

高性能结构钢材应用技术与进展*

石永久 余香林 班慧勇

(清华大学土木工程系, 北京 100084)

摘要:具有高强度、高延性、高韧性、强可焊性、强耐候性、强抗火性等优越材料性能的高性能结构钢材,在建筑和桥梁钢结构中具有广阔的应用前景。高效和合理应用高性能结构钢材,可以大幅度节省钢材和防护涂装,降低制作加工和运输安装成本,减少焊接工作量和碳排放,从而降低钢结构的全生命周期运维成本。重点讨论了高强度钢材、超高强度钢材、耐火钢材、耐候钢材等高性能结构钢材的发展现状,总结了国内外现行建筑和桥梁钢结构技术标准体系中对应用高强度钢材的相关规定,并结合工程应用案例分析了 690 MPa 及以上超高强度钢材的优势,提出了研发超高强度钢材的结构体系、制定相应结构设计和施工技术标准的建议。

从材料层面提高钢结构抗火和耐腐蚀性能是高性能钢材优势的综合体现,还总结了在桥梁钢结构中应用耐候钢和建筑钢结构中应用耐火钢的发展趋势,创新提出了构建“耐火钢+混凝土+膨胀薄涂料”多重(SCI)抗火结构体系的钢结构防火设计新理念,为实现免防火涂装或少防火涂装的耐火钢结构体系提供了新的途径,建议了耐火钢 SCI 结构体系的火灾安全评价方法。

在建筑和桥梁结构体系中应用高性能钢材是钢结构行业的发展方向,是实现全生命周期绿色低碳、安全适用的高性能钢结构体系推广应用的关键举措,同时应研发配套的焊接和螺栓材料、制作安装工艺、设计和技术标准,助力实现高质量发展战略目标。

关键词:高性能钢材;高强度和超高强度结构钢材;耐火钢和耐候钢;钢结构抗火体系

1 概述

建造全生命周期绿色低碳、安全耐久的建筑和桥梁钢结构是实现经济社会绿色发展、高质量发展国家战略的重要举措。面对建筑和桥梁钢结构可能遇到的地震、台风、火灾、爆炸、锈蚀等自然灾害,大力推广应用高性能结构钢材(High Performance Steel)是有效提升钢结构全生命周期抗灾能力、实现绿色低碳的关键技术手段。以钢板或型钢形式轧制生产的高性能结构钢产品具有高强度、高延性、高韧性、强可焊性、强耐候性、强抗火性等优越的材料性能^[1]。在建筑和桥梁钢结构中高效和合理应用高性能结构钢材,可以大幅度减少钢材用量和防护涂装用量,降低制作加工和运输安装成本,减少焊接工作量和碳排放量,从而降低全生命周期的运维成本^[2-3]。高性能结构钢材可以是单项高性能(如高强度钢材、耐候 W 钢材、耐火 FR 钢材、低屈服点 LY 钢材)或综合高性能(如耐火耐候 FRW 钢、高建 GJ

钢、高强韧性抗震钢、抗震耐蚀耐火钢等)。

在建筑和桥梁结构中推广应用高性能结构钢材是近年来城乡基础设施建设行业研发和应用的重点任务。2016 年 7 月,交通运输部发布的《关于推进公路钢结构桥梁建设的指导意见》提出了“鼓励择优选用钢结构桥梁,环境条件适合的项目推广使用耐候钢”的要求。2020 年 8 月,住建部等九部门联合印发的《关于加快新型建筑工业化发展的若干意见》中提出“加大热轧 H 型钢、耐候钢和耐火钢应用,推动钢结构建筑关键技术和相关产业全面发展”。2023 年 8 月,工业和信息化部等七部门联合印发的《钢铁行业稳增长工作方案》要求在桥梁、地下管廊、地下通道、海洋结构、装配式建筑等领域积

* 国家自然科学基金项目(52078276)。

第一作者:石永久,博士,教授,主要从事钢结构和钢-混凝土组合结构研究。

Email:shiyj@tsinghua.edu.cn

收稿日期:2024-07-17

极推广应用钢结构,加强热轧 H 型钢推广应用,推进耐候钢、耐火钢示范应用。

冶金和钢铁行业结合“十三五”国家重点研发计划新开发出高层及超高层建筑用 460 MPa 级和 690 MPa 级高强抗震耐蚀耐火建筑结构用高性能钢板、型钢及其配套焊接材料与工艺,契合了我国建筑结构采用高性能钢的材料发展需求,同时开发了 420 MPa 级和 690 MPa 级高强高性能桥梁用钢和配套焊接与螺栓连接等关键技术,为桥梁领域推广应用高性能钢材提供了材料基础条件。

“十三五”国家重点研发计划“高性能建筑结构钢材应用关键技术与示范”对高强结构钢、耐火钢、耐候钢、不锈钢、高效截面型钢、纵向变截面钢板、轧制金属复合板、高性能大直径高强耐候索及配套的连接材料在多高层和大跨空间建筑领域的推广应用进行了系统研究,建立了材料、构件、连接节点和结构体系的性能指标和设计方法,全方位展示了高性能建筑结构钢材的特色优势,进一步推动了高性能建筑结构钢材的工程应用。

当前高性能结构钢材的产品研发和工程应用已经进入了新的发展时期,应用高性能结构钢材的主要目的不是全面替代普通低合金钢,而是应用于普通低合金钢难以满足建筑功能和设计要求之处,或综合效能低的钢构件或结构体系的局部。合理的钢结构体系应是普通低合金钢和高性能钢材的协同混用或并用,以充分发挥各自的经济技术优势,实现钢结构体系的综合效能优化。目前高性能结构钢材的研究和应用关键技术之一是发展高强度和超高强度结构钢、耐火耐候结构钢、高强抗震耐蚀耐火钢等构建的高性能结构体系。此外,兼具高性能与低成本的双金属复合钢材等新型高性能金属材料也得到了学术界和工业界的广泛关注。

2 高强度和超高强度结构钢材

在工程结构领域,一般将钢材屈服强度等级达到 460~690 MPa 的建筑和桥梁钢结构用钢称为高强度结构钢材^[2],690 MPa 及以上的建筑和桥梁钢结构用钢称为超高强度结构钢材。

高强度结构钢材的传统应用领域主要是工程机械、起重设备、航空航天器等。近 10 年来高强度结构钢材在建筑和桥梁工程中的应用得到了长足的进展,建筑和桥梁结构中采用高强度钢材可大幅度降低钢板厚度和钢结构自重,减少焊接工作量和防护涂装用量,易于实现更大尺寸构件的整体制作、运输

和现场安装。

现行国家标准 GB/T 1591—2018《低合金高强度结构钢》、GB/T 19879—2023《建筑结构用钢板》、GB/T 714—2015《桥梁结构钢》等结构钢材技术标准所覆盖的钢材牌号均达到了 690 MPa 级,为高强度结构钢材在建筑和桥梁工程中的应用奠定了材料技术基础。

高强度钢材在强度增加的同时,屈强比增大、伸长率下降,应力-应变曲线不再有屈服平台。在建筑和桥梁钢结构体系中,需要从展示钢材强度高、钢板厚度小的优势,并避免塑性低的劣势角度,研究和应用高强度结构钢材^[2]。可发挥高强度钢材优势的构件或结构部位包括各类钢结构的受拉板件、大跨结构的受拉杆件、高层建筑的厚板构件等,以利用钢材弹性指标高为基准的钢构件和钢结构更是应用高强度钢材的主要场景。混合强度等级的钢梁和钢桁架是发挥高强度钢材优势的主要场景,例如梁(桁架)结构的受拉翼缘(弦杆)采用高强度钢材,腹板(腹杆)采用普通强度钢材,受压翼缘(弦杆)或桥面板采用普通强度钢材等。对于抗震性能要求比较高的建筑和桥梁结构应采用性能化抗震设计方法,应把高强度钢材应用在地震作用下不会发生塑性变形的结构部位和节点区。

在对高强度结构钢材应用技术的大量研究和示范基础上,我国的 GB 50017—2017《钢结构设计标准》对 Q460 级钢材的结构设计和应用做出了明确规定,带动了 Q460 级钢材在建筑钢结构中的大量工程应用。通过对国产 Q460~Q690 级高强度结构钢材的设计强度指标、焊接构件截面残余应力分布、连接和节点承载性能、基本构件的整体稳定和局部稳定性能的多年系统研究和工程实践^[2],2020 年行业标准 JGJ/T 483—2020《高强钢结构设计标准》正式颁布和实施,为建筑钢结构领域广泛应用 Q460~Q690 级高强度结构钢材提供了科学完整的设计依据。

钢铁冶炼行业不断开发新技术、新工艺,有力保证了建筑和桥梁用高性能钢材的稳定性能;同时,在承载性能、抗脆性断裂、疲劳耐久性方面的基础研究也取得了重要突破。TB 10091—2017《铁路桥梁钢结构设计规范》对 Q500q 级钢材的桥梁结构设计和应用做出了规定,Q500qE 级钢材在沪苏通长江大桥中的应用,以及 Q690q 级钢材在汉江湾桥中的应用,标志着我国的钢桥建设进入了应用高强度钢材的时代。

港澳特别行政区的研发人员结合欧洲钢结构技术标准的设计和焊接质量要求,对 690 级钢材依据欧盟标准所设计的材料、连接和构件的基本力学性能和焊接工艺进行了深入探索^[4],将国产 690 级钢材成功应用于香港和澳门特区的大跨桥梁结构、大跨度体育场馆屋盖结构。2022 年建成通车的香港将军澳拱桥跨度 200 m,采用国产 690 钢材后结构自重大幅度下降。大桥采用了“内地制造、香港安装”的建设模式,双拱钢桥在江苏南通等地整体预制,经过海上长途运输运抵香港。在港澳地区成功实践了无需使用大型起重机船进行钢桥的整体加工、整体运输、整体安装^[5],大幅度提高了施工效率,彰显了高强度结构钢材的性能优势,为落实国产高强度钢材产品、技术“走出去”和“一带一路”倡议提供了工程实践典范。

高强度结构钢材的优势在越来越多的绿色低碳、安全适用的建筑和桥梁钢结构中得到了体现,激励了行业进一步探索更高强度的结构钢材在建筑和桥梁领域的应用基础性研究需求。2022 年欧盟国家颁布了第二代欧洲钢结构设计标准 EN 1993-1-1:2022 *Eurocode 3-Design of Steel Structures-Part 1-1: General Rules and Rules for Building*^[6],将钢结构建筑和桥梁的钢材牌号延伸到了 S690 级。即将颁布的 EN 1993-1-12: *Eurocode 3-Design of Steel Structures-Part 1-12: Additional Rules for Steel Grades up to S960*,将钢结构的钢材牌号进一步拓展到了 S960 级^[7]。新一代欧盟钢结构技术标准的颁布和实施,标志着欧洲的建筑和桥梁钢结构用钢的强度等级进入了 690~960 MPa 级超高强度阶段,同时实现了欧洲结构钢材技术标准(EN 10025)与欧洲钢结构设计标准(EN 1993)在钢材牌号上的全面协调统一,即按现行欧洲结构钢材技术标准(EN 10025)生产的全部钢材牌号(S235~S960)均可以按欧洲钢结构设计标准(EN 1993)直接设计和应用于建筑和桥梁工程。

我国的 GB/T 16270—2009《高强度结构用调质钢板》亦对 Q690~Q960 级调质钢的性能指标要求做出了规定。目前 Q960 级高强度调质钢材主要应用于起重机、煤矿机械、运输机等大型工程设备。近年来,国内外开始研究其在建筑和桥梁结构领域的应用技术,包括材料的常温和高温力学性能、低温冲击韧性、以及高强度调质钢材料的焊接工艺、焊接接头的组织和力学性能、焊接截面的残余应力分布、基本构件的整体稳定性和局部稳定性、以及连接和节

点的常温和高温承载力。调质钢是通过热处理的方式来实现细化粒晶组织,从而提高钢材强度和韧性,但是在焊接过程中会明显改变热影响区的金相组织和力学性能,需要研发专门的焊接工艺,以减少焊接过程对母材性能的影响。在对超高强度结构钢材基本构件和连接性能充分研究的基础上,应进一步研发超高强度结构钢材结构体系,制定相应的结构设计和施工技术标准,指导超高强度结构钢材在建筑和桥梁结构中的推广应用。

欧洲结构钢材技术标准 EN 10025-6:2019^[8]规定的高强度钢材和超高强度钢材主要是按淬火和回火的调质工艺供货,例如 S690Q, S960QL,并保证不同的低温冲击韧性值。

香港理工大学通过大量试验研究表明^[9],必须对高强钢和超高强钢的焊接和切割热输入严格控制,明确了焊接 Q960 调质钢时热输入能量应控制在 1.0~2.0 kJ/mm 范围内,可保证焊接过程避免对焊接截面承载力的影响。香港北部地区的基础设施建设项目中,正在按照欧盟钢结构技术标准设计和建造大跨人行钢桥,直接采用了国产 960 级钢材,大幅度减轻了桥梁的自重,降低了运输、吊装成本,香港理工大学和清华大学在 960 级结构钢材工程应用的研究成果为两座人行桥的建设提供了关键技术依据。

超高强度钢材在军用桥梁结构中体现了其独特的优势。军用机动保障桥梁要求承载强度高、结构自重轻,但对桥梁的刚度和变形要求低,正是发挥超高强度结构钢材优势的应用场景。瑞典建造的 48 m 跨军用机动保障桥^[10],采用 S960 和 S1100 超高强度钢材预制,实现了桥梁结构的运输高度轻量化、安装灵活机动和快速化,在 90 min 内就可以完成桥梁的搭建和架设,无需大型运输和吊装机械,体现了突出的军事应用价值。

3 耐火和耐候结构钢材

火灾安全性和腐蚀耐久性是建筑和桥梁钢结构面临的偶然和长期灾害环境。建筑和桥梁钢结构的常规抗火、耐蚀技术手段是采用涂装防护或包覆隔离的方式,以避免或减轻钢结构本身受到的火灾高温作用或(电)化学侵蚀作用。然而,大量的涂装防护难以实现与钢结构本身具有同等寿命的耐久性,需要对防护涂装进行定期检测评价和维护修复。但是在很多建筑钢结构中,涂装防护已成为隐蔽工程,难以准确检测涂装的损伤和退化状态,维护修复工

作困难重重。因此,迫切需要从结构钢材材料层面提高钢结构体系自身的抗高温、耐锈蚀问题,使其实现无需涂装防护就能具备较高的抗火和长期的防锈能力。为此,冶金行业相继研发了具有耐腐蚀性能的结构用耐候钢(Weathering Steel)和具有耐高温性能的结构用耐火钢(Fire-Resistant Steel)。

采用耐火、耐候钢的免防护涂装钢结构,不仅降低了钢结构的防腐和防火涂装费用和维护成本,而且使得全生命周期的运维过程更加绿色低碳环保,并可有效提高防火和防腐的安全性和延长使用寿命,在钢结构住宅、立体车库、大跨空间建筑等领域具有巨大的推广潜力,免防护涂装的耐候钢桥可大幅度降低桥梁结构的后期维护投入和成本。

3.1 结构用耐候钢

耐候钢是通过在普通钢中添加适量的 Cu、P、Cr、Ni 等合金元素形成的结构钢材。耐候钢材表面在自然环境下形成锈色、稳定、致密的氧化层,可阻碍大气中的氧气和水分子向钢材基体内部渗入,从而保护了锈层下面的基体,以延缓或阻止其进一步腐蚀。目前国际上一般采用美国 ASTM G101 标准来评价结构钢材的耐候性能^[11],根据钢材的化学成分计算其耐候指数 I :

$$I = 26.01(\%Cu) + 3.88(\%Ni) + 1.20(\%Cr) + 1.49(\%Si) + 17.28(\%P) - 7.29(\%Cu)(\%Ni) - 9.10(\%Ni)(\%P) - 33.39(\%Cu)^2 \quad (1)$$

耐候指数 I 大于 6.0 的结构钢材称为耐候钢。耐候钢具有优良的耐大气腐蚀性能,其耐腐蚀能力为普通结构钢的 2~5 倍,且使用时间愈长,耐蚀作用愈突出。耐候钢免涂装钢结构根据不同环境等级只需预留 0.5~1.5 mm 的腐蚀余量即可满足耐久性要求^[12]。现行国家标准 GB/T 714—2015《桥梁用结构钢》规定了 Q345qNH~Q550qNH 六个强度等级桥梁用耐候钢的化学成分要求。欧洲结构钢材技术标准 EN 10025-5:2019 规定了 S235、S355、S420 和 S460 四个强度等级耐候钢的性能指标要求^[13]。美国桥梁用钢技术标准 ASTM A709/A709M-21 规定的高性能桥梁用耐候钢(耐候指数 $I \geq 6.0$)包括 HPS50W、HPS70W 和 HPS100W 三个强度等级^[14],相当于 345 MPa、485 MPa 和 690 MPa 级钢材。耐候钢除了优越的耐候性能外,其抗冲击、耐疲劳等性能亦明显优于普通桥梁结构钢。

桥梁工程是耐候钢的主要应用领域,对于位置偏远、地形复杂、维护困难的高海拔山区的钢桥,耐候钢的应用更能体现其独特优势。1964 年美国首

次将耐候钢应用于钢结构桥梁,过去 50 年美国已建造了 1 万多座免涂装耐候钢公路桥,且有多座桥梁采用了 HPS100W 设计和建造^[15]。国际上越来越多的钢桥正广泛应用耐候钢,日本的耐候钢桥约占全部钢桥的 20%,加拿大在新建的钢桥中有 90% 使用了耐候钢^[12]。

我国对免涂装高耐候钢的桥梁应用技术进行了长期的系统研发。针对焊材力学性能、耐候性与母材匹配的要求、螺栓的耐候性满足免涂装使用要求进行关键技术攻关,制定了 GB/T 43151—2023《钢结构用耐候钢高强度螺栓连接副》技术标准,为在桥梁建设领域推广应用免涂装耐候钢提供了依据,越来越多的桥梁建设开始采用免涂装耐候钢。

2020 年建成的拉林铁路藏木雅鲁藏布江特大桥,位于海拔 3 100 m 的高原地区,为跨径 430 m 的钢管拱桥,是国内首座大体量免涂装耐候钢桥^[16],全桥用钢量 1.28 万 t,钢材材质为 Q420qENH 和 Q345qENH,采用了 12 万余套 M30 耐候钢高强度螺栓进行连接安装。2021 年 4 月通车的福州市新洪塘大桥耐候钢使用量达到了 2.4 万 t。同年 6 月,大跨度免涂装耐候钢公路桥——怀来大桥也正式通车运行。

免涂装耐候钢作为绿色建筑材料成为近期关注的热点。北京冬奥场馆“国家雪车雪橇中心”和国家高山滑雪中心项目位于严寒地区,均采用了 Q355NHD 耐候钢作为主要结构用钢^[17],成功实践了北京冬奥会“绿色、共享、开放、廉洁”的办奥理念。西北的高原沙漠地区太阳辐射强烈,为光伏发电提供了得天独厚的条件,但是也为暴露在复杂多变自然环境中的光伏支架建设和维护带来了难度和挑战。新能源行业从减少环境污染、降低碳排放、推动光伏行业更加绿色发展的角度,也开始积极采用免涂装耐候钢建造光伏支架^[18]。

3.2 结构用耐火钢

普通结构钢材的强度和弹性模量随着温度的升高而迅速下降,一般无保护的钢构件耐火极限仅为 15 min。通过在钢材中添加适量 Cr、Mo 和 Nb 等合金元素,在提高钢材的高温剩余强度的同时,常温性能亦不低于普通结构钢材,这类钢材称为耐火钢。其直观判定是:当钢材的温度达到 600 ℃时,剩余屈服强度($f_{0.2\%}$)不低于室温屈服强度的 2/3。20 世纪 80 年代国际上开始研发和应用耐火结构钢材,以解决普通钢材抗火性能不足的问题^[19]。采用耐火钢的钢结构可无防火涂装或大幅度减少防火涂装,比

普通结构钢材具有更长的耐火极限和更强的防火抗坍塌能力,能够有效延缓结构或构件在火灾与荷载共同作用下的失效破坏。现行国家标准 GB/T 28415—2023《耐火结构用钢板和钢带》对 Q235FR~Q690FR 耐火钢的性能指标做出了详细规定。美国 ASTM A1077/A1077M-21 规定的建筑用耐火钢包括了 250 MPa 和 345 MPa 两个等级^[20],亦要求材料温度达到 600 ℃ 时的剩余屈服强度($f_{0.2\%}$)不低于常温屈服强度的 2/3。冶金行业同时研发出了配套的耐火钢焊接材料和焊接工艺,目前与耐火钢配套的高强度螺栓还在研发阶段^[21]。

国家标准 GB 50016—2014《建筑防火设计规范》规定了建(构)筑物和基本构件的耐火极限要求。GB 51249—2017《建筑钢结构防火技术规范》规定了钢结构和组合结构基本构件高温下承载力、临界温度和耐火极限的计算方法,但对于耐火钢材钢结构的抗火性能评价尚处于研究阶段,对于钢结构连接和节点的耐火性能计算方法尚无具体规定。国家标准 GB/T 9978—2008《建筑构件耐火试验方法》要求通过标准化耐火试验方法来评价结构构件的抗火性能和耐火极限,要求按照 ISO 834 的时间-温度曲线控制火灾升温过程进行构件火灾试验,以评价结构构件的抗火安全性。试验评价对象包括承重构件(梁、柱)、分隔构件(隔墙)、承重分隔构件(楼盖、承重墙),并从隔热性、完整性、承载力三方面规定了结构构件耐火极限状态的判别准则,但是国内外现行标准对钢结构节点和连接的抗火性能尚无统一的试验评价方法。

按照 GB/T 9978—2008 对钢结构基本构件抗火安全性评价的要求,在建筑结构中应用耐火钢时,可通过构建“耐火钢+混凝土+膨胀薄涂料”(SCI)抗火结构体系充分发挥耐火钢的优势:

1) 无防护涂装钢(S)构件。

对于暴露在室外开敞环境的钢结构,根据欧洲火灾荷载标准 EN 1991-1-2:2024 提供的室外火灾升温曲线^[22],在不同的耐火极限要求下空气的最大温升均不会超过 680 ℃。试验表明,耐火钢在温升达到 680 ℃ 时仍有约 60% 的剩余强度^[3],故不采取额外防护措施的耐火钢足可以承受火灾状态下的不利荷载组合,即暴露在室外的钢结构如采用耐火钢设计和建造,基本不需要采用防火涂装亦可满足结构耐火极限的火灾安全评价要求。

大空间建筑钢结构发生火灾时,一般是从局部火灾开始,并逐渐蔓延。在火焰附近的空气温升较

快,随着时间的推移和火灾蔓延远离火焰区的空气温度逐渐升高。在规定的耐火极限内非火焰区的空气温度一般不会超过 600 ℃^[22],则处于非火焰区的耐火钢构件亦无需采用防火涂装。因此,对于采用耐火钢设计和建造的大空间建筑钢结构,根据可能发生的火灾场景进行温度分析。对于空气温度超过 600 ℃ 的钢结构部位,可采取必要的防火保护措施;而其他部位的钢结构可减少或无需采用防火保护,只需通过设置必要的消防报警装置和喷淋灭火设施来保护人员、财产和钢结构的安全。

2) 耐火钢组合(SC)构件。

对于住宅、办公楼等小空间钢结构,一旦发生火灾空气升温很快。亦可利用耐火钢高温剩余强度高、混凝土吸热能力强的优势,通过采用耐火钢-混凝土组合构件共同提高结构在火灾高温环境下的安全性。大量火灾试验表明,采用耐火钢闭口压型板构建的混凝土组合楼板具有极强的耐火性能,根据不同的楼面荷载合理选配楼板厚度即可满足 1~3 h 不等的耐火极限要求,无需额外设置纵向受力钢筋,且无需进行防火涂装^[3]。

采用耐火钢闭口压型板和耐火钢梁构建的钢-混凝土组合梁,以及采用耐火钢构建的钢管混凝土组合柱同样具有良好的抗火和吸热性能,在构件荷载比较低、耐火极限要求不高的情况下,也可大幅度减少或免除防火涂层^[23]。

3) 薄涂层防护钢构件(SI 或 SCI)。

对于耐火极限要求高、荷载比较大且位于小空间内的裸露耐火钢构件,根据 GB/T 9978—2008 评价抗火安全性时,构件火灾试验时温度会升至 1 000 ℃ 以上(当受火时间超过 87 min 时),耐火钢的高温剩余强度已无法满足火灾状态下的安全要求,必须采用必要的防火保护措施。采用膨胀型薄涂料(Intumescent Coating)是提高耐火钢结构耐火极限的有效方式。涂装在耐火钢构件表面的膨胀型涂料在受到高温热源作用时,会迅速膨胀形成隔热层,可有效延缓耐火钢构件的温升。膨胀型涂料的涂装厚度较薄,根据不同的耐火极限要求只需 2~5 mm 厚,可以与构件表面的装饰涂层相结合,特别适用于外露的耐火钢结构构件的火灾防护。

对采用膨胀型涂料的耐火钢结构进行抗火安全性设计时^[24],可以通过两种方法保证耐火钢构件的火灾安全性:

1) 钢材表面温度控制法。对于耐火极限要求高、荷载比较大的耐火钢(S)构件或组合构件(SC),

可采用试验或分析计算的方法确定膨胀型涂料厚度,形成有涂层的 SI 或 SCI 抗火构件,只要涂层厚度保护的钢构件部位在达到耐火极限时表面温度不超过 600 ℃,耐火钢在 600 ℃ 的剩余强度即可满足火灾安全承载性能的需求。

2) 钢材临界温度控制法。对于耐火极限要求不高、荷载比不大的耐火钢构件,可根据分析计算确定耐火钢构件的临界温度,通过选择合适的膨胀型涂料厚度,保护钢材表面温度不超过临界温度,以达到保证火灾安全的目的。钢材临界温度控制法比钢材表面温度控制法所需要的涂层厚度更少,甚至可以免除防火涂装。

3.3 高强耐火耐候钢

高强耐火耐候钢是兼有高强度钢材、耐火钢材、耐候钢材优势特色的结构钢材。“十三五”期间开发的高层及超高层建筑用 460 MPa 级和 690 MPa 级高强抗震耐蚀耐火建筑结构用高性能钢板,为未来建筑和桥梁钢结构应用高性能结构钢材准备了材料基础。现行国家标准 GB/T 41324—2022《耐火耐候结构钢》,对 Q235FRW~Q690FRW 耐火耐候钢的性能指标做出了详细规定,覆盖了普通耐火耐候钢和高强耐火耐候钢的各个强度等级。

采用高强耐火耐候钢的钢结构可直接利用结构钢材的自身性能并解决受多重灾害耦合作用时的钢结构抗灾安全性、环境适应性和长期耐久性问题。冶金行业已成功研发高强耐火耐候钢生产工艺,需要进一步完善性能稳定、按需供应的冶炼工艺,以及配套的焊材、螺栓和连接生产工艺和技术。建筑和桥梁钢结构需要研发体现高强耐火耐候钢性能优势的结构体系,以及设计、施工技术,构建应用高强耐火耐候钢结构体系,制定相关技术标准,评价其全生命周期的抗灾性能、耐久性、绿色低碳性能。

国内部分工程已开始探索应用高强耐火耐候钢,例如 2022 北京冬奥会滑雪大跳台裁判塔、成都兴隆寺商业中心等工程,大幅度减少和降低了全生命周期的防火防腐涂装成本和运维成本。

4 高强抗震耐蚀耐火钢材

高强抗震耐蚀耐火钢是一种具有高强度、良好抗震性能、耐腐蚀性能和耐火性能的多重抗灾功能且性能优异的新型结构钢材,应用到建筑和桥梁结构能够显著提高结构的安全性和使用寿命。“十三五”期间,依托国家重点研发计划“重点基础材料技术提升与产业化”,国内主要钢铁企业和研究机构

自主研发了建筑结构用 460 MPa 和 690 MPa 高强抗震耐蚀耐火钢板^[25],并对其材料力学性能^[26]、低温冲击韧性^[27]及相关焊接技术^[28]进行了试验研究,明确给出了高强抗震耐蚀耐火钢板的常规性能指标、耐火指标和耐候指标^[25]。

高强抗震耐蚀耐火钢作为一种先进的结构材料,在全生命周期内展现了优异的抗灾性能、耐久性和绿色低碳性能。在基础设施建设领域,高强抗震耐蚀耐火钢主要用于建造大跨和高层建筑、钢结构桥梁、高耸塔架等。这些结构长期暴露于大气环境中,高强抗震耐蚀耐火钢能够有效抵抗大气腐蚀,提高建筑物和构筑物的结构寿命。当大型公共建筑发生火灾时,高强抗震耐蚀耐火钢能够保持更长时间的高承载能力,延缓结构失效破坏和倒塌,为人员疏散和消防救援争取更多宝贵时间。此外,由于高强抗震耐蚀耐火钢具有更高的强度和更优的耐久性,因此在建筑结构中可以减少钢材用量,降低建筑能耗和碳排放。同时,其优异的抗震性能和耐火性能也有助于减少因自然灾害导致的建筑损坏和重建工作,进一步减少碳排放。在轨道交通和汽车制造领域,高强抗震耐蚀耐火钢主要用于制造铁路客车、地铁车辆、城市轻轨等。它们长期暴露于各种复杂气候条件和复杂荷载作用,高强抗震耐蚀耐火钢能够提高车辆的抗撞击能力和防火耐高温性能,有效提高交通工具的安全性和使用寿命。在能源工程领域,高强抗震耐蚀耐火钢主要用于制造风力发电塔、核电站反应堆外覆盖等。这些设施需要在各种气候条件下长期运行,高强抗震耐蚀耐火钢能够有效抵抗大气腐蚀,提高设施的运行效率和使用寿命,减少因腐蚀、疲劳等因素导致的结构损伤和破坏,从而减少维护成本。在海洋工程领域,高强抗震耐蚀耐火钢主要应用于海洋平台、海底管道等,能够满足复杂多变的海洋环境对钢材的强耐蚀性要求。石油化工、电力、冶金等高温高压工业领域对钢材的耐蚀性和耐火性要求较高。高强抗震耐蚀耐火钢能够满足这些特殊环境下的使用要求,延长设备的使用寿命,提高生产效率。

高强抗震耐蚀耐火钢的研发和应用,对促进高性能建筑和桥梁结构的绿色可持续发展具有重要意义。它不仅推动了建筑材料领域的创新,使得建筑和桥梁结构在承载性能、抗震性能、耐蚀性能和耐火性能等方面得到了显著提升,而且对建筑和桥梁结构的设计及相关标准的制定提出了更高要求和挑战。设计师需要充分了解这种高性能钢材的性能特

点,结合建筑和桥梁的实际需求进行合理设计。随着建筑和桥梁结构设计水平的不断提升,出现了更多创新性的设计理念和方法,为高性能建筑和桥梁结构体系的创新提供了有力支撑。

随着材料科学的进步和冶金制造工艺的发展,高强抗震耐蚀耐火钢的研究将进一步深入和完善,特别是在提高钢材的强度、韧性、耐蚀性和耐火性等方面。同时,随着国家对绿色建材和装配式建筑的推广,高性能钢材的应用能够满足建筑行业对材料性能的不断提升需求。随着科技的不断进步和工业化进程的加速推进,以及全球对绿色建筑和可持续发展的高度重视,高强抗震耐蚀耐火钢作为一种高性能、强环保的建筑材料,未来将在更多领域得到更广泛的应用和推广,对于加快建筑行业的绿色转型和高质量发展意义重大。

综上所述,高强抗震耐蚀耐火钢在全生命周期内展现了优异的多重抗灾性能、耐久性能和绿色低碳性能。在促进高性能建筑结构向绿色环保、低碳节能、安全耐久、经济适用、可持续发展等方面,必将充分发挥其自身特点和优势,显著提升建筑和桥梁结构全生命周期的高质量发展水平。

5 结束语

提升结构钢材自身的抗灾性能,是提高建筑和桥梁钢结构体系综合抗灾能力的有效途径。采用具有高强、高延、易焊、耐蚀、抗火等绿色低碳性能的高性能钢材构建建筑和桥梁结构体系是钢结构行业的发展方向。同时需要研发配套的焊接和螺栓材料、制作安装工艺、设计和技术标准,推进全生命周期绿色低碳、安全适用的钢结构体系的推广应用,为国家双碳战略目标的实现作出更大贡献。

参考文献

[1] Bjorhovde R. Development and use of high performance steel[J]. *Journal of Constructional Steel*, 2004, 60: 393-400.

[2] Shi G, Hu F X, Shi Y J. Recent research advances of high strength steel structures and codification of design specification in China[J]. *International Journal of Steel Structures*, 2014, 14 (4): 873-887.

[3] 石永久,余香林,班慧勇,等. 高性能结构钢材与钢结构体系研究与应用[J]. *建筑结构*, 2021, 51(17): 145-151.

[4] Chung K F, Hu Y F, Xiao M, et al. Structural behavior of welded H-sections made of high-strength S690 steel plates and their applications in construction[G/OL]//*Analysis and Design of Plated Structures*. 2nd Ed. 2022: 539-591 [2021-10-01]. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-8235570-6.00001-X>.

[5] Wang Z. Double-arch steel bridge for Cross Bay Link erected[N/OL]. [2021-02-26]. <https://www.chinadailyhk.com/hk/article/158935>.

[6] BSI. Eurocode 3-design of steel structures part 1-1: general rules and rules for buildings; BS EN 1993-1-1:2022[S]. London: British Standards Institution, 2023.

[7] Kuhlmann U, Schmidt-Rasche C, Jorg F, et al. Update on the revision of Eurocode 3[J]. *Steel Construction*, 2021, 14 (1): 2-13.

[8] BSI. Hot rolled products of structural steel part 6: technical delivery conditions for flat products of high yield strength structural steels in the quenched and tempered condition; BS EN 10025-6: 2019[S]. London: British Standards Institution, 2019.

[9] Chung K F. Effective use of high strength S690 to S960 steel in construction[J]. *Hong Kong Engineer*, 2022, 50: 8-18.

[10] Collin P, Johansson B. Bridges in high strength steel[J]. *IABSE Symposium Report*, 2006, 92(4): 1-9.

[11] ASTM International. Standard guide for estimating the atmospheric corrosion resistance of low alloy steels; G101-04[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2020.

[12] 王春生,张静雯,段兰,等. 长寿命高性能耐候钢桥研究进展与工程应用[J]. *交通运输工程学报*, 2020, 20(1): 1-26.

[13] BSI. Hot rolled products of structural steel part 5: technical delivery conditions for structural steels with improved atmospheric corrosion resistance; BS EN 10025-5:2019 [S]. London: British Standards Institution, 2019.

[14] ASTM International. Standard specification for structural steel for bridges; A709/A709M-21[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2021.

[15] Jennifer M, Harry W Shenton III, Dennis R, et al. National review on use and performance of uncoated weathering steel highway bridges[J]. *Journal of Bridge Engineering*, ASCE, 2014, 19 (5), 04014009.

[16] 谢斌,杨学军,王远锋. 高强度螺栓在拉林铁路藏木雅鲁藏布江大桥上的应用[J]. *铁道建筑*, 2018, 58(12): 54-56.

[17] 蒋周,胡毅,王晓科,等. 冬奥会高山滑雪耐候钢焊接工艺应用[J]. *山西建筑*, 2021, 47(16): 60-61.

[18] 鲁俊辉,郭维维,黄惠,等. 超级耐候钢在光伏支架上的应用[J]. *科技与创新*, 2024(11): 179-181.

[19] Sakumoto Y, Yamagyuchi T, Ohashi M, et al. High-temperature properties of fire-resistant steel for buildings[J]. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 1992, 118(2): 393-407.

[20] ASTM International. Standard specification for structural steel with improved yield strength at high temperature for use in buildings; A1077/A1077M-21[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2021.

[21] Sakumoto Y, Keira K, Furumura F, et al. Tests of fire-resistant bolts and joints[J]. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 1993, 119(11): 3131-3150.

[22] BSI. Eurocode 1-action on structures part 1-2: action on structures exposed to fire; BS EN 1991-1-2:2024[S]. London: British Standards Institution, 2024.

[23] 王文昊,余香林,程赞,等. 耐火耐候钢·混凝土组合梁抗火

性能试验研究[J]. 建筑结构, 2023, 53(12): 1-6.

[24] BSI. Eurocode 3-design of steel structures part 1-2: structural fire design: BS EN 1993-1-2:2024[S]. London: British Standards Institution, 2024.

[25] 袁继恒, 李忠波, 杨东, 等. Q460GJEZ35 抗震耐蚀耐火特厚钢板的研发[J]. 钢结构(中英文), 2021, 36(3): 39-45.

[26] 何文涛, 刘楚涵, 王明, 等. 460FRW 抗震耐蚀耐火钢材料性能及抗力分项系数研究[J]. 钢结构(中英文), 2021, 36(3): 22-27.

[27] 王志明, 吕尚霖, 王鑫, 等. 建筑结构用抗震耐蚀耐火钢 Q460FRW 低温冲击韧性性能分析[J]. 钢结构(中英文), 2021, 36(3): 28-33.

[28] 王垒, 刘中华, 张伟, 等. SQ460FRW 抗震耐蚀耐火钢气保焊焊接技术[J]. 电焊机, 2020, 50(5): 27-31.

Research and Progress on Application of High Performance Steel

Yongjiu Shi Xianglin Yu Huiyong Ban

(Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract:

High performance structural steel with superior material properties such as high strength, high ductility, high toughness, better weldability, improved weather resistance and fire resistance, has been widely applied in building and bridge steel structures. Efficient and rational application of high-performance structural steel can significantly save steel and protective coatings, reduce production, transportation, and installation costs, decrease welding workload and carbon emissions. Further reducing the full life cycle operation and maintenance costs of steel structures. This paper focuses on the development and progress of high-performance structural steels such as high-strength steel, ultra-high strength steel, fire-resistant steel, and weathering steel. This paper reviews the relevant regulations on the application of high-strength steel in the current technical standard system of building and bridge steel structures, and analyzes the advantages of ultra-high strength steel grade of 690 MPa and above through engineering application cases.

Recommendations are proposed for the research and development of structural systems using ultra-high strength steel, and drafting relevant structural design and construction standards. The advantages of high-performance steel can be further demonstrated in improving the fire and corrosion resistance of steel structures from the material level. The development trend of using weathering steel in bridge steel structures and fire-resistant steel in building steel structures is summarized. An innovative concept of steel structure using fire-resistant steel to form a “fire-resistant Steel + Concrete + Intumescent coating” (SCI) structural systems is proposed. The steel structural system without or with less fire-resistant coating can be realized, and the fire safety evaluation method of SCI structural system is suggested.

The use of green and low-carbon high-performance steel to construct building and bridge structural systems is the new direction and advancement of the steel structure. Meanwhile the welding and bolt materials, as well as design fabricating and installation standards have been developed to promote the application of high-performance steel structure systems and contribute to the achievement of the national “dual carbon” strategic goals.

Key words:high performance steel;high strength and super-high strength steel;fire-resistant and weathering steel;fire resistance of steel structure