

高性能钢材特点及其在建筑领域的全生命周期经济贡献研究

何孟超

贵州瑞泰实业有限公司, 贵州 六盘水
Email: 1632329244@qq.com

收稿日期: 2021年8月13日; 录用日期: 2021年9月15日; 发布日期: 2021年9月22日

摘要

为了提升建筑的安全性、经济性以及满足建筑外观的造型要求, 建筑业对于新型钢结构的性能需求也变得多样化。高性能钢材在屈服强度、抗拉强度、断后伸长率, 冲击性能、超声检测、断面收缩率等方面具有明显优势, 能满足不同应用环境下对高强、抗震、耐腐蚀、耐火耐低温性等多方面的需求。本文在经济性、绿色转型与可持续发展等方面进行分析, 并对建筑的全生命周期内货币成本、人力成本与社会效益等方面进行探讨。

关键词

高性能钢材, 经济性, 绿色转型, 可持续发展, 全生命周期, 成本

Research on Characteristics of High Performance Steel and Its Economic Contribution to the Whole Life-Cycle in the Construction Field

Mengchao He

Guizhou Ruitai Industrial Co., Ltd., Liupanshui Guizhou
Email: 1632329244@qq.com

Received: Aug. 13th, 2021; accepted: Sep. 15th, 2021; published: Sep. 22nd, 2021

Abstract

In order to improve the safety and economy of buildings and meet the modeling requirements of building appearance, the performance requirements of the construction industry for new steel structures have also become diversified. High-performance steel has obvious advantages in yield strength, tensile strength, elongation after fracture, impact performance, ultrasonic testing, and reduction of area. It can meet the requirements of high strength, earthquake resistance, corrosion resistance, fire and low-temperature resistance under different application environments and many other needs. This paper analyzes the aspects of economical efficiency, green transformation and sustainable development, and discusses the currency cost, human cost and social benefits in the whole life cycle of the building.

Keywords

High-Performance Steel, Economical Efficiency, Green Transformation, Sustainable Development, Full Life Cycle, Cost

Copyright © 2021 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. 引言

根据世界钢铁协会发布的世界钢铁统计数据, 2020 年的全球粗钢产量为 18.78 亿吨, 钢铁表观消费量为 17.72 亿吨, 而我国 2020 年粗钢产量达到 10.65 亿吨, 占全球粗钢总产量比重为 56.7% [1]。作为全球最大的钢材生产国与消费国, 我国每年仍然需要进口大量钢铁以满足国内需求, 尤其是进口数千万吨的高端钢材, 用来加工各种高端部件产品。相对于普通钢材, 高性能钢材在屈服强度、抗拉强度、断后伸长率, 冲击性能、超声检测、断面收缩率等方面具有明显优势, 能满足不同应用环境下对高强、抗震、耐蚀性、耐火耐低温性等多方面的需求, 大大提升建筑性能[2]。

近年来, 随着中国经济飞速发展, 以公路、桥梁、建筑为代表的传统基建朝着“新基建”转变。2021 年政府工作报告第一次提出了加强新型基础设施建设, 激发新消费需求、助力产业升级。新基建要求对于新型钢结构的性能需求也变得多样化, 在满足安全性、经济性以及高性能要求的同时, 还额外提出了很多规格外的性能保障[3]。工业和民用建筑行业对高性能钢材需求逐渐增大, 推动钢铁产业加大研发投入, 研发出满足各种场景下的钢材, 例如高耐震性、低屈服比的结构用钢; 与此同时, 高性能钢材将进一步提升建筑的质量, 进而满足日益增长的安全需求。建筑行业与钢材企业相辅相成, 共同推动产业升级与经济发展。

为了更好地服务于新基建需求, 推动钢铁产业技术升级, 国内外学者从不同角度对高性能钢材对建筑质量进行阐述与分析。日本材料研究院钢铁研究中心 Kaneaki Tsuzaki 教授[4]提出了一种高性能钢纤维, 通过加入混凝土能得到高强度、高断裂韧性和高延性的新型建筑材料; 日本京都大学精密工程系久保爱三教授利用从单轴拉伸和压缩试验中提取的材料特性, 对建筑行业中采用的高性能钢材进行了非线性有限元模拟, 可以预测载荷 - 位移曲线和裂纹扩展过程, 有效增强了建筑的抗弯强度[5]; 中国工程院院士、

东北大学教授王国栋团队通过在碳素钢添加微量合金元素, 能够提高钢材应对恶劣气候的能力, 具有优异的力学性能和耐久性[6]。尽管国内外学者对高性能钢材在建筑性能方面进行了广泛的研究, 但其在经济性方面的数据缺乏足够可靠的实验数据。相关分析表明, 合理控制高性能钢的比例, 可提高建筑的安全性的同时, 减少 30%左右的工程造价。

高性能钢材多用于大型复杂建筑, 建造难度高、对社会环境影响大。大多数研究主要从高强度和高性能钢结构基本性能研究、建立高强度和高性能钢材结构体系和设计理论, 以便建设更加安全可靠、经济环保的复杂建筑。然而, 单从结构性能的角度来分析高性能钢材并不能对结构建筑进行全面描述, 还应该从经济性、绿色转型与可持续发展等方面进行讨论。本文从经济贡献角度对工业和民用建筑中高性能钢材进行分析, 旨在全面的描述建筑行业与钢材企业对高性能钢材的认识。

2. 国内外高性能建筑钢材特点

自从 1856 年贝塞默法炼钢发明以来, 钢铁生产变得越来越高效和廉价, 极大地促进了基础设施和建筑技术的发展[7]。钢材广泛应用于各个行业, 尤其是在建筑业中发挥着极其重要的作用, 全世界生产的大部分钢材用于建筑业。为了提升钢结构的使用寿命, 常见的处理方法是进行合金化或表面处理。在建筑材料中, 钢材可以最大限度地减少噪音、灰尘、污染、废料和交通拥堵等现场影响, 还可以提供高效、安全、高质量和快速的施工。结构钢是建筑业中应用最广泛的钢材, 另外不锈钢和泡沫钢由于具有更好的耐腐蚀性和重量刚度比等优点, 近年来得到了广泛的应用。

目前, 大多数建筑用钢可分为三大类: 普通碳钢、低合金钢和高合金钢。普通碳钢通常是铁, 含碳量高达 2.1 wt%, 杂质残留浓度高。普通碳钢按其碳成分的范围可分为低碳钢、中碳钢和高碳钢。低碳钢的碳含量低于 0.25 wt%, 通常被称为低碳钢。这种钢因其强度、成形性、高延展性、可用性和成本而在建筑行业非常流行。普通碳钢的强度随含碳量的增加而增加, 但塑性和成形性降低。中碳钢和高碳钢的碳含量分别为 0.25~0.60 wt% 和 0.60~1.4 wt%。还有一种特殊的低碳钢被称为高强度低合金钢(HSLA), 含有铬、钼、镍、铜、钒、铌、氮和锆等合金元素, 其组合浓度低于 0.1 wt%。典型的低合金钢包括碳和合金元素[8], 如镍、铬、钼、锰、硅, 从而提高强度和韧性。高合金钢多为不锈钢, 其铬和镍含量非常高。根据碳、铬和镍的含量, 不锈钢可分为铁素体、奥氏体和马氏体不锈钢。

欧美国家几十年前已经完成了基础设施的建设, 并逐步将建筑用钢的研发方向转到新型多功能建筑钢材及其应用技术上, 利用其在设计理念、产品研发等方面整体优势提升钢材性能。例如, 抗震钢材需要在塑性变形的基础上减少地震带来的破坏, 因此要求钢材具有稳定的屈服强度。一般来说, 屈服强度 460 以上的高强钢具有足够的韧性及较高的比强度和屈强比, 还有良好的焊接性和成形性。日本研发的 SN 钢、TMCP 钢、超低屈服点钢、轻型焊接超厚 H 型钢等, 具有耐蚀、耐火、高强, 抗低温的特点, 在大型建构物中得到了大量应用, 提升了建筑质量品质、节约了资源, 并且减少了污染等。另外, 发达国家在钢结构装配式建筑方面也有了很大的发展。模块化钢结构是一种建筑行业中一种新兴技术, 用于建造质量更高、安装速度更快、施工损耗最小的建筑。部分发达国家的模块化建筑占 80%的份额。研究表明, 模块化结构的结构性能和荷载传递机制与传统的抗弯框架有很大的不同, 其整体造价远低于传统建筑模式。

我国建筑钢材品种、规格全面, 已形成生产应用完整的质量及技术体系, 为建筑及基础设施建设产业的发展奠定了良好的基础。目前, 我国建筑用钢品种有钢筋、预应力钢材、中厚板、钢管、冷弯型钢及涂镀层钢板等, 这些高性能钢材已经在建筑工程中广泛应用。建筑钢材的性能要求、性能需求指标以及相应产品标准如表 1 所示。

Table 1. Performance requirements, performance requirements indicators and corresponding product standards of construction steel**表 1.** 建筑钢材的性能要求、性能需求指标以及相应产品标准

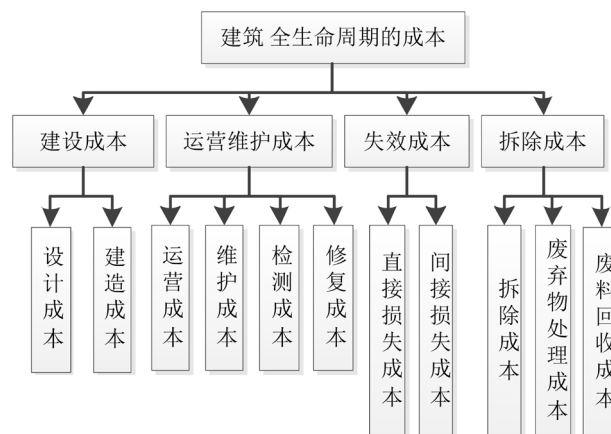
| 类别 | 性能 | 指标 | 产品标准 | |
|-------|---------|---------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------|
| 基本特征 | 高延性 | 屈强比 ≤ 0.85 伸长率 $\geq 20\%$ | GB/T 700 GB/T 19879 GB/T 1591 | |
| | 冲击韧性 | 冲击功 $\geq 34 \text{ J}$ | | |
| | 焊接性能 | $CE \leq 0.5\%$ 时 $P_{cm} \leq 0.5\%$ | GB/T 5313 | |
| | 抗层状撕裂性能 | Z15, Z25, Z35 | | |
| | 高洁净度 | P/S、夹杂 | | GB/T 19879 GB/T 1591 |
| | 加工性能 | 180 度冷弯 | | |
| 高性能特征 | 低屈服点 | LY100/LY160 | GB/T 28905 | |
| | 高韧性 | $KV \geq 70 \text{ J}$ 或低温韧性 | -- | |
| | 耐候性能 | 耐腐蚀指数 ≥ 6.0 | GB/T 4170 | |
| | 耐火性能 | 600℃下, 屈服强度降幅 ≤ 0.33 , ET | GB/T 28451 GB/T 4261 | |

3. 高性能钢材的全生命周期经济贡献

建筑领域的经济性不能简单理解成为材料成本的优化节约, 而应该从货币成本、效率与效益三方面进行分析评价, 这需要建筑全生命周期内进行多维度、多层次的论证[8]。本章将从三方面对高性能钢材的经济贡献进行分析。

3.1. 货币成本

上一章分析了国内外高性能建筑钢材特点。广义上, 高性能钢材不仅具有高性能, 也得具有良好的经济性。经济性指标是在满足建筑的结构性能的基础上实现建筑的全生命周期的最优成本费用。图 1 展示了建筑的全生命周期的成本费用, 包括建设、运营维护及废弃拆除等费用。

**Figure 1.** The cost of the whole life cycle of the building**图 1.** 建筑的全生命周期的成本费用

众所周知，高性能钢材的经济性与建筑全生命周期成本正相关，高性能钢材的成本是建筑整体成本中的一部分。然而，高性能钢材的经济性能不仅仅体现在货币成本，还包含经济效益与社会效益。

一直以来，建筑业都被认为是高污染、高能耗的行业。高性能钢材以耐蚀、耐火、高强，抗低温的特点，提升了建筑质量品质、节约了资源，并且减少了环境污染等。与此同时，高性能钢材具有较高的装配率，以及模块化设计性能，进一步增强了资源利用率，并缩短了施工时间。因此，相比传统建筑钢材，高性能钢材具有更低的资源需求与污染排放。为了便于对高性能钢材对建筑行业的经济贡献进行全面分析，参考文献[6]提出的全寿命分析模型，将经济贡献指标分解为经济、环境和社会三部分内容。

按照 GB/T 50378-2013《绿色建筑评价标准》的总体要求，建筑应该从节能、节地、节水、节材和环境保护方面将施工对环境造成的影响降低到最低，实现良好的社会效益和经济效益。高性能钢材通常具有良好的结构体系，材料利用率较高，且部分构件可拆卸更换[9]。建筑行业中的高性能钢材的资源利用主要包含在土地利用、材料利用、能源利用以及水资源利用。建筑的材料选择会影响其经济性。高性能钢材的使用会提升建设成本，但大大降低了运营维护的成本。因此，经济性能分析应该结合建筑的不同阶段的成本进行考量。

3.2. 时间与人力成本

随着建筑领域逐渐进入快节奏发展模式，以及劳动力短缺的发展形势下，建筑的开发实际运作综合成本中，时间和人力成本渐渐成为了主导因素。尤其是对于高难度的重点工程，其项目周期短、施工难度大的矛盾更为突出。为了提高建设的效率，降低开发周期，高性能钢材的使用成为大势所趋。

高效是新形势下对建筑领域更高层次的要求，一方面指高性能钢材的性能高效、结构体系及受力的高效，通过充分发挥材料的性能，有助于以最少的材料完成最优的结构；另一方面是指高性能钢材的独特模块化功能可以采用更短时间、更高效的方式实现结构施工，节约时间成本。

3.3. 高性能钢材的社会效益

高性能钢材具有强度高、延性好、易焊接、耐候、省材等优势，已逐渐在大型建筑中推广应用，但高性能钢材的经济性受到各种因素的制约与影响。例如，高性能钢材的使用可以有效降低材料的消耗，但也增加了全生命周期初始成本。对于采用耐火耐候钢材的高性能钢结构建筑，虽然能够有效减少建筑涂料的使用、降低后期维护所消耗能源与材料，但整体成本可能高于采用传统钢材的建筑成本。北京奥运会主体育场国家体育场“鸟巢”采用了屈服强度达 690 MPa 级高性能钢材，具有独特的地理区位及其巨大的影响力，其独特的建筑外观给人强大的视觉冲击和美感。因此，“鸟巢”赛后运营的定位是要实现社会性、公益性的社会效益目标，同时实现可持续性发展，其社会效应高于经济效益。

4. 结论

1) 高性能钢结构建筑的初始成本通常高于传统钢结构与现浇混凝土结构，其经济贡献不能只局限于全生命周期内的建设成本，而应结合运营维护成本、时间成本、及拆除成本。

2) 建筑领域对高性能钢材的需求推动钢铁产业加大研发的投入，研发出满足各种场景下的钢材，例如高抗震性、低屈服比的结构用钢；与此同时，高性能钢材将进一步提升建筑的质量，进而满足日益增长的物质文化需求。建筑行业与钢材企业相辅相成，共同推动产业升级与经济发展。

3) 高性能钢材能提升建筑的质量，尤其是提升了建筑的耐蚀、耐火、高强，抗震性能，从而大大降低了事故与自然灾害造成的人员伤亡和财产损失。

4) 高性能钢材使得建筑结构具有良好的绿色可持续性与可延展性，能够设计出高难度复杂大型建筑，

具有较强的经济效益与社会效益。

基金项目

贵州省重大专项课题《高性能钢筋产业化及在高墩大跨径桥梁中的应用》；贵州省工业和信息化发展专项资金计划《高强度矿山用钢的研究与开发 2016055》。

参考文献

- [1] 贾逸卿, 段红梅, 柳群义. 中国废钢资源化利用趋势: 2020~2035 年分析预测[J]. 中国矿业, 2021, 30(3): 31-36+42.
- [2] 杨婷. 全球钢铁工业发展现状及趋势[J]. 冶金管理, 2020(12): 23-28.
- [3] 施灿涛, 吴秀婷, 朱涛. 以数字基建支撑钢铁行业内涵式发展[J]. 钢铁, 2021, 122(7): 1-8.
- [4] 胡迟. 制造业转型升级最新成效的分析与对策[J]. 经济研究参考, 2015(20): 3-34.
- [5] Wang, M., Akiyama, E. and Tsuzaki, K. (2007) Effect of Hydrogen on the Fracture Behavior of High Strength Steel during Slow Strain Rate Test. *Corrosion Science*, **49**, 4081-4097. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2007.03.038>
- [6] 国际桥梁与结构工程协会. 高性能钢材在钢结构中的应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [7] 王国栋. 新一代控制轧制和控制冷却技术与创新的热轧过程[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2009, 30(7): 913-922.
- [8] 曹轲, 徐胜利, 叶堃晖, 等. 高性能钢结构建筑结构全寿命周期“三元一体化”指标体系研究[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(5): 1-10.
- [9] Husam, S. and Stefan, B. (2019) Life Cycle Input Indicators of Material Resource Use for Enhancing Sustainability Assessment Schemes of Buildings. *Journal of Building Engineering*, **21**, 230-242. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2018.10.010>