微结构和工艺性。避免过高或过低的温度、过快或过慢的应变速率,会导致晶粒过大或析出相不完全,从而影响材料的综合性能。通过工艺窗口的优化,能够保证生产过程的稳定性和可控性,提高产品质量的一致性[5]。

### 3.3 热加工图的应用实例

热加工图的应用已经广泛渗透到不同类型钢铁材料的生产过程中,尤其是在高强度钢、耐腐蚀钢以及轻量化钢等领域,热加工图的优化设计发挥了至关重要的作用。以下是几个实际应用案例的分析:

**高强度钢的生产:**在高强度钢的生产中,通过优化热加工图,可以有效提高钢材的抗拉强度、抗疲劳性能以及耐高温性能。通过调整加热温度、变形速度和冷却速度等参数,可以细化钢材的晶粒,提高其机械性能。例如,在低

合金钢的生产过程中,通过优化热加工工艺,能够在保持高强度的基础上,提升钢材的耐疲劳性和抗冲击性能,使其适用于要求较高强度和韧性的结构件。

**耐腐蚀钢的生产:**在耐腐蚀钢的生产中,热加工图的优化可以帮助材料形成更加稳定的析出相,提高钢材的耐腐蚀性。特别是在海洋环境或者化学腐蚀性环境中,耐腐蚀钢的应用具有重要意义。通过调整热加工工艺参数,可以促进钢材中合金元素的析出,形成抗腐蚀的稳定相,提升钢材在恶劣环境下的使用寿命。

**汽车工业中的应用:**在汽车工业中,钢材的轻量化和高强度是提高汽车安全性和燃油效率的关键。通过热加工图的优化设计,能够有效减少钢材的厚度,并提高其强度。例如,在车身结构和安全性部件中,微合金化钢的应用能够实现钢材的强度和韧性的平衡,同时减轻车身重量,提升汽车的安全性和燃油经济性。

## 4 结语

钢铁材料的动态再结晶行为与热加工工艺密切相关,理解和掌握其机制,能够有效优化热加工工艺,提高钢铁材料的综合性能。微合金化元素通过精确控制合金元素的添加量和工艺参数的选择,能够在提升钢材性能的同时,保证其在生产过程中的加工性和可控性。热加工图作为一种有效的工艺优化工具,通过精确的工艺窗口确定,可以帮助工程师在不同钢铁材料的生产中获得最佳的性能和质量。

未来,随着材料科学和热加工技术的不断发展,热加工图的应用将越来越广泛和精准,成为钢铁行业提高生产效率和产品质量的重要手段。同时,微合金化技术的进一步优化和新型合金元素的引入,将为钢铁材料的性能提升提供更多可能,为未来的工业发展奠定坚实的基础。

## 参考文献

- [1] 李立新,刘雪峰,汪凌云.材料热加工组织性能数值模拟的现状 & 发展[J].特殊钢,2000,(01):1-6+9.
- [2] 王子成.高碳耐磨钢球热处理工艺及相关理论研究[D].重庆大学,2003.
- [3] 康永林,董洪波.热轧过程组织性能数值模拟研究现状[J].轧钢,2004,(01):42-44.
- [4] 王涛.IF钢铁素体区热轧工艺研究[D].河北理工学院,2004.
- [5] 周军.Ti-17钛合金片状组织球化规律研究[D].西北工业大学,2005.