

耐热钢焊接工艺与组织性能调控

张平安

中国石油乌鲁木齐石化公司机电仪运维中心 新疆 乌鲁木齐 830000

摘要：本文介绍了耐热钢的分类与性能特点，包括珠光体、马氏体等多种类型及其热强性、抗氧化性等优势。阐述了耐热钢焊接工艺，涵盖常用焊接方法、材料选择及参数优化。分析了焊接过程对组织性能的影响，如热循环、力学性能变化及缺陷影响。最后提出焊接接头组织性能调控策略，包括优化工艺参数、选合适材料与预热及焊后热处理。

关键词：耐热钢；焊接工艺；组织性能；调控；焊接质量

引言：耐热钢凭借其优异的高温力学性能、抗氧化及抗腐蚀能力，广泛应用于能源、化工等高温工业领域。然而，焊接过程中因热循环、材料匹配及工艺参数不当等因素，易导致接头组织劣化、力学性能下降及焊接缺陷产生，严重影响构件的安全性与可靠性。本文系统梳理耐热钢的分类与性能特点，深入分析焊接工艺、材料选择及参数优化对组织性能的影响机制，并从工艺调控、焊前预热及焊后热处理等角度提出针对性优化策略，旨在为耐热钢焊接质量控制提供理论依据与技术指导。

1 耐热钢的分类与性能特点

1.1 耐热钢的分类

耐热钢是一类在高温环境下能够保持优良力学性能和抗氧化、抗腐蚀性能的特种钢材，按其化学成分和微观组织结构可细分为多种类型。珠光体耐热钢主要以铬、钼等合金元素为主，这类钢在高温下展现出较好的热强性和工艺性能，适用于制造在中等温度下工作的零件。马氏体耐热钢含有较高的铬元素，经过热处理后，在高温下能保持较高的强度和抗氧化性，常用于制造高温紧固件和叶片等。铁素体耐热钢铬含量较高，具有良好的抗氧化性能，但高温强度相对较低，适用于一些对强度要求不高但对抗氧化性能有严格要求的场合。奥氏体耐热钢则因其特殊的晶体结构，具有优异的高温强度、塑性和抗氧化性，广泛应用于高温高压环境下。沉淀硬化型耐热钢通过沉淀强化机制，在保持良好塑性和韧性的同时，获得高强度和良好的综合性能，适用于制造对强度和耐热性都有较高要求的零件。

1.2 耐热钢的性能特点

耐热钢作为一类专为高温环境设计的特种钢材，具备诸多卓越且独特的性能特点，使其在众多工业领域中发挥着不可替代的作用。（1）热强性是耐热钢最为突出的性能之一，在高温条件下，普通钢材的强度和硬度往往会大幅下降，而耐热钢却能维持较高的强度和硬度水

平，有效抵抗蠕变变形。蠕变是材料在高温和恒定应力作用下，随时间缓慢发生的塑性变形现象，耐热钢优异的抗蠕变性能确保了构件在长期高温负荷下仍能保持稳定的力学性能，保障设备的安全可靠运行。（2）抗氧化性同样是耐热钢的重要性能，在高温氧化性气氛中，耐热钢能够迅速形成一层致密且稳定的氧化膜。这层氧化膜如同天然的防护屏障，能有效阻止氧气进一步向钢材内部扩散，从而显著减缓氧化进程，大大延长材料的使用寿命。（3）耐热钢还具有良好的组织稳定性，在高温长期服役过程中，其组织结构不易发生明显变化，避免了因组织转变而导致的性能劣化，保证了材料性能的持久稳定。值得一提的是，不同类型的耐热钢还具备各自独特的性能优势。例如奥氏体耐热钢，不仅具备上述基本性能，还展现出良好的塑性和韧性，使其在复杂结构的焊接加工中具有更好的适应性和可操作性，能满足多样化的工程需求^[1]。

2 耐热钢焊接工艺

2.1 常用焊接方法

在耐热钢焊接领域，常用的焊接方法各有特点，适用于不同的焊接场景和要求。（1）钨极氩弧焊（TIG）是一种优质高效的焊接方法，其电弧稳定性极佳，氩气保护效果出色，能有效隔绝空气，防止焊缝金属被氧化和污染，从而获得高质量的焊缝。TIG焊可精确控制焊接热输入，对于薄板和对焊接质量要求苛刻的耐热钢焊接，优势显著。例如在焊接奥氏体耐热钢薄板时，它能有效缩小热影响区宽度，大幅降低焊接变形，保证焊接精度。（2）熔化极气体保护焊（MAG/MIG）具有焊接效率高、熔敷速度快的特点。通过合理选择保护气体和焊接材料，可实现良好的焊缝成形和性能，适用于中厚板耐热钢的焊接，能满足工业化生产对效率的需求。（3）焊条电弧焊操作灵活，不受焊接位置限制，对焊接环境要求不高，在现场安装和维修焊接中应用广泛。不过，

该方法焊接效率相对较低,且焊缝质量受焊工操作水平影响较大。(4)埋弧焊焊接电流大、熔深大、焊接效率高,焊缝质量稳定,适合厚板耐热钢的焊接,常用于锅炉锅筒、压力容器等大型构件的焊接,能有效保障大型结构的焊接质量和生产效率。

2.2 焊接材料的选择

在耐热钢的焊接过程中,焊接材料的选择至关重要,它直接关系到焊接接头的质量与性能。为确保焊接接头具备与母材相当的耐热性、抗氧化性和力学性能,焊接材料必须与母材的化学成分和性能相匹配。针对珠光体耐热钢,通常选用含有铬、钼等关键合金元素的焊条或焊丝,这些元素能够增强焊缝的热强性和抗氧化性,使其与母材性能相协调。而在奥氏体耐热钢的焊接中,为提高焊缝的抗裂性和耐腐蚀性,常选用成分与母材相近或合金元素含量稍高的焊接材料。此外,焊接材料的工艺性能同样不容忽视,如焊接过程中的电弧稳定性、脱渣性等,这些因素都会影响焊接操作的便捷性和焊缝的成型质量。因此,在选择焊接材料时,需综合考虑多方面因素,以确保焊接接头的性能达到最佳^[2]。

2.3 焊接参数优化

在耐热钢焊接过程中,焊接参数的优化对于确保焊接质量与接头性能起着关键作用。焊接电流、电弧电压以及焊接速度是三大核心焊接参数。焊接电流的大小直接影响熔深和熔宽,适当增大电流可增强熔透能力,但若电流过大,会导致热输入过高,使热影响区晶粒异常长大,进而降低接头的力学性能与耐热性。电弧电压过高会使焊缝熔宽增加,熔深减小,还可能引发咬边等缺陷,影响焊缝外观与内部质量。焊接速度过快,则会造成焊缝成形不佳,熔合不充分,产生未焊透等严重缺陷。因此,在焊接时,必须综合考虑母材厚度、所采用的焊接方法以及焊接材料特性等多方面因素,通过科学试验与计算,合理优化焊接参数,精准控制焊接热输入,从而获得高质量的焊接接头,满足耐热钢构件的使用要求。

3 焊接过程对耐热钢组织性能的影响

3.1 焊接热循环对组织的影响

在焊接过程中,焊接热循环会使焊缝及其附近的热影响区经历快速加热与冷却的复杂过程,进而导致组织发生显著且多样的变化。在焊缝区,由于金属液态时冷却速度极快,会形成铸态组织,其晶粒相对粗大,这种组织状态可能在一定程度上影响焊缝的力学性能。热影响区的组织变化更为复杂,依据受热温度的不同,可细分为过热区、正火区和不完全重结晶区。过热区因加热

温度过高,晶粒会发生急剧长大,冷却后形成粗大的组织,这会显著降低接头的韧性,增加脆性断裂的风险。正火区由于经历了类似正火的热处理过程,组织得到细化,性能相对较好,具有较高的强度和韧性。而不完全重结晶区组织不均匀,存在粗大的铁素体和细小的珠光体或贝氏体组织,这种不均匀性可能导致该区域性能的不稳定。因此,深入理解焊接热循环对组织的影响,对于优化焊接工艺、提高焊接接头质量具有重要意义。

3.2 焊接接头的力学性能变化

焊接接头的力学性能与其组织状态紧密相连。焊缝区由于在焊接快速凝固过程中形成铸态组织,晶粒相对粗大,使得该区域强度和硬度较高,然而塑性和韧性却相对较低。这种性能特点使得焊缝区在承受外力时,虽不易发生塑性变形,但可能因韧性不足而发生脆性断裂。(1)热影响区中,过热区因加热温度过高,晶粒急剧长大,导致韧性显著下降,成为焊接接头中最薄弱的环节,在承受载荷时极易发生断裂。正火区组织经过细化,性能较为优良,兼具较高的强度和韧性,是焊接接头中性能较为理想的区域。(2)焊接过程中产生的残余应力也会对焊接接头的力学性能产生重要影响。残余拉应力的存在会降低接头的抗疲劳性能和抗断裂性能,使接头在交变载荷或长期使用过程中更容易发生疲劳破坏和断裂失效。因此,在焊接过程中,需综合考虑组织变化和残余应力等因素,以优化焊接接头性能^[3]。

3.3 焊接缺陷对性能的影响

在耐热钢焊接过程中,裂纹、气孔、夹渣等缺陷的产生会对焊接接头的性能造成严重的负面影响。裂纹作为最为危险的焊接缺陷,会极大地降低接头的强度和韧性。在高温环境和复杂应力共同作用下,裂纹极易发生扩展,随着裂纹的不断延伸,焊接接头乃至整个构件的承载能力会急剧下降,最终可能导致构件突然失效,引发严重的安全事故。气孔和夹渣同样不容忽视。气孔是在焊接熔池凝固时,气体未能及时逸出而残留在焊缝中形成的空洞,夹渣则是焊接过程中熔渣未能完全浮出而残留在焊缝内的杂质。这些缺陷会显著削弱焊缝的有效承载面积,使得焊缝在承受载荷时应力分布不均,局部应力集中。这不仅会降低接头的强度,还会加速疲劳裂纹的萌生与扩展,从而降低接头的抗疲劳性能,缩短构件的使用寿命,影响耐热钢构件在高温环境下的可靠性和安全性。

4 耐热钢焊接接头组织性能调控策略

4.1 优化焊接工艺参数

优化焊接工艺参数是提升耐热钢焊接接头质量的关

键举措。焊接电流、电弧电压和焊接速度等参数的合理调整,能够精准控制焊接热输入,进而显著改善焊接接头的组织性能。焊接热输入对热影响区的组织演变起着决定性作用,降低热输入可有效减少热影响区的宽度,抑制晶粒的异常长大,促使组织细化,从而提高接头的韧性。以焊接马氏体耐热钢为例,此类钢材对焊接热输入较为敏感。若热输入过大,热影响区易出现粗大的马氏体组织,不仅会降低接头的韧性,还会增加冷裂纹产生的倾向。而采用小热输入焊接工艺,能够使热影响区的组织更加均匀、细小,避免粗大马氏体组织的形成,降低冷裂纹风险,显著提升焊接接头的综合性能,确保耐热钢构件在高温、高压等恶劣工况下的安全可靠运行。

4.2 选择合适的焊接材料与焊前预热

在耐热钢焊接过程中,焊接材料的选择与焊前预热处理是保障焊接质量、提升接头性能的关键环节。(1)焊接材料的成分必须与母材高度匹配。耐热钢通常含有特定的合金元素以赋予其高温性能,焊接材料也应含有相应比例的合金元素,确保焊缝金属在化学成分上与母材相近。这样,焊缝金属才能具备与母材相当的耐热性、抗氧化性以及力学性能,使焊接接头在高温环境下能够稳定工作。同时,焊接材料还需具备良好的工艺性能,如合适的熔点、流动性以及润湿性等,以便在焊接过程中形成优质的焊缝。(2)焊前预热处理对于一些淬硬倾向较大的耐热钢至关重要。预热可有效降低焊接接头的冷却速度,减小焊接过程中产生的热应力,避免接头区域形成淬硬组织。淬硬组织硬度高、脆性大,极易产生冷裂纹。对于马氏体耐热钢这类淬硬倾向明显的钢材,焊前预热是必不可少的工艺措施。通过合理控制预热温度和时间,能够显著降低冷裂纹的产生风险,提高焊接接头的质量和可靠性,确保耐热钢构件在复杂工况下的安全稳定运行。

4.3 焊后热处理

焊后热处理是优化耐热钢焊接接头组织性能的重要工艺手段。在焊接过程中,由于局部快速加热和冷却,

焊接接头会产生残余应力、组织不均匀等问题,而焊后热处理能够有效解决这些弊端。常见的焊后热处理方法包括高温回火和退火等。高温回火时,焊接接头在较高温度下保温一定时间,可使焊缝和热影响区的组织发生转变,趋于均匀化和稳定化。这一过程不仅能显著消除焊接残余应力,降低接头在后续使用过程中因应力集中而发生开裂的风险,还能提高接头的塑性和韧性,增强其抗变形和抗断裂能力。退火处理则是将焊接接头加热到适当温度后缓慢冷却,通过原子扩散和晶粒重结晶,细化晶粒,消除加工硬化现象,使焊接接头的综合性能得到全面改善,确保耐热钢构件在高温、高压等复杂工况下安全可靠地运行。

结束语

综上所述,耐热钢的分类多样,不同类型具备独特性能优势,其性能特点决定了在高温工业领域的关键地位。在焊接过程中,从焊接方法选择、焊接材料匹配,到焊接参数优化,每个环节都紧密关联焊接接头质量。焊接热循环、力学性能变化及缺陷产生等,均会对接头性能产生重要影响。而通过优化焊接工艺参数、合理选择焊接材料与实施焊前预热,以及进行焊后热处理等组织性能调控策略,能够有效改善焊接接头组织,提升其力学性能,降低缺陷风险,确保耐热钢焊接接头在高温、高压等复杂工况下具备稳定可靠的性能,为相关工业设备的安全运行提供坚实保障。

参考文献

- [1]张翠红,李畅.低合金高强钢的焊接工艺与组织性能研究[J].湖南文理学院学报(自然科学版),2023,35(04):67-72.
- [2]郭紫威,韩荧.低合金高强钢激光填丝焊接工艺稳定性及组织性能研究[J].应用激光,2022,42(04):7-13.
- [3]艾根根,姜凤阳,思芳,等.合金成分对高熵合金及其涂层耐腐蚀性能影响的研究进展[J].热加工工艺,2024,53(24):1-10.