

高强度钢高温材性及构件抗火研究综述

刘兵 王卫永

(重庆大学土木工程学院, 重庆 400045)

提 要: 介绍了高强度钢的定义、优点及在实际工程中的应用, 分析了高强度结构钢构件抗火研究的必要性, 综述了国内外对于高强度结构钢的高温材性性能以及构件抗火的研究现状, 并对高强度钢结构抗火性能研究工作进行了展望。

关键词: 高强度钢; 抗火; 材料性能

1. 高强度钢的定义、优点及目前的应用

钢材作为一种建筑材料, 以其众多优点, 如强度高、自重轻、施工工期短、抗震性能好等, 在现代建筑中的应用范围越来越广。随着国内钢结构建筑的蓬勃发展, 工程所用钢材的创新, 从早期的 Q235 发展到 Q345 再到 Q360、Q390, 一直到目前的 Q420、Q460 等高强度钢材。关于高强度钢材, 国内外尚没有统一、明确的定义。澳大利亚^[1]规范定义屈服强度大于 450MPa, 美国 ASTM^[2]规定屈服强度大于 690MPa, 香港规范^[3]定义屈服强度在 460MPa~690MPa 之间, 欧洲标准^[4]规定屈服强度大于 460MPa, 我国《钢分类》^[5]规范中规定屈服强度大于等于 420MPa, 同济大学李国强教授^[6]定义屈服强度大于等于 440MPa, 抗拉强度大于等于 590MPa 的钢材, 在建筑结构中均属于高强度钢材。

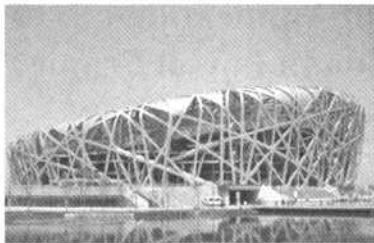


图1 我国国家体育馆的“鸟巢”



图2 国家游泳中心的“水立方”

高强度钢因其具有高的屈服强度、抗拉强度和抵抗脆性破坏的性能, 并可有效减轻结构自重, 提高结构的抗震性能, 逐渐引起了建筑行业的关注, 相关产品也加紧开发和大范围推广使用^[7-8]。例如, 2004 年修建的北京新保利大厦工程大部分框架柱采用了美国标准 W14 系列的热轧 H 型钢, 钢材屈服强度 420MPa, 抗拉强度 505~660MPa, 物理及力学性能相当于 Q420-C 钢材^[9]。

在最近的几年, 国内又有一批钢结构工程采用高强度结构钢。如北京奥运会主体育场

馆“鸟巢”使用的是国产 Q460E—Z35 钢，最大板厚 110mm，总用钢量高达 4.2 万吨^[10]，如图 1 所示；如国家游泳中心“水立方”工程使用了新型 Q420C 高强厚钢板^[11]，如图 2 所示；又如中央电视台新台址主楼使用了 Q420D—Z25、Q460E—Z35 级别的高强度钢，主体结构总用钢净重约为 12.6 万吨^[12]；此外，在我国电力工程方面，电网输电线路铁塔钢材也开始采用 Q420 和 Q460 高强度钢材^[13-14]。

在国外，高强度钢在多个实际工程中得到应用，获得了良好的效果。例如，位于德国柏林的索尼中心大楼(Sony Center) 屋顶桁架采用了 S460 和 S690 高强度钢材(屈服强度标准值分别为 460MPa 和 690MPa)，有效减小了构件截面，降低结构自重。如图 3 所示。



图 3 德国柏林索尼中心大楼图



图 4 澳大利亚悉尼星城饭店(Star City)



图 5 日本横滨 Landmark Tower 大厦

位于澳大利亚悉尼的星城饭店(Star City)采用了屈服强度为 650MPa 和 690MPa 的钢材，以及悉尼中心区世界广场(World Square)的 Latitude 大厦，在转换层的钢结构中，采用了 16mm 厚的 Bisplate80(690MPa) 钢板，以减小结构重量。如图 4 所示。

日本横滨的 Landmark Tower 大厦，其 I 形截面柱采用了屈服强度为 600MPa 钢材^[15]。可见高强度钢的应用领域在逐步扩大中，从原先的汽车、船舶、桥梁、压力容器、锅炉等过渡到建筑结构上的广泛应用，如图 5 所示。

2. 高强钢结构抗火研究的必要性

钢材虽为非燃烧材料，但它耐热不耐火，温度为 400℃时，钢材的屈服强度将降至室

温下强度的一半, 温度达到 600°C 时, 基本丧失全部的强度和刚度^[16]。根据理论分析及试验结果^[17], 钢结构耐火性能差的主要原因有: (1) 在火灾高温作用下, 由于其内部晶格结构发生变化, 强度、弹性模量等基本力学性能随温度升高降低明显; (2) 钢构件多为薄壁状, 截面系数大, 从火场吸收热量多, 火灾中升温快; (3) 钢材的导热系数大, 截面温度均匀分布, 火更容易损伤其内部材料。

当建筑采用无防火保护措施的钢结构时, 其耐火极限仅为 $10\text{min}\sim 20\text{min}$, 一旦发生火灾, 结构非常容易遭到破坏甚至倒塌, 如图 6、7 所示:



图 6 火灾后的钢结构工业厂房



图 7 火灾后倒塌的钢屋架

国内外, 火灾中钢结构被烧毁、倒塌的事故不胜枚举。例如^[18], 1996 年北京市环岛家具城发生火灾, 钢结构发生整体倒塌; 2001 年“9·11”事件中, 纽约世贸中心两座 110 层、411 米高的钢结构大楼因飞机撞击后发生的火灾而导致结构倒塌, 造成数千人伤亡。2003 年上海大众汽车制动器厂发生火灾, 造成部分钢结构厂房倒塌, 整个大众汽车的生产深受影响。

高强度钢作为钢材的一种, 耐火性能与普通钢相似, 在火灾下非常容易破坏, 因此研究高强度钢构件的受火性能具有重要的理论意义和工程应用价值。

3. 高强度钢材的高温材性性能研究现状

钢材的高温材性性能主要有两个方面: ①高温下钢材的物理性能, 包括热膨胀系数、热传导系数、比热、密度等; ②高温下钢材的力学性能, 包括强度(屈服强度和极限强度)、弹性模量、应力-应变本构关系、松弛与蠕变效应等。

1) 国外研究现状

由于早期的高强度钢材主要用于制作高强度螺栓等连接件, 对高温下的材性试验研究一般针对高强度螺栓进行。

1977-1982 年, 日本的小久保勋、田中淳夫等对 F10T 级高强度螺栓进行了高温材性试验, 得到了 F10T 级螺栓的高温应力-应变关系曲线^[6]。

1995 年, 英国 Kirby^[20]对 8.8 级高强度螺栓进行了高温下拉伸和双剪材性试验, 试验

的最高温度为 800℃，试验还比较了螺母材料对整个螺栓受力的影响。

2001 年, Theodorou 对 8.8 级螺栓用钢进行了高温性能试验, 得到了 8.8 级螺栓用钢的高温应力-应变关系曲线, 以及试件的破坏情况^[6]。

2) 国内研究现状

2001 年, 同济大学的李国强教授、蒋首超博士等^[21]对国内 10.9 级高强度螺栓常用 20MnTiB 钢进行了研究, 提出了高温下钢材的屈服强度、极限强度、弹性模量等力学性能模型。

试验的屈服强度为名义应变为 0.2%时对应的应力值, 屈服强度 f_y 及极限强度 f_u 的统计计算公式分别见式 (1) (2):

$$\frac{f_{yT}}{f_y} = 4 \times 10^{-9} T^3 - 6 \times 10^{-6} T^2 + 0.00117 T + 0.9603 \quad (1)$$

$$\frac{f_{uT}}{f_u} = -2 \times 10^{-6} T^2 + 7 \times 10^{-5} T + 1.0473 \quad (2)$$

式中 T 表示温度 (°C), 下标 T 表示高温量值。屈服强度、极限强度统计计算公式与试验值对比见图 8、9。

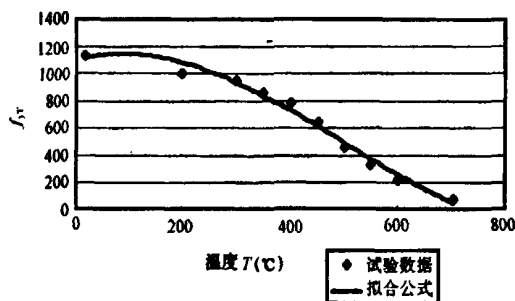


图 8 屈服强度计算公式与试验值对比

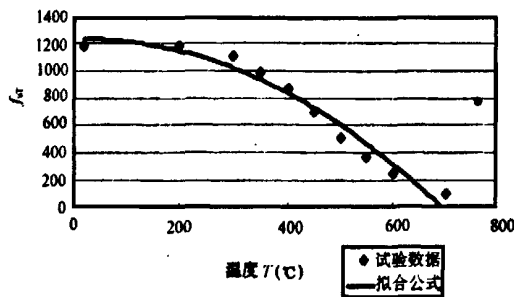


图 9 极限强度计算公式与试验值对比

高温下 20MnTiB 钢材弹性模量 E 的统计数据拟合的计算公式如下:

$$\frac{E_T}{E} = 6 \times 10^{-9} T^3 - 8 \times 10^{-6} T^2 + 0.0016 T + 0.9433 \quad (3)$$

另外, 中国人民武装警察部队学院屈立军^[22]教授对国产 Q420 高强度钢材高温下的强度性能进行了试验研究, 并进行了恒载升温 and 恒温加载两种试验的对比, 结果显示恒载升温比恒温加载的钢材强度要小。

近年来, 高强度钢材在结构上的广泛使用, 已经有人开始对高强度钢材高温材性进行研究, 以便给高强度钢构件及整体结构的抗火设计提供一定的基础数据。

Chen^[23]对高强度钢 BISPLATE 80 (相当于 ASTM A 514, EN 10137-2 Grade S690Q, 和 JISG3128) 的进行了高温材性试验, 试验结果得出的高强度钢弹性模量 and 对应残余应变为 0.2%时的屈服强度, 并发现高强度钢和普通钢的弹性模量 and 屈服强度在 22℃~540℃之间非常相似, 温度超过 540℃之后两者的差别较大。最后, 根据试验结果, Chen 给出了一组拟合公式, 如下:

(1) 高强度钢高温下屈服强度:

$$\frac{f_{yT}}{f_y} = a - \frac{(T-b)^n}{c} \quad (4)$$

式中: f_{yT} 为温度 T °C 时高强度钢材的屈服强度, f_y 为常温下高强度钢的屈服强度。参数 a, b, c, n 的取值见表 1。

表 1 屈服强度公式中参数取值表

温度	$350 \leq T < 650$	$22 \leq T < 350$	$650 \leq T < 1000$
a	1	0.88	0.45
b	22	300	650
c	140	285000	13
n	0.5	2	0.3

(2) 高强度钢高温下弹性模量:

$$\frac{E_T}{E} = 1.0 - \frac{T-22}{978} \quad (5)$$

式中: E_T 为温度 T °C 时高强度钢材的弹性模量, E 为常温下高强度钢的弹性模量。

4. 高强度钢构件抗火性能研究现状

目前国内外对高强度钢构件的抗火性能的研究还不多, 还未发现对高强度钢梁, 节点等构件的抗火性能研究的文献。

Chen 和 Ben^[24]对高温下高强度箱型和 I 字型钢柱的性能和设计进行了有限元分析, 考虑了钢柱的初始几何缺陷, 并将有限元分析结果和美国、欧洲、澳大利亚规范得出的热轧钢柱在高温下的承载力结果进行了比较, 结果发现, 采用美国和欧洲规范计算得出的高强度钢柱的承载力结果偏于保守。

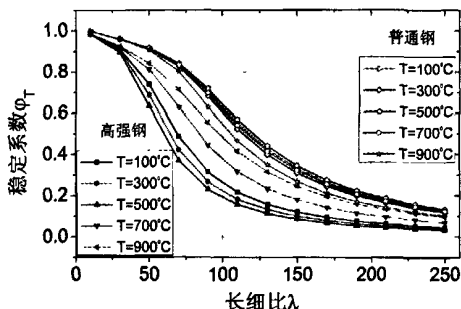


图 10 高强度钢和普通结构钢高温下稳定系数的比较

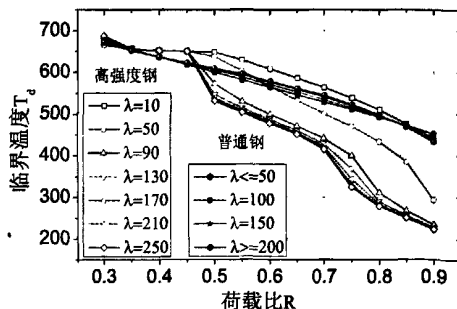


图 11 高强度钢和普通钢轴心受力构件的临界温度

王卫永等^[25]引入了Chen对高强度钢 (BISPLATE 80) 高温下的力学性能参数, 推导了高强度钢轴心受力构件在高温下的临界应力, 得到了其整体稳定系数与临界温度, 并将高强度钢和普通钢轴心受力构件在高温下的稳定系数和临界温度进行了对比, 见图10、11。结

果表明:普通钢轴心受力构件高温下的整体稳定系数和临界温度不适用于高强度钢轴心受力构件,高强度钢轴心受力构件整体稳定系数比普通钢低。此外,还使用有限元方法对本文给出的高强度钢轴心受力构件的整体稳定系数进行了验证,二者得出的结果吻合较好。

5. 结论与展望

随着经济的繁荣增长及制作加工工艺的不断进步,高强度结构钢以其优越的性能得到了越来越多的青睐,被广泛地应用于建筑结构,并且多数的高强度建筑结构都是相当浩大的工程,若该类结构发生火灾,后果不堪设想,研究高强度钢构件的抗火性能具有重要的理论意义和工程应用价值。

目前国内只有对个别高强度钢材的高温材性性能参数有研究,对于高强度钢材基本构件的抗火性能,约束构件的抗火性能,乃至高强度钢整体结构的抗火性能仍无人涉及。因此,急需对国内高强度结构钢的高温性能进行全面研究,对高强度钢材基本构件、整体构件以及节点等的抗火性能进行研究,并得出简易适用的方法用来指导高强度钢所制作结构的抗火设计。

参考文献

- [1] Australia Standards (AS). (1998). 'Steel structures', AS4100:1998, Sydney, Australia.
- [2] American Society for Testing and Materials (ASTM). Selected ASTM standards for structural steel fabrication. 1997.
- [3] Hong Kong Buildings Department. (2005). Code of practice for the structural use of steel, The Government of the Hong Kong Special Administrative Region, Kowloon, Hong Kong.
- [4] European Committee for Standardization, ENV 1993-1-2, Eurocode 3, Design of Steel Structures, Part 1.1 General rules and rules for buildings.
- [5] 《钢分类》(GB/T 13304-2008).北京:中国标准出版社,2008.
- [6] 李国强,韩林海,楼国彪,蒋首超著. 钢结构及钢-混凝土组合结构抗火设计[M], 北京:中国建筑工业出版社,2006.
- [7] Bjorhovde, R. Development and use of high performance steel [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2004, 60(3-5):393-400.
- [8] Miki C, Homma K, Tominaga T. High strength and high performance steels and their use in bridge structures [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2002, 58(1): 3-20.
- [9] 尹华钢,李志强,刘晓华,侯军祥,黄咏政. 北京新保利大厦结构抗震设计[J]. 建筑结构,2007,37(4):1-5.
- [10] 黄明鑫,刘子祥,戴为志,林观志,俞荣华,刘中华. 国家体育场“鸟巢”钢结构工程加工与安装关键技术[J]. 工业建筑,2007,37(5):73-76.
- [11] 万荣涛,肖璇,杨弘生,王晓峰. 厚钢板的低温焊接技术在国家游泳中心工程中的应用[J]. 焊接技术,2008,37(3):18-20.
- [12] 陈振明,张耀林,彭明祥,张琨. 国产高强钢及厚板在央视新台址主楼建筑中的应用[J]. 钢结构,

2009,24(2):34-38.

- [13] 韩钰,徐德录,杨建平,陈玉成,李茂华. Q420 高强钢在特高压输电工程中的应用研究[J]. 电力建设,2009,30(4):33-35.
- [14] 李正良,刘红军,张东英,李茂华. Q469 高强钢在 1000KV 杆塔的应用[J]. 电网技术,2008,32(24):1-5.
- [15] 施刚,石永久,王元清. 超高强度钢材钢结构的工程应用[J]. 建筑钢结构进展,2008,10(4):32-38.
- [16] 李国强. 现代钢结构抗火设计方法[J]. 消防科学与技术,2002,1(1):8-11.
- [17] 屈立军,李焕群. 我国钢结构耐火设计方法评述[J]. 武警学院学报,2005,21(1):35-37.
- [18] 李国强. 尽快编制钢结构抗火设计国标[J]. 建筑视界,2004,24(1):53.
- [20] Kirby,B.R. The behavior of high-strength grade 8.8 bolts in fire[J]. Journal of Constructional Steel Research, 1995,33(1):3-38.
- [21] 李国强,李明菲,殷颖智,蒋首超. 高温下高强度螺栓 20MnTiB 钢的材料性能试验研究[J]. 土木工程学报,2001,5(34):100-104.
- [22] 屈立军,李焕群. Q420 钢材高温强度试验研究[J]. 消防科学与技术,2004,3(23):223-225.
- [23] Chen J, Young B, Uy B. Behaviour of High Strength Structural Steel at Elevated Temperatures [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE 2006,132(12):1948-54.
- [24] Ju Chen, Ben Young. Design of high strength steel columns at elevated temperatures[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2008,64(6): 689-703.
- [25] 王卫永,李国强,戴国欣. 轴心受压高强度钢构件抗火性能研究[J]. 中国科技论文在线 (<http://www.paper.edu.cn>). 2010-01-13.