

我国铁路钢结构发展回顾与展望

刘晓光¹, 卢春房^{2,3}, 鞠晓臣¹, 蔡超勋¹

(1. 中国铁道科学研究院集团有限公司铁道建筑研究所, 北京 100081; 2. 中国铁道科学研究院集团有限公司, 北京 100081; 3. 中国铁道学会, 北京 100844)

摘要: 新中国成立以来我国铁路事业成就显著, 在国民经济发展中发挥了重要作用, 尤其是近 15 年来高速铁路建设飞速发展, 成为一张靓丽的国家名片。钢结构对于铁路发展起着不可替代且极为关键的作用, 在铁路大跨度钢桥、高速铁路车站屋架结构等工程中获得广泛应用。站位于新的历史阶段, 适时对我国铁路钢结构发展进行回顾和展望, 具有一定的工程实践价值和理论研究价值。本文分别从材料、结构、使用规模的角度, 对大跨度钢桥、车站屋架等铁路钢结构的发展进行了系统回顾; 提出了我国铁路钢结构轻量化、装配化、信息化、耐久性和高韧性的技术发展趋势, 总结了铁路钢结构在设计、施工、运维和材质等方面的未来重点工作。随着应用地域和环境的多样化, 铁路钢结构仍然面临一系列有待攻克的技术难题, 如耐候设计、海洋恶劣环境施工、高原少维护等, 需持续加大研究投入以保障关键技术突破与运用。

关键词: 钢桥; 车站; 钢结构; 信息化; 耐久性; 发展趋势

中图分类号: TU391 **文献标识码:** A

Review and Prospect of the Development of Railway Steel Structure in China

Liu Xiaoguang¹, Lu Chunfang^{2,3}, Ju Xiaochen¹, Cai Chaoxun¹

(1. Railway Engineering Research Institute, China Academy of Railway Sciences Co., Ltd., Beijing 100081, China;
2. China Academy of Railway Sciences Co., Ltd., Beijing 100081, China;
3. China Railway Society, Beijing 100844, China)

Abstract: China has made great achievements in railway construction since its founding over 70 years ago. Particularly, China's high-speed railway industry has developed rapidly and become a beautiful national business card over the past 15 years. Steel structures play an irreplaceable and critical role in railway development and are widely applied in long-span railway steel bridges and roof trusses of railway stations. This research reviews and prospects the development of railway steel structures. It reviews the development of railway steel structures from the perspective of material, structure, and project scale, and proposes the development trends of the railway steel structures, namely, lightweight, assembly, informatization, strong durability, and high tenacity. Moreover, the focuses of future development of the railway steel structures are summarized in terms of design, construction, maintenance, and material. The diversification of application areas and environments has posed a series of technical challenges for the railway steel structure development, including weather resistant design, construction in harsh marine environment, and lack of maintenance in plateau environment, which all require persistent and further research.

Keywords: steel bridge; railway station; steel structure; informatization; durability; development trend

收稿日期: 2020-02-13; 修回日期: 2020-04-28

通讯作者: 卢春房, 中国铁道科学研究院集团有限公司正高级工程师, 中国工程院院士, 研究方向为铁路工程技术与管理;

E-mail: tagerocai@163.com

资助项目: 中国工程院咨询项目“川藏铁路工程系统可靠性保障战略研究”(2019-ZD-19); 国家重点研发计划项目“高性能桥梁钢应用技术研究及示范工程应用”(2017YFB0304805)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

一、前言

铁路作为国家的重要基础设施、大众化的交通工具，在我国综合交通运输体系中处于骨干地位。截至2019年年底，我国铁路营业里程达到 13.9×10^4 km，其中高速铁路营业里程达到 3.5×10^4 km。在铁路工程中有许多重要设施采用钢结构来建造，如跨越江河峡谷的大跨度铁路桥梁、现代化的大跨度高架站房等。铁路的快速发展与钢结构技术的研发与应用是密不可分的。

钢结构主要分为建筑钢结构、桥梁钢结构等，与钢筋混凝土结构相比，具有强度高、工程造价低、自重轻、施工周期短、可工厂化制作等优点。伴随着国民经济的快速发展，钢结构的设计、加工制造和施工技术水平显著提高，在铁路中的应用也得到跨越式发展。我国建造了数十座跨越大江大河的大跨度铁路钢桥和一批结构形式新颖、造型美观的大跨度高架站房结构，极大地促进了我国铁路事业的发展 [1]。

本站位于新的历史阶段，从材料、结构、使用规模的角度对大跨度铁路钢桥、车站屋架等铁路钢结构的发展进行回顾；根据我国国情，提出铁路钢结构轻量化、装配化、信息化、耐久性、高韧性的发展趋势，进一步明确铁路钢结构未来在设计、施工、运维和材质方面的重点工作；提出基于建筑信息模型（BIM）技术的信息化设计、装配化施工、智能化运维的钢结构发展建议。

二、我国铁路钢结构发展回顾

以铁路工程中的钢桥和车站两大钢结构基础设

施为重点，从材料、结构、使用规模的角度对我国铁路钢结构发展历程进行回顾。

（一）钢桥






1937年建成的钱塘江大桥是中国自行设计、建造的第一座双层公铁两用钢结构桁梁桥。新中国成立后铁路桥梁技术发展成就显著，尤其是近20年，得益于高速铁路的建设，数座大跨度桥梁相继落成或开工建设 [1]。从铁路大跨度桥梁技术发展历程来看，已经建成了多座里程碑式的桥梁工程（见表1和图1）。

武汉长江大桥主桥为跨度 3×128 m的铆接连续钢桁梁，通行双线铁路、4车道公路。主桁材质为从国外进口的A3q钢，全桥用钢量为 2.44×10^4 t。首次采用钢板桩围堰管桩基础，钢筋混凝土管柱直径为1.55 m。武汉长江大桥的建成标志着我国初步具有建设大跨度铁路桥梁的能力。

南京长江大桥主桥为跨度 3×160 m铆接连续钢桁梁，通行双线铁路、4车道公路。主桁材质为我国自主研发的16锰桥钢（16Mnq），用钢量为 6.65×10^4 t。主桥采用4类基础：筑岛重型混凝土沉井基础、深水浮式钢筋混凝土沉井基础、钢板桩围堰管桩基础、沉井加管柱基础，其中预应力混凝土管柱直径为3.6 m。南京长江大桥的建成标志着我国具有自主创新的铁路桥梁技术。

九江长江大桥主桥为跨度 180 m+ 216 m+ 180 m栓焊连续钢桁梁拱桥，通行双线铁路、4车道公路。主桁材质为我国自主研发的15锰钒氮桥钢（15MnVNq），首次采用M27高强螺栓连接，全桥用钢量为 5.68×10^4 t。采用双壁钢围堰钻孔基础取代了管柱基础。九江长江大桥的建成标志着铆接钢桥退出

表1 我国代表性的长江铁路钢桥

桥名	武汉长江大桥	南京长江大桥	九江长江大桥	芜湖长江大桥	天兴洲长江大桥
外形					
主跨/m	128	160	216	312	504
运营荷载	2铁4公	2铁4公	2铁4公	2铁4公	4铁6公
建成时间/年	1957	1968	1994	2000	2008
钢材/($\times 10^4$ t)	2.44	6.65	5.68	7.16	4.61
钢材种类	A3q	16Mnq	15MnVNq	14MnNbq	Q370q

注：2铁4公表示双线铁路、4车道公路；4铁6公表示4线铁路、6车道公路。

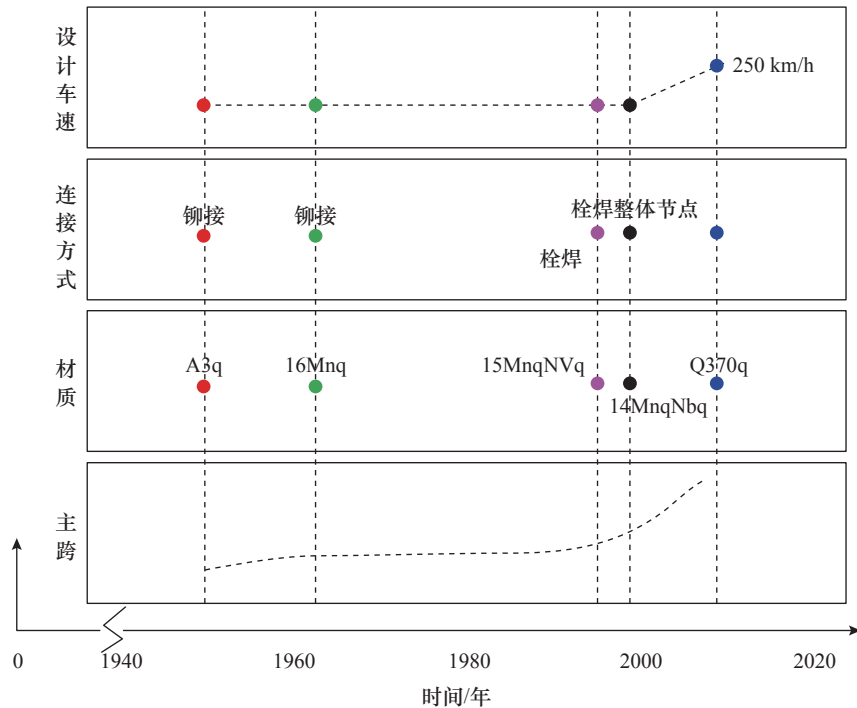


图 1 我国铁路钢桥发展历程

我国新建桥梁工程的历史舞台。

芜湖长江大桥主桥为跨度 180 m+312 m+180 m 的双矮塔双索面斜拉桥，通行双线铁路、4 车道公路。主桁材质为我国自主研发的 14 锰铌桥钢 (14MnNbq)，采用厚板焊接整体节点，全桥用钢量为 7.16×10^4 t。采用钢筋混凝土板与钢桁梁结合共同受力的结合桁梁。芜湖长江大桥的建成标志着我国桥梁技术向全焊方向迈出了一大步，也拉开了铁路大跨度斜拉桥建设的帷幕。

天兴洲长江大桥为主跨 504 m 的公铁两用斜拉桥，通行 4 线铁路、6 车道公路。在世界上首次采用三主桁、三索面栓焊结构，钢结构材质为 Q370q，全桥用钢量为 4.61×10^4 t。天兴洲长江大桥的建成实现了我国铁路桥梁跨度从 300 米级到 500 米级的跨越，标志着我国铁路斜拉桥技术迈上了新台阶 [2]。

在上述建设成就的基础上，我国钢桥技术进一步发展，在建的沪通长江大桥和五峰山长江大桥主跨均超过千米。以沪通长江大桥为例 [3]，大桥主桥跨径布置为 140 m+462 m+1092 m+462 m+140 m，采用三主桁、三索面结构；主桁断面最大轴力达 7.0×10^5 kN，根据承载需求主桥钢桁梁确定采用了 Q370qE、Q420qE、Q500qE 等多种规格钢材，合

计用钢量达 13.95×10^4 t，其中 Q500qE 用钢量为 3.16×10^4 t；主航道桥为全焊整体节段设计，实现了桥梁的大型化、工厂化制造；全桥共有 92 个节段，其中 12 个节段质量达到 1600 t；由 372 块公路和铁路桥面、170 片横联、558 根弦杆、1269 根腹杆组成，单根杆件最大质量约为 114 t、最高 5 m，采用整节段吊装技术施工完成（见图 2）。

（二）车站

在新中国建国前修建的铁路车站大多粗糙简陋，建国后陆续修建了一些不同等级的车站。但直到 20 世纪末，国内车站建筑结构还多为砖木结构或混凝土结构，结构跨度小且功能单一。近年来，随着高速铁路的快速发展，我国的铁路车站建设也取得了长足进步，一批结构形式新颖、造型美观的车站设施相继建设完成（见表 2），其中最具有代表性的是南京南站和北京南站。

南京南站主站房采用了站桥合一的高架站房框架结构体系，一层出站层和二层站台层均为承托超重荷载的大跨度结构。屋架为大跨度大悬挑钢结构，最大跨度为 72 m，最大悬挑为 30 m，总高近 60 m。站房屋盖采用正交异性钢网架形式，总用钢量达到 12×10^4 t。

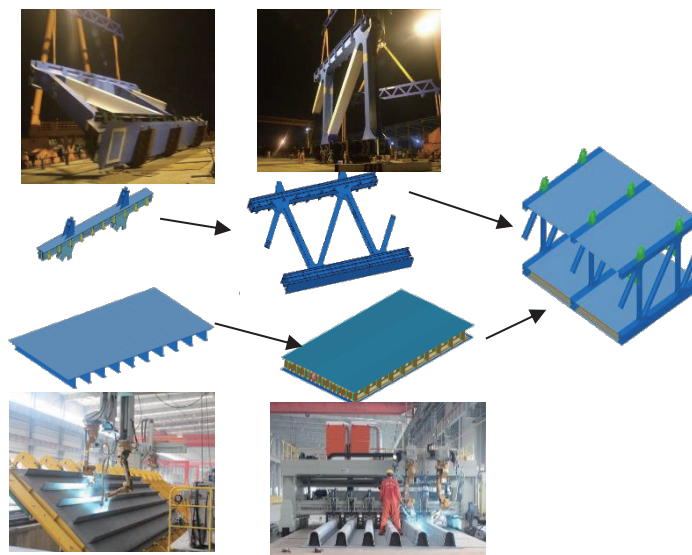


图2 沪通长江大桥钢梁制造示意图

表2 我国代表性的高速铁路车站

站名	北京南	上海虹桥	广州南	南京南	天津西	郑州东
外形						
站台	13台24线	16台30线	15台28线	15台28线	13台26线	16台32线
投用时间/年	2008	2010	2010	2011	2011	2012
用钢量/($\times 10^4$ t)	5	8	8	12	7	9

北京南站主体结构由中央站房、站台雨篷及地下换乘大厅三部分组成，总用钢量约为 5×10^4 t。中央站房为双曲穹顶，外形为椭圆结构，屋面为双向圆弧的光滑曲面（见图3），其主要承重构件包括支撑屋盖的格构柱、横向桁架、纵向桁架和钢梁等[4]。钢结构屋盖由15榀三跨连续变截面刚架组成。雨篷设巨大A字形钢塔柱共有94根，预应力悬垂梁最大下垂度为6.4 m；内环曲线形高架桥位于站房和雨篷之间，跨度范围为16~40 m。屋盖施工采用高空散拼法安装。

三、铁路钢结构发展趋势

随着钢结构设计和建造水平的提高，铁路钢结构朝着轻量化、装配化、信息化、耐久性、高韧性的方向发展。

（一）轻量化

当前，无论是铁路桥梁还是站房结构都朝着大

跨度方向发展，这是因为自重是制约跨度的重要因素，故桥梁、屋架等大跨度结构的轻量化成为必然。高强轻质材料的应用是轻量化结构技术的突破口之一，而钢结构作为典型的高强轻质结构将在未来的铁路建设中获得大量使用。

（二）装配化

随着现代工业技术的发展、预制构件的加工精度与装配式施工技术水平的提高，装配式施工获得了广泛应用。装配化施工可以缩短建设周期，实现资源集约，降低施工干扰，且工厂化、集约化的管理也更利于保障施工质量。快速施工、无人化或无人化施工、工厂化施工、高质量施工将是未来施工技术的发展方向，这些技术均要求铁路钢结构实现更高层次的装配化，特别是整体结构的装配化（见图4）。

（三）信息化

铁路钢结构的设计施工、工程管理、养护维修，



图 3 施工过程中的北京南站



图 4 公铁两用桥的钢梁节段装配化整体吊装

需要以现代化的信息和通信技术为支撑，从而涉及大数据、物联网、人工智能等技术的应用（见图 5）。信息化重点体现在钢结构设计、施工、运维等整个生命周期，还包括建造过程智能化和管理决策智能化等。

（四）耐久性

按照我国桥梁设计规范，铁路钢桥设计寿命一般为 100 年。从钢结构自身性能和技术绿色发展的要求来看，继续延长钢结构的使用寿命是技术趋势。高性能耐候钢板的研制和应用、不锈钢复合钢板的推广应用、新型涂装材料和体系等方面成为铁路钢结构耐久性研究的主要方向。

（五）高韧性

铁路钢结构应当抵抗一定程度的自然灾害冲击，有效抵御有意或无意的人为破坏，这不仅关系到钢结构自身安全，更事关人民生命财产安全和经济社会发展。铁路钢结构必须具有一定的韧性，技术主攻方向包括：从材料出发，重点研发高韧性钢材来提高结构材料韧性；从结构形式出发，优化结构形式尤其是节点及连接件的构造措施 [5]。

四、我国铁路钢结构重点工作建议

（一）设计方面

1. 辨识服役环境，拟定设计标准

我国地域广阔，地理、地质、气候环境复杂，而铁路建设分布于全国各地，在开展设计的过程中需要准确判断钢结构的服役环境。当前划分的 6 种环境有可能无法涵盖一些局部实情，如青藏高原的特殊情况，应提出新的服役环境判识类别和标准，拟定相应的建设标准建议并报批，为铁路钢结构耐久性打牢外因基础。另外，对于钢结构服役地区的地震、洪水、泥石流、滑坡等自然灾害，应充分调查、明晰归类，准确采取与之相适应的设计标准和措施，为增加钢结构抗力合理拟定输入条件。以地震灾害为例，应针对当地情况明确铁路钢桥抗震性能指标、设计方法、构造措施、设防标准等。

2. 提升设计理论和方法

目前铁路钢结构设计方面较为成熟的方法有容许应力法、极限状态法等，但从提高结构性能和降低成本的角度来看，相关设计理论和结构形式等方面尚有完善空间。关于设计理论，宜总结和深化大跨度桥梁刚度控制标准研究，系统开展温度、徐变等后期变形的控制标准及相关技术措施研究。关于结构形式，宜适时开展预应力梁、斜拉-悬吊协作结构体系、新型钢-混组合结构等技术研究 [6]，还可采用轻型结构形式、应用轻型管状和矩形空腹构件等。提出新的算法、开发新的软件，也是促进和保障铁路钢结构设计理论与工程化能力创新发展的重要方面。

3. 拓宽 BIM 技术应用范围

BIM 技术将铁路桥梁工程所有涉及的过程信息汇集到统一的数据库，据此实现信息共享与管理。

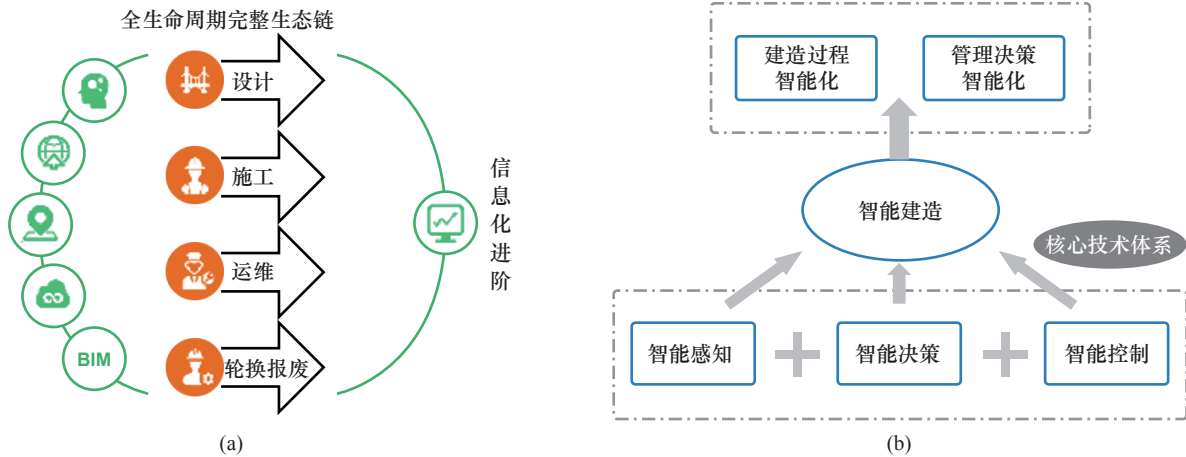


图5 信息化发展与智能建造的发展构成

BIM 技术在设计流程上进行了优化而更具工程实施的合理性，可以有效防范设计上的“差错漏碰”，为工程施工和养护维修的数据化、过程管理的可视化提供强有力的手段，从而大幅提高设计与审核工作的效率（见图6）。应加快推广 BIM 技术在铁路钢桥梁设计中的应用，提高我国铁路桥梁设计和管理工作的信息化水平 [7]。

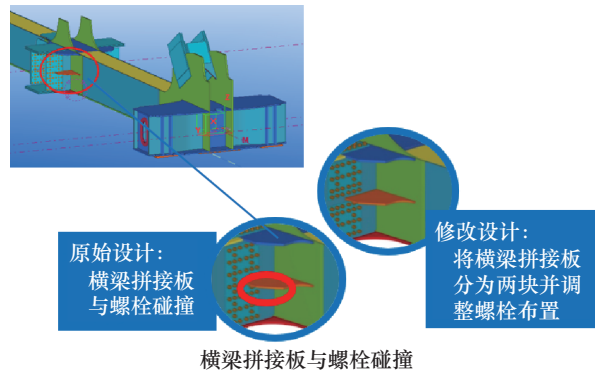


图6 BIM 技术解决碰撞问题

(二) 施工方面

1. 线性控制

目前设计和使用的铁路钢结构多为超静定结构形式，在安装施工过程中，若线形控制不严将会产生扭曲和弯曲变形，诱导附加内力并使受力状态出现变化，严重时可使结构发生破坏。在铁路钢结构安装施工过程中，应注重采用先进的测绘和调整技术来确保线形平顺。

2. 焊接

历史经验表明，铁路钢结构焊接中曾出现过焊接缺陷（不致密、连接不良、未焊透、夹渣、未焊满等）带来的质量问题，影响了结构受力和耐久性。当前铁路钢结构施工中主要采用的自动埋弧焊和气体保护焊等焊接方法，基础技术已经非常成熟。为了满足一些特殊钢结构的焊接需求，应示范应用一批先进的焊接控制方法、设备和软件（见图7），总结经验并全面推广。

3. 涂装

若涂装方法不当、喷涂质量不高，将加剧铁路钢结构锈蚀。从现场情况分析，若除锈手段落后、除锈效果不佳，直接进行涂装会严重影响涂装质量。

应推广工厂除锈和涂装方式，普及现场螺栓连接方法（以免焊接破坏工厂涂装），通过技术升级来全面保障涂装质量。

4. 工厂化装备研制

研制适用于装配化、大型化铁路钢结构的施工设备以及与之配套的工厂化工艺装备与智能化设备，逐步实现自动化施工。在提升装配生产效率的同时，减少或避免人为的不规范行为对铁路钢结构施工质量的影响。

(三) 运维方面

1. 检测监测

除了日常检查外，先进铁路钢结构在设计施工阶段应针对性地布设长期监测设备，对运营期间的的环境特征和结构状态开展实时监测。利用动态检测设备定期对关键结构进行检测，针对检测监测数据进行综合分析，精确指导结构养护维修和评估以保证铁路钢结构服役期内的安全可靠承载。



(a) U形肋板单元自动组装定位机床

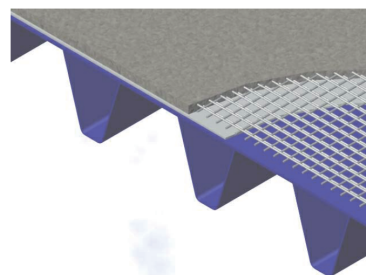


(b) 钢桥面板焊接机器人

图 7 先进的铁路钢结构焊接技术



(a) 钢板+高强螺栓加固



(b) 高性能混凝土铺装加固

图 8 正交异性桥面疲劳的加固形式

2. 修复

面对自然灾害、人为破坏造成的结构损伤以及设计、施工中产生的缺陷或隐患，应及时做出维修决策，指导采用新技术、新材料实施修复，消除铁路钢结构“带病工作”现象。以正交异性桥面疲劳加固修复为例，可采用钢板与高强螺栓组合或高性能混凝土铺装来进行加固，从而修复结构病害（见图 8）。

3. 评估

基于检测监测数据，对铁路钢结构进行状态评定和服役性能分析，掌握结构性能状态的变化过程。对于已使用多年或遭受突然性破坏的铁路钢结构，重点开展寿命期服役评估以确保绝对安全。

（四）钢材材质

钢材性能是钢结构性能的源头，提升冶炼技术以保证钢材合格率是重中之重。以钢材质量保障为基础，进一步提高钢材性能是未来铁路钢结构性能提升的重点方向。

1. 高强

现阶段国内铁路桥梁普遍采用 Q345、Q370 桥梁钢，而 Q420q、Q500q 钢处于推广使用阶段。例如，南京大胜关长江大桥采用了 Q420q 钢板；沪通

长江大桥采用了强度等级更高的 Q500q 钢材，提出了钢板在横、纵两个方向上拉伸检验均需满足屈服强度 ≤ 500 MPa、抗拉强度 > 630 MPa 的要求 [8]。随着大跨度桥梁的兴建，高强度钢材在铁路工程中的应用需求量会越来越大，Q500q 以上规格的桥梁用钢、2000 MPa 以上强度的缆索钢丝将不可或缺。

2. 耐候

腐蚀会消耗大量的钢铁资源，导致自然环境污染和生态环境破坏，其中基础设施腐蚀占有相当大的比例。加强不锈钢、不被化学有害物质腐蚀的钢材研究，且成本问题应予以关注。耐候钢由于冶炼工序的增加，材质的一次性投资略高于同等级普通低合金钢。但从桥梁成品角度来看，由于在工厂和现场减少了部件的表面处理和涂料，综合经济效益较有优势 [9]。

3. 韧性

铁路工程对结构钢的品质要求高，在满足强度的同时还需具有较高的韧性。为了提高铁路钢桥的韧性，防止因脆性断裂引发安全事故，桥梁钢的韧性指标将不断提高。在高寒地区钢材更易发生脆断，这对材料韧性指标提出了更高要求。在不断提高钢材强度的同时，通过韧性提升来维持一定的防断性能至关重要。

五、结语

随着我国铁路线路的不断增加,铁路钢结构在海洋强腐蚀、高原高寒强紫外线等特殊气候条件中的应用越来越多,这对钢结构的设计、施工、运维、装备和钢材材质方面提出了更高的要求。耐候设计、海洋恶劣环境施工、高原少维护等一系列技术难题有待攻克,需要持续保障在这些方面的研究投入。

针对耐候性问题,不断提高耐候钢板以及耐候螺栓的性能指标,增加耐候钢材在铁路工程中的应用是重要的发展方向。针对恶劣的施工环境,发展装配式、机械化和智能化的施工技术来减少现场施工操作量、提高施工质量。针对高原维护的问题,提高铁路钢结构工程运维管理水平,研发新型智能化数字化的管养技术和设备。

参考文献

- [1] 方秦汉,高宗余,李加武.中国铁路钢桥的发展历程及展望[J].建筑科学与工程学报,2008,25(4):1-5.
Fang Q H, Gao Z Y, Li J W. Development course and prospect of steel railway bridges in China [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2008, 25(4): 1-5.
- [2] 秦顺全,高宗余,潘东发.武汉天兴洲公铁两用长江大桥关键技术研究[J].桥梁建设,2007,37(1):1-4,20.
Qing S Q, Gao Z Y, Pan D F. Research of key techniques for Wuhan Tianxingzhou Changjiang River rail-cum-road bridge [J]. Bridge Construction, 2007, 37 (1): 1-4, 20.
- [3] 易伦雄,高宗余,陈维雄.沪通长江大桥高性能结构钢的研发与应用[J].桥梁建设,2015,45(6):36-40.
Yi L X, Gao Z Y, Cheng W X. Development and application of high-performance structural steel for Hutong Changjiang River bridge [J]. Bridge Construction, 2015, 45(6): 36-40.
- [4] 田承昊,董城,刘明.北京铁路南站中央站房大型钢结构体系研究[J].钢结构,2012,27(6):5-8,77.
Tian C H, Dong C, Liu M. Research on the complicated steel structure for Beijing South Railway Station [J]. Steel Structure, 2012, 27(6): 5-8,77.
- [5] 王元清,周晖,石永久,等.基于冲击韧性的钢结构厚板防止脆性断裂的选材方法[J].钢结构,2011,26(7):43-46.
Wang Y Q, Zhou H, Shi Y J, et al. Material selection based on impact toughness for brittle fracture resistant design of thick plate steel structures [J]. Steel Structure, 2011, 26(7): 43-46.
- [6] 周勇政,陈良江,高策.我国高速铁路桥梁设计技术及探索[J].桥梁建设,2018,48(5):11-15.
Zhou Y Z, Cheng L J, Gao C. Design techniques and exploration of high-speed railway bridges in China [J]. Bridge Construction, 2018, 48(5): 11-15.
- [7] 杜仲云,方继.BIM技术在桥梁钢结构制造和施工中的应用[J].铁路技术创新,2016(3):70-74.
Du S Y, Fang J. Application of BIM technology in bridge steel structure manufacturing and construction [J]. Railway Technology Innovation, 2016 (3): 70-74.
- [8] 徐向军,陈振中.现代钢桥制造对桥梁钢的更高要求[J].焊接,2016(8):60-63.
Xu X J, Chen Z Z. Higher requirements for steel bridges in modern times [J]. Welding & Joining, 2016 (8): 60-63.
- [9] 郭爱民,邹德辉.我国桥梁用钢现状及耐候桥梁钢发展[J].中国钢铁业,2008(9):18-23.
Guo A M, Zou D H. Present situation of bridge steel in China and development of weathering bridge steel [J]. China Steel, 2008 (9): 18-23.