

# 高氮奥氏体不锈钢轧制技术的研究进展

梅海滨 朱连平

宁波市东盟新材料制造有限公司 浙江宁波 315177

**摘要:** 高氮奥氏体不锈钢以其优异的综合性能在各领域得到广泛应用。本文从高氮奥氏体不锈钢的冶炼与制备、轧制工艺与性能等方面综述了其研究进展。重点阐述了氮元素对不锈钢组织和性能的影响机制,分析了提高氮含量的冶炼工艺,探讨了热轧、冷轧过程中组织演变及性能调控规律,总结了热处理工艺优化及其对提升材料性能的作用。针对高氮奥氏体不锈钢在工业领域的应用,展望了其未来的研究方向和发展前景。

**关键词:** 高氮奥氏体不锈钢; 轧制工艺; 工业应用; 研究进展

引言: 奥氏体不锈钢具有优异的性能,在多个领域得到广泛应用。为满足日益提高的性能要求,高氮奥氏体不锈钢应运而生。它利用氮的固溶强化作用,在保证耐蚀性的同时提高材料强度,开创了奥氏体不锈钢的新方向。但在提高氮含量以及通过轧制和热处理调控组织性能方面仍面临挑战。本文总结高氮奥氏体不锈钢轧制技术的研究进展,为其开发应用提供指导和支持。

## 1. 高氮奥氏体不锈钢的冶炼与制备

### 1.1. 氮在高氮奥氏体不锈钢中的溶解度模型

高氮奥氏体不锈钢中氮的溶解度是影响其性能的关键因素。在1个大气压下,1600°C时高氮奥氏体不锈钢熔体中氮的溶解度可达0.6%~0.9%,而在常压下其在奥氏体相中的溶解度仅为0.3%~0.4%。合金元素对氮溶解度的影响显著,如锰、钼等元素可提高氮的溶解度,而铬、硅等元素则降低氮溶解度。利用热力学模型计算表明,在1600°C、1个大气压下,含25%Cr-22%Mn-0.4%N的高氮奥氏体不锈钢的平衡氮溶解度可达0.8%。通过合理的成分设计和冶炼工艺控制,可获得氮含量均匀、组织稳定的高氮奥氏体不锈钢,其室温下屈服强度可超过700MPa,且具有良好的耐腐蚀性能。

### 1.2. 氮在高氮奥氏体不锈钢凝固过程中的析出与偏析模型

在高氮奥氏体不锈钢的凝固过程中,氮元素容易发生偏析和析出,形成氮化物,导致氮含量不均匀和组织缺陷。为了优化凝固组织,需要建立氮偏析和析出的数学模型。氮在凝固过程中的平衡分配系数小于1,容易发生正偏析。同时,氮化铬、氮化钛等析出相的形成受到温度、氮含量和冷却速

率等因素的影响。通过有限元方法和相场法等数值模拟技术,可以定量描述凝固过程中氮的分布和析出行为,预测不同工艺条件下的偏析程度和析出物形貌。在此基础上,优化凝固工艺参数,如控制冷却速率、电磁搅拌等,可以有效抑制氮的严重偏析。

### 1.3. 高氮奥氏体不锈钢的冶炼方法

高氮奥氏体不锈钢的冶炼通常采用特殊的工艺方法,以克服氮在常压下溶解度低的问题。目前主要有三种冶炼方法:加压电渣重熔(PESR)、氮气保护的感应熔炼(IF)和真空感应熔炼-气体加压(VIM-GP)。PESR通过在高氮压下进行电渣重熔,可获得氮含量高达0.8%~1.0%的高氮奥氏体不锈钢。IF采用氮气保护,利用感应加热熔化合金,并通过搅拌增加氮在熔池中的溶解,氮含量可达0.4%~0.6%。VIM-GP先在真空条件下感应熔炼,再通入高压氮气,使氮在高温高压下充分溶解,可获得氮含量为0.6%~0.8%的高氮奥氏体不锈钢。通过优化冶炼工艺参数,并结合精炼和脱氧处理,可获得成分和组织均匀、力学性能和耐蚀性优异的高质量高氮奥氏体不锈钢。

### 1.4. 高氮奥氏体不锈钢的组织与成分控制

高氮奥氏体不锈钢的组织 and 成分控制需要通过合理的成分设计和冶炼工艺控制,才能获得单一奥氏体组织,避免铁素体和析出相的形成。高氮奥氏体不锈钢中氮含量通常控制在0.4%~1.0%,并需要适当添加奥氏体形成元素如锰、镍等,以抑制铁素体的生成。同时,需要严格控制铬、钼等铁素体形成元素和碳、硅等析出相形成元素的含量。在冶炼过程中,通过优化熔炼温度、氮压和搅拌条件,可以促进氮的

均匀溶解,抑制夹杂物的生成。此外,通过合理的凝固控制和后续热处理,可以细化晶粒,消除偏析,获得均匀的单一奥氏体组织。

## 2. 高氮奥氏体不锈钢的轧制工艺与性能

### 2.1. 高氮奥氏体不锈钢的热轧工艺

#### 2.1.1. 热轧温度与变形量对组织和性能的影响

热轧温度和变形量是影响高氮奥氏体不锈钢组织和性能的重要工艺参数。高氮奥氏体不锈钢的热轧温度通常在1100–1200℃范围内,高于固相线温度,确保奥氏体组织的稳定性。在此温度范围内,随着热轧温度的升高,晶粒尺寸增大,变形抗力降低,材料的塑性变形能力提高。热轧变形量也对组织和性能有显著影响。适度的变形量有利于获得细小均匀的晶粒,提高材料的强度和韧性。但过大的变形量可能导致动态再结晶的发生,引起组织的粗化。此外,热轧过程中的应变速率和应变分布也会影响晶粒的细化效果。

### 2.1.2. 热轧过程中的氮化物析出与控制

高氮奥氏体不锈钢在热轧过程中容易发生氮化物析出,主要包括Cr<sub>2</sub>N、CrN等。这些氮化物的析出会消耗基体中的氮和铬,导致奥氏体稳定性下降,同时析出物也是材料缺陷的源头,降低材料的塑韧性。为了控制热轧过程中的氮化物析出,需要从成分设计和工艺控制两方面入手(见图1)。在成分设计方面,需要合理平衡奥氏体形成元素和铁素体形成元素的比例,提高奥氏体的稳定性,减少氮化物析出倾向。例如,适当提高锰含量,可以抑制Cr<sub>2</sub>N的形成。在工艺控制方面,需要优化热轧温度和变形量,使其匹配良好,避免应变诱发析出。

### 2.2. 高氮奥氏体不锈钢的冷轧工艺

#### 2.2.1. 冷轧变形规律

高氮奥氏体不锈钢的冷轧变形规律与普通奥氏体不锈钢有所不同。由于氮的固溶强化效应,高氮奥氏体不锈钢的初始屈服强度和加工硬化能力显著提高。在冷轧过程中,材料表现出更高的变形抗力和更快的加工硬化速率。高氮奥氏体不锈钢在冷轧变形量小于30%时,加工硬化主要源于位错密度的增加和奥氏体晶粒的细化。而当变形量超过30%时,由于应变诱发马氏体相变的发生,加工硬化速率进一步提高。同时,高氮奥氏体不锈钢在冷轧过程中表现出各向异性,沿轧制方向和垂直于轧制方向的力学性能差异明显。这主要是由于冷轧引入的织构和残余应力所致。为了获得均匀的力学性能,需要合理控制冷轧的道次和轧制率,并采用交叉轧制等措施来改善材料的各向同性。

#### 2.2.2. 冷轧组织演变与力学性能

高氮奥氏体不锈钢在冷轧过程中,其组织和力学性能发生显著变化。随着冷轧变形量的增加,奥氏体晶粒被拉长,沿轧制方向形成明显的织构。同时,位错密度急剧增加,形成大量的缠结和胞状亚结构。这些组织变化提高了材料的强度和硬度,但塑性和韧性有所下降。当冷轧变形量超过30%时,应变诱发马氏体相变开始发生,残留奥氏体向马氏体转变。这种相变进一步提高了材料的强度,但也导致塑性和韧性的急剧下降。通过X射线衍射、电子背散射衍射等表征手段,可以定量分析冷轧过程中组织的演变规律,建立组织与力学性能之间的关联。合理控制冷轧变形量,可以获得强度和塑性平衡优异的高氮奥氏体不锈钢。通常,冷轧变形量控制在20%–40%范围内,可获得兼具高强度和良好塑韧性

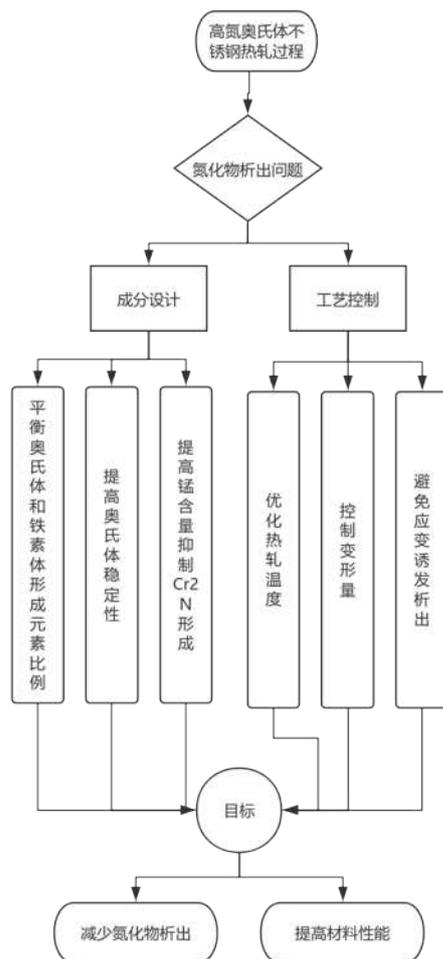


图1: 高氮奥氏体不锈钢热轧过程中氮化物析出控制流程图

的优异组合。

### 2.2.3. 冷轧过程中的析出相控制

高氮奥氏体不锈钢在冷轧过程中,除了位错密度增加和晶粒细化外,析出相的演变也对材料的组织和性能产生重要影响。常见的析出相包括 Cr<sub>2</sub>N、CrN 等氮化物,以及 Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub> 等碳化物。这些析出相会消耗基体中的合金元素,降低奥氏体的稳定性,同时析出物也是材料缺陷的来源,对

塑性和韧性产生不利影响<sup>[1]</sup>。为了控制冷轧过程中的析出相,需要从成分设计和工艺优化两方面入手(见图2)。在成分设计方面,需要合理平衡氮、碳含量及其他合金元素的比例,降低析出驱动力。例如,适当降低碳含量,可以抑制 Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub> 的形成。在工艺优化方面,需要严格控制冷轧前的固溶处理工艺,尽可能将碳、氮等元素充分固溶到奥氏体基体中。同时,合理控制冷轧变形量和应变速率,避免应变诱发析出。

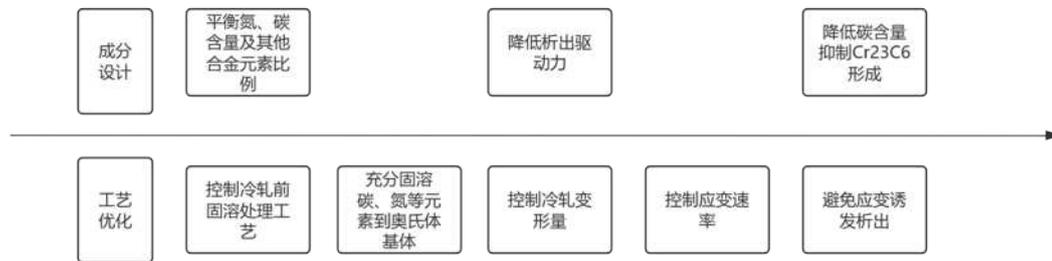


图 2: 高氮奥氏体不锈钢冷轧过程析出相控制图

## 2.3. 高氮奥氏体不锈钢的热处理工艺

### 2.3.1. 热处理工艺对组织和性能的影响

高氮奥氏体不锈钢的热处理工艺对其组织和性能有显著影响。常见的热处理工艺包括固溶处理、时效处理等。固溶处理的目的是将合金元素充分溶入奥氏体基体,获得均匀的过饱和固溶体。固溶温度通常在 1000-1200℃ 范围内,保温时间需根据钢种成分和尺寸进行优化。适当的固溶处理可以细化晶粒,提高奥氏体的稳定性,为后续冷加工和时效处理创造良好的组织基础。时效处理则是在固溶处理的基础上,通过调控温度和时间,诱发析出相的形成,从而提高材料的强度和硬度。时效温度通常在 700-900℃ 范围内,保温时间从几分钟到几小时不等。时效处理引起的组织变化主要包括析出相的形核长大以及基体元素的扩散与偏聚<sup>[2]</sup>。合理的时效处理可以获得细小弥散的析出相,显著提高材料的强度,同时保持良好的塑韧性。

### 2.3.2. 热处理过程中的氮化物析出与控制

高氮奥氏体不锈钢在热处理过程中,尤其是在固溶处理和时效处理阶段,容易发生氮化物的析出。常见的氮化物包括 Cr<sub>2</sub>N、CrN 等,其形成与温度、时间以及钢中氮、铬含量密切相关。氮化物的析出一方面消耗基体中的氮和铬元素,降低奥氏体的稳定性;另一方面,析出相作为异相界面,也是材料缺陷和应力集中的源头,恶化材料的塑性和韧性。为了控制热处理过程中氮化物的析出,需要从热力学和动力学

两个方面入手。在热力学方面,需要合理设计钢种成分,调整氮、铬含量及其他合金元素的比例,降低氮化物形成的驱动力。例如,适当提高锰、镍等元素含量,可以提高氮在奥氏体中的固溶度。在动力学方面,需要优化热处理工艺参数。例如,在固溶处理阶段,采用较高的加热温度和短时保温,可以加速合金元素的扩散,抑制氮化物的形核长大。

### 1.4. 高氮奥氏体不锈钢的轧制工艺优化

高氮奥氏体不锈钢轧制工艺的优化是获得优异力学性能和使用性能的关键。轧制工艺优化需要综合考虑钢种成分、工艺参数以及产品性能要求等因素,通过多学科交叉和先进工艺模拟手段,实现轧制过程的精准控制和产品性能的定制化调控。在热轧工艺优化方面,需要重点关注加热温度、变形量、轧制道次以及冷却控制等参数。通过合理设计轧制温度和变形量,控制奥氏体晶粒度和析出相的演变,可以获得细小均匀的组织结构。同时,优化轧制道次和轧制工艺路线,有助于获得均匀的应变分布,减小残余应力,提高产品的尺寸精度和表面质量<sup>[3]</sup>。在冷轧工艺优化方面,需要重点关注变形量、轧制速度、轧辊表面状况以及中间退火等工艺参数。通过合理控制冷轧变形量,可以获得适度的加工硬化效应,同时避免过大变形导致的开裂问题。优化轧制速度和轧辊表面状况,可以减小摩擦和磨损,延长轧辊寿命,同时获得良好的板材表面质量。针对不同钢种和产品规格,采用差异化的中间退火工艺,可以有效调控冷轧组织的演变,获

得力学性能与塑性的平衡。

## 2. 高氮奥氏体不锈钢的工业应用

高氮奥氏体不锈钢凭借其优异的综合性能,在化工、海洋、能源等诸多领域得到广泛应用。在化工领域,高氮奥氏体不锈钢常用于制造高温高压反应釜、换热器等关键设备,以及各类管道和阀门等部件。其出色的耐腐蚀性能 and 高温强度,可以显著延长设备使用寿命,提高生产效率和安全性。在海洋工程领域,高氮奥氏体不锈钢被广泛用于制造海水淡化装置、海洋平台、船舶等海洋工程装备的关键部件,如泵体、阀门、法兰等。优异的耐海水腐蚀性能和高强度,使其能够长期稳定地服役于恶劣的海洋环境中。在能源领域,高氮奥氏体不锈钢常用于制造核电、火电、风电等设备的关键部件,如汽轮机叶片、锅炉管道等<sup>[4]</sup>。其良好的抗应力腐蚀开裂性能 and 高温强度,保证了设备的安全可靠运行。近年来,随着高氮奥氏体不锈钢冶炼、加工技术的不断进步,其工业应用范围进一步拓宽。在航空航天、轨道交通、生物医药等高端领域,高氮奥氏体不锈钢凭借卓越的性能优势,正在逐步取代传统材料,开创新的应用局面。

结语:高氮奥氏体不锈钢轧制技术研究已取得长足进步,促进了其性能提升和应用拓展。未来,应加强多学科交叉,

深化机理认识,优化工艺参数,开发新型高氮钢。同时,通过产学研用合作,加速科研成果向工程应用转化,推动高氮钢产业化,为我国战略性新兴产业提供材料保障,使其在未来高性能金属材料发展中扮演重要角色。

### 参考文献:

- [1] 王哨兵,钟尧舜,付少朋.S32205双相不锈钢线材的开发[J].金属世界,2018(06):74-77.
- [2] 方晓阳.加工工艺对奥氏体先进高强钢组织与力学性能的影响[D].浙江大学,2016.
- [3] 毛新平,高吉祥,柴毅忠.中国薄板坯连铸连轧技术的发展[J].钢铁,2014,49(07):49-60.
- [4] 杨辉,王建勇,陈华,等.ER307Ti焊接用奥氏体不锈钢线材研制与开发[J].金属世界,2014(01):71-74.

### 作者简介:

梅海滨(1970.09.14-),男,汉族,浙江省宁波市,高中,董事长,研究方向:金属新材料。

### 基金项目:

海洋工程用含氮合金钢研发与产业化,科技创新2025重大专项(2020Z041)