

管道用X70管线钢低温冲击韧性影响因素研究

任继承 薛卫平 王 炜 段海宁 李 浪

中国石油集团工程材料研究院有限公司 国家市场监督管理总局重点实验室（石油管及装备质量安全）
陕西 西安 710077

【摘要】 X70管线钢在低温环境下的冲击韧性是影响管道使用安全的重要因素。低温冲击韧性的高低直接关系到管道的抗裂能力及其在恶劣气候条件下的长期稳定性。研究表明，X70管线钢的低温冲击韧性受多种因素影响，主要包括其化学成分、热处理工艺、以及材料的微观结构特征。通过优化成分配比、改进热处理工艺，能够有效提升其在低温环境中的冲击韧性。环境因素如温度变化速率等也会对材料性能产生显著影响。本研究提出了改善X70管线钢低温冲击韧性的一些策略，为管道设计和应用提供理论依据。

【关键词】 X70管线钢；低温冲击韧性；影响因素；热处理；化学成分

DOI:10.12417/2811-0722.26.01.001

引言

X70管线钢作为现代油气管道的主要材料，其在低温环境下的韧性对管道的使用安全至关重要。在寒冷地区或极端低温条件下，管道发生脆性断裂的风险增大，因此，研究X70管线钢的低温冲击韧性显得尤为重要。过去的研究表明，材料的化学成分、晶粒大小、以及热处理过程等都会对低温冲击韧性产生影响。这些因素的作用机制尚不完全明确，因此，系统地分析这些因素的影响，并探索提高材料韧性的方法，对提高管道的抗裂能力和延长使用寿命具有重要意义。

1 X70管线钢低温冲击韧性现状与挑战

X70管线钢作为一种重要的管道材料，广泛应用于石油、天然气等管道运输领域。低温环境下，X70管线钢的冲击韧性直接影响其抗裂性能和使用寿命。在低温条件下，材料的脆性增加，容易发生脆性断裂，从而威胁管道的安全性。近年来，随着极寒地区管道建设的增多，X70管线钢的低温冲击韧性研究成为一个亟待解决的重要问题。X70管线钢在低温环境下的韧性表现仍存在许多挑战，特别是在温度迅速变化或长期低温负荷作用下，钢材的冲击韧性往往不足，导致管道系统的运行风险增加。

目前，影响X70管线钢低温冲击韧性的因素众多，包括钢材的化学成分、晶粒大小、热处理工艺、微观结构及其相变行为等。化学成分对钢材的冲击韧性有显著影响，过高的碳含量或合金元素的配比不当，会导致材料的脆性增加，影响低温冲击性能^[1]。钢材在制造过程中所采用的热处理工艺，如正火、退火、淬火等，直接影响其晶粒大小和组织结构，进而影响材料的韧性。微观组织中的马氏体相和贝氏体相的分布也会对冲击韧性产生决定性影响。虽然目前一些改性措施，如微合金化、控制热处理参数等，已取得一定进展，但在应对极端低温条件下的实际应用中，仍存在许多技术难题。

X70管线钢低温冲击韧性不足的另一个挑战来自环境因

素。在严寒气候条件下，管道系统的低温冲击韧性容易受到周围环境变化的影响。温度急剧波动、环境湿度、氯离子等因素均会在一定程度上加剧管道材料的脆化现象，增加管道的风险。针对X70管线钢低温冲击韧性提升的研究亟需从多个角度进行深入分析，以期在保证管道安全性的同时，提升其低温使用性能。

2 影响X70管线钢低温冲击韧性的主要影响因素分析

X70管线钢的低温冲击韧性受到多种因素的影响，其中最为关键的是材料的化学成分、热处理工艺、微观组织结构和外部环境条件。化学成分直接决定了钢材的力学性能，特别是含碳量及合金元素的配比。过高的碳含量往往导致钢材在低温下产生较大的脆性，降低冲击韧性。与此同时，合金元素如钼、铬、镍等的添加也在一定程度上影响钢材的低温性能。这些元素的比例必须严格控制，以确保其对钢材韧性的正面作用。碳化物的析出与相变行为对低温下的冲击韧性也有重要影响，过多的碳化物会阻碍晶粒的细化，从而影响钢材的整体韧性。

热处理工艺是影响X70管线钢低温冲击韧性的另一个重要因素。不同的热处理方式对钢材的微观结构和力学性能具有显著影响。冷却速度、温度和保持时间等工艺参数决定了钢材内部组织的形态，进而影响冲击韧性^[2]。快速冷却可能导致马氏体的形成，这种硬脆相在低温下会使钢材变脆，降低其韧性。适当的退火或正火处理则可以优化组织结构，细化晶粒，增强材料的韧性。因此，合理的热处理工艺对于提升X70管线钢低温冲击韧性具有决定性作用。

钢材的微观组织结构对冲击韧性的影响也不容忽视。X70管线钢的主要组织成分包括铁素体、珠光体、马氏体等，其中铁素体和珠光体相对较为柔韧，适当的分布能提高钢材的冲击韧性。过多的马氏体或贝氏体会导致材料的硬度增加，而这种硬度的提高往往是以牺牲韧性为代价的。在生产过程中，通过

控制冷却速度和其他工艺参数，合理分布钢材中的不同相，可以有效提高其低温冲击韧性。

环境因素，尤其是温度变化的幅度和速率，对X70管线钢的低温冲击韧性有着重要影响。温度剧烈波动时，钢材表面与内部产生较大的温差，容易引发热应力，从而导致材料的脆化现象。在低温环境下，长期暴露于冰冻或急剧降温的条件下，钢材的内应力也会加剧，进一步降低其冲击韧性。外部环境中的氯离子、湿度等因素也会促使材料表面发生腐蚀，影响材料的力学性能。X70管线钢在设计和使用过程中，必须综合考虑这些环境因素的影响，以确保其在实际应用中的可靠性。

2.1 热处理工艺对低温冲击韧性的影响

热处理工艺在X70管线钢的低温冲击韧性中起着至关重要的作用，其对材料的微观组织、力学性能及韧性表现产生深远影响。不同的热处理方式不仅改变了钢材的相组成，还影响了晶粒的大小、分布以及相的形态。钢材的冷却速率、加热温度和处理时间等因素，都会对低温冲击韧性产生显著的影响。在冷却过程中，温度控制不当会导致马氏体或贝氏体相的形成，而这些硬脆相对钢材的韧性具有较大的负面影响。特别是在低温环境下，含有大量马氏体的X70管线钢容易发生脆性断裂，无法有效承受外界冲击负荷。

通过控制热处理工艺中的冷却速率，可以优化X70管线钢的组织结构，减少硬脆相的比例，提升钢材的冲击韧性。缓慢冷却有助于形成铁素体和珠光体相，这些相对较为柔韧且具有较好的低温韧性^[3]。热处理过程中的正火和退火工艺也能显著改善钢材的微观组织，细化晶粒，增强材料的整体性能。正火处理能有效提升钢材的均匀性，使其在低温下表现出更高的抗裂性。退火处理则通过降低内应力，改善材料的塑性和韧性，减少低温下发生脆性断裂的风险。

淬火后的回火工艺对X70管线钢的低温冲击韧性也有重要作用。回火可以有效调节钢材的硬度与韧性之间的平衡，使其在低温条件下既具备足够的强度，又能保持良好的冲击韧性。回火温度和时间的合理选择有助于改善钢材的内在组织，减少残余应力，提高其在严寒环境下的可靠性。合理选择热处理工艺，精确控制加热温度和冷却速率，是提升X70管线钢低温冲击韧性的重要途径。

2.2 化学成分对韧性的作用机制

X70管线钢的化学成分和微观结构对其低温冲击韧性有着直接而深远的影响。钢材的化学成分决定了其基本的力学性能，尤其是含碳量、合金元素和杂质的种类与含量。在低温环境下，含碳量较高的钢材往往表现出较低的韧性，这是由于碳元素能够促进碳化物的析出，导致钢材的脆性增大。特别是在温度急剧下降时，过高的碳含量使得钢材内生成的硬脆相马氏体或贝氏体在低温下的脆性更加显著，进而影响其抗裂性能。

为了提高低温韧性，通常需要控制碳的含量，优化合金元素的配置，以实现钢材的理想性能。

除了碳元素外，合金元素如锰、镍、钼和铬等也在影响X70管线钢低温韧性方面起到重要作用。锰能够提高钢材的硬度和强度，同时帮助改善钢材的韧性，在低温下表现出较好的抗裂性。镍的加入则有助于提高钢材的耐低温性能，尤其是在极寒条件下，镍元素可以有效提高钢的冲击韧性，降低脆性断裂的发生。钼和铬则有助于增强钢材的高温强度，但在低温下，过量的钼和铬可能导致钢材的脆化现象。因此，合金元素的含量和比例需要根据实际应用需求进行精确调整，以确保钢材在低温下具有较好的综合性能。

2.3 微观结构韧性对韧性的影响

X70管线钢的微观结构是其低温冲击韧性的重要决定因素。微观组织中的晶粒大小和组织形态对钢材的力学性能有着直接影响。较小的晶粒通常能够提高钢材的韧性，因为细小的晶粒能够有效地阻止裂纹的扩展，延缓脆性断裂的发生。细化晶粒的过程可以通过优化热处理工艺来实现，如正火或退火等热处理方法能够有效控制晶粒的尺寸，进而改善韧性^[4]。钢材的显微组织中各相的分布也对冲击韧性产生影响，特别是铁素体、珠光体与马氏体等相的比例关系。铁素体和珠光体相对较为柔韧，能够提高钢材在低温下的抗裂能力，而过多的马氏体则会导致硬度增加，但脆性随之升高，从而降低冲击韧性。

微观结构中的相变行为也是影响低温韧性的因素。当钢材受到外界温度变化或力学加载时，钢材的相变特性对其抗裂性至关重要。尤其是马氏体的形成，虽然提高了钢的强度，但在低温下其脆性特征更加明显，可能导致钢材发生脆性断裂。通过适当的合金设计和热处理工艺，可以调控钢材中不同相的含量，使得铁素体与珠光体占据主导地位，从而优化其低温冲击韧性。钢材的化学成分与微观结构的协同作用直接决定了X70管线钢在低温环境下的韧性表现，这要求在材料设计和生产过程中精确控制这些因素，以保证钢材在严寒条件下的可靠性和安全性。

3 提高X70管线钢低温冲击韧性的优化策略与实践

提高X70管线钢低温冲击韧性是确保管道在寒冷地区可靠运行的关键。优化策略和实践主要从调整材料成分、改进热处理工艺以及控制微观结构等方面入手，以增强钢材在低温环境中的抗裂性能和整体韧性。在实际应用中，通过精准控制化学成分、优化加工工艺，能够有效提高钢材的低温冲击韧性。在化学成分方面，调整合金元素的比例是优化X70管线钢低温韧性的一个重要手段。通过合理配置锰、镍、铬、钼等元素的含量，可以在不牺牲钢材强度的前提下，提升其在低温下的韧性。镍元素的添加对改善钢材的低温冲击韧性具有显著效果，尤其在极低温环境下，镍元素能够抑制钢材脆化的发生，增强

材料的韧性。同时，降低碳含量，特别是在高碳钢材中，能有效减少碳化物的析出，避免硬脆相的形成，从而提升低温冲击韧性。采用低碳化和微合金化技术，在保证钢材强度的同时，优化其韧性表现。

热处理工艺的改进也在提高X70管线钢低温冲击韧性方面起到至关重要的作用。通过细化晶粒、优化相变控制，可以显著提高钢材的综合性能。冷却速率、加热温度和保持时间等热处理参数的精准调控，有助于获得更均匀的微观结构。缓慢的冷却过程有助于形成铁素体和珠光体，这些相对柔韧的相能有效提升低温下的韧性。另一方面，热处理中的正火和退火工艺也能通过调节钢材的显微组织，减少残余应力，增强钢材的塑性和韧性。对于已经淬火的X70管线钢，进行适当的回火处理，能够有效平衡硬度与韧性之间的矛盾，确保其在低温环境下具有足够的冲击韧性。

在微观结构的优化方面，合理控制钢材中的相组成和晶粒尺寸是提高韧性的有效途径。细小的晶粒能够有效阻碍裂纹扩展，延缓脆性断裂的发生，从而提高低温冲击韧性。通过精确调控热处理工艺中的冷却速率，可以在保持强度的同时，减少马氏体或贝氏体的生成，从而避免硬脆相的比例过高，保持较好的韧性^[5]。微观结构中铁素体、珠光体和马氏体的合理分布

对低温韧性有着直接影响。特别是铁素体和珠光体相对柔韧，能够提高钢材在低温下的抗裂能力，而过多的马氏体则会增加硬度和脆性，从而降低冲击韧性。在生产过程中，通过精确控制热处理工艺中的各项参数，可以有效改善钢材的微观组织，使其更适应低温环境的挑战。

环境因素对X70管线钢的低温冲击韧性也有显著影响。气候变化、温度波动以及外部应力都会对钢材产生负面影响，设计合理的管道系统和外部保护措施同样至关重要。在严寒环境下，通过在管道表面涂覆防腐层和使用加热装置等技术手段，可以有效减缓环境对管道材料的影响，保障钢材在低温下的可靠性。通过这些综合优化策略的应用，可以显著提高X70管线钢的低温冲击韧性，使其更好地适应极寒环境中的使用要求，确保管道系统在严酷条件下的长期稳定运行。

4 结语

X70管线钢在低温环境下的冲击韧性直接关系到管道的安全性和可靠性。通过调整化学成分、优化热处理工艺和微观结构设计，可以有效提升其低温冲击韧性，确保在严寒地区的长期稳定运行。未来，在对X70管线钢进行性能优化时，仍需进一步加强材料设计、生产工艺与环境因素的协同作用，以确保钢材在极端条件下的使用表现和安全性。

参考文献：

- [1] 吴华,班久庆,罗寅午,等. 摊氢天然气环境中X70管线钢及其焊缝适应性研究[J].石油与天然气化工,2025,54(05):146-151.
- [2] 徐士祺,李雨轩,黄长河,等. X70管线钢在高含CO₂气田环境中的腐蚀规律研究[J].电镀与精饰,2025,47(10):45-51.
- [3] 刘晓茹,魏超. 硼添加方式对Q690E焊条熔敷金属低温冲击韧性的影响[J].金属制品,2025,51(04):57-60.
- [4] 简龙,王越,李东宇,等. X70管线钢热轧卷边部纵向裂纹分析及控制措施[J].鞍钢技术,2025,(04):61-65.
- [5] 付成哲,张帅,王爽,等. 基于ABAQUS的X70管线钢连铸板坯空冷的热力耦合分析[J].特殊钢,2024,45(06):62-68.