

文章编号: 1004-0609(2004)S1-0224-07

大线能量焊接耐火耐候建筑用钢的研制及应用^①

陈 晓^{1, 2}, 刘继雄^{1, 2}, 董汉雄¹, 李平和¹, 习天辉^{1, 2}, 卜 勇¹

(1. 武汉钢铁(集团)公司技术中心, 武汉 430080; 2. 武汉科技大学, 武汉 430081)

摘 要: 对大线能量焊接耐火耐候建筑用钢 WJ510C2 的力学性能、焊接性能及其典型应用进行了研究。试验结果表明: 该钢具有优良的综合力学性能, 在 600 ℃温度下的屈服强度均高于其室温下屈服强度的 2/3, 完全满足建筑结构用钢耐火安全性的强度许用指标; 该钢具有低的焊接冷裂纹敏感性, 能承受大线能量(50~100 kJ/cm)焊接; 该钢在大型建筑应用中的实际效果良好。

关键词: 耐火性能; 耐候性能; 力学性能; 焊接性能; 大线能量焊接; 建筑钢

Development of fire-resistant and weathering construction steel weldable with high heat input and its typical use

CHEN Xiao^{1, 2}, LIU Jixiong^{1, 2}, DONG Hanxiong¹, LI Pinghe¹,

XI Tianhui^{1, 2}, BU Yong¹

(1. NETC of Wuhan Iron and Steel (Group) Corporation, Wuhan 430080, China;

2. Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

Abstract: The mechanical performance, weldability and usage of high fire-resistant and weathering construction steel named WJ510C2 were evaluated. The results show that this steel has fine integrated mechanical performance and the yield strength of the steel at 600 ℃ is more than 2/3 of the yield strength at room temperature, which is suitable for the fire-resistant safety of constructions. The steel has low cold-cracking sensitivity and can bear high heat input (50~100 kJ/cm). The practical use in huge constructions is excellent.

Key words: fire-resistant; weathering; mechanical performance; weldability; high heat input; construction steel

20 世纪土建结构领域的重大进展之一就是高层钢结构和大跨度空间结构的兴建。21 世纪随着高层、超高层、大跨度及轻钢轻板建筑的兴起, 钢结构必将成为建筑业发展的方向, 必将逐步替代土建结构。钢结构建筑对于中国人来说并不陌生, 虽然秦砖汉瓦的时代让现代都市人留恋, 但随着我国国民经济的发展与城市建设速度的加快, 钢结构建筑必将与日俱增, 尤其是超高层建筑均采用了钢结构的形式。我国《国家建筑钢结构产业“十五”计划和 2015 年发展规划纲要》的目标是争取达到每年建筑钢结构的用钢量占全国钢材总产量的 3%。但钢结构建筑的耐火性能远较砖石结构和钢筋混凝土结构为差。钢材的机械强度是温度的函数^[1], 一般说

来, 可以认为钢材的强度和弹性模量随温度的升高而降低, 而且在高温下钢材的力学性能会发生明显变化, 主要表现在强度和刚度的明显降低。温度为 400 ℃时, 其屈服强度降低一半, 温度为 600 ℃时, 钢材基本丧失承载力^[2]。当钢材的温度升高到某一值(破坏极限时的温度值)而使其失去支撑能力的温度值定义为该钢材的临界温度^[1]。

近年来, 武汉钢铁公司自主开发成功的具有国际领先水平的高性能耐火耐候建筑用钢, 其耐候性能与美国的 Cor-ten 钢相当, 为普通钢材的 2~8 倍; 其耐火性能与日本的 FR 钢相当, 即保证在 600 ℃高温下其屈服强度不低于标准要求屈服强度的 2/3, 这也是保证建筑结构用钢安全性的一个必要

① 作者简介: 陈 晓(1940-), 男, 教授级高工, 博士生导师。

通讯作者: 陈 晓, 教授级高工; 电话: 027-86805844; E-mail: chxi@wisco.com.cn

的许用指标。该钢获得了国家发明专利(专利号: ZL 01 1 33562.9), 2001 年 10 月通过 4 位院士参加的省部级鉴定, 一致认为该成果“属技术首创, 达到国际领先水平”。本文作者通过该钢力学性能实验、焊接热模拟实验、组织结构分析及焊接性能实验等, 对该钢的力学性能、焊接性能及其组织结构和典型应用进行了分析和研究。

1 力学实验

高性能耐火耐候建筑用钢 WGJ510C2 的力学性能及冷弯性能应满足表 1 的规定。按不同试验要求, 选取不同厚度的钢板进行了以下力学性能试验^[3]。

1.1 拉伸试验

1.1.1 常温拉伸性能

对厚度为 10 mm、50 mm 的 WGJ510C2 钢板取纵、横向试样, 在常温下进行拉伸试验。试验结果见表 2。

从试验结果可以看出, 各项指标均满足表 1 的要求, 且有较大的富裕量, 相同厚度试样纵横向以及不同取样部位的拉伸性能无明显差异。

1.1.2 高温拉伸性能

厚度为 10 mm 的 Q235、Q345 和 WGJ510C2

钢板及 50 mm 的 WGJ510C2 钢板均取横向拉伸试样(直径均为 10 mm)在 100 kN 电子拉伸试验机上进行高温拉伸试验, 采用 E45 型红外加热炉对试样加热并保温, 保温时间不小于 20 min, 试验温度小于 300 ℃时所测屈服强度为 σ_s 。试验结果如图 1 和图 2 所示。

从图 1 中可以看出, 随着温度的升高, WGJ510C2 钢屈服强度下降平缓, 在 600 ℃下屈服强度为 265 MPa, 不低于室温下屈服强度的 2/3, 完全满足耐火建筑钢板的设计要求, 在 700 ℃下仍有 212 MPa。但 Q235 和 Q345 钢在 300~400 ℃下屈服强度急剧下降, 这说明该类钢在此温度范围已开始软化, 进入更高温度, 其强度性能更加恶化。

同表 2 的结果相比较, 在温度小于 400 ℃时, 10 mm 板厚试样的抗张强度与室温下的试验结果相当, 屈服强度略有降低, 50 mm 板厚试样的强度结果则均有下降。但总的趋势还是: 强度随着温度的升高而降低, 在 400 ℃左右时出现蓝脆现象, 这在 10 mm 板和 50 mm 板中均存在。塑性数值随温度的升高而缓慢下降, 整个波动幅度不大。

1.1.3 Z 向拉伸性能

对厚度为 50 mm 的 WGJ510C2 钢板取厚度方向拉伸样块, 经摩擦焊接夹持样头后加工成直径 $d_0=10\text{ mm}$ 、标距 $\geq 1.5d_0$ 的圆柱形 Z 向拉伸试样, 钢板厚度均位于试样的平行部。试验在 WE-

表 1 力学性能及冷弯性能技术要求

交货状态	取样方向	板厚/mm	拉伸试验		冲击试验		冷弯试验	高温拉伸
			σ_s/MPa	σ_b/MPa	$\delta_5/\%$	$A_{kv}(0\text{ }^\circ\text{C})/\text{J}$	180°	600 ℃屈服点 σ_s/MPa
热轧或正火+ 回火	纵向	4~16	≥ 325	≥ 510			$d=2a$	≥ 217
		>16~36	≥ 315	≥ 490	≥ 21	≥ 47		≥ 210
		>36~60	≥ 305	≥ 470			$d=3a$	≥ 204

表 2 钢板拉伸试验结果

板厚/mm	取样方向 及部位	σ_s/MPa		σ_b/MPa		$\delta_5/\%$		$\phi/\%$		σ_s/σ_b	
10	L, 全厚	425	425	560	560	31	28	—	—	0.76	0.76
	T, 全厚	430	465	580	560	28	28	—	—	0.74	0.83
50	L, 表层	380	390	545	550	32	30	73	76	0.70	0.71
	L, $t/4$	360	345	545	540	30	31	77	76	0.66	0.64
	T, 表层	365	370	545	545	33	33	76	76	0.67	0.68
	T, $t/4$	350	355	545	545	30	30	74	74	0.64	0.65

注: L—纵向; T—横向; t —板厚。以下同。

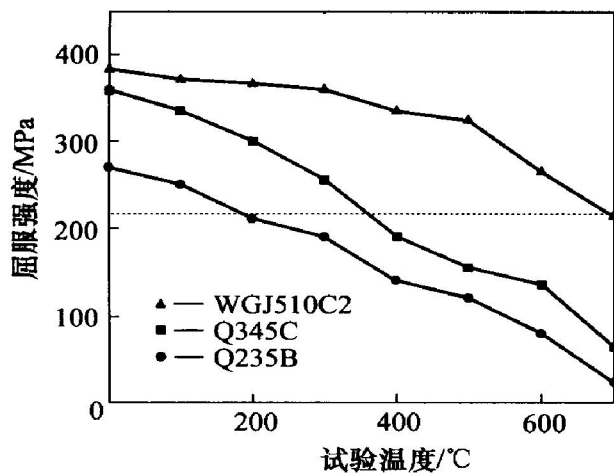


图1 10 mm 厚 WGJ510C2 和 Q345、Q235 钢板系列温度下屈服强度的对比

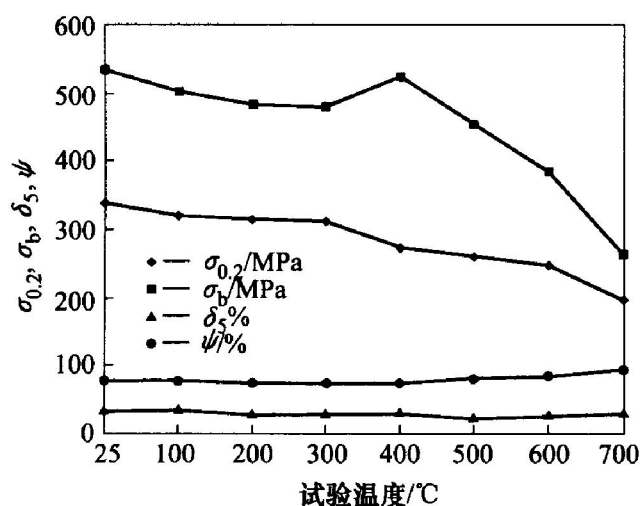


图2 50 mm 厚 WGJ510C2 钢板高温拉伸试验结果

300kN 万能材料试验机上进行, 环境温度为室温, 空气介质。试验结果见表 3。

表3 钢板 Z 向拉伸试验结果

试样编号	σ_b / MPa	ψ_z / %
1	540	57
2	545	77
3	540	56
4	530	43
5	545	76
6	545	54

厚壁钢材焊接的致命缺陷是发生沿母材板厚方向的层状撕裂, 这与母材的 Z 向性能有很大关系, 所以钢结构用厚钢板在订货时一定要提出 Z 向性能的等级要求, 并按规定进行抽样复验。一般认为, 在钢材中含有硫、磷等有害杂质, 在轧制过程中易形成片状硫化夹杂物等材质缺陷, 可能导致钢材沿板厚方向 (Z 向) 受力时 (通常为焊接收缩应力)

容易分层撕裂, 产生层状撕裂后一般很难修复。从表 3 可以看出, WGJ510C2 钢板 ψ_z 最大为 77%, 最小为 43%, 高于 Z 向钢最高级别 Z35 要求的 ψ_z 大于等于 35%, 表明 WGJ510C2 钢板具有优良的抗层状撕裂能力。

1.2 冲击性能试验

对不同板厚 (10 mm、50 mm)、不同取样方向 (纵向、横向)、不同取样部位 (表层、 $t/4$ 、 $t/2$) 试样进行系列温度冲击试验, 试验结果见图 3, 其中 10 mm 板厚的试样尺寸为 7.5 mm × 10 mm × 55 mm。

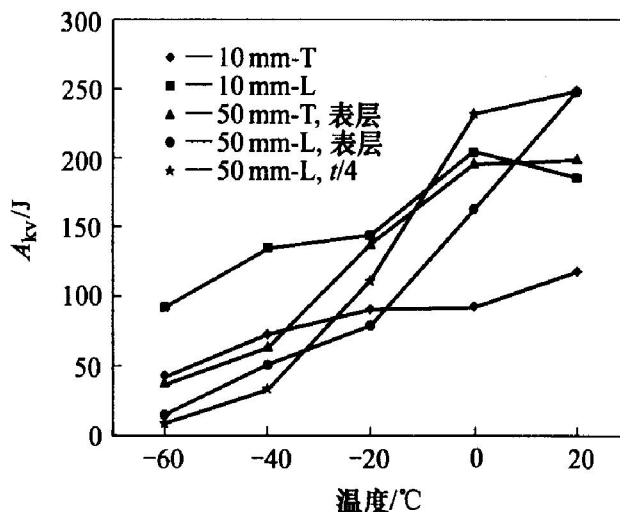


图3 10 mm、50 mm 厚钢板系列温度冲击试验结果

从试验结果可以看出:

1) WGJ510C2 钢板具有优良的冲击韧性。不同板厚不同取样部位的冲击功, 在 0 °C 试验温度下均大于 100 J, 对照高性能技术条件的要求, 仍具有较大的富裕量。

2) 按脆性转变温度的常规判据, 对照图 3 可得: 脆性转变温度 t_c (10 mm-T) < -40 °C, t_c (10 mm-L) < -60 °C, t_c (50 mm-T, 表层) $\approx$ -30 °C, t_c (50 mm-L, 表层) $\approx$ -10 °C, t_c (50 mm-L, $t/4$) $\approx$ -20 °C。在冲击功为 47 J 时, 所有试验材料的温度均低于 -30 °C。

3) 10 mm 和 50 mm 两种厚度的钢板, 无论是纵、横向取样还是不同厚度部位 (表层或 $t/4$ 处) 取样, 当试验温度 $\geq$ -20 °C 时, 其冲击韧性均在 100 J 以上, 即使是在 -40 °C, 其冲击韧性仍保持较高的水平。

2 焊接实验

手弧焊采用 HHJ506 焊条, 扩散氢含量为 3.4

mL/ 100 g。按不同试验要求选取不同厚度的高性能耐火耐候建筑用 WJ510C2 钢板进行了以下性能试验。模拟焊接热影响区试验在 Gleeble 2000 上进行。

2.1 焊接冷裂纹敏感性试验

2.1.1 钢的冷裂纹敏感性评估

P_{cm} 值是日本焊接协会 WES 3009-1983《低焊接冷裂纹敏感性高强度钢》标准中用于评定焊接冷裂纹敏感性的指标。根据该标准规定, 只有当钢的 $P_{cm} \leq 0.20\%$ 时, 防止根部裂纹(根部裂纹是在拘束条件下进行焊接时最易产生的冷裂纹)的焊接预热温度才不会高于 50℃。

$$P_{cm}/\% = w(C) + w(Si)/30 + w(Mn + Cu + Cr)/20 + w(Ni)/60 + w(Mo)/15 + w(V)/10 + 5w(B) \tag{1}$$

若考虑到焊缝金属中扩散氢以及板厚对焊接冷裂纹的影响, 可在 P_{cm} 的基础上进一步得到 P_c 指数。根据 P_c 值可以计算小铁研试验时不产生根部裂纹的预热温度值 t_0 。

$$P_c/\% = P_{cm} + [H]/60 + t/600 \tag{2}$$

$$t_0/^\circ\text{C} = 1\,440P_c - 392 \tag{3}$$

式中 P_{cm} —焊接裂纹敏感性组成, %; P_c —焊接裂纹敏感性指数, %; $[H]$ —焊缝扩散氢含量, mL/100 g; t —钢板厚度, mm; t_0 —防止产生焊接冷裂纹的预热温度, ℃。

根据以上公式, 试验钢的 P_{cm} 、 P_c 及需预热的温度如表 4 所示。

表 4 P_{cm} 、 P_c 及焊接预热温度计算

板厚/mm	$P_{cm}/\%$	$[H]/(\text{mL}\cdot(100\text{g})^{-1})$	$P_c/\%$	$t_0/^\circ\text{C}$
10	0.19	3.4	0.28	7
50	0.19	3.4	0.34	103

注: $[H]$ 是采用甘油法测定的 HHJ506 焊条的扩散氢含量

以上计算结果表明, WJ510C2 钢板的 P_{cm} 值 < 0.20%。当板厚为 10 mm 时, 焊前可不用预热; 但当板厚增加以及其它因素造成焊接拘束应力较大时, 就应采用预热等工艺措施, 并在选用焊接材料时尽量采用低氢或超低氢型焊接材料, 以降低钢板的焊接冷裂纹倾向。但总的来说, 计算结果表明, 即使要求在预热条件下焊接, 只需较低的预热温度, 就可避免焊接冷裂纹的产生。

2.1.2 焊接热影响区最高硬度试验

该试验是以焊接热影响区最高硬度来间接评价

钢板焊接冷裂纹倾向的试验方法。

在常温和不同预热温度下焊接时, 两种规格 WJ510C2 钢板焊接热影响区的硬度分布分别见图 4(a) 和图 4(b)。

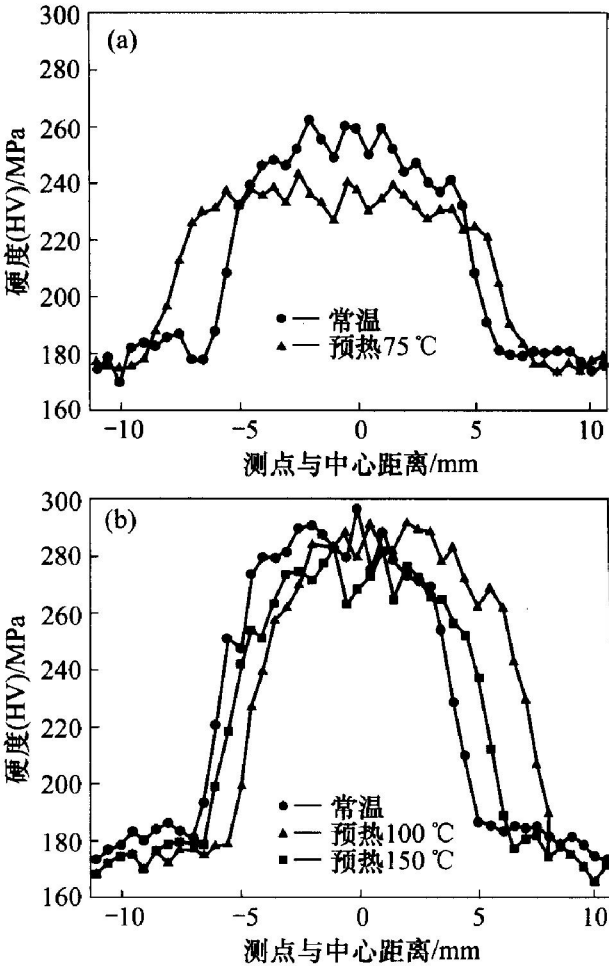


图 4 焊接热影响区最高硬度曲线 (a) 10 mm 板; (b) 50 mm 板

结果表明, 厚度分别为 10 mm 和 50 mm 的钢板, 常温下焊接时热影响区最高硬度值分别为 HV262 和 HV292, 在预热情况下最高硬度值更低, 且均低于国际焊接学会提出的钢的焊接冷裂纹倾向的临界硬度值 HV350。从最高硬度试验来判断, 该钢的抗裂纹性能是良好的。

2.1.3 斜 Y 坡口焊接裂纹试验

试板厚度为 50 mm, 采用低氢型碱性焊条 HHJ506 进行焊接, 环境温度 26℃, 环境湿度 65%。每一预热温度下焊接 3 副试板, 焊后先对每付试板进行表面裂纹检查, 然后根据标准沿试验焊缝长度方向取出 5 个横截面, 进行断面裂纹检查, 并对裂纹长度进行统计分析。试验结果如表 5 所示。

由于 052# 试样的拘束间隙过大, 所以在受检焊缝断面上出现了贯穿了整个断面的裂纹。该裂纹

从根部起源, 经过热区拐向焊缝, 然后又折向 HAZ。053[#] 试样在断面上的裂纹, 也是从根部起源, 经过热区拐向焊缝并停止。排除 52[#] 异常试样后可以看出, 厚度为 50 mm 的钢板在常温下的断面裂纹率为 4.8%。预热到 100 ℃ 时, 受检焊缝表面和断面均不存在任何形式的裂纹, 说明在此预热温度下进行焊接, 可以完全避免焊接冷裂纹的产生。

表 5 斜 Y 型坡口焊接裂纹试验结果

预热温度/ ℃	间隙/ mm	表面裂纹率/ %	断面裂纹率/ %
常温	1.9	0	0
	2.0	0	4.8
100	2.1	0	0
	2.2	0	0
150	2.1	0	0
	2.3	0	0

2.2 焊接热模拟试验

取厚度为 16 mm 的试板在热模拟试验机上进行焊接 HAZ 模拟试验, 线能量与相应的峰值温度及 $T_{8/5}$ 见表 6, 控制冷却终止温度低于计算的马氏体相变点 M_s (约为 450 ℃)。试验过程中, 为了减小实际采样温度曲线与模型温度曲线的差别, 可根据线能量的不同适当调整 Free Span 间距, 以达到两者较好的吻合, 减小实验误差。每一线能量下模拟 5 个试样, 其中 2 个加工成拉伸试样, 3 个加工成夏比冲击试样, 不同线能量下的热影响区性能见图 5 和图 6。

表 6 焊接线能量 E 与 $T_{8/5}$

$E / (\text{kJ} \cdot \text{cm}^{-1})$	$T_{8/5} / \text{s}$	$t_{\max} / \text{℃}$
30	14.8	1 320
60	96.6	1 321
80	174.2	1 323
100	267	1 323

可以看出, 随着线能量的增加抗拉强度有所下降, 但仍在 510 MPa 以上, 冲击功随着线能量的增加先增加, 随后下降, 但仍具有 100 J 左右。这说明, WGJ510C2 钢能承受大线能量 (50~100 kJ/cm) 焊接^[3]。虽然大线能量焊接技术给传统的 HSLA 钢带来了焊接粗晶区 (CGHAZ) 强韧性恶化的问题, 但是为了改善 CGHAZ 的韧性, 可以通过添加 Nb、V、Ti 等微合金元素, 利用冶炼过程中形

成高熔点的第二相质点, 抑制奥氏体晶粒长大和阻止 HAZ 晶粒粗化。另一方面, 在大线能量焊接条件下, 第二相质点既能促进针状铁素体的形成, 又能促进 M-A 组元分解, 使 CGHAZ 组织转变为以针状铁素体为主。针状铁素体本身较稳定, 不易长大, 具有优良的韧性、较大的应变和位错密度, 且交错排列, 具有较高的强韧性和阻止裂纹扩展的能力。

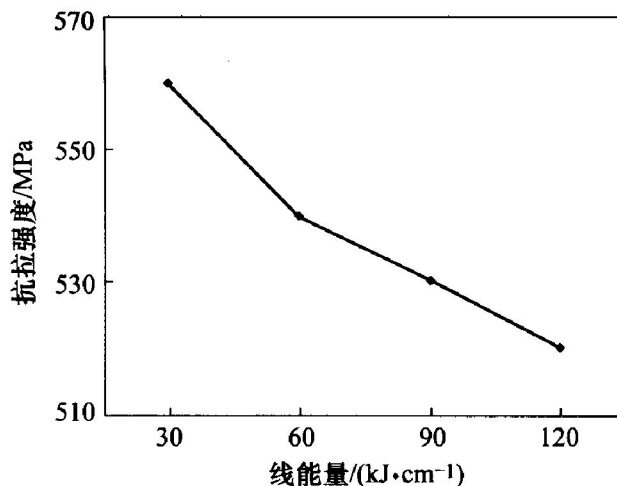


图 5 不同线能量下的拉伸性能

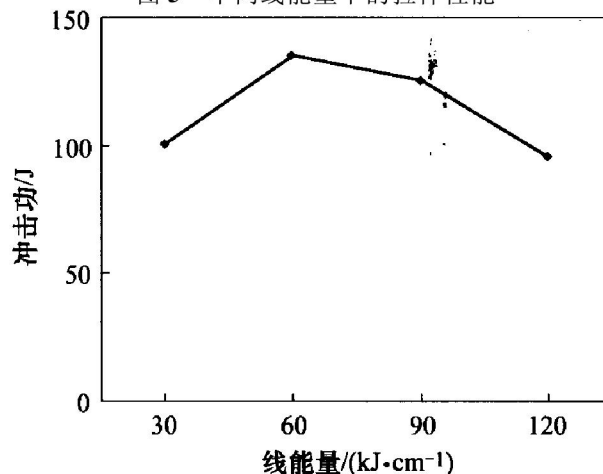


图 6 不同线能量下的冲击性能

2.3 手弧焊接头试验

采用 HHJ506 焊条对 10 mm 及 50 mm 的钢板进行了焊接接头性能试验。为了与工程应用相对应, 本实验中所选 10 mm 厚钢板为大生产热轧状态钢板, 50 mm 厚钢板为大生产热处理状态钢板。焊接时环境温度为 25~27 ℃, 环境湿度为 60%~65%。采用的焊接参数根据线能量 17~22 kJ/cm 进行设计。

手弧焊接头拉伸及弯曲性能试验结果见表 7, 焊接接头冲击试验结果见表 8。

试验结果表明, 厚度为 10 mm 和 50 mm 的 WGJ510C2 钢板采用 HHJ506 焊条焊接时, 接头板

表 7 手弧焊接头拉伸力学性能

试板 编号	板厚/ mm	对接 方向	接头拉伸			冷弯 $d=3a$, 120°
			σ_b / M Pa	断裂位置		
011	10	横向	555	565	母材	完好
012	10	纵向	565	565	母材	完好
051	50	横向	560	555	母材	完好
052	50	纵向	560	555	母材	完好

拉试样均断于母材处, 焊接接头冷弯性能良好, 焊接接头各个区域在 0℃下有很高的冲击韧性, 即使在 -20℃下, 也远超过母材的技术指标要求(0℃时的 $A_{kv} \geq 47$ J)。由表 8 还可以看出, 两种厚度试样的焊缝脆性转变温度约为 -40℃, 不同的是, 10 mm 板的 HAZ 脆性转变温度约为 -20℃, 50 mm 板的 HAZ 脆性转变温度低于 -40℃。

3 典型应用

上海市重点工程——中国残疾人体育艺术培训基地, 为大跨度轻钢轻板结构, 由同济大学建筑设计研究所设计, 采用了大跨度轻钢轻板结构。钢架平面外通过设置连梁使其发挥空间整体作用, 形成一个空间拱以优化受力性能。该工程需采用耐火耐候钢板进行建造, 在设计部门和用户的大力支持下, 决定首次采用武汉钢铁(集团)公司研制开发的高性能耐火耐候钢建造这一具有特殊意义的宏伟建筑, 2001 年 10 月武汉钢铁(集团)公司为中国残疾人体育艺术培训基地提供了急需的耐火耐候钢管 d 219 mm 和 d 273 mm 共计 200 多 t, 网架建成时的雄姿如图 7 所示, 建成后的局部如图 8 所示。

中国国家大剧院是中国的重点文化工程和国家标志性工程, 国务院于 1998 年 4 月正式批准该工



图 7 采用 WJ510C2 钢建成的上海中国残疾人体育艺术培训基地网架

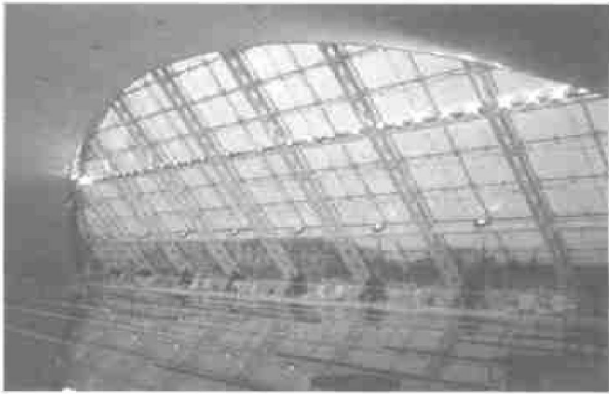


图 8 采用 WJ510C2 钢建成的上海中国残疾人育艺术培训基地(局部)

程立项, 经过两年多的筹备, 于 2001 年 4 月 1 日在北京人民大会堂西侧正式开工建设。举世瞩目的国家大剧院是中国政府面向 21 世纪投资兴建的大型现代化文化设施, 是国家新时代的标志性建筑, 是中国最高艺术表演中心, 是具有世界一流水平的大型艺术殿堂。它的总建筑面积为 18 万 m², 其中主体建筑约 13 万 m², 地下附属设施约 5 万 m²。2002 年 2 月, 武汉钢铁(集团)公司的耐火耐候钢又成功

表 8 手弧焊接头冲击试验结果

试板 编号	板厚/ mm	对接 方向	缺口 部位	冲击功(AkV/J)											
				20℃			0℃			-20℃			-40℃		
011 [#]	10	横向	焊缝	170	167	166	130	130	142	130	124	126	112	102	34
			HAZ	166	154	225	144	142	154	140	78	50	42	30	24
012 [#]	10	纵向	焊缝	177	166	178	100	122	138						
			HAZ	183	113	170	92	70	104						
051 [#]	50	横向	焊缝	274	280	293	240	256	242	232	222	164	128	16	38
			HAZ	288	288	289	261	278	268	180	224	216	156	170	110
052 [#]	50	纵向	焊缝	290	246	275	208	240	234						
			HAZ	288	248	269	228	214	204						

注: 10 mm 板接头各区域的冲击试验均采用 7.5×10×55(mm) 的非标试样。

地,在国家大剧院钢管劲性柱工程项目招标中中标,2002 年 8 月中旬,国家大剧院用 $d\ 406\ \text{mm}$ 和 $d\ 508\ \text{mm}$ 耐火耐候钢管共计 254 根近 300 t 全部按要求发运到北京。经工程设计、采购、施工、监理等部门组成的验收小组验收,所有钢管均符合国家大剧院工程技术条件的要求,全部检验合格,并已成功应用到工程中(见图 9 和图 10),受到了有关方面的高度赞扬。



图 9 采用 WGJ510C2 钢制成的
国家大剧院用钢管劲性柱



图 10 WGJ510C2 钢应用在
国家大剧院的钢管劲性柱

4 结论

1) WGJ510C2 钢板在 $600\ ^\circ\text{C}$ 温度下的屈服强度均高于其室温下屈服强度的 $2/3$, 完全满足建筑结构用钢耐火安全性的强度许用指标。在交货使用状态下具有足够强度的同时,还具有较低的屈强比,这保证了该材料具有良好的冷变形能力和高的塑性变形功,即降低了材料脆性断裂的可能性。该钢具有优良的 Z 向性能,其 ϕ_z 全部高于 Z 向钢最高级别 Z35 的要求,即 $\phi_z \geq 35\%$ 。WGJ510C2 钢板具有优良的综合力学性能。

2) WGJ510C2 钢 HAZ 的淬硬性倾向性低,该钢具备低的冷裂纹敏感性,但焊接 $50\ \text{mm}$ 厚板时,需预热 $100\ ^\circ\text{C}$ 为宜。WGJ510C2 钢在大线能量条件下焊接时,其焊接热影响区仍具有优良的强韧性,焊接接头具有良好的抗拉、抗弯和抗冲击性能。

3) 该钢已成功应用于上海中国残疾人体育艺术培训基地和北京中国国家大剧院的建造,且实用效果良好。

参考文献

- [1] 李 风,覃文清. 钢结构防火保护——钢结构防火涂料[A]. 2001 年上海钢结构防火技术国际研讨会论文集[C]. 上海, 2001. 60.
- [2] 殷李革. 性能设计方法在钢结构建筑防火设计中的应用[A]. 2001 年上海钢结构防火技术国际研讨会论文集[C]. 上海, 2001. 94.
- [3] 陈 晓,秦晓钟. 高性能压力容器和压力钢管用钢[M](第 1 版). 北京: 机械工业出版社, 1999.

(编辑 何学锋)