

温度变化对钢材力学性能影响研究进展

张涿鸣¹, 杨帆^{1,2*}, 关久阳¹, 王俊鑫¹

¹辽宁科技学院资源与土木工程学院, 辽宁 本溪

²辽宁工程技术大学土木工程学院, 辽宁 阜新

收稿日期: 2026年4月13日; 录用日期: 2026年5月5日; 发布日期: 2026年5月15日

摘要

钢材作为工程领域应用最广泛的结构材料之一, 其力学性能直接决定工程结构的安全性与可靠性。温度变化是影响钢材力学性能的关键环境因素, 不同温度区间及温度变化过程均会导致钢材的强度、塑性和韧性等核心力学性能发生显著改变。本文系统综述低温环境下钢材的冷脆特性和韧脆转变机制, 以及不同温度作用引发的钢材力学性能劣化规律; 梳理温度对不同类型钢材力学性能的影响差异; 最后展望该领域未来的研究方向, 为寒冷地区及复杂温度环境下钢材结构设计、安全评估与寿命预测提供理论参考。

关键词

钢材, 温度变化, 力学性能

Research Progress on the Influence of Temperature Changes on the Mechanical Properties of Steel

Zhuoming Zhang¹, Fan Yang^{1,2*}, Jiuyang Guan¹, Junxin Wang¹

¹School of Resources and Civil Engineering, Liaoning Institute of Science and Technology, Benxi Liaoning

²School of Civil Engineering, Liaoning Technology University, Fuxin Liaoning

Received: April 13, 2026; accepted: May 5, 2026; published: May 15, 2026

Abstract

Steel, as one of the most widely used structural materials in the engineering field, has its mechanical properties directly determining the safety and reliability of engineering structures. Temperature variation is a key environmental factor affecting the mechanical properties of steel. Different

*通讯作者。

temperature ranges and temperature change processes can significantly alter the core mechanical properties of steel, such as strength, plasticity, and toughness. This paper systematically reviews the cold brittleness characteristics and ductile-brittle transition mechanism of steel under low temperature environments, as well as the degradation laws of steel mechanical properties induced by different temperature effects. It also examines the differences in the impact of temperature on the mechanical properties of different types of steel. Finally, it looks forward to future research directions in this field, providing theoretical references for steel structure design, safety assessment, and life prediction in cold regions and complex temperature environments.

Keywords

Steel, Temperature Change, Mechanical Properties

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

钢材凭借其优异的力学性能、良好的加工性能及经济性，广泛应用于建筑、桥梁、机械制造、航空航天等诸多领域。在实际服役过程中，钢结构常面临复杂的温度环境，如寒冷地区冬季的极端低温（ $-50^{\circ}\text{C}\sim 0^{\circ}\text{C}$ ），以及昼夜交替、季节更迭带来的温度循环，还有火灾、焊接等引发的局部温度梯度与骤升骤降。温度变化会通过改变钢材的微观组织结构，进而显著影响其屈服强度、抗拉强度、伸长率、冲击韧性等力学性能，甚至引发结构失效。

近年来，随着工程建设向极端环境拓展，如高纬度寒区桥梁、航空发动机高低温部件等，温度变化对钢材力学性能的影响得到了广泛关注。本文从低温及温度作用两个核心方面，整合国内外最新研究成果，系统分析温度变化对钢材力学性能的影响规律，总结研究方法与技术进展，展望未来发展趋势，旨在为工程实践中钢材的合理选用与结构安全保障提供理论支撑。

2. 低温环境对钢材力学性能的影响

钢材在低温环境下的力学性能变化直接关系到寒冷地区工程结构的安全性与可靠性，核心影响是导致钢材出现“冷脆”现象，当温度降至某一临界值时，钢材会从塑性断裂突然转变为脆性断裂，断裂前几乎无明显塑性变形，极易引发结构突发性失效。表 1 和表 2 分别为国内外学者对不同种类钢材在低温环境下力学性能影响的研究，国内以王元清教授团队的研究成果为代表，低温环境主要采用液氮冷却方式。

Table 1. Research on the mechanical properties of steel under low temperature conditions by domestic scholars

表 1. 国内学者对钢材在低温环境下力学性能研究

文献	主要研究内容	结论
[1]	针对钢结构在低温环境下的脆性破坏现象开展研究，探究低温冷脆现象的产生机制与影响因素。	低温是诱发钢结构脆性破坏的关键因素之一，钢材的韧-脆转变温度是判断脆性破坏风险的重要阈值，低温下结构的应力集中部位更易率先发生脆性断裂。
[2]	对 14 mm 厚 Q460C 高强度钢材在 -60°C 、 -40°C 、 -20°C 、 0°C 、 20°C 五个温度点下进行拉伸试验，并用扫描电镜分析试件断口形貌。	随温度降低，Q460C 钢材抗拉强度和屈服强度提高、屈强比上升，断后伸长率和断面收缩率减小。 -20°C 是 Q460C 钢材低温性能的转折点； -40°C 开始，钢材的抗拉强度和屈服强度随温度升高反而有所降低。

续表

[3]	对 14 mm 厚 Q460C 钢材在 20℃、0℃、-20℃、-40℃、-60℃ 五个温度点下进行三点弯曲试验,并用电子显微镜对试件断口进行微观分析。	随温度降低, Q460C 钢材裂纹尖端张开位移 δ_{\square} 值下降,断裂韧性变差;韧脆转变温度约为 -40.9℃。
[4]	在 +20℃、0℃、-20℃、-40℃、-60℃ 温度点对 Q345qD 桥梁钢进行系统静力拉伸试验和 V 形缺口冲击试验,研究其力学性能和冲击韧性随温度变化规律。	随温度下降,屈服强度及抗拉强度提高,断后伸长率、断面收缩率和弹性模量无明显变化,冲击韧性下降。
[5]	在 +20℃、-20℃、-60℃ 三个温度点下,对三种常用结构钢材进行低温拉伸试验;分析力学指标随温度的变化规律。	屈服强度和极限强度均随温度降低而提高,破坏截面收缩率和伸长率随温度降低呈递减趋势,钢材塑性和韧性随低温衰减。
[6]	对输电线路铁塔用 Q345B、Q420B、Q460C 钢管和 Q345B、Q420B 角钢钢材,进行系列室温和低温条件下的单轴拉伸和冲击试验。	钢材的屈服强度和抗拉强度随温度降低而增大,同强度等级角钢钢材的屈服强度和抗拉强度均高于钢管钢材;5 种钢材的夏比冲击功均随温度降低而减小, Q345B 钢管和角钢的韧脆转变温度较高(分别为 -10.14℃、-3.94℃)。
[7]	开展 960MPa 高强度钢材及其焊缝的低温冲击韧性试验,探究高强度钢材及其焊接部位在低温环境下的韧性表现。	夏比冲击功随温度降低呈下降趋势,其韧-脆转变温度为 -19.5℃;焊缝部位的低温冲击韧性低于母材,低温下焊接接头更易发生脆性破坏。

Table 2. Research on the mechanical properties of steel under low temperature conditions by foreign scholars
表 2. 国外学者对钢材在低温环境下力学性能研究

文献	主要研究内容	结论
[8]	在室温和 -60℃ 条件下,对两种强度低合金钢材及其对接焊接接头进行正弦荷载和冲击荷载下的疲劳测试,分析低温与荷载类型对钢材性能的耦合影响。	随温度降低,试样在正弦荷载下疲劳强度增加,在冲击荷载下疲劳强度减小;应力集中系数增大时,低温对疲劳强度的不利影响更显著,低温环境服役构件需进行冲击疲劳试验。
[9]	研究了 Q690 和 Q960 中国标准 H 型钢在 -80℃ 至 20℃ 低温下的力学性能。	随着温度降低, Q690 和 Q960 的屈服强度分别提高了约 11% 和 15%;同时,抗拉强度分别平均提高约 12% 和 15%。低温对两种钢材的断裂应变和断面收缩率影响较小。
[10]	在 -80℃ 至 +30℃ 的不同温度下,通过冷却室对钢试样进行拉伸试验。对比分析了低温对低碳钢和高强度钢力学性能的影响。	普通低碳钢板弹性模量、屈服强度和抗拉强度随温度降低均有所增加,薄钢板厚度越大,增量越大;与相同厚度的普通低碳钢板相比,低温对高强度钢板的力学性能影响较小。
[11]	研究了用于寒冷地区基础设施和液化天然气储罐的 Q235-Q460 轻钢材(MS)的力学性能,温度范围是 20℃ 至 -165℃。	低温显著提高了轻钢材的屈服强度和抗拉强度值。对弹性模量影响甚微,对断裂应变和断面收缩率影响较小。
[12]	本研究测试了在 20℃ 至 -70℃ 温度范围内低强度和高强度冷轧钢板的负温力学性能。	冷轧钢板的屈服强度、抗拉强度及 2% 总应变下的应力随温度降低而增加,低强度钢(LSS)的增幅高于高强度钢(HSS),但 LSS 的抗拉强度与屈服强度之比随温度降低而显著减小。
[13]	进行结构厚板及其对接焊缝沿厚度方向的低温力学性能与断裂韧性试验,探究厚度方向特性差异及低温的影响。	低温下结构厚板及对接焊缝的断裂韧性(CTOD 指标 δ)随温度降低而减少;沿厚度方向存在性能不均匀性,中心部位的低温韧性略低于表层。
[14]	开展低温条件下钢结构构件防断设计方法研究,结合 CTOD 指标探究低温和板厚对钢材断裂韧性的综合影响。	提出了考虑低温和板厚影响的钢结构构件防断设计方法,该方法可有效提升低温环境下钢结构的抗脆断能力。

通过不同学者对不同种类钢材在低温下力学性能的研究可以看出，低温环境会提高钢材的屈服强度和抗拉强度，而塑性指标和韧性指标如伸长率、断面收缩率和冲击吸收功大多表现出下降趋势。

对于高强度钢，其本身的塑性和韧性相对较低，低温环境会进一步加剧其脆化趋势，临界脆化温度更高，脆化程度更显著。此外不同钢材在低温环境下的屈强比变化规律不同，表现出强度储备的差异。研究表明当温度从室温降至 -70°C 时，低强度钢的屈服强度最高可提升 75%，抗拉强度最高提升 52%，增幅远高于高强度钢。在厚度相同时，低温对高强度钢板的力学性能影响小于普通低碳板。

3. 温度作用对钢材力学性能的影响

工程结构处在自然环境中，经受着一年四季春夏秋冬的变化。通常所说的结构温度作用是由于环境条件改变引起的，按作用时间的长短可分为三类：季节性温度作用，骤然变温温度作用和日照温度作用 [15]。各种温度作用的特点如表 3 所示。

Table 3. Characteristics of various temperature effects

表 3. 各种温度作用特点

温度作用	作用范围	分布规律	变化速度	复杂性	影响因素	温度效应特点
季节	整体	均匀	长期缓慢	一般	季节变化	整体变形大
骤然变温	整体	较均匀	短时急变	一般	极端天气	整体温度应力较大
日照	局部	非均匀	短时急变	复杂	太阳辐射	局部温度应力及变形

3.1. 季节性温度作用

季节性温度作用是一种由于四季交替而产生的整体、均匀、缓慢的温度作用。由于其观测周期长、现场监测难度大，目前国内外针对季节性温度作用对钢结构的影响研究相对匮乏。且当前研究多以数值模拟为主，依托有限元软件开展温度场与结构响应分析，而足尺试验与原位实测研究较为缺乏，相关理论模型与试验验证体系有待进一步完善。

3.2. 骤然变温温度作用

骤然变温温度作用是由于极端天气的侵袭和日落后夜间低温导致的结构温度变化，近年来，此类极端温度条件在我国东北、西北区域频发，对钢结构的受力性能影响尤为突出。在温度骤然升降作用下，钢结构可能因应力集中、局部损伤等因素发生脆性破坏，直接威胁结构整体安全性与耐久性。目前规范对骤然变温的温度范围没有明确规定，李先锋 [16] 提出钢构件温度骤然升降的定义，研究温度骤然升降作用下的钢构件应力变化情况及屈服临界温度。姚晨 [17] 采用数理统计法推算极端气温条件下的大气昼夜温差代表值，采用数值模拟方法得到波形钢腹板 PC 组合箱梁的设计温度梯度分布规律，并分析其力学效应。武彦光 [18] 分析了骤然降温对摩天轮结构的影响，结果表明骤然降温对摩天轮侧支撑柱等关键部位的最大应力和变形影响较大，但整体结构满足设计要求。王海花 [19] 研究骤然降温作用下乌鲁木齐站网架结构的温度场，确定网架结构设计时极端升温工况和极端降温工况的取值，为今后类似工程提供参考帮助。

3.3. 日照温度作用

日照温度作用是由于太阳东升西落而引起的局部非均匀的温度作用，太阳辐射在钢材表面形成明显的温度差，温度梯度导致钢材不同部位的热胀冷缩程度不同，局部产生较大的热应力与热变形。表 4 为国内学者对不同种类钢材在日照温度作用下力学性能影响的研究。

Table 4. Research on the mechanical properties of steel under the influence of solar temperature by domestic scholars
表 4. 国内学者对钢材在日照温度作用下力学性能研究

文献	主要研究内容	结论
[20]	实测夏季日照下 Q235 型钢构件温度效应, 获得了不同约束构件日照温度应力及变形的分布特性及时变规律。	型钢构件温度应力分布存在明显的非均匀性, 固支条件下实测最大温度应力和日照弯曲应力大于铰支, 铰支构件温度变形更大, 最大值上升到 0.9 mm。
[21]	采用有限元软件对上海地区一大尺寸矩形钢结构建立模型, 对不同辐射吸收率和空间倾角下其温度应力随时间变化规律进行分析。	温度应力的最值基本分布在端部, 为固接位置处四个角部, 在夏日日照条件下钢拱的温度应力可以达到钢材强度设计值的 30% 以上。
[22]	基于无线传感网络, 实测国家体育场钢结构各部位的温度与应力, 以全年实测数据为依据, 研究非均匀温度场作用对结构应力变化的影响。	非均匀温度场作用的存在使得多数测点的应力变化幅度有所增大, 增长最多的为上弦测点, 增幅为 27.83 MPa。
[23]	研究山东航海实训中心项目非均匀温度场对外墙钢板以及整体结构的变形和应力影响。	应力最大值发生在钢板的局部龙骨单元, 非均匀温度场下最大应力约为 219 MPa, 所有钢材仍处于弹性阶段。
[24]	以武汉市东国家网络安全与人才创新基地展示中心钢结构为研究对象, 研究钢结构在露天施工条件下的非均匀温度作用下结构应力变化规律。	应力变化最大部位为下部网壳, 产生的最大应力增量为 25.2 MPa, 且非均匀温度对竖向构件几乎没有影响。
[25] [26]	揭示连续焊接不锈钢屋面系统的各构造层的日照温度场分布规律及主要受力构件处的温度效应变化特性。	屋面系统檩条、支座、屋面板各位置上的纵向应力总体上大于横向应力。最大应力差异幅度出现在屋面板的板肋处, 应力差异幅度为 14.9%。

通过不同学者对不同类型钢结构建筑在温度作用下的力学性能研究可以看出, 不管是骤然变温温度作用或是日照温度作用, 都会在结构不同部位产生温度应力和温度变形, 非均匀温度场产生的温度效应没有明显规律, 需要对特定地区进行温度场特征分析。

温度变化使钢材内部或表面存在明显的温度差, 温度梯度会导致钢材不同部位的热胀冷缩程度不同, 产生较大的热应力, 当热应力超过钢材的屈服强度时, 会引发塑性变形; 若温度骤变频繁, 热应力反复作用, 会在钢材内部形成微裂纹并逐渐扩展, 对结构安全造成威胁。

4. 结论与展望

本文系统综述建筑与桥梁用钢材, 在低温环境和温度作用下的力学性能影响规律。低温环境的核心影响是引发钢材冷脆, 表现为塑性和韧性显著下降; 不同钢材低温性能存在差异, 高强度钢脆化趋势更显著, 低强度钢强度增幅更大, 焊缝部位低温韧性低于母材, 且钢材厚度和类型会影响低温作用效果。

温度作用按作用时间长短可分为季节性、骤然变温和日照三类, 主要通过钢材表面形成的温度差与应力集中, 引发钢材脆性破坏。目前规范对骤然变温的温度范围无明确规定, 相关研究已初步探索其应力变化规律与设计取值。日照温度作用形成的局部非均匀温度场, 在钢材表面产生热应力与热变形, 但应力分布无明显规律, 需结合具体地区分析。

综上, 温度是影响钢材力学性能及工程结构安全性的关键因素, 不同温度条件对钢材性能的影响存在显著差异, 在不同温度场景的钢材选型中, 需综合考虑多维度影响因素, 以保障材料应用的可靠性与适配性。

尽管目前关于温度变化对钢材力学性能影响的研究已取得诸多成果, 但随着工程应用向极端环境拓展, 仍存在很多待解决的问题, 在此提出三个未来发展研究方向:

(1) 目前对超低温(-100℃以下)、超高温(1000℃以上)环境下钢材的力学性能数据不足,可深入研究极端温度下钢材的微观组织演变机制与力学性能劣化规律,开发适用于极端温度环境的新型钢材。

(2) 在实际工程中,钢材常面临温度变化与腐蚀、疲劳、载荷等多因素耦合作用,可以开展循环温度与机械荷载共同作用下高强度螺栓连接的疲劳性能研究,通过监测试验过程中钢材的变形、裂纹萌生与扩展规律,分析温度-荷载-疲劳损伤机制,准确预测钢材的服役寿命。

(3) 结合物联网和人工智能等技术,开发钢材结构在温度变化环境下的智能化监测系统,实时监测力学性能变化与损伤累积。建立基于数据驱动的使用寿命预测模型,实现钢材结构的全生命周期安全评估与智能运维。

基金项目

2025年辽宁科技学院大学生创新创业训练计划项目“大温变-荷载耦合作用下输电塔螺栓节点损伤机理与计算模型研究”(202611430009)。

参考文献

- [1] 王元清. 钢结构在低温下脆性破坏研究[J]. 低温建筑技术, 1998(2): 2-5.
- [2] 王元清, 林云, 张延年, 等. 高强度钢材 Q460C 低温力学性能试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2011, 27(4): 646-652.
- [3] 王元清, 林云, 张延年, 等. 高强度钢材 Q460C 断裂韧性低温试验[J]. 吉林大学学报(工学版), 2012, 42(3): 639-644.
- [4] 贾单锋, 王元清, 崔佳, 等. 桥梁钢 Q345qD 低温力学性能及冲击韧性试验研究[J]. 钢结构, 2017, 32(5): 41-45.
- [5] 王元清, 王晓哲, 武延民. 结构钢材低温下主要力学性能指标的试验研究[J]. 工业建筑, 2001, 31(12): 63-66.
- [6] 王元清, 廖小伟, 张子富, 等. 输电线铁塔钢材的低温力学和冲击韧性试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2001, 47(12): 70-74.
- [7] 王元清, 刘希月, 石永久. 960MPa 高强度钢材及其焊缝低温冲击韧性试验研究[J]. 建筑材料学报, 2014, 17(5): 915-919.
- [8] Shulginov, B. and Matveyev, V. (1997) Impact Fatigue of Low-Alloy Steels and Their Welded Joints at Low Temperature. *International Journal of Fatigue*, **19**, 621-627. [https://doi.org/10.1016/s0142-1123\(97\)00066-2](https://doi.org/10.1016/s0142-1123(97)00066-2)
- [9] Yan, J.B., Luo, Y.L., Lin, X.H., et al. (2021) Effects of the Arctic Low Temperature on Mechanical Properties of Q690 and Q960 High-Strength Steels. *Construction and Building Materials*, **300**, Article 124022. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124022>
- [10] Yan, J.B., Liew, J.Y.R., Zhang, M. and Wang, J. (2014) Mechanical Properties of Normal Strength Mild Steel and High Strength Steel S690 in Low Temperature Relevant to Arctic Environment. *Materials & Design*, **61**, 150-159. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.04.057>
- [11] Xie, J., Xi, R., Tong, C.L. and Yan, J. (2023) Mechanical Properties of Q235~Q460 Mild Steels at Low Temperatures. *Construction and Building Materials*, **363**, Article 129850. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129850>
- [12] Rokilan, M. and Mahendran, M. (2020) Sub-Zero Temperature Mechanical Properties of Cold-Rolled Steel Sheets. *Thin-Walled Structures*, **154**, Article 106842. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106842>
- [13] Wang, Y.Q., Liu, X.Y., Hu, Z.W. and Shi, Y.J. (2013) Experimental Study on Mechanical Properties and Fracture Toughness of Structural Thick Plate and Its Butt Weld along Thickness and at Low Temperatures. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, **36**, 1258-1273. <https://doi.org/10.1111/ffe.12062>
- [14] Zhou, H., Wang, Y., Shi, Y. and Wu, Y. (2015) Experimental Study on Fracture Resistant Design Method for Steel Structural Components at Low Temperature. *International Journal of Steel Structures*, **15**, 319-333. <https://doi.org/10.1007/s13296-015-6005-6>
- [15] 刘红波. 弦支穹顶结构施工控制理论与温度效应研究[D]: [博士学位论文]. 天津: 天津大学, 2011.
- [16] 李先铎. 温度骤然升降作用下钢构件屈服临界温度预测模型[D]: [硕士学位论文]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2022.
- [17] 姚晨. 极端气温下波形钢腹板 PC 组合箱梁温度效应研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2017.
- [18] 武彦光. 温度效应对摩天轮结构性能的影响分析[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2018.

- [19] 王海花. 乌鲁木齐站大跨度网架结构的温度场及其温度效应分析[D]: [硕士学位论文]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2020.
- [20] 陈德坤. 空间钢结构日照非均匀温度场及其效应研究[D]: [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [21] 陈建稳, 侯红青, 樊祜壮. 日照条件下空间钢结构温度效应研究[J]. 科技开发, 2011, 12(26): 1-5.
- [22] 罗尧治, 梅宇佳, 沈雁彬, 等. 国家体育场钢结构温度与应力实测及分析[J]. 建筑结构学报, 2017, 11(34): 24-32.
- [23] 崔建华, 余琼, 张琳, 等. 山东航海实训中心非均匀温度场及温度效应研究[J]. 建筑结构, 2017, 47(17): 99-104.
- [24] 游颖, 张泽涛, 周清富. 非均匀温度场作用下空间钢结构温度分布及应力分析[J]. 结构工程师, 2021, 37(2): 61-65.
- [25] 王明明. 连续焊接不锈钢屋面系统温度场及温度效应研究[D]: [博士学位论文]. 广州: 广州大学, 2024.
- [26] 王明明, 杨强, 刘丹妮, 等. 连续焊接不锈钢屋面系统在日照下的温度场及温度效应试验研究[J]. 建筑科学, 2025, 41(9): 63-71+129.