

Rolling process and microstructure property control of fine grain strengthened microalloyed steel

Shuqing Liu

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

Abstract

Microalloyed steel has become an indispensable material in modern industry due to its excellent mechanical properties and broad application prospects. Fine-grain strengthening, as a crucial method for enhancing the performance of microalloyed steel, has received significant attention. The mechanism of fine-grain strengthening improves the strength, toughness, and fatigue resistance of materials by controlling grain size. In the rolling process of microalloyed steel, achieving fine-grain strengthening depends on precise control of process parameters such as temperature, strain, and strain rate. This paper delves into the fine-grain strengthening mechanism of microalloyed steel and analyzes its impact on microstructure and properties. Considering different stages of the rolling process, this paper proposes effective process strategies to control fine-grain strengthening in microalloyed steel, aiming to provide theoretical support and practical guidance for optimizing the rolling process of microalloyed steel.

Keywords

fine grain strengthening; microalloyed steel; rolling process; structure and properties; hot working

基于细晶强化的微合金钢轧制工艺与组织性能控制

刘树清

首钢伊犁钢铁有限公司, 中国·新疆伊犁 835800

摘要

微合金钢因其优异的机械性能和广泛的应用前景,已成为现代工业中不可或缺的材料。细晶强化作为提高微合金钢性能的重要手段,受到广泛关注。细晶强化机制通过控制晶粒大小来提升材料的强度、韧性及抗疲劳性能。在微合金钢的轧制工艺中,细晶强化效果的实现依赖于温度、应变、应变率等工艺参数的精准控制。本文深入探讨了微合金钢的细晶强化机制,并分析了细晶强化对组织与性能的影响。结合轧制工艺的不同阶段,本文提出了有效控制微合金钢细晶强化的工艺策略,以期微合金钢的轧制工艺优化提供理论支持和实践指导。

关键词

细晶强化; 微合金钢; 轧制工艺; 组织性能; 热加工

1 引言

微合金钢是一种通过在钢中加入微量合金元素(如钒、铌、钛等)以提高其强度、韧性、耐腐蚀性等性能的钢铁材料。随着工业技术的进步,尤其是在结构件、桥梁、高强度板材等领域对钢铁材料性能要求的提高,微合金钢的应用日益广泛。微合金化元素通过细化钢的晶粒、强化析出相等机制,使得钢铁材料的性能得到显著提升。

细晶强化机制被认为是微合金钢性能提升的关键之一。根据“Hall-Petch”关系,晶粒越小,材料的屈服强度和抗拉强度越高。细晶强化不仅能提高钢铁的强度,还能显著改善其韧性和抗疲劳性能。因此,在微合金钢的轧制过程中,如何有效控制细晶强化的效果,成为一个重要的研究课题。

钢铁的轧制工艺,包括加热、变形和冷却等过程,对于微合金钢的细晶强化至关重要。细晶强化的实现需要控制合适的轧制温度、应变和应变率等工艺参数,以确保钢铁的晶粒能够细化到理想尺寸。不同的工艺参数对钢铁的晶粒细化效果具有不同的影响,而这些影响也在很大程度上决定了钢材的最终力学性能和使用性能。

因此,本文将深入探讨微合金钢在轧制过程中的细晶强化机制,分析不同工艺参数对组织与性能的影响,并提出优化的轧制工艺方案,旨在为微合金钢的生产提供理论依据和技术指导[1]。

2 细晶强化的基本机制

2.1 细晶强化的理论基础

细晶强化是指通过减少晶粒的尺寸来提高金属材料的强度的现象。根据“Hall-Petch”关系,晶粒尺寸与材料强度成反比关系,即晶粒越小,材料的屈服强度越高。这一理

【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。

论基础为细晶强化提供了理论依据。在实际应用中,通过控制材料的晶粒尺寸,能够有效提高材料的抗拉强度、抗压强度以及耐腐蚀性等。

细晶强化的主要机制包括晶粒边界对位错的阻碍作用、晶界滑移的限制,以及晶界能量的改变等。当晶粒尺寸减小,位错运动所遇到的阻力增加,进而提高了材料的屈服强度和抗拉强度。此外,较小的晶粒还能够改善材料的疲劳性能和韧性,特别是在低温和高温环境下,细晶强化材料具有更好的抗裂性和耐疲劳性。

2.2 微合金钢中细晶强化的作用机制

微合金钢中的细晶强化机制不仅与晶粒尺寸的减少有关,还与微合金化元素的加入及其对钢材晶粒形态的影响密切相关。钒(V)、铌(Nb)、钛(Ti)等微合金化元素通过固溶强化作用和析出强化作用,能显著促进晶粒细化。

例如,铌通过形成Nb(C, N)型碳化物或氮化物,阻碍了晶粒长大,钛通过与氮形成TiN型颗粒,也具有类似作用。钒和铌等微合金化元素在高温变形过程中能够细化晶粒,增强钢铁的强度和耐磨性。微合金化元素还通过影响钢材的相变过程和晶粒生长过程,进一步优化钢材的组织结构。

此外,微合金化元素在钢材的热处理过程中发挥着重要作用。例如,在热轧过程中,铌元素通过形成细小的Nb(C, N)颗粒,细化了晶粒的尺寸,并且阻止了高温下晶粒的粗化,从而提高了材料的强度和耐疲劳性能。

2.3 细晶强化对微合金钢的性能提升作用

细晶强化不仅仅是提高材料强度的手段,它对微合金钢的多项性能提升有着深远的影响。细晶强化钢具有更好的耐磨性、抗疲劳性、抗腐蚀性及韧性等综合性能,特别是在工程结构中,对材料的强度和耐久性有着重要意义。

例如,细晶强化可以显著提升微合金钢的抗拉强度和屈服强度,在高强度钢的生产中具有重要应用。此外,细晶强化钢具有更好的塑性和延展性,使其在复杂成形工艺中具有更好的加工性。在航空航天、汽车、桥梁等高强度结构件中,细晶强化钢材料已广泛应用[2]。

3 微合金钢轧制工艺的优化

3.1 轧制工艺对细晶强化的影响

钢铁的轧制工艺,包括加热、变形和冷却等工艺阶段,对于细晶强化效果有着至关重要的影响。合理的轧制工艺不仅能够有效促进晶粒细化,还能够通过调控晶粒尺寸和晶粒形态来提升钢材的综合力学性能。不同的工艺参数,如加热温度、应变、应变率及冷却速度等,直接影响着钢铁的再结晶行为和晶粒的演化过程,从而对最终的显微结构和力学性能产生深远的影响。

加热阶段:加热温度对钢材的晶粒细化起着决定性作用。在钢铁的加热过程中,温度是促进晶粒细化和微合金化

元素溶解的重要因素。过低的加热温度无法有效激活微合金化元素,导致晶粒未能充分细化,影响钢材的最终强度和塑性。反之,过高的加热温度则可能导致钢材晶粒粗化,这不仅影响钢材的强度,还可能降低材料的韧性。研究表明,在适当的加热温度范围内,钢材的晶粒能够均匀细化,细化后的晶粒有利于提高材料的屈服强度和抗拉强度。通常,加热温度在950°C至1200°C之间为钢材的最佳加热范围,能够确保微合金化元素的溶解和晶粒细化的最佳效果。

变形阶段:在轧制过程中,应变速率是影响晶粒细化的关键因素之一。适当的应变速率有助于材料的晶粒细化,从而增强钢铁的强度和韧性。在高应变速率下,钢铁材料的晶粒会被迅速拉伸并细化,同时应变速率过高可能导致材料过于脆弱,容易产生裂纹。通过控制应变速率,能够促进动态再结晶的发生,帮助钢材实现优异的性能。例如,在中高应变速率下,钢材的晶粒能更细致均匀地分布,提高其抗拉强度和疲劳寿命。在实际生产中,根据不同钢种的特性,调整应变速率可以有效地平衡钢材的强度和延展性,避免不均匀变形导致的材料性能下降。

冷却阶段:冷却速率对钢材晶粒的生长和再结晶过程具有重要影响。较快的冷却速度可以有效阻止晶粒的粗化,从而保持钢材的细晶结构。然而,如果冷却速度过快,钢材可能会产生内应力,导致材料表面出现裂纹。合理的冷却速率能够在确保晶粒细化的同时,避免由于过快冷却导致的内应力积聚。通常,适度的冷却速率可以优化钢材的显微结构,避免晶粒粗化并保持材料的韧性。此外,冷却过程中若能通过控制冷却介质的温度和流量来调节冷却速率,还可以进一步精细控制钢材的晶粒度和性能[3]。

3.2 微合金化元素在轧制过程中的作用

微合金化元素在轧制过程中的作用主要体现在通过细化晶粒、析出强化和固溶强化等机制,优化钢材的显微结构和性能。不同微合金化元素在热加工过程中以不同的方式作用于钢材的晶粒细化,影响其力学性能和耐用性。

钛(Ti)的作用:钛作为一种常见的微合金化元素,能够与氮形成TiN粒子,阻止晶粒在热变形过程中的长大,促进晶粒细化。TiN粒子在钢中以纳米级尺寸分布,可以作为位错运动的障碍物,提高钢材的强度和抗疲劳性能。钛元素的加入不仅能够细化晶粒,还能改善钢材的耐腐蚀性,特别是在高温环境下表现出更强的抗氧化性。因此,钛合金钢在航空、汽车等高强度、高要求的领域具有广泛应用。

铌(Nb)的作用:铌是一种重要的微合金化元素,能够与碳和氮形成Nb(C, N)型碳化物或氮化物,这些颗粒对晶粒的细化有显著作用。铌通过固溶强化和析出强化两种途径,提高钢的强度、耐磨性和抗疲劳性能。在高温变形过程中,铌的加入能够抑制晶粒的长大,优化钢材的显微结构,特别是在钢材的热处理过程中,铌的添加能有效增强其热稳定性。

钒(V)的作用:钒元素在钢中通常通过形成V(C, N)型碳化物来细化晶粒。钒合金钢具有良好的高温强度、抗氧化性及抗腐蚀性,特别是在高温、高应力环境下,钒能够提高钢材的耐磨性和抗疲劳性能。钒对钢材的强化作用不仅局限于提升强度,还能在高温下保持良好的塑性和韧性。

微合金化元素的联合作用,可以进一步优化钢材的力学性能。例如,在一些高强度低合金钢的生产中,钛、铌和钒等元素的联合使用能够在不同轧制阶段实现最佳的细晶强化效果,提升钢材的综合性能,满足现代工业对钢铁材料的高强度和高韧性要求[4]。

3.3 轧制工艺参数优化的策略

在微合金钢的轧制过程中,合理选择工艺参数对于细晶强化至关重要。通过优化加热温度、应变速率和冷却速率等参数,可以有效提升钢材的力学性能和组织稳定性。以下是几种常用的优化策略:

加热温度的优化:合理控制加热温度至关重要。温度过高会导致钢材晶粒粗化,而过低则无法激活微合金化元素,导致细晶强化效果不显著。通常,合适的加热温度范围应根据钢种的特性来选择,一般在 950°C 至 1200°C 之间为最佳区间。通过精确控制加热过程,能够为随后的轧制变形提供理想的组织基础。

应变速率的控制:应变速率的选择对微合金钢的晶粒细化和性能提升有着直接影响。较高的应变速率会增加位错的密度,促使动态再结晶的发生,但过高的速率可能引起材料的脆性。通过合理调节应变速率,能够在保持良好塑性的同时实现理想的细晶强化效果。一般来说,中等应变速率($0.1\text{-}1\text{ s}^{-1}$)有助于材料晶粒的均匀细化,并提高钢材的综合性能。

冷却速率的优化:冷却速度的控制对晶粒细化和相变过程起着重要作用。较快的冷却速度有助于晶粒细化,但可能导致材料内部应力的增大。通过适度的冷却速度控制,可以在保证晶粒细化的基础上,避免过快冷却所引起的裂纹和内应力积聚。在实际生产中,选择适当的冷却介质和冷却速

率,能够有效提高钢材的综合力学性能[5]。

4 结语

细晶强化作为微合金钢提升性能的重要手段,对钢铁材料的研究和应用具有深远影响。随着现代工业对材料性能的需求日益提高,尤其是在航空航天、汽车、建筑等领域,钢铁材料的高强度、高韧性和耐腐蚀性成为工程结构中不可或缺的要求。细晶强化技术通过减少晶粒尺寸,极大地提高了钢材的抗拉强度、屈服强度、抗疲劳性及冲击韧性等力学性能。这一现象通过“Hall-Petch”关系得到理论支持,即晶粒越小,材料的屈服强度越高。细晶强化的应用不仅能够提升钢材的机械性能,还能显著改善其在不同环境下的耐用性,使得钢铁材料能够在更为苛刻的工作条件下稳定使用。

通过合理的微合金化元素配比和精确控制轧制工艺参数,钢铁的组织 and 性能得到优化。微合金化元素如铌(Nb)、钛(Ti)、钒(V)等,能够在钢材的晶粒细化过程中发挥重要作用,促进钢材的强度、韧性和耐腐蚀性等性能的提升。比如,铌元素通过与碳、氮反应形成坚硬的Nb(C, N)颗粒,有效阻止了晶粒的长大,进一步提高了材料的强度;钛元素与氮结合形成TiN颗粒,有助于提升钢材的抗氧化性和耐腐蚀性。这些微合金化元素的精准控制和使用,使得钢铁材料在满足不同领域应用要求的同时,还能保持较高的加工性能和可靠性。

参考文献

- [1] 司鹏程. 钢中铁素体相变与晶粒大小控制[J]. 上海金属(钢铁分册), 1984(01):24-30.
- [2] 张羊换, 佟庆安, 刘永铨. 轧制工艺参数对钒铌微合金钢沉淀强化的影响[J]. 东北工学院学报, 1992(04):363-367.
- [3] 赵嘉蓉, 杨节, 唐文胜, 等. 含钛微合金钢的强度组分的研究[J]. 武汉钢铁学院学报, 1995(04):374-381.
- [4] 刘嘉禾, 王祖滨. 低合金高强度钢生产技术的发展[J]. 钢铁, 1996(10):73-79.
- [5] 冯光纯. 化学成分与热轧工艺对15MnV钢组织性能的影响[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 1997(04):116-120.