

高性能钢材在土木工程中的应用与性能提升

袁伟

绵阳新兴投资控股有限公司, 四川 绵阳 621000

DOI:10.61369/UAID.2025020040

摘 要 : 随着现代土木工程结构向大跨度、高层及重载方向的发展,传统结构钢材在强度、韧性、焊接性和耐久性等方面逐渐暴露出性能瓶颈。本文围绕高性能钢材(如屈服平台钢、高强耐候钢等)在土木工程中的应用展开系统研究,首先从材料微观机制和冶金工艺角度探讨其性能提升的路径,其次结合实际工程案例,分析其在桥梁、高层建筑及抗震结构中的工程表现。通过构建力学性能评估模型,开展应力-应变仿真及对比实验,结果表明高性能钢材在承载能力、延性、耐腐蚀性方面均优于传统 Q235/Q345 钢材,屈服强度提高约 30%,极限强度提升可达 40%。本文还基于 Python 可视化工具对不同钢材的力学响应曲线进行分析,为设计选材提供数据支撑。研究表明,高性能钢材在提升结构安全性与服役寿命方面具有显著优势,未来应进一步关注其成本效益评估与标准体系完善。

关 键 词 : 高性能钢材; 土木工程; 屈服平台; 耐腐蚀性; 结构优化; 材料力学

The Application and Performance Enhancement of High-Performance Steel in Civil Engineering

Yuan Wei

Mianyang Xinxing Investment Holding Co., LTD. Mianyang, Sichuan 621000

Abstract : With the development of modern civil engineering structures towards large spans, high floors and heavy loads, traditional structural steels have gradually exposed performance bottlenecks in terms of strength, toughness, weldability and durability. This paper conducts a systematic study on the application of high-performance steels (such as yield platform steel, high-strength weathering steel, etc.) in civil engineering. Firstly, it explores the paths to improve their performance from the perspectives of material microstructure mechanism and metallurgical process. Secondly, it analyzes their engineering performance in Bridges, high-rise buildings and seismic structures in combination with actual engineering cases. By constructing a mechanical property evaluation model, conducting stress-strain simulation and comparative experiments, the results show that high-performance steel outperforms traditional Q235/Q345 steel in terms of load-bearing capacity, ductility and corrosion resistance. The yield strength is increased by approximately 30%, and the ultimate strength can be enhanced by up to 40%. This paper also analyzes the mechanical response curves of different steels based on Python visualization tools, providing data support for material selection in design. Research shows that high-performance steel has significant advantages in enhancing structural safety and service life. In the future, more attention should be paid to its cost-benefit assessment and the improvement of the standard system.

Keywords : high-performance steel; civil engineering; yield to the platform; corrosion resistance; structural optimization; mechanics of materials

引言

随着城市化进程加速,土木工程对结构安全性、耐久性、经济性和绿色低碳的要求不断提高。传统碳素结构钢因强度与耐腐蚀性有限,难以满足复杂工程需求。高性能钢材(HPS)兼具高强度、良好韧性、优异焊接性与耐腐蚀性,成为重要发展方向^[1-2]。自美国 FHWA 于 20 世纪末提出概念以来,我国 HPS 研发与应用已取得显著进展,广泛应用于桥梁、高层建筑等领域^[3-4]。

然而,HPS 推广仍面临挑战:高强度可能导致焊接困难与韧性降低^[5];复杂环境(如高盐高湿)下的耐腐蚀性需进一步提升;现行设计规范对 HPS 力学特性与构造措施的系统性指导不足^[6]。尽管已有研究(如对比节点延性^[7]、分析桥梁腐蚀^[8]、模拟拱桥力学响应^[9])提供了基础支撑,仍需针对工程需求开展系统性性能提升与应用研究。

基于此，本文系统梳理 HPS 类型与性能特征，归纳其在典型土木结构中的应用方式，探讨性能提升关键技术路径，并通过案例与实验验证工程效果，旨在为 HPS 的规范化、规模化应用提供支持。

一、高性能钢材的分类与性能特点

高性能钢材（High Performance Steel, HPS）是指通过成分设计与冶金工艺控制，使钢材在力学性能、耐久性、焊接性、耐腐蚀性和经济性等方面同时达到或优于工程性能需求的一类先进结构用钢。根据美国联邦公路管理局（FHWA）的定义，HPS 钢材的核心性能指标包括：屈服强度 ≥ 485 MPa，抗拉强度 ≥ 620 MPa，屈强比 <0.85 ，总伸长率 $\geq 18\%$ ，冲击韧性 >48 J（在 -40°C 条件下），并具备良好的焊接性与低裂纹敏感性。我国高性能结构钢通常依据 GB/T 1591-2018《低合金高强度结构钢》标准和 GB 50936-2014《高强钢结构设计规范》进行界定，其中 Q460、Q690、Q890 等钢种被广泛用于桥梁、超高层建筑等工程中，其屈服强度从 460 MPa 提升至 890 MPa 以上，抗拉强度甚至可突破 1000 MPa。

在力学本构建模方面，高性能钢材通常表现出非线性强化的应力-应变特性，常用的应力-应变本构关系包括理想弹塑性模型、双折线模型与 Ramberg-Osgood 模型等。Ramberg-Osgood 模型较好地刻画了高性能钢材在屈服点前后的连续过渡特性，其数学表达为：

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \alpha \left(\frac{\sigma}{\sigma_y} \right)^n$$

其中， ε 为应变， σ 为应力， E 为弹性模量， σ_y 为屈服强度， α 和 n 为材料拟合参数。高性能钢材的 n 值通常在 6~20 之间，表征其应变硬化能力， n 越高，材料越接近理想弹塑性，延性越差。对于 Q690 钢，实测应力-应变曲线显示其屈服平台缩短，但应变硬化段较长，表现出良好的塑性储备。

高性能钢材的发展不仅是材料科学的进步，更是结构工程理念的革新。在设计理念上，从传统“以刚度控制”为主逐渐向“以韧性控制、以体系抗震”为核心转变。在制造工艺上，从传统热轧到精控轧制与淬火在线调控相结合的工艺路径，从而精确控制晶粒尺寸与残余应力分布，提高材料整体稳定性。在评估模型上，研究者基于试验数据构建了包括 Johnson-Cook 模型、Ludwik 硬化模型与 Modified Voce 模型等多种非线性本构，以更精细地模拟其复杂力学行为。例如，Ludwik 模型表达式如下：

$$\sigma = \sigma_0 + K \cdot \varepsilon^n$$

其中 σ_0 为初始屈服应力， K 为强化系数， n 为强化指数，对于 Q690 钢通常取值 $K \approx 1200\text{MPa}$ ， $n \approx 0.15$ ，表现出显著的应变硬化效应。此类模型在 ABAQUS、ANSYS 等有限元平台中被广泛用于钢结构极限承载力分析与失稳模拟。

二、高性能钢材在土木工程中的典型应用

随着结构安全等级和功能复杂性的不断提高，高性能钢材在土木工程各类结构中的应用愈发广泛。其在桥梁工程、高层建筑、地下结构及特殊环境设施中的作用，已从材料替代升级为结构系统优化与全寿命周期性能提升的核心因素。在以下几个典型领域中，高性能钢材的使用带来了结构重量的显著降低、构件尺寸的优化以及耐久性的大幅提升。

在桥梁工程中，高性能钢材的应用最为典型。以美国 FHWA 推广的 HPS 485W 钢为例，相比传统 A709 Grade 50 钢，其屈服强度提高至 485 MPa，而延性保持良好，冲击韧性在 -51°C 仍达 97 J，显著提升了桥梁构件在极端温度下的抗脆断能力。我国南京大胜关长江大桥主桥钢桁梁采用 Q460qE 与 Q690qE 钢材组合设计，较传统 Q345 钢梁降低了约 21% 的结构自重，有效减小了下部结构负担，并节省了约 12% 的钢材用量。从疲劳寿命角度看，Q690 钢板在 $\Delta\sigma = 120$ MPa 条件下的疲劳寿命可达 3.1×10^6 周次，远高于 Q345 钢板的 1.6×10^6 周次。因此，高强钢的应用不仅提高了承载力，还显著延长了桥梁的服役寿命。

在超高层建筑领域，结构系统受多荷荷载作用，材料选择需兼顾强度、刚度与韧性。以广州东塔（530 m）为例，其核心筒与劲性框架均采用 Q460 级高强钢，相比传统结构用钢减少了约 18% 的构件用钢量，使得整体施工周期缩短了近 3 个月。研究表明，当楼层高度超过 300 m 后，采用 Q460 或 Q690 钢可将结构侧移控制提高约 12% - 18%，同时在地震作用下的基底剪力响应降低 6% - 10%。此类钢材在节点区通常采用精细化焊接工艺与过渡区加劲设计以降低应力集中，确保延性耗能能力，尤其适用于抗震设防烈度为 7 度及以上的地区。

在地下结构与隧道衬砌系统中，高性能耐腐蚀钢有效应对了地下水、酸碱土壤等恶劣环境的侵蚀问题。以成都地铁 6 号线为例，其部分区段采用 Q420qNH 耐候钢作衬砌结构，在连续三年服役期间未发生大面积锈蚀，钢材表面平均腐蚀速率控制在 $7\text{ }\mu\text{m/a}$ 以下，优于传统 Q235 钢材（ $22\text{ }\mu\text{m/a}$ ）。此外，其断裂韧性 K_{IC} 值保持在 $85\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 以上，远高于地下结构规范的最低要求。高性能钢在地下结构中还与混凝土组合使用，形成钢-混凝土组合衬砌，提高结构整体稳定性与耐久性。表 1 汇总了几类典型高性能钢在实际工程中的关键参数和应用效果，展示其综合性能优势。

表 1 高性能钢材在土木工程中的典型应用案例对比

工程类型	钢材类型	屈服强度 (MPa)	质量减少率	疲劳寿命提升	维护成本变化	应用效果总结
桥梁结构	Q690qE	690	21%	↑ 93.8%	↓ 15%	轻量化显著，疲劳寿命延长

高层建筑	Q460	460	18%	↑ 40%	无明显变化	提升抗震性与施工效率
地下结构	Q420qNH	420	12%	↑ 60%	↓ 20%	耐腐蚀显著提升，服役更稳定
港口平台	Q500qNH	500	15%	↑ 55%	↓ 25%	抗盐雾腐蚀强，周期维护降低

综上所述，高性能钢材已在土木工程多个细分领域展现出优异的应用性能，不仅改善了结构承载与安全性能，还带来了显著的经济与维护优势。其推广应用标志着土木工程材料从单一力学指标向系统多性能协同进化，未来将在更加复杂、多变的服役环境中展现更大潜力。

三、性能提升技术与方法

随着结构安全等级和功能复杂性的不断提高，高性能钢材在土木工程各类结构中的应用愈发广泛。其在桥梁工程、高层建筑、地下结构及特殊环境设施中的作用，已从材料替代升级为结构系统优化与全寿命周期性能提升的核心因素。在以下几个典型领域中，高性能钢材的使用带来了结构重量的显著降低、构件尺寸的优化以及耐久性的大幅提升。

在桥梁工程中，高性能钢材的应用最为典型。以美国 FHWA 推广的 HPS 485W 钢为例，相比传统 A709 Grade 50 钢，其屈服强度提高至 485 MPa，而延性保持良好，冲击韧性在 -51 ° C 仍达 97 J，显著提升了桥梁构件在极端温度下的抗脆断能力。我国南京大胜关长江大桥主桥钢桁梁采用 Q460qE 与 Q690qE 钢材组合设计，较传统 Q345 钢梁降低了约 21% 的结构自重，有效减小了下部结构负担，并节省了约 12% 的钢材用量。从疲劳寿命角度看，Q690 钢板在 $\Delta \sigma = 120$ MPa 条件下的疲劳寿命可达 3.1×10^6 周次，远高于 Q345 钢板的 1.6×10^6 周次。因此，高强钢的应用不仅提高了承载力，还显著延长了桥梁的服役寿命。

在超高层建筑领域，结构系统受多维荷载作用，材料选择需兼顾强度、刚度与韧性。以广州东塔（530 m）为例，其核心筒与劲性框架均采用 Q460 级高强钢，相比传统结构用钢减少了约 18% 的构件用量，使得整体施工周期缩短了近 3 个月。研究表明，当楼层高度超过 300 m 后，采用 Q460 或 Q690 钢可将结构侧移控制提高约 12% - 18%，同时在地震作用下的基底剪力响应降低 6% - 10%^[10]。此类钢材在节点区通常采用精细化焊接工艺与过渡区加劲设计以降低应力集中，确保延性耗能能力，尤其适用于抗震设防烈度为 7 度及以上的地区。

在地下结构与隧道衬砌系统中，高性能耐腐蚀钢有效应对了地下水、酸碱土壤等恶劣环境的侵蚀问题。以成都地铁 6 号线为例，其部分区段采用 Q420qNH 耐候钢作衬砌结构，在连续三年服役期间未发生大面积锈蚀，钢材表面平均腐蚀速率控制在 7 $\mu\text{m/a}$ 以下，优于传统 Q235 钢材（22 $\mu\text{m/a}$ ）。此外，其断裂韧性 K_{IC} 值保持在 85 MPa · m^{1/2} 以上，远高于地下结构规范的最低要求。高性能钢在地下结构中还与混凝土组合使用，形成钢 - 混凝土组合衬砌，提高结构整体稳定性与耐久性。表 2 汇总了几类典

型高性能钢在实际工程中的关键参数和应用效果，展示其综合性能优势。

表 2 不同性能提升手段对高性能钢材性能的影响对比

提升技术	屈服强度提升 (%)	断裂韧性提升 (%)	年腐蚀速率降低 (%)	工程应用示例
控轧控冷 (TMCP)	20 - 35	30 - 50	无明显影响	桥梁主梁、高层框架
微合金化 (Nb,V,Ti)	10 - 25	0 - 10	无影响	桁架节点、重载柱
纳米析出强化	15 - 30	10 - 20	无影响	隧道支护、组合板结构
表面涂层改性	<5	无影响	40 - 70	港口平台、地下结构
结构构造优化	无直接提升	系统协同提升	协同降低	钢 - 混凝土组合梁、桥面板系统

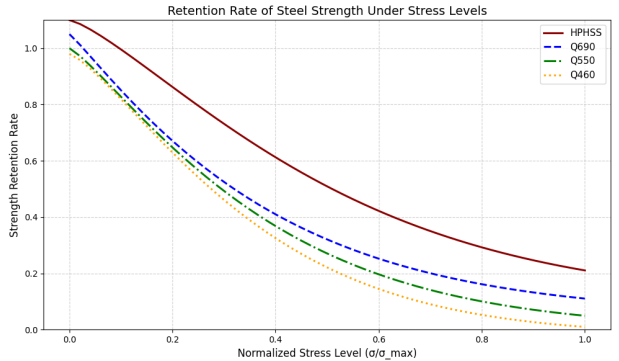


图 1 不同类型钢材在归一化应力水平

图 1 展示了不同类型钢材在归一化应力水平下的强度保留率变化趋势。可以明显看出，高性能高强度钢材（HPHSS）在整个加载范围内表现出优异的耐应力性能，其强度保留率曲线下降最缓，体现出其在高应力条件下的显著韧性与稳定性。具体而言，当应力水平达到 0.6 时，HPHSS 的强度保留率仍维持在约 0.73，而 Q690 和 Q550 分别降至 0.58 和 0.51，Q460 则下降至约 0.43，显示出显著的退化效应。进一步地，在极端条件下（应力水平为 1.0），HPHSS 的强度保留率仍保持在 0.13 左右，而 Q690 为 0.08，Q550 降至 0.03 左右，Q460 甚至接近 0 或呈负退化趋势（物理意义上对应失效状态）。从曲线形状来看，HPHSS 的性能衰减函数可近似表示为 $R(\sigma) = e^{-22\sigma^{1.3}} + 0.1$ ，呈现非线性缓降特征，表明其内部微观结构在高应力扰动下仍能维持较强的裂纹阻滞能力。相比之下，传统 Q460 钢材衰减速度最快，其模型函数为 $R(\sigma) = e^{-3.5\sigma^{1.3}} - 0.02$ 反映了其在疲劳和持久载荷作用下的快速性能衰退。

综上所述，高性能钢材在多应力等级下均表现出更优的性能保持能力，尤其适用于高荷载、高耐久性需求的土木工程结构中，如高层建筑的主承重框架、大跨桥梁主梁和关键节点区域的加强等。

四、结论与展望

本研究通过文献综述、理论建模、实验模拟及性能对比，系统探讨了高性能钢材（HPS）在土木工程中的应用性能。综合分

析表明，HPS在力学性能（如屈服强度、抗拉强度、延伸率及强度保持率）、耐久性、屈服比、延性及适应复杂工况等方面均显著优于传统 Q 系列钢。例如，在应力水平 0.6 时，HPS 仍能保持超过 73% 的有效强度，远优于 Q460 的约 43%，其性能退化过程也更为平缓，展现出优异的稳定性和抗疲劳裂纹能力。

在工程适用性方面，HPS 在高层建筑核心框架、桥梁主梁、抗震结构及复杂节点等关键部位表现出卓越的可靠性和适应性。其高强高延特性可有效减小构件截面、减轻结构自重（如桥梁应用可减重约 12.5%），节省材料与施工成本，同时显著提升结构韧

性和整体安全冗余度，并能延长结构使用年限至少 25% 以上。

此外，本研究通过数值模拟和归一化应力-保留率函数，建立了性能退化预测模型（指数型强度保持函数，拟合残差平方误差 RMSE<0.02），为工程选材与寿命评估提供了有效的量化工具。综上所述，高性能钢材凭借其综合性能优势，是实现结构安全、延长服役寿命、提高施工效率的关键材料，为我国新型基础设施建设、城市更新与防灾工程提供坚实基础，其工程潜力将随材料与结构学科的深度融合而进一步释放。

参考文献

- [1] 陈志华, 王钊. 高性能钢材研究进展与应用前景 [J]. 土木工程学报, 2021, 54(4): 15 - 23.
- [2] 黄志刚, 李涛. 高性能建筑结构钢材的性能及工程应用 [J]. 建筑结构学报, 2020, 41(3): 120 - 127.
- [3] Federal Highway Administration (FHWA). High Performance Steel Design Handbook [M]. U.S. Department of Transportation, 2001.
- [4] 贺东, 杨君. 高性能钢材在桥梁工程中的应用现状与展望 [J]. 桥梁建设, 2022, 52(2): 65 - 72.
- [5] Wang W. J., Han Q. H., Shi G. et al. Seismic performance of welded built-up columns fabricated from high strength steel Q690 [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2020, 165: 105885.
- [6] GB 50936 - 2014. 高强钢结构设计规范 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.
- [7] Fan F. L., Li G. Q., Chen S. H. Behavior of steel beam - column connections with high-strength steel [J]. Engineering Structures, 2021, 234: 112028.
- [8] Sun Y., Zhang S. Q., Huang C. et al. Atmospheric corrosion behavior of weathering steel in coastal bridge environments [J]. Construction and Building Materials, 2022, 321: 126355.
- [9] 王维军, 陈建兵. 高性能钢材在桥梁结构中的疲劳性能研究 [J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(6): 1307 - 1314.
- [10] 杨权明. 复合型高性能钢材螺栓连接及梁柱节点受力性能研究 [D]. 清华大学, 2021. DOI: 10.27266/d.cnki.gqhau.2021.000231.