

我国钢结构规范及标准体系概述

郁银泉¹ 王 喆¹ 柴 昶² 王立军³ 徐厚军⁴

(1. 中国建筑标准设计研究院有限公司, 北京 100048; 2. 中国钢结构协会, 北京 100088;
3. 华诚博远工程技术集团有限公司, 北京 100043; 4. 中南建筑设计院股份有限公司, 武汉 430206)

摘 要:对我国钢结构规范及标准体系的现状进行了总结,并对国内主要钢结构规范及标准的发展历程和技术内容变迁进行了梳理。我国钢结构标准规范体系的发展历程可分为4个阶段:20世纪50年代参照前苏联钢结构规范的内容制订了我国第一本钢结构设计类规范;60—70年代,结合我国国情和工程经验,对钢结构的设计规范进行了修订,并推出了薄壁型钢结构方面的规范;80—90年代,随着钢结构工程建设的巨大需求,在前期基础上,推出了高层民用建筑、网架结构、网壳结构和门式钢架等方面的相关规范。对钢结构领域重点规范的发展历程进行了总结,介绍了《钢结构设计标准》的编制和修订历程,总结了规范修订的主要内容,从设计理论、钢材本构关系、结构分析、抗震设计、结构稳定和连接件设计等方面与欧洲设计规范进行了比较。总结了《冷弯薄壁型钢结构技术规范》的修订历程和主要修订内容,并与澳大利亚和美国相关方面的规范进行了对比,总结了我国与国外规范在结构力学性能指标计算方面的差异。针对钢结构材料方面的相关标准,介绍了碳素结构钢系列、低合金结构钢系列和建筑结构用钢板系列等方面的规范发展历程,重点总结了各版本规范的增补内容,以及部分材料力学性能指标的概念和定义修正。以上研究表明,我国钢结构规范标准正逐步赶上甚至在一些方面超越了国际标准,但在标准规范的广度、深度、修编频率等方面还可进一步提高。

关键词:钢结构;标准规范;发展历程

1 标准体系概述

20世纪80年代以前,因为经济实力的限制^[1],我国钢结构工程形式比较单一,类型主要有重型和轻型工业厂房、以及平板网架结构,当时的钢结构标准规范种类也只有十几种。

20世纪80年代以后,随着我国经济的快速、持续发展,国内建筑钢结构领域的科研也蓬勃发展,同时广泛吸收和引进了发达国家钢结构方面先进的技术。随着结构计算技术的不断提升、各种新材料、新工艺国外引进和国内研发的成功,我国钢结构科研实力和技术水平迅速壮大,已经开始向国际先进靠拢和接轨。钢结构的技术标准体系也迅速发展,目前基本形成了整体上比较完善的系统。

经统计,目前钢结构材料和制品的国家标准和行业标准、以及相关的协会标准和地方标准,共有151本,详细情况见表1。

表1 建筑钢结构相关标准数量统计

Table 1 Statistics of standards related to steel structures in construction

技术标准		材料、制品标准	
技术标准	数量	材料、制品标准	数量
国家标准和行业标准	33	钢材及制品	66
协会标准和地方标准	27	紧固件连接	16
		焊接材料	9

我国建筑结构标准规范分为四个层级:国家强制性标准(GB),国家推荐性标准(GB/T)和建工行业推荐性标准(JGJ/T及JG/T),中国工程建设标准化协会标准和中国钢结构协会等团体标准,地方标准和企业标准。其中国家标准和行业标准的管理部門为中华人民共和国住房和城乡建设部,团体标准管理部门为各协会。国家强制性标准为强制执行的

第一作者:郁银泉,全国工程勘察设计大师,中国建筑标准设计研究院有限公司首席科学家,主要从事钢结构和建筑抗震等的研究。
通信作者:王喆,wangz@cbs.com.cn。
收稿日期:2024-09-05

标准,其他标准均为推荐性采用的标准^[1]。

2 国内规范的发展

我国钢结构标准规范体系的发展可以概括为四个发展阶段。20 世纪 50 年代为第一阶段、60—70 年代为第二阶段、80—90 年代为第三阶段、21 世纪初为第四阶段。

20 世纪 50 年代建国初期,苏联援建 156 个大型建设项目,其中大型工业厂房项目多数采用了钢结构。这些厂房的设计直接催生了我国第一版钢结构设计规范——54 版规范的诞生。我国 54 版钢结构设计规范直接采用了苏联的钢结构规范内容。

到了 20 世纪 60—70 年代,因为工业发展的需要,国家各部门对钢材的需求量大幅增加,但是钢产量仍然有限。而 54 版钢结构规范采用了苏联设计规范,适用苏联的气候条件和经济条件,造成建筑用钢量较大。于是我国结合本国国情和 10 余年工程、设计、科研成果,编写了自己的钢结构规范,69 版《弯曲薄壁型钢结构技术规范》、74 版《钢结构设计规范》。另外由于节约钢材的政策及焊接空心球和螺栓球节点的成功研发,全国各地的网架工程快速增多。其中第一个平板网架工程于 1964 年在上海完成。

20 世纪 80—90 年代,改革开放政策带动全国工程建设的巨大需求,钢结构建筑迎来快速发展时期。很多新技术研发成功、或从国外引入,并应用于工程实践。如 1987 年我国第一栋高层钢结构建筑,高 165 m 的深圳发展中心大厦建成。其他如厂房框架结构,包括平板网架和网壳的空间结构,空间结构和拱、钢架组成的混合体系,钢和混凝土混合结构,悬索结构,膜结构,以门式钢架、拱形波纹屋顶为代表的轻钢结构等工程开始出现、技术慢慢成熟。这一时期,钢结构设计规范更新为 88 版《钢结构设计规范》、冷弯薄壁型钢规范更新为 87 版《冷弯薄壁型钢技术规范》;十余本新规范也相继出现,如 JGJ 99—98《高层民用建筑钢结构技术规程》、JGJ 7—91《网架结构与施工规程》、JGJ 61—2003《网壳结构技术规程》、CECS 102:98《门式钢架轻型房屋钢结构技术规程》等。

21 世纪初至今,我国钢结构工程达到了空前快速发展阶段。2006 年我国粗钢年产量达到 4 亿 t,居于世界首位;2022 年我国粗钢年产量约占全世界的一半。面对钢铁产量的增加、甚至产能的过剩,以及我国在经济发展中遇到的诸如环境污染、资源紧

缺、人口红利逐渐消失等新问题,国家不断推出新政策以推广钢结构在建筑领域的应用。传统结构形式如高层钢结构和空间结构继续快速发展,新结构形式如钢板剪力墙结构、张弦梁、张弦桁架、预应力钢结构、钢结构住宅等也不断出现,并快速发展。

我国钢结构主要标准发展情况如下。

2.1 《钢结构设计规范》的发展

我国《钢结构设计规范》的编制和修订,经历了《钢结构设计规范》(试行草案)规结-4—54、74 规范 TJ 17—74《钢结构设计规范》试行、88 规范 GBJ 17—88《钢结构设计规范》、03 规范 GB 50017—2003《钢结构设计规范》和目前最新的 GB 50017—2017《钢结构设计标准》。

2.1.1 规范编制和修订情况

新中国成立之初,我们没有自己的钢结构设计标准。1954 年,当时的建工部颁布了新中国第一本钢结构设计类规范——《钢结构设计规范》(试行草案)规结-4-54。这本规范的内容等同于苏联的 1946 年版钢结构设计规范。1960 年起,我国组织力量,开始编制我们自己的规范,但在文革时工作暂停了^[2]。

70 年代初,国家基本建设委员会下决心编制自己的国家标准规范体系。由冶金工业部组织科研机构 and 高校等 10 余个单位抽调人员完全脱产,进行规范课题研究和编制工作。于 1974 年 12 月由国家基本建设委员会、冶金工业部批准和颁布了 TJ 17—74《钢结构设计规范》(试行)。74 版规范不仅解决了我国钢结构设计问题,而且还培养了一批热心于钢结构设计规范编制的人才,这无疑是我国钢结构发展史上的一个重要的里程碑^[3]。

74 版规范颁布后,由北京钢铁设计院组织全国几十个单位对所选定的专题进行了大量的理论研究、科学试验和调查研究。在此基础上,结合国内工程的实践经验,吸取国内外的科研成果进行对比,并借鉴国外规范的经验起草了修订稿,在广泛征求全国有关单位的意见后,经过多次讨论和反复修改,于 1988 年 10 月经建设部批准为国家规范,即 GBJ 17—88《钢结构设计规范》^[4]。

自 20 世纪 90 年代以来,随着我国钢产量的不断增加,建筑钢结构有了飞速的发展,对 88 版规范提出了多方面的修改要求,1997 年建设部发文要求北京钢铁设计研究总院会同国内 15 家单位成立规范修订组,负责对 88 版规范作全面修改。2003 年 4 月建设部批准并颁布了 2003 版 GB 50017—2003

《钢结构设计规范》。

随着我国经济的发展,钢结构应用状况也发生了很大变化。因此,迫切需要一本适用于当前形势并囊括工业和民用建筑领域的钢结构设计规范与市场和国际接轨。同时,经过多年的改革开放,我们已从过去单纯的学习苏联转变为向欧美日等发达国家

学习先进的钢结构技术。因此,从 2003 版规范开始,经历 14 年的努力,于 2018 年颁布了最新规范 GB 50017—2017《钢结构设计标准》。

2.1.2 技术内容变迁

对我国钢结构设计标准历次修改内容进行了总结和归纳,详见表 2。

表 2 我国历次钢结构设计标准技术内容的变迁
Table 2 Transformation of standard for design of steel structures

相关内容	GBJ 17—88 与 TJ 17—74 对比	GB 50017—2003 与 GBJ 17—88 对比	GB 50017—2017 与 GB 50017—2003 对比
稳定	1)增加受弯构件腹板局部稳定计算的相关公式 2)轴心受压构件的稳定性计算采用三条曲线 3)调整受弯构件的整体稳定系数 4)压弯构件的稳定性改用相关公式计算 5)增加多层框架柱的计算长度,引入 K_1 、 K_2 计算柱长度系数	1)增加了组成板件厚度 $t \geq 40$ mm 的工字形截面和箱形截面在计算轴心受压构件时截面类别规定,增加了 d 类截面的 φ 值 2)增加了单轴对称截面轴压构件绕对称轴弯扭屈曲的计算方法 3)明确将框架界定为无支撑纯框架、强支撑框架、弱支撑框架三类,并规定了各类框架计算长度系数的计算方法 4)充实了框架结构内力分析方法。规定对于 $(\sum N \cdot \Delta \mu) / (\sum H \cdot h) > 0.1$ 的框架结构宜采用二阶弹性分析方法确定杆件内力 5)调整梁腹板局部稳定的计算公式,不再把腹板看成是完全弹性板,而是考虑非弹性变形和几何缺陷的影响,同时给出利用屈曲后强度的计算方法,对腹板的约束系数也进行了调整 6)修改了在 T 形截面受压构件中,轴心受压构件和弯矩使腹板自由边受拉的压弯构件,腹板高度与其厚度之比 7)修改了受压构件受压翼缘自由长度的侧向支承的支撑力计算方法和交叉腹杆在平面外计算长度的确定方法	新增钢结构稳定设计的直接分析法
疲劳	疲劳计算以应力幅代替应力比	应力变化循环次数 $n \geq 5 \times 10^4$ 时,要进行疲劳计算	增加了简便快捷验算疲劳强度的方法,构造要求中对吊车梁和吊车桁架的要求及提高寒冷地区结构抗脆断能力的要求移入本章,并增加了抗脆断设计的规定
材料		推荐了 Q235 钢、Q345 钢、Q390 钢,增补了 Q420 钢	1)增加了 Q460 和 Q345GJ 两种钢 2)由于屈服强度变异系数的增大,Q235 抗力分项系数由 1.087 增大到 1.090,Q345 ~ Q420 由 1.111 增大到 1.125 ~ 1.180,新增 Q460 钢的抗力分项系数为 1.125 ~ 1.180
计算方法	设计方法由容许应力法修改为以概率理论为基础的极限状态设计法		基本设计规定,补充了多遇地震设计法和 17 章钢标的设防烈度地震设计法
钢管结构	新增钢管结构设计	增加了空间圆管节点强度计算公式,增补矩形管或方形管结构平面节点强度的计算方法及有关构造规定	1)新增钢管混凝土柱承载力计算及相关构造要求 ^[6] ; 2)钢管结构章节丰富了计算的节点连接形式,增加了节点刚度判别内容
钢与混凝土组合梁	新增钢与混凝土组合梁计算	增补了钢与混凝土组合梁负弯矩部位的计算方法,混凝土翼缘板用压型钢板做底模的组合梁计算和构造特点,部分抗剪连接组合梁的设计规定以及组合梁挠度计算 ^[5]	
其他新增	1)直角角焊缝采用考虑应力方向的计算方法 2)增加承压型高强度螺栓连接 3)新增塑性设计	1)增加了梁与柱刚性连接和不设置柱的横向加劲肋时,对柱腹板厚度或翼缘厚度的要求 2)新增板件在拉剪作用下的强度计算以及桁架节点板的强度计算和稳定方法 3)新增平板支座、球形支座、橡胶支座等内容 4)增加了插入式柱脚、埋入式柱脚及外包式柱脚的设计、构造等规定 5)增加了寒冷地区结构抗脆断能力的内容	1)术语和符号中,明确了无支撑框架、强支撑框架的定义,规范了支撑结构、框架-支撑结构体系,增加了用于抗震设计的构件塑性耗能区的定义 2)新增带加劲肋的钢板墙 3)增加了钢结构防护章节,对钢结构的防火、防腐、隔热做了原则性的规定 ^[7]
其他修改		1)取消原规范中吊车横向水平荷载的增大系数,给出吊车摆动产生横向水平力的计算公式 2)取消原规范“圆钢、小角钢的轻型钢结构”等章节	

2.1.3 中欧钢结构规范对比

1)中欧钢结构设计规范都是采用以概率极限理论为基础的极限状态设计理论和多分项系数设计

方法^[8]。欧洲钢结构设计规范以半概率极限法为主体,而我国钢结构设计方法因规范所属行业不同有所差异,如 TB 10002.2—2005《铁路桥梁钢结构

设计规范》中仍大量存在安全系数法,而 GB 50017—2003《钢结构设计规范》中全概率极限法、半概率极限法与安全系数法并存。中欧规范都将结构根据破坏后果严重程度分为三个安全等级,所不同的是欧洲规范同时还给出可靠性等级的概念,并且明确可靠性等级与结构重要性等级不是同一概念,只有当两者相关联时,才具有同等的含义。

2)以钢结构材料本构关系为基础,比较中欧规范钢材应力-应变曲线、钢材分类和材料特性要求的异同。欧洲规范考虑材料的应变硬化和拉伸屈服后的变形,规定了5条不同的本构关系曲线;对于连接强度,欧洲规范比中国规范对应的级别高;对于其他材料特性的要求,中国规范规定更加细致,更符合我国生产实际,如在钢材延性要求上考虑了材料应变,厚度特性专门规定了含硫限值。随着我国钢材冶炼水平提高,欧洲规范具有较强的参考性。

3)结构分析主要从结构建模和结构二阶效应计算方面进行了比较。中国规范基于结构弹性分析理论设计,欧洲规范则可使用弹塑性分析、塑性分析理论进行设计;通过分析公式和算例发现,同一框架是否考虑二阶效应,中欧规范的判断标准基本相同,且都采用放大侧端弯矩的简化二阶效应设计方法,但欧洲规范除了考虑结构的 $P-\Delta$ 效应,还考虑了 $P-\delta$ 效应,中国规范仅考虑结构的 $P-\Delta$ 效应,框架柱端部弯矩欧洲规范比中国规范大5%~10%。

4)抗震设计方法。欧洲规范采用二水准设计,而中国规范则使用三水准设计,欧洲规范的“破坏极限要求”和“不倒塌要求”,相当于中国规范的“小震不坏”和“中震可修”,中国规范还规定了“大震不倒”设防水准;反应谱都分为四个阶段且形状相似;地震作用计算都采用底部剪力法和振型分解反应谱法,中国规范还规定时程分析法,考虑了扭转对结构的影响。对于底部剪力法,中国规范采用顶点附加集中地震作用计算,并对多质点结构引入折减系数,欧洲规范均未考虑,算例表明,中国规范的地震作用和层间剪力值更大。

5)结构的稳定性。中欧规范都基于压杆稳定理论和薄板稳定理论进行设计。欧洲规范考虑组成截面受压板件的边界约束条件、宽厚比、钢材的屈服强度及应力分布将钢构件截面分为5类;中欧规范都根据试验数据和数学推导,并考虑构件几何缺陷和残余应力,规定了多条稳定性系数曲线。a. 整体稳定性:受压构件计算,欧洲规范对弹性、塑性状态分别设计,并对第4类截面使用有效截面面积计算,

但计算结果与中国规范差异不大;压弯构件计算,中欧规范都分为平面内和平面外分别设计,但对弯矩折减方式不同,计算结果中国规范更保守;受弯构件计算,由于截面模量和钢材的抗压强度设计值的不同,欧洲规范整体稳定系数普遍小于中国规范,算例表明,横向荷载作用下,欧洲规范轧制截面的整体稳定承载力比中国规范大2%~7%,焊接截面比中国规范小24%~32%。b. 局部稳定性:翼缘宽厚比限值规定中国规范未考虑应力分布,腹板高厚比限值中国规范考虑最大、最小应力的差值,而欧洲规范考虑应力分布;有学者进行算例表明,相同的构件,欧洲规范轴压构件翼缘宽厚比限值小于中国规范,受弯和受压构件,随着端部受压区和受拉区增大,欧洲规范的翼缘宽厚比限值先大于、后小于中国规范。

对连接件的分类、设计抗力计算理论、计算方法、连接的破坏机理等方面进行探讨。螺栓分类中,欧洲规范按照螺栓受力状态及其破坏形式分类,中国规范螺栓连接按材料强度和受力方式分类;支承抗力计算中,中欧规范在破坏机理的认识方面存在差异,欧洲规范认为板材支承壁破坏等于螺栓连接破坏,以板材的强度为控制因素,中国规范则取抗剪与抗承压力的较小值;拉剪组合承载力计算中,欧规使用一次式,中国规范使用二次式。

2.2 《冷弯薄壁型钢结构技术规范》的发展

冷弯薄壁型钢由钢带或钢板经冷加工而成,成型方式具有很大的灵活性,能根据受力需要生产出材料分布最优的截面形状,承载效率高,因此具有很强的经济性,在我国发展建设过程中获得了大量应用。

国家标准《冷弯薄壁型钢结构技术规范》自1969年颁布实施,当时名称为《弯曲薄壁型钢结构技术规范》,发展至今先后经历了3次修订工作,目前已发布的版本包括:1969年《弯曲薄壁型钢结构技术规范》(草案)、TJ 18—75《冷弯薄壁型钢结构技术规范》、GBJ 18—87《冷弯薄壁型钢结构技术规范》、GB 50018—2002《冷弯薄壁型钢结构技术规范》^[9]。

2.2.1 技术内容变迁

对我国冷弯薄壁型钢结构设计标准历次修改内容进行了总结和归纳,详见表3。

2.2.2 与国外规范对比

与国外规范相比,02版规范在设计方法上采用与澳大利亚规范 AS/NZS 46600:2005 *Australian/New Zealand Standard Cold-formed Steel Structures*

表 3 我国历次冷弯薄壁型钢结构设计标准技术内容的变迁^[9-13]

Table 3 Transformation of standard for design of cold-formed thin-walled steel structures

相关内容	69 版	75 版	87 版	02 版
设计方法	安全度表达形式采用“标准荷载、基本应力和区别对待各种条件的调整系数”的设计方法	采用标准荷载、容许应力进行计算的设计方法。这是一种多系数分析,简单形式表达的设计方法,对于采用单一材料的薄钢结构较为合适	采用以二阶矩概率理论为基础的极限状态设计法,把影响结构可靠度的各种因素均作为随机变量(过程),建立起可靠指标与失效概率的对应关系,使结构可靠度有较为科学的衡量尺度和明确合理的定义	按 GB 50068—2001《建筑结构可靠度设计统一标准》和 GB 50009—2001《建筑结构荷载规范》对结构重要性系数、荷载重现期、部分楼面活荷载等进行了调整
	关于折减系数(调整系数)的要求,屋架及格格式刚架横梁的压杆的调整系数为 0.95	在屋架、刚架横梁中采用焊接方管的受压弦杆及支座斜杆乘以折减系数 0.95,这是因为跨越结构的主要压杆,安全度宜适当提高,以区别于一般压杆。同时试验表明,用两个槽钢焊接而成的方管作压杆,由于焊接应力和局部缺陷对其承载能力影响较大		考虑到受力蒙皮作用的经济性优势,在系统的试验研究和理论分析基础上,增列当采用不能滑动的紧固件连接压型钢板及其支承构件形成屋面和墙面等围护体系时,可在单层房屋设计中考虑受力蒙皮作用
局部稳定	对于薄壁型钢构件的局部缺陷未作具体规定	对方管的纵向局部变形限值给出了不大于 0.01 的规定,并认为方管横向局部变形不引起板件强度的降低,不另做限制	对受压板件局部稳定性的计算规定及取值作了合理调整	用有效截面特性替代原规范列出的基本构件计算公式中的全截面特性来考虑受压构件的局部屈曲及构件整体稳定间的相关性和相互作用
整体稳定	规定十字截面和不卷边单角钢轴心受压构件应验算弯扭失稳	对十字截面和不卷边单角钢轴心受压构件通过有限截面考虑其弯扭失稳问题	采用相关公式计算压弯构件的强度和稳定性,物理概念明确、直接,计算方便,有利国际交流	补充了弯矩作用于非对称平面内的单轴对称开口截面压弯构件稳定性的计算公式
	对于轴心受压构件两端支承条件(弯曲和翘曲)未作明确规定;对于加缀板的开口截面轴心受压构件不需验算弯扭失稳的规定缺乏科学依据	对不加缀板和加缀板的单轴对称开口截面轴心受压构件区分了三种不同的支承情况,并分别给出了比较准确的约束系数,对验算公式进行了合理简化	从理论上解决了非密集缀板的单轴对称开口截面轴心压弯构件的弯扭屈曲计算问题,并为大量的系列试验所证实	
	计算受弯构件整体稳定系数的计算公式参数多,运算麻烦,其中 γ 值的计算是以工字形为典型截面,没有考虑不同截面形状的影响,使槽型截面偏于不安全,而 Z 形截面又偏于保守,表达形式也与当时的《钢规》不统一	受弯构件整体稳定系数的计算公式采用了与当时《钢规》统一的表达式,使计算比较简单。并区分了工字形、槽形和卷边 Z 形钢承受均匀荷载的简支梁的系数 ψ 值,使计算符合实际情况	对轴心压件稳定系数 φ 及受弯构件整体稳定系数 φ_w 作了合理的调整,扩大了使用范围,完善了规范的有关规定	
板件宽厚比	对均匀受压板件有效宽厚比的规定不够合理,在常用范围内即当板件宽厚比较小时,偏于不安全;而当宽厚比较大时,又过于保守。对于不均匀受压板件的有效宽厚比的规定也不够合理,且表格较多,使用麻烦	在进一步理论研究和试验研究的基础上,建立了一个半理论半经验的有效宽厚比计算公式,并制成了新的表		对受压板件屈曲后强度及有效宽厚比的计算方法作了全面修订,例如,将原规范中两边支承板件,一边支承一边卷边板件和一边支承一边自由板件,分别改为加劲板件、部分加劲板件和非加劲板件,使含义更为明确,并与国际接轨
材料			增列了基于塑性理论分析及系统试验的冷弯效应计算公式,较国外同类公式适用范围更广,计算精度更高,且具有较大的经济效益	
防腐		规定了闭口截面管材内壁不必作防腐处理。因为工程实践证明,只要将管材封闭,内壁是不会生锈的,即使有个别气孔,也不会使锈蚀发展	提出了钢材腐蚀性分级区划标准及相应的配套涂料品种和合理维护年限	
其他构件要求	工程中常用的构件,如桁架式檩条、单面挂墙板的墙梁及屋盖支撑布置,原规范都未作规定	新增了部分工程中常用构件的有关条文,如桁架式檩条的要求,屋架和檩条支撑的布置原则等		对应用最为广泛的冷弯薄壁型钢结构构件(如压型钢板、檩条、墙梁、刚架等)的计算方法和构造要求都作了较为全面的修改和补充

相同的以概率理论为基础的极限状态设计方法,以分项系数设计表达式进行设计计算;北美规范 AISI/COS/NASPEC-2001 *North American Specification for the Design of Cold-formed Steel Structure Member* 则是涉及容许应力设计法(ASD)、荷载抗力系数设计法(LRFD)和极限状态设计法(LSD),其中极限状态设计(LSD)仅限于加拿大,荷载与抗力系数设计(LRFD)和容许应力设计(ASD)仅限于美国和墨西哥。关于冷弯效应的分析和计算,中国规范只考虑了角部冷弯效应的影响而没有考虑平板部分冷弯效应的影响,计算结果偏于保守,而北美和澳大利亚规范用冷弯型钢截面的平均屈服强度代替了屈服强度,并用加权平均值来计算冷弯效应的影响;此外,北美、澳大利亚规范由于没有考虑成形过程中存在未屈服区及其对屈服强度的贡献,在 R/t (径厚比)较大时可能给出低于母材屈服强度的结果。关于考虑蒙皮效应的构件设计方面,中国规范虽有檩条的计算公式,但未考虑屋面板对檩条下翼缘失稳的约束扭转作用,于是计算方法对一般薄壁檩条无法使用,而美国规范和澳大利亚规范均包含这方面的内容。关于畸变屈曲的计算,目前只有北美规范和澳大利亚规范中有相应的设计方法,中国规范尚未涉及。关于直接强度法,北美规范和澳大利亚规范已经允许在冷成型钢构件的设计中采用,而我国虽对此也有研究,但在规范中尚未涉及。此外,中国规范对屋架、刚架以及构件制作、安装和防腐等内容进行了规定,而北美和澳大利亚规范中则没有相关内容^[14]。

2.3 钢结构材料标准的发展

我国建筑结构钢使用的主要材料标准为《碳素结构钢》GB/T 700 系列、《低合金结构钢》GB/T 1591 系列、《建筑结构用钢板》GB/T 19879 系列。

2.3.1 碳素结构钢标准

1) GB 700—65《普通碳素钢》及 GB 700—79《普通碳素结构钢技术条件》。

我国于 1958 年成功研制了碳素钢,作为廉价、耐用易加工的钢材,在我国工业化初期得到了广泛的应用,碳素钢的技术指标最早体现在冶金行业标准 YB 170—63《普通碳素结构钢和低合金结构钢热轧条钢技术条件》中。碳素结构钢首部国家标准于 1965 年 1 月发布,即 GB 700—65《普通碳素钢》,该标准主要参考前苏联标准体系,将碳素钢分为 0~7 共 8 个级别,序号越高,碳含量越高,强度越大;同时又细分为 A、B、C 三类,区分钢材的力学性能和化

学成分^[15]。

本标准投入使用后,于 1979 年开展了第一次修订,整体仍沿用前苏联标准体系,相比于 65 版标准,取消了应用较少的 0 号钢和 7 号钢,更名为 GB 700—79《普通碳素结构钢技术条件》。

2) GB 700—88《碳素结构钢》。

改革开放后,随着我国工业制造水平的大幅提升,苏联标准体系逐渐不合时宜,原标准中一个牌号只有一种成分和性能,不能满足不同的使用需求,也没有规定冲击韧性等重要的指标。为此,1987 年以国际标准 ISO 630—1987《结构钢》为主要参照,并结合自身国情,对碳素钢国标进行了第二次修订,即 GB 700—88《碳素结构钢》,明确了标准的适用范围;提出了由屈服强度字母、数值、质量等级、脱氧方法字母组成的新牌号表示方法;取消了 79 版标准中的 6 号钢,原 1~5 号钢牌号改为 Q195、Q215、Q235、Q255、Q275;修改化学性能要求,采用了国外提 Mn 降 C 的技术路线,既保证强度又降低碳含量,降低 P、S 含量从而提高韧性和焊接性;重新规定了钢材的力学性能,按照对材料韧性的要求将钢材分为 A~D 四个质量等级,修改了屈服强度、抗拉强度和伸长率的要求,并规定了冲击韧性试验为钢材的必须检验项目之一。

3) GB/T 700—2006《碳素结构钢》。

结合应用近 20 年来的大量工程经验,碳素结构钢系列标准的第三次修订吸收了 ISO 标准 630:1995《结构钢》的部分技术内容,对 1988 版《碳素结构钢》做出了 10 余项修改,取消了“脱氧方法”中的半镇静钢;取消 Q255 和 Q275 牌号;修改各钢材牌号中的化学成分含量,参照国际标准取消了碳、硅、锰元素的含量下限;提高 Q235 钢材的抗拉强度和屈服强度、断后伸长率的性能指标;明确 Q195、Q235BF 轧制钢材的厚度限值;修改冲击试验有关的规定,采用国际标准最小冲击吸收功图;更新了钢材产品的检验规则等。碳素结构钢标准内容变迁见表 4。

2.3.2 低合金结构钢系列

1) YB 13—59、YB 13—63、YB 13—69《低合金高强度钢钢种及一般技术条件》及 GB 1591—79《低合金结构钢技术条件》。

我国低合金钢的发展始于 1956 年试制 16Mn 钢,1959 年首次制订了冶金行业的低合金钢标准 YB 13—59,将低合金钢列为 11 个牌号。1963 年修订为 YB 13—63,新增了 25MnSi 牌号。这些牌号多

表 4 碳素结构钢标准内容变迁

Table 4 Transformation of carbon structural steel standard content

类别	GB 700—65 《普通碳素钢》	GB 700—79 《普通碳素结构钢技术条件》	GB 700—88 《碳素结构钢》	GB/T 700—2006 《碳素结构钢》
厚度	明确适用范围,使用热轧普通碳素结构钢及钢板	修改适用范围,条钢厚度 100 mm 以下,异型钢厚度 20 mm 以下,钢板厚度 40 mm 以下	扩大适用范围,既包含普通钢也包含优质钢;适用范围一律提高到厚度 200 mm 以下	脱氧方法中取消了半镇静钢
牌号	钢号按含碳量分为 0~7 七类	取消 0 号钢和 7 号钢	取消 6 号钢;修改牌号表示方法 1~5 号钢改为 Q195、Q215、Q235、Q255、Q275	取消 Q255 牌号,新增 ISO630:1995 中的 E275 牌号,改为新的 Q275 牌号
成分	提出化学成分要求,主要靠 C 元素提高强度,Mn 元素只起脱氧作用		修改化学成分要求,采用提 Mn 降 C 的技术路线	调整碳、锰、硅、磷、硫、氮等元素的含量限值
力学性能	甲类钢按力学性能供应;乙类钢按化学成分供应;特类钢按力学性能和化学成分供应 使用 U 型缺口冲击试样进行冲击试验	规定冲击韧性试验为主要检验项目,使用 V 型缺口冲击试样进行冲击试验	按照材料韧性的不同分为 A~D 四个质量等级 修改冲击试验规定,增加最小冲击吸收功	取消厚度不大于 16 mm 钢的断后伸长率规定

数引用苏联,而 16Mn 参照德国 DIN17100 标准^[16]。

20 世纪 60 年代,我国自行研制了不少低合金钢牌号,本标准在 1969 年的修订中,将钢牌号从 12 个扩大到了 21 个,同时扩大了标准适用的尺寸规格范围。但限于当时大环境的影响,新增牌号中有一些不成熟乃至性能低劣的品种,标准的修订水准也偏低,相较 63 版标准,69 版标准的技术含量明显降低。

特殊历史时期后,我国对 YB 13—69 进行了修订,升级为国标 GB 1591—79《低合金结构钢技术条件》,取消了 69 版标准中新增的 II 组钢以及 16Mn 钢化学条件和力学性能修改的规定,恢复到 63 版的技术水平。

2)GB 1591—88、GB 1591—94《低合金高强度结构钢》。

我国钢铁产品从 20 世纪 80 年代开始采用国际标准,在 1988 年修订碳素钢标准的同时,对低合金钢标准也进行了修订,即 GB 1591—88《低合金高强度结构钢》。但是受我国钢铁企业当时的装备及工艺限制,88 版标准的修订规模较小,相较 79 版标准,修改了硅、硫和稀土元素含量要求,规定了抗拉强度范围,提高了伸长率要求。

本次修订后,GB 1591—88 标准仍与国际标准不接轨,且差距较大,十分不利于我国低合金钢的发展。因此很快开始了新一轮的修订,这次修订突破了旧标准的框架,采用 ISO 4950:1981《正火或控轧高屈服强度扁平钢材》及 ISO 4951:1979《高屈服强度钢棒材和型材》,确立了由屈服点拼音字母、屈服点数值、质量等级符号构成的钢材牌号表示方法,确立了 Q295、Q345、Q390、Q420、Q460 五个当时常用的钢材牌号;根据市场经济要求调整钢材 C、Mn 成

分,参考 ISO 标准加入微合金化的要求,这一技术路线能够显著提高 C、D、E 等重要用途常用质量等级钢材的性能;新增了钢材的交货状态规定;调整了力学性能和冷弯试验的规定。94 版《低合金高强度结构钢》标准整体与国际水平接轨^[17]。

3)GB/T 1591—2008、GB/T 1591—2018《低合金高强度结构钢》。

随着钢结构行业上下游领域的全面发展,工程应用须与国外接轨,采用新型高强度、高韧性和具有良好焊接性的钢材,因此参照欧洲标准 EN 10025:2004《结构钢热轧产品》对 94 版《低合金高强度结构钢》进行修订,推出了 GB/T 1591—2008《低合金高强度结构钢》,将适用范围扩大到 Q500~Q690 级别的钢材,取消了 Q295 钢;规定了热轧、控轧、正火、正火轧制、正火加回火、机械轧制等多种交货方式;提高了钢材屈服强度,降低伸长率;提高了冲击吸收能量值;加入了厚度方向的性能要求等。

10 余年来,我国钢结构工程中应用 Q345 等低合金高强度结构钢的比重已占到总用钢量的 80% 以上,大量的工程应用催生了对标准规范条款的优化要求。部分钢厂已经能够按 EN 标准、ATSM 标准、JIS 标准的要求生产和供货,我国钢材标准也需要同步等效或参照国外标准。因此于 2018 年参照欧标 EN10025《非合金钢化学成分及其性能》对 08 版标准的钢材牌号、质量等级、性能指标和交货状态进行了多处重要的修改与优化,并用 Q355 牌号取代了 Q345 牌号,与欧标 S355 对应,为国标钢材的国际化应用铺平道路,最终形成了目前应用的 GB/T 1591—2018《低合金高强度结构钢》^[18]。低合金结构钢标准内容变迁见表 5。

表 5 低合金结构钢标准内容变迁

Table 5 Transformation of low alloy structural steel standard content						
类别	YB 13—59、YB 13—63 《低合金高强度钢钢种 及一般技术条件》	YB 13—69 《低合金高强度钢钢种 及一般技术条件》	GB 1591—79 《低合金结构 钢技术条件》	GB 1591—88、 GB 1591—94 《低合金高强度结构钢》	GB/T 1591—2008 《低合金高强度 结构钢》	GB/T 1591—2018 《低合金高强度 结构钢》
厚度	提出适用范围	扩大适用范围, 板材厚 度扩大到 50 mm, 方钢 扩大到 100 mm		明确适用于厚度不小于 3 mm 的钢板、钢带、型钢 及钢棒	扩大适用范围, 不再规 定最小厚度	明确本标准化学成分 要求适用于钢坯; 修 改部分术语定义
牌号	提出 12 个钢牌号, 主要为 引进的苏联、民主德国标 准牌号, 以 16Mn (相当于 St52) 系为主	钢牌号增加到 22 个	取消 II 组钢, 此版本 剩下 18 个牌号	更新牌号表示方法, 牌号 分为 Q295、Q345、Q390、 Q420、Q460	增加 Q500、Q550、Q620、 Q690 牌号, 取消 Q295 牌号	以 Q355 钢替代 Q345 钢及相关要求; 增加 了与国外标准牌号对 照表
成分	提出化学成分要求	增加了多种合金元素如 钒、钛、铌	取消上一版标准中 16Mn 允许提供含碳 量上限的规定	原标准化学成分只规定一 个范围, 新标准按质量等 级划分成分, Mn 含量比原 标准放宽 0.2% ~ 0.3%, 碳含量不设下限, 硫、磷要 求变化较大	加强对硫、磷的控制; 增 加钢材碳当量及裂纹敏 感系数的计算	修改细化晶粒元素 含量
力学 性能	提出屈服点、抗拉强度、伸 长率的要求, 划分强度 级别	强度级别由 7 个减少到 5 个	取消上一版标准中 16Mn 允许降低屈服 点、抗拉强度、伸长率 的规定	根据 ISO 标准修改屈服 点、抗拉强度和伸长率要 求。冲击韧性试验由协议 条件改为基本保证条件; 根据不同强度等级、用途 和韧性分为 A ~ E 五个质 量等级	修改力学性能值及裂纹 敏感系数的规定; 提高 冲击吸收能量值; 增加 厚度方向性能要求	将下屈服强度改为上 屈服强度; 修改试验 方法, 明确冲击试验 的取样部位

2.3.3 建筑结构用钢板系列

1) GB/T 19879—2005《建筑结构用钢板》。

20 世纪 90 年代我国高层钢结构建筑开始蓬勃发展, 高层钢结构建筑对所用钢材的质量要求较高, 化学成分、碳含量、屈强比、屈服点波动范围及 Z 向性能等方面都有严格要求, 是当时的一般工程结构用钢材标准中没有的。厂家生产和供货时往往需要额外签订技术协议, 不利于钢板的正常生产和使用。因此我国为推广高层建筑结构用钢, 起草了冶金行业标准 YB 4104—2000《高层建筑用钢板》, 该标准参考了日本 JIS G 3136 : 1994《建筑结构用轧制钢材》, 并与 JGJ 99—98《高层民用建筑钢结构技术规程》相协调, 规定了 GJ 钢板的尺寸、外形、技术要求、试验方法、检验规则等内容。该标准于 2005 年修订升级为 GB/T 19879—2005《建筑结构用钢板》。相较于 YB 4104—2000, 05 版国标中增加了 390、420、460 MPa 三个强度等级的钢板; Q235GJ 和 Q345GJ 增加了 B 级钢; 充分考虑国内钢厂的生产情况后, 本标准中将 Q345GJ 的屈强比限值改为 0.83^[19]。

2) GB/T 19879—2015《建筑结构用钢板》。

05 版标准实施后, 大批 GJ 钢厚板成功应用于国家体育场(鸟巢)、首都新机场、国家大剧院、中央电视台新址、上海环球贸易中心等标志性钢结构工

程中, 并收获了大量实践经验。在 05 版标准的基础上, 吸收了日本抗震建筑钢板的生产应用, 提高钢板抗震性能和材料利用率, 并与国内《抗规》及《高钢规》的材料要求相结合, 修订了 GB/T 19879—2015《建筑结构用钢板》, 增加了 Q500GJ~Q690GJ 等高强度 GJ 钢牌号和 质量等级, 修改了 Q235GJ~Q460GJ 钢板最大厚度限值; 明确了 Q500GJ 等高强度钢板屈服现象不明显时的屈服强度取值; 将 Q345GJ 钢的屈强比进一步由 0.83 调整为 0.80, Q390GJ~Q460GJ 的屈强比也均有所下调; 提高部分钢材的伸长率和最小冲击吸收能量等。

3) GB/T 5313—85、GB/T 5313—2010《厚度方向性能钢板》。

高层建筑及大型桥梁工程中, 常采用大厚度钢板, 不仅要求沿宽度和长度方向有一定的力学性能, 而且要求厚度方向有良好的抗层状撕裂性能, 这一性能主要通过厚度方向拉力试验的断面收缩率来评定。国际上常用的厚度方向性能钢板相关标准有美标 ASTM《特殊用途钢板厚度方向拉伸试验》系列及欧标 EN 10164《改进垂直于产品表面变形性能的钢产品》系列, 前者为试验方法标准, 后者为产品标准。我国主要参照欧标, 于 1985 年编制了 GB/T 5313—85《厚度方向性能钢板》, 提出了 Z15、Z25、Z35 三个厚度方向性能级别, 对厚度为 40 mm 以上

的钢板 Z 向性能要求不低于 Z15。而后结合我国厚度方向性能钢板生产和应用情况,修订完成了 GB/T 5313—2010《厚度方向性能钢板》,取消了适用钢

板的屈服强度级别;将最大厚度由 150 mm 提高到了 400 mm;修改了试验和检验规定。建筑结构用钢板标准内容变迁见表 6。

表 6 建筑结构用钢板标准内容变迁

Table 6 Transformation of steel plate for building structures standard content

类别	GB/T 19879—2005 《建筑结构用钢板》	GB/T 19879—2015 《建筑结构用钢板》	GB/T 5313—85 《厚度方向性能钢板》	GB/T 5313—2010 《厚度方向性能钢板》
厚度	明确适用范围 6~100 mm 钢板	修改适用范围,Q345GJ 适用于 6~200 mm 钢板;Q235GJ、Q390GJ、Q420GJ、Q460GJ 适用于 6~150 mm 钢板;Q500GJ、Q550GJ、Q620GJ、Q690GJ 适用 12~40 mm 钢板	明确适用范围 15 ~ 150 mm 镇静钢板	修改适用范围为 15~400 mm 的镇静钢板
牌号	钢板共五个牌号: Q235GJ、Q345GJ、Q390GJ、Q420GJ、Q460GJ	增加了 Q500GJ、Q550GJ、Q620GJ、Q690GJ 牌号	提出 Z 向性能的 3 个级别 Z15、Z25、Z35	
成分	提出各牌号钢板的化学成分要求;提出不同厚度方向性能级别钢板的硫含量要求,与 85 版《厚度方向性能钢板》一致	修改化学成分要求,严格控制含硫量	提出不同厚度方向性能级别钢板的硫含量要求	
力学性能	提出各牌号钢板的力学性能要求,其中 Q235GJ 屈强比不大于 0.80,Q345GJ 屈强比不大于 0.83,Q390GJ、Q420GJ 和 Q460GJ 屈强比不大于 0.85;提出不同厚度方向性能级别的断面收缩率要求,与 85 版《厚度方向性能钢板》一致	调整力学性能要求,屈服强度明确为下屈服强度;提高最小冲击吸收能量;Q345GJ 屈强比改为不大于 0.80,Q390GJ、Q420GJ 和 Q460GJ 屈强比改为不大于 0.83	提出不同厚度方向性能级别钢板的断面收缩率	

3 结束语

经过多年发展,国内钢结构标准体系已经日趋完善,形成了覆盖材料、设计标准及施工和验收的较为全面的标准体系,并且通过不断更新,将最新的科技成果和工程经验反映到标准中,助力了我国钢结构建筑的飞速发展。我国钢结构规范正逐步赶上甚至在一些方面超过了国际发展,但和国外规范相比,标准涵盖的广度、深度、修编频率还可以进一步提升,继续以标准为引领,推动我国钢结构事业向更好、更快方向发展。

参考文献

[1] 郁银泉,王喆,董庆园. 钢结构建筑标准体系[R]. 北京:中国建筑标准设计研究院,2015.

[2] 王立军.《钢结构设计规范》回顾与展望[J]. 工程建设标准化,2015(7):82-83.

[3] 沈祖炎. 中国《钢结构设计规范》的发展历程[J]. 建筑结构学报,2010(6):1-6.

[4] 罗邦富.《钢结构设计规范》(GBJ 17—88)内容简介[J]. 工业建筑,1990(8):41-46,61.

[5] 何家俊. 从《钢结构设计规范》看我国近三十年来钢结构设计技术的发展[J]. 大众科技,2007(9):21-22.

[6] 王立军. GB 50017—2017《钢结构设计标准》简述[J]. 钢结构,2018,33(6):77-79,114.

[7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构设计标准:GB 50017—2017[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2018.

[8] 李洋. 中欧钢结构设计规范对比研究[D]. 武汉:武汉大学,2016.

[9] 陈雪庭,徐厚军.《冷弯薄壁型钢结构技术规范》在我国颁布实施 40 周年的回顾与展望[J]. 钢结构,2009,24(7):59-61,15.

[10] 《冷弯薄壁型钢结构技术规范》简介[J]. 工业建筑,1989(8):60.

[11] 《薄壁型钢结构技术规范》TJ 18—75 修订内容简介[J]. 冶金建筑,1977(5):44-49.

[12] 《冷弯薄壁型钢结构技术规范》(GBJ 18—87)修订内容简答 12 题[J]. 钢结构,1992,7(4):5-11.

[13] 张中权,陈雪庭,徐厚军.《冷弯薄壁型钢结构技术规范》(GB 50018—2002)修订内容简介[J]. 钢结构,2002,17(5):52-54.

[14] 杨雪. 中、美、澳三国冷弯薄壁型钢结构规范对比研究[D]. 北京:北京交通大学,2008.

[15] 唐一凡.《碳素结构钢》(GB 700—88)标准编制情况综述[J]. 钢结构,2001,16(1):7-11.

[16] 唐一凡.《低合金高强度结构钢》(GB 1591—94)编制情况综述[J]. 钢结构,2001,16(1):12-15.

[17] 柴昶,陈禄如. 钢结构用钢材新标准及其应用[J]. 钢结构,2008,23(12):38-43.

[18] 柴昶,刘迎春. 关于新版国标 GB/T 1591—2018《低合金高强度结构钢》应用中的注意事项[J]. 钢结构(中英文),2020,35(6):50-54.

[19] 柴昶,刘迎春. 钢结构常用钢材标准的修订情况及其应用建议[J]. 建筑钢结构进展,2011(5):6-10,20.

Overview of China's Steel Structure Codes and Standards System

Yinquan Yu¹ Zhe Wang¹ Chang Chai² Lijun Wang³ Houjun Xu⁴

(1. *China Institute of Building Standard Design and Research, Beijing 100048, China;*

2. China Steel Construction Society, Beijing 100088, China;

3. Huachengboyuan Engineering Technology Group, Beijing 100043, China;

4. Central South Architectural Design Institute Co., Ltd., Wuhan 430206, China)

Abstract:

The current state of Chinese steel structure codes and standards system is summarized, with a review of the development process and technical content changes in major domestic codes and standards. The development process of Chinese steel structure standard code system is outlined, which can be divided into four stages: in the 1950s, China adopted the former Soviet Union's steel structure code as its first design class code; in the 1960s and 1970s, revisions were made to this code based on Chinese national conditions and engineering experience, including introducing specifications for thin-walled steel structures; In response to high demand for steel construction during the 1980s and 1990s, additional specifications were introduced for high-rise civil buildings, grid structures, reticulated shell structures and portal steel frames. Also, this research provides a comprehensive overview of the development process of key codes in the field of steel structure. The preparation and revision process of the "Standard for design of steel structures" is introduced, along with a summary of the main content revised in the code. A comparative analysis is conducted between design theories, steel constitutive relationships, structural analysis methods, seismic designs, structural stability considerations, and connector designs in relation to European design codes. Furthermore, an examination is made on the revision process and main contents of the "Technical code of cold-formed thin-wall steel structures". Differences between Chinese and foreign codes regarding calculations for structural mechanical properties are compared against relevant Australian and American codes. Additionally, this research focuses on introducing the development process of Carbon structural steel series, Low alloy Structural steel series as well as Steel plate for Building structures series within relevant standards for steel structure materials. Moreover, it summarizes supplementary content from each version of these codes while revising concepts and definitions related to mechanical properties. The aforementioned research demonstrates that Chinese steel structure standards are gradually aligning with and even surpassing international advancements in certain aspects. However, there is room for further improvement in terms of the comprehensiveness, depth, and frequency of standard and specification revisions.

Key words: steel structures; standards and specifications; development process