

舞钢高层建筑结构用钢板的发展

韦明 李玉谦

(舞阳钢铁有限责任公司)

摘要：本文介绍了舞钢高层建筑结构用钢板的研制开发情况、技术特点、实物质量水平和产品应用情况。

关键词：高层建筑 钢结构

The Development of High Rise Building Structure in WuYang Iron and Steel Co.ltd

Xie Liangfa, Wei Ming and Li Yuqian

(Wuyang Iron and Steel Co.ltd)

Abstract: This paper describes the research and development of high rise building plate produced by WuYang Iron and Steel Co.ltd, technical characteristics, actual quality level and production application are also introduced.

Keywords: high rise structure steel structure

1 前言

上世纪 80 年代以后，我国高层钢结构建筑得到了快速发展，建造了一批以金茂大厦为代表的高层钢结构建筑。为推动高层建筑结构用钢板的国产化，舞钢积极进行高层建筑结构用钢板的研究开发，并与冶金信息标准研究院合作，起草了我国第一部高层建筑结构用钢板行业标准 YB4104-2000。自 1996 年以来，舞钢公司先后承接了大连云山大廈、北京中银大厦、厦门国际会展中心、国家大剧院、上海文献大厦等高层建筑结构用钢板的供货合

同,开创了高层建筑结构用钢板国产化的先河,其实物质量达到或超过了同类进口产品。

2 高层建筑结构用钢板的开发

2.1 高建用钢的研制原则

高层建筑结构的受力情况复杂,要求具有安全可靠、使用寿命长,并能够抵御一定地震烈度的破坏等特点。这就决定了高层建筑结构用钢板要求具有一定的特殊性能,主要有以下几点:

(1) 能够抵御一定地震力的破坏,要能防震和抗震。为此钢板不仅要具有足够的抗拉强度和屈服强度,而且要具有较低的屈强比。低的屈强比可使材料具有良好的冷变形能力和高的塑性变形功,吸收较多的地震能,提高建筑物的抗震能力。

(2) 要具有良好的焊接性能,做到焊前不需预热,焊后不需热处理,以便于现场施焊,从而减少劳动强度、提高劳动效率。

(3) 要具有较高的塑性和韧性,以使钢板具有良好的综合力学性能。

(4) 要具有较小的屈服强度波动范围。屈服强度波动范围大时,建筑物各部分之间屈服强度的匹配可能与设计要求值不同,容易产生局部破坏,降低建筑物的抗震性。为此,日本标准中规定屈服强度波动范围不大于 120MPa。

(5) 采用焊接连接的梁与柱节点范围内,当节点约束较强、并承受沿板厚方向的拉力作用时,要求钢板必须要具有一定级别的抗层状撕裂能力。

(6) 对于建筑结构用耐火钢,在 600 的温度下,要求高温屈服强度不低于室温标准值的 2/3,耐火时间一般为 1~3 小时。

2.2 舞钢高建钢产品技术特点

为满足以上特殊性能要求,在钢板的成分和性能指标设计、生产工艺控制等方面进行了深入细致的研究。舞钢生产的屈服强度为 235MPa 和 345MPa 的高层建筑用钢板具有以下技术特点:

(1) 良好的综合力学性能

钢板具有适宜的强度,足够的塑性和韧性。

(2) 焊接碳当量低

焊接碳当量一般不大于 0.43% ($C_{eq}=C+Mn/6+(Cr+Mo+V)/5+(Ni+Cu)/15$),可保证钢板具有良好的焊接性能。

(3) 有害元素含量低

钢中的有害元素含量一般为：S 0.005%，P 0.015%。钢质比较纯净，有利于提高钢板的综合性能，尤其是 Z 向性能。

(4)低屈强比

屈服强度为 345Mpa 的高层建筑结构用钢，其屈强比一般为 0.60-0.78，低于日本工业标准中规定的屈强比不大于 0.80 的要求。

(5)屈服强度波动小

屈服强度的波动范围，对热轧钢板可控制在 100Mpa 以下，对正火钢板可控制在 80Mpa 以下，优于日本标准规定的不大于 120Mpa、YB4104 标准中规定的不大于 110Mpa 的要求。

(6)Z 向性能优良

钢板的 Z 向断面收缩率一般能达到 50-70%，远高于日本标准中规定的 Z25 要求，具有良好的抗层状撕裂能力。

(7)内部质量好

钢板的内部质量检测可以按照中国（JB4730、GB/T2970）、美国（A435、A577、A578）、日本（JISG0801、JISG0901）、德国（SEL072）、英国（BS5996）、法国（NF A04-305）等国内外探伤标准进行检验。

(8)品种、规格齐全

可以按照国内、国外不同标准，生产屈服强度在 195～460Mpa 之间的众多牌号的高层建筑结构用钢板。

产品规格范围广，可以生产厚度 8～300mm、宽度 1100～3900mm、长度 1200～27000mm、最大单重到 27 吨的宽厚钢板。

2.3 生产技术措施

舞钢公司对高层建筑结构用钢的生产，实行“精料、精炼、精轧、精整”的方针，严格按质量计划和内控质量标准控制生产中的各个环节，确保高层建筑结构用钢质量。高层建筑结构用钢工艺流程如下：

90 吨 UHP 电炉冶炼 LF 炉外精炼 VD 真空处理 连铸（或模铸） 加热 控轧 ACC 控冷 探伤（正火） 精整 性能检验 入库

2.3.1 成分设计

根据钢级、厚度规格、交货状态等的不同，在进行成分设计时，严格控制 C、Mn 元素的含量范围、加入适量的 Nb、V、Ti 等微合金元素，以降低碳当量、减轻板厚效应对性能的影响、减少屈服强度波动范围。

2.3.2 冶炼

冶炼前对废钢等原料进行精选，以减少带入钢中的外来夹杂、气体及残余元素含量。

在电炉冶炼熔化期加强造渣、流渣，通过偏心底出钢避渣操作等措施将 P 控制在 0.015%以下。在 LF 炉外精炼过程，加强造白渣，加强吹 Ar 促进钢水与渣的混合搅拌，经 VD 处理，将 S 控制在 0.005%以下，同时进行 Ca 处理，改善夹杂物形态。

2.3.3 轧制

通过控制轧制和控制冷却，可以细化晶粒，提高钢板的韧性，并获得期望的强度和屈强比等综合性能。轧机配有激光测厚仪和 AGC 厚度自动控制系统，可以精确控制厚度公差和板形，厚度公差可以控制在 -0.3 ~ +0.5mm，钢板的不平度可控制在 3mm/m 以下。

2.3.4 正火

正火钢板组织比较均匀，晶粒进一步细化，冲击韧性大幅度提高。通过正火，能够得到强度、塑性、韧性的最佳匹配。

2.4 产品开发现状

舞钢公司积极与国外标准接轨，每年等同采用国外先进标准生产的钢板都在 25 万吨以上。可以根据用户要求，生产屈服强度在 195-460Mpa 之间所有级别的国内外标准中的高层建筑结构用钢板。

3 舞钢高层建筑结构用钢板的应用

自 1996 年 10 份至今，舞钢开发高层建筑结构用钢板数十万吨，被先后应用于大连云山大廈、北京中银大厦、上海信息枢纽大厦、厦门国际会展中心、北京大剧院、上海文献大厦、北京电视中心等重要工程。

表 2：舞钢高层建筑钢结构用钢的应用

用途	牌号	技术条件	供货量 吨	供货时间 年
大连云山大厦	Q345B Q345/Z25	GB/T1591 附加特殊要求	2000	1996
北京中银大厦	A572Gr50	A572/A572M 附加特殊要求	1300	1997
上海信息枢纽大厦	SM490B SM490B/Z25	JISG 3106 附加特殊要求	3000	1998-1999
厦门国际会展中心	SM490B SM490B/Z25	JISG 3106 附加特殊要求	12000	1998-1999

广州奥林匹克 体育大厦	Q345B-Z25 (替代进口)	GB/T1591 附加特殊要求	1000	1999
广州体育中心	Q345B Q345B-Z15	GB/T1591 附加特殊要求	7600	1999-2000
广州白云机场	Q345B Q345B-Z15	GB/T1591 附加特殊要求	5200	2000
芜湖体育馆	Q345C Q345C-Z15	GB/T1591 附加特殊要求	1000	2002
上海新国际博览中心	Q345B Q345B-Z15	GB/T1591 附加特殊要求	1020	2002
长春体育公园	Q345D Q345D/Z25	GB/T1591 附加特殊要求	1000	2002
国家大剧院	Q345D、Q345D/Z25、Q345D/Z35	GB/T1591	4800	2002
上海世贸大厦	Q345C、Q345C/Z15	GB/T1591	3000	2002
上海万向广场	Q345B Q345B-Z15	GB/T1591 附加特殊要求	12230	2002
上海文献大厦	Q345B、Q345B/Z15、Q345B/Z25 Q345GJZ25C、Q345GJZ35C	GB/T1591 YB4104	6000	2003
北京中关村金融中心	Q345GJC、Q345GJZ15C	YB4104	4400	2003
深圳会展中心	Q345B、Q345B-Z15	GB/T1591	16900	2003
北京电视中心	Q345B、Q345B/Z15 Q345GJC、Q345GJZ15C	GB/T1591 YB4104	2450	2003

4 实物质量

4.1 系列温度冲击试验

30mm 厚（热轧）、65mm 厚（正火）的 Q345GJD 系列温度冲击试验结果见图 1。

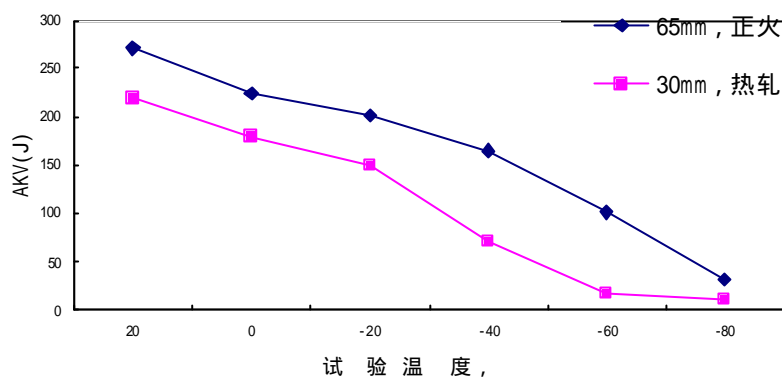


图 1：系列冲击试验

4.2 弹性模量 (E) 试验

对 65mm 厚的正火 Q345GJD，按 GB/T2105-91 做金属材料杨氏模量试验，所测结果分别为：212.9GPa、212.4GPa、211.3GPa，平均为 212.2Gpa。

4.3 NDT 落锤试验

对板厚为 65mm，正火的 Q345GJD 做落锤试验，测得零塑性转变温度为-60

4.4 裂纹尖端张开位移 CTOD 试验

对板厚为 65mm，正火的 Q345GJD，按 GB2358-94 进行裂纹尖端张开位移 CTOD 试验，结果见表 3。

表 3：裂纹尖端张开位移 CTOD 试验

试样类型	裂纹面取向	试验温度	0.05 (mm)	i (mm)	m(mm)
SE(B)	T-L	-20	0.363	0.595	1.894

测得的 $R - a$ 阻力曲线方程为：

$$R = 1.5470 a + 0.2854 \pm 0.0696 (R=0.9918, S=0.0696)$$

4.5 疲劳裂纹扩展速率 da/dN 试验

对板厚为 65mm，正火的 Q345GJD，按 GB6398-86 进行疲劳裂纹扩展速率 da/dN 试验，测得的 da/dN- k 表达式为：

$$\lg(da/dN) = -7.8603 + 2.7941 \lg(k) \quad (R=0.9845)$$

4.6 金相检验

对板厚为 65mm，正火的 Q345GJD，进行夹杂物、晶粒度、组织检验，结果表明钢质纯净、夹杂物含量低、晶粒比较细小（结果见表 4）

表 4：金相检验

夹 杂 物				晶粒度	组织
A 类	B 类	C 类	D 类		
0	1.5	0	1.0	9.5 级	F+P

5 舞钢高层建筑结构用钢的最新开发状况

5.1 耐火建筑结构用钢板

为少用或不用防火涂层、减少环境污染、降低建造成本，舞钢开发了屈服强度为 345MPa 级的建筑结构用耐火钢。

5.1.1 化学成分

舞钢开发的建筑结构用耐火钢，其化学成分技术要求见表 5。

表 5：化学成分 Wt%

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Nb	V	Ti
0.10	0.40	1.50	0.020	0.010	0.50	0.60	0.050	0.080	0.025

5.1.2 主要技术措施

钢结构在火灾情况下，强度一般会迅速下降，结构温度达到 350、500、600 时强度一般分别下降 1/3，1/2，2/3。为提高高温强度，并达到建筑结构用钢的技术要求，主要采取了以下技术措施：

（1）固溶强化和沉淀强化

单独或复合加入 Cr、Mo、Nb、V、Ti 等元素。通过这些元素的固溶强化（如 Cr、Mo）或其化合物的沉淀强化（如 Mo₂C、NbC 等），来提高屈服强度。

（2）低 C 含量

将 C 含量控制在较低的范围加入，防止加入 Cr 或 Mo 后碳当量急剧提高，导致焊接

性能恶化。

(3) 控制轧制和控制冷却

通过控制轧制和控制冷却，实现对钢板显微组织的控制，获得理想的综合力学性能。

5.1.3 性能结果

舞钢研制的建筑结构用耐火钢，力学性能结果主要如下：

在 600 的温度下，高温屈服强度在 230MPa 以上，满足了耐火钢规定的高温屈服强度大于等于室温标准值的 2/3 以上(即 217MPa)的要求；具有较低的屈强比，一般为 0.65 ~ 0.75；厚度方向断面收缩率一般为 55 ~ 75%，远高于 Z35 的技术要求；横向夏比 V 型缺口冲击性能良好，20 冲击功在 180J 以上，0 冲击功在 100J 以上，-20 冲击功在 60J 以上。

表 6：耐火钢实物性能

编 号	批号	规格 mm	0.2 MPa	b MPa	5 %	0.2/ b	0.2, 600 MPa	冲击, 横向			z		
								-20, J			%		
1	214196	30	385	570	30	0.68	230	94	164	166	63	70	75
2	214198	30	405	590	28	0.69	260	220	214	220	64	64	68
3	214194	40	395	575	27	0.69	260	184	165	172	60	63	58

5.2 耐候建筑结构用钢板

通过加入适量的 Cu、Cr、Ni 等合金元素,在金属基体表面形成保护层，满足建筑物耐大气腐蚀的要求，目前舞钢公司已批量生产供货 Corten B、16CuCr、15MnCuCr、09CuPCrNiA 等耐候钢数万吨。

6 结论

1、舞钢高层建筑结构用钢板力学性能优异，屈服和抗拉强度波动范围小，屈强比低，冲击韧性和 Z 向断面收缩率均有较大富余量，足以满足高层建筑对抗震性和对关键材料的综合性能要求。

2、舞钢高层建筑结构用钢板化学成分控制得当，P、S 含量及碳当量、焊接裂纹敏感性指数都比较低，具有良好的抗层状撕裂性能和焊接性能。