

高性能耐火耐候建筑用钢 WGJ510C2 的研制及应用

陈 晓 刘继雄 卜 勇

(武汉钢铁(集团)公司技术中心 武汉 430080)

〔摘要〕 对武汉钢铁(集团)公司(以下简称武钢)研制的高性能耐火耐候建筑用钢 WGJ510C2 的力学性能、焊接性能、耐火性能、耐候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;具有低的焊接冷裂纹敏感性,能承受大线能量(50~100kJ/cm)焊接;裸钢的耐火极限比 Q235 钢高出 44%左右,在考虑建筑设计一级防火标准时,使用该钢可比使用 Q235 钢节省薄型防火涂料 36.5%~50%,节省厚型防火涂料 26%;经过 1 800h 加速循环腐蚀以后,该钢的腐蚀率与 Q235 钢和 Q345 钢相比分别减少 20%和 29%;经过武汉 10 个月大气曝晒试验的结果也表明,该钢的耐候性能也明显优于 Q235 钢和 Q345 钢。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 [中图分类号] TU511.3

〔文献标识码〕 A

〔文章编号〕 1000-7857(2005)03-0031-07

INVESTIGATION OF HIGH PROPERTIES FIRE-RESISTANT AND WEATHERING CONSTRUCTION STEEL WGJ510C2 AND ITS TYPICAL USE

CHEN Xiao LIU Ji-xiong BU Yong

(NETC of Wuhan Iron & Steel (Group) Corporation, Wuhan 430080, China)

Abstract: The mechanical performance, weldability, fire-resistant, weathering performance and usage of high properties fire-resistant and weathering construction steel developed in Wuhan Steel were evaluated in this paper. It shows that this steel has fine integrated mechanical performance and that 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 (50~100kJ/cm). The endurance of naked WGJ510C2 is about 44% higher than that of Q235. Considering the fire protection standard Grade One in construction, WGJ510C2 can save 36.5%~50% thin protection coat and 26% thick protection coat, compared with Q235. The result from comparing different steel samples in cyclic corrosion test (CCT) in room and exposed experiment outside (Wuhan, ten months) shows that corrosion speed of new steel (WGJ510C2) is obviously slower than that of traditional construction steel such as Q235 and Q345. The practical use in huge constructions is excellent.

Key Words: fire-resistant, weathering, mechanical performance, weldability, high heat input, construction steel

CLC Number: TU511.3

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2005)03-0031-07

1 前言

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,钢材在

高温下的力学性能会发生明显变化,主要表现在强度和刚度明显降低。温度为 400℃时,钢材的屈服强度降低一半,温度为 600℃时,则基本丧失承载力^[2]。钢材在温度升高到某一

收稿日期:2004-12-28

作者简介:陈晓,男,1940.5~;武汉市冶金大道 28 号武汉钢铁(集团)公司技术中心,副总工程师、教授级高工,主要从事新钢种、新材料的研究与开发;E-mail: chxi@wisco.com.cn

版社,2000,1:85~86

[2] 徐洁磐,马玉书,范明. 知识库系统导论[M]. 北京:科学出版社,2000,1:204

[3] 金光灿. 分布式数据库管理系统中主动机制的设计与实现[D]. 华中理工大学学位论文,1996,5

[4] 高峻,吕述望. 入侵检测系统(IDS)[J]. 现代电信科技,2001,9:

11

[5] R Sekar, Y Guang, S Verma & T Shanb hag. A high-performance network Intrusion Detection System[A]. In: Conference on Computer and Communications Security, 1999:8~17

[8] 胡昌振. 信息安全的概念及方法论探讨 [J]. 科技导报,2004 (3):18~45 (责任编辑 苏 青)

值而失去支撑能力时,此时的温度值(破坏极限时的温度值)被定义为该钢材的临界温度^[1]。

近年来,武钢自主开发成功了高性能耐火耐候建筑用钢 WGJ510C2。该钢集高耐火性(温度为 600℃时的屈服强度不低于室温屈服强度的 2/3)、高耐候性(耐大气腐蚀性能明显优于普通建筑用钢 Q235 和 Q345)、高 Z 向性能($Z_z \geq 35\%$)和能承受大线能量(50~100kJ/cm 焊接等高性能于一体,并获国家发明专利。本文通过相关的试验,对 WGJ510C2 钢的力学性能、焊接性能和典型应用进行了分析和研究。

2 力学试验

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]。

表 1 WGJ510C2 钢的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	
			σ_s (Mpa)	σ_b (Mpa)	δ_5 (%)	$A_{kv}(0^\circ\text{C})$ (J)	180°	600℃	屈服点 σ_s (Mpa)
热轧或正火+回火	纵向	4~16	≥ 325	≥ 510	≥ 21	≥ 47	d=3a	≥ 217	
		>16~36	≥ 315	≥ 490	≥ 21	≥ 47	d=2a	≥ 210	
		>36~60	≥ 305	≥ 470				≥ 204	

2.1 拉伸试验

2.1.1 常温拉伸性能

对厚度为 10mm、50mm 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。

表 2 WGJ510C2 钢板拉伸试验结果									
板厚 (mm)	取样方向及部位	σ_s (Mpa)	σ_b (Mpa)	δ_5 (%)	ψ (%)	σ_s/σ_b	σ_s/σ_b	σ_s/σ_b	σ_s/σ_b
10	L,全厚	425	425	560	560	31	28	—	0.76
	T,全厚	430	465	580	560	28	28	—	0.74
	L,表层	380	390	545	550	32	30	73	0.70
50	L,t/4	360	345	545	540	30	31	77	0.66
	T,表层	365	370	545	545	33	33	76	0.67
	T,t/4	350	355	545	545	30	30	74	0.64

注:L 为纵向;T 为横向;t 为板厚。以下同。

从试验结果可知,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。

2.1.2 高温拉伸性能

厚度为 10mm 的 Q235、Q345 钢板和 WGJ510C2 钢板及 50mm 的 WGJ510C2 钢板,均取横向拉伸试样(直径均为 10mm)在 100kN 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 20min,试验温度小于 300℃时所测屈服强度为 σ_s 。试验结果见图 1 和图 2。

由图 1 可见,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 265Mpa,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,屈服强度仍有 212Mpa。但 Q235 和 Q345 钢在 300~400℃下,其屈服强度急剧下降。这说明这类钢在此温度范围已开始软化,进入更高温度,其强度性能将更加恶化。

同表 2 的结果相比较,在温度小于 400℃时,10mm 板

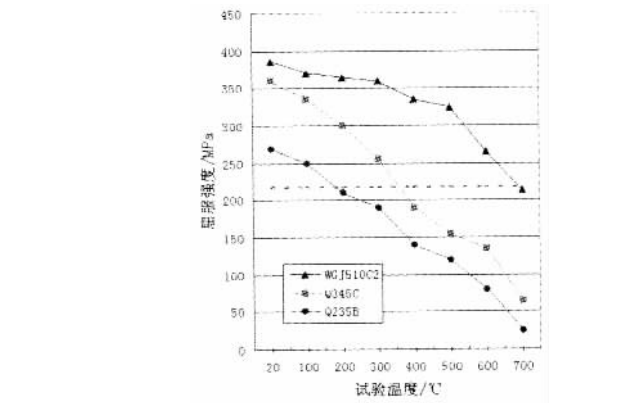


图 1 10mm 厚 WGJ510C2 和 Q345、Q235 钢板系列温度下屈服强度的对比

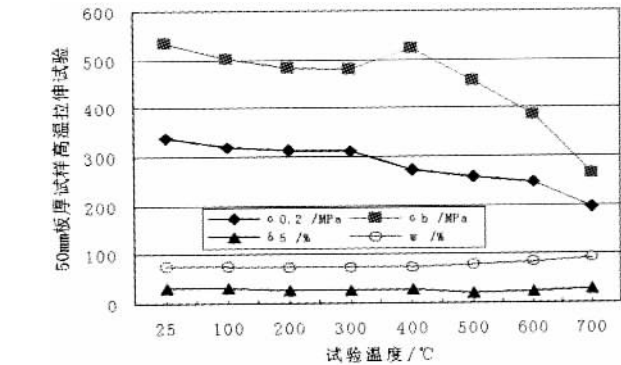


图 2 50mm 厚 WGJ510C2 钢板高温拉伸试验结果

厚 WGJ510C2 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,50mm 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℃左右时出现兰脆现象,这在 10mm 板和 50mm 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。

2.1.3 Z 向拉伸性能

对厚度为 50mm 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-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 WGJ510C2 钢板 Z 向拉伸试验结果		
试样编号	σ_b (Mpa)	Z_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,故厚钢板用户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,由于钢材中含有硫、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,因而钢材沿

板厚方向(Z 向)受力时(通常为焊接收缩应力)容易导致分层撕裂,产生层状撕裂后一般也很难修复。由表 3 可见,WGJ510C2 钢板 Z_z 最大为 77%、最小为 43%,高于 Z 向钢最高级别 Z35 要求的 Z_z (大于或等于 35%)。这表明 WGJ510C2 钢板具有优良的抗层状撕裂能力。

2.2 冲击性能试验

2.2.1 系列温度冲击试验

对不同板厚(10mm、50mm)、不同取样方向(纵向、横向)、不同取样部位(表层、t/4、t/2)试样的 WGJ510C2 钢进行系列温度冲击试验。试验结果见图 3。其中 10mm 板厚的试样尺寸为 7.5×10×55mm。

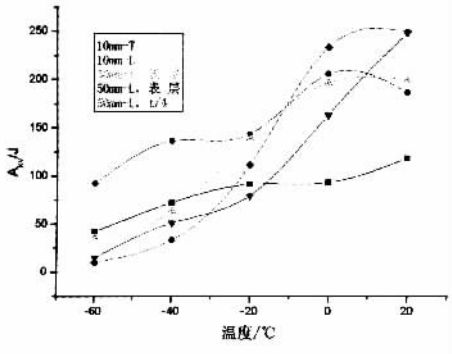


图 3 10mm、50mm 厚 WGJ510C2 钢板系列温度冲击试验结果

从试验结果可以得知以下 3 点。

(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℃试验温度下均大于 100J,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 (10mm-T) < -40℃, T_c (10mm-L) < -60℃, T_c (50mm-T, 表层) ≈ -30℃, T_c (50mm-L, 表层) ≈ -10℃, T_c (50mm-L, t/4) ≈ -20℃。在冲击功为 47J 时,所有试验材料的温度均低于 -30℃。

(3)10mm 和 50mm 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 1/4 处)取样,当试验温度 ≥ -20℃时,其冲击韧性均在 100J 以上,即使是在 -40℃,其冲击韧性仍保持较高的水平。

3 焊接试验

手弧焊采用 HHJ506 焊条,扩散氢含量为 3.4ml/100g。按不同试验要求选取不同厚度的 WGJ510C2 钢板进行了下述性能试验。模拟焊接热影响区试验在 Gleeble-2000 上进行。

3.1 焊接冷裂纹敏感性试验

3.1.1 钢的冷裂纹敏感性评估

P_{cm} 值(式 1)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℃。

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(式 2)。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 (式 3)。

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

$$P_c = P_{cm} + [H]/60 + t/600 \quad (\%)$$

$$T_0 = 1440P_c - 392 \quad (^\circ\text{C})$$

式中: P_{cm} 为焊接裂纹敏感性组成(%); P_c 为焊接裂纹敏感性指数(%); $[H]$ 为焊缝扩散氢含量(ml/100g); t 为钢板厚度(mm); T_0 为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} (%)	$[H]$ (ml/100g)	P_c (%)	T_0 (°C)
10	0.19	3.4	0.28	7
50	0.19	3.4	0.34	103

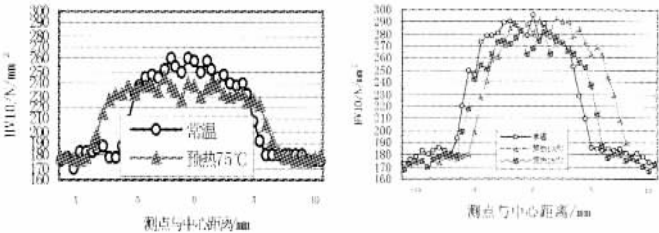
注: $[H]$ 是采用甘油法测定的 HHJ506 焊条的扩散氢含量

以上计算结果表明,WGJ510C2 钢板的 P_{cm} 值 < 0.20%。当板厚为 10mm 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,也只需较低的预热温度,就可避免焊接冷裂纹产生。

3.1.2 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,两种厚度规格 WGJ510C2 钢板焊接热影响区的硬度分布分别见图 4(a)和图 4(b)。



(a) 10mm 板

(b) 50mm 板

结果表明,厚度分别为 10mm 和 50mm 的 WGJ510C2 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,该钢的抗裂性性能是良好的。

3.1.3 斜 Y 坡口焊接裂纹试验

WGJ510C2 试板厚度为 50mm,采用低氢型碱性焊条 HHJ506 进行焊接,环境温度为 26℃,环境湿度为 65%。每一预热温度下焊接 3 副试板,焊后先对每副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。

表 5 中编号为 52 的试样,由于其拘束间隙过大,所以在受检焊缝断面上出现了贯穿整个断面的裂纹;该裂纹从根部起源,经过热区拐向焊缝,然后又折向 HAZ。53 号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

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

止。排除 52 号异常试样后可以看出,厚度为 50mm 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,这说明在此预热温度下焊接可以完全避免焊接冷裂纹的产生。

3.2 焊接热模拟试验

表 6 焊接线能量 E 与 T_{8/5}

E(kJ/cm)	30	60	80	100
T _{8/5} (S)	14.8	96.6	174.2	267
T _{max} (℃)	1 320	1 321	1 323	1 323

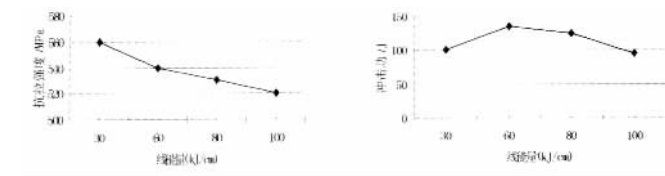


图 5 不同线能量下的
拉伸性能

图 6 不同线能量下的
冲击性能

取厚度为 16mm 的 WGJ510C2 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 Ms(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。

可以看出,随着线能量的增加,抗拉强度有所下降,但仍在 510MPa 以上;冲击功随着线能量的增加先增加,随后下降,但仍具有 100J 左右。这说明,WGJ510C2 钢能承受大线能量(50~100kJ/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 2 相质点,抑制奥氏体晶粒长大并阻止 HAZ 晶粒粗化。另一方面,在大线能量焊接条件下,第 2 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。

3.3 手弧焊接头试验

采用 HHJ506 焊条对 10mm 及 50mm 的 WGJ510C2 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 10mm 厚钢板为大生产热轧状态钢板,50mm 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 17~22kJ/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。

表 7 手弧焊接头拉伸机械性能

试板编号	板厚(mm)	对接方向	接头拉伸		冷弯 d=3a, 120°
			6b(Mpa)	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

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

试验结果表明,10mm 和 50mm 的 WGJ510C2 钢板采用 HHJ506 焊条焊接时,接头板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℃的 A_{KV}≥47J)。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,10mm 板的 HAZ 脆性转变温度约为-20℃,50mm 板的 HAZ 脆性转变温度低于-40℃。

4 耐火试验

4.1 中型炉耐火试验

分别用 10mm 厚的普通碳素结构钢 Q235 和 WGJ510C2 钢板焊接成 H 型中型炉用钢梁,其规格均为:长 1 560mm、高 80mm、凸缘宽 40mm、整个试件重 17.8kg、截面抗弯矩(截面模数)W_x为 29.17cm³。选用北京航空材料研究院研制的 GJ-3 超薄型钢结构防火涂料和德国 Herberts 38091 超薄型钢结构防火涂料(这两种涂料均已在国家检测中心做过多次试验,性能较好,质量相当稳定),按产品标准规定的方法将这两种涂料分别涂覆在两种钢材制成的中型钢梁上。由于德国涂料样品比较少,故对每种钢梁只做了 1 种厚度(1.46mm),GJ-3 涂料则涂覆了两种厚度(1.50mm 和 3.00mm)。涂覆完毕再经过 20 天的养护后,在中型耐火极限炉中进行耐火试验。

表 9 是两种钢梁涂覆两种涂料的结果对照表。裸露时,Q235 钢梁达到耐火极限的温度大约在 580~600℃,WGJ510C2 钢梁达到耐火极限的温度大约在 700℃。这些结果是钢材本身内在质量的反映,与涂覆涂料的厚度和种类无关。

至于耐火极限从裸钢状态下的相差 10min,到 1.50mm GJ-3 的 14min,3.00mm GJ-3 的 20min,再到 1.46mm 38091 的 19min,表明耐火耐候钢与防火涂料有相辅相成之功效。所用防火涂层在 580~700℃温度区间的隔热性能越好、高温强度越好,对钢梁升温速率减缓越强,更能体现出耐火耐候钢 WGJ510C2 的耐火优势。即在不同涂层条件下,

表 9 两种小型钢梁在裸露和不同
涂覆状态下的试验结果对照表

	裸钢		GJ-3(1.50mm)		GJ-3(3.00mm)		38091(1.46mm)	
	耐火 极限 (min)	失效 温度 (℃)	耐火 极限 (min)	失效 温度 (℃)	耐火 极限 (min)	失效 温度 (℃)	耐火 极限 (min)	失效 温度 (℃)
Q235	23	587	72	575	83	560	72	583
WGJ510C2	33	694	86	707	103	713	91	692
延长时间(min)	10		14		20		19	
提高幅度(%)	43.5		19.4		24.1		26.4	

表 10 在相同耐火时间下 Q235、WGJ510C2
涂料厚度的对比表

	GJ-3	Herberts 38091
Q235	3.00mm(83min)	2.30mm(87min)
WGJ510C2	1.50mm(86min)	1.46mm(91min)
减薄率(%)	50	36.5

WGJ510C2 相比于 Q235 延长的耐火时间不同,新钢种耐火
极限优势的体现比 Q235 钢更明显。

从表 9 可知,在 1.50mm 左右时,GJ-3 和 38091 涂料涂
覆在 Q235 钢梁上时的耐火极限一样,若使用 WGJ510C2 钢
梁,则 38091 涂料的结果比较好,这说明 38091 涂料的高温
隔热性能更好。即在采用厚度相同而品质不同的涂料时,钢
梁耐火时间的提高也不同。主要原因在于,不同防火涂料形
成的膨胀体在钢梁从 580℃升高到 700℃范围内的隔热性能
有差异。因此,防火涂料膨胀体在梁温为 580~700℃范围
内隔热效率越高、强度越高,钢梁耐火时间的延长就越多。

从涂层减薄率(见表 10)来看,对于 GJ-3 防火涂料要
达到 83min 的耐火时间,使用耐火耐候钢 WGJ510C2 时
可以减薄 50%以上。对于 Herberts 38091 涂料要达到约 90min
的耐火时间,使用耐火耐候钢 WGJ510C2 时,涂层可以减薄
近 40%。这说明对高性能的钢结构防火涂料,采用高性能耐
火耐候建筑用钢 WGJ510C2 时,可以在很大程度上减少涂
料的使用量,从而大大降低工程成本,提高钢结构的有效使
用空间。

4.2 标准炉耐火试验

本试验采用新钢种高性能耐火耐候建筑用钢
WGJ510C2 和普通建筑用钢 Q235,并制成符合上述规格尺
寸的构件,在天津“国家固定灭火系统和耐火构件质量检验
测试中心”进行耐火对比试验,在相同的载荷条件和加热条
件下,分别测定各自的变形挠度。按 GB/T9978—1999 标
准中 8.2 条款的规定:梁的最大挠度超过 $L/20\text{mm}$ (L 为试
件计算跨度,单位:mm),则表明试件失去稳定性。此处 $L/20=$
260mm。

按正常要求各种耐火建筑构件均应按 GB14907-94(钢
构件防火涂料通用技术条件)标准要求,其表面施涂同种类
型的防火涂料(GJ-IIH 厚型防火涂料)。但由于施涂防火涂
料干燥时间较长,故决定本试验第 1 轮仅采用裸露的构件
(梁)对比 WGJ510C2 和 Q235 的耐火性能,然后再进行不同
厚度防火涂料构件的对比试验,其中 WGJ510C2 的涂层厚
度为 20mm, Q235 的涂层厚度为 27mm,在均布载荷为

表 11 Q235 钢和 WGJ510C2 钢检验对比试验结果

	Q235	WGJ510C2	实验效果
裸钢	27min	39min	耐火极限高出 44.4%
厚型涂料	27mm(耐火极限 155 min)	20mm(耐火极限 158 min)	节省涂料 26%

132.74kN 时,所得结果见图 7 和表 11。

由图 7 可以明显看出,在相同的载荷下,裸露钢梁
Q235 从第 4 min 就开始屈服,耐火耐候钢梁 WGJ510C2 从
第 7 min 才开始屈服;在挠度达到 260mm 时,两裸钢达到耐
火极限,此时 Q235 为 27 min, WGJ510C2 为 39 min,这说明
裸露耐火耐候钢的耐火极限比裸露 Q235 的耐火极限高出
44.4%。这与中型炉的同类实验结果是相当接近的,说明中
型炉的实验结果与标准炉的实验结果有很强的可比性。

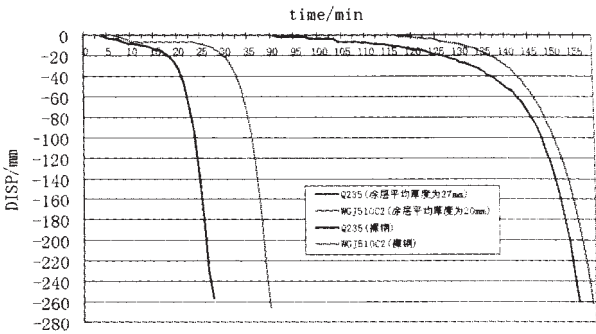


图 7 WGJ510C2 和 Q235 钢梁的时间-挠度变化曲线

在涂覆不同厚度的厚型防火涂料时,还是利用上述裸
钢梁相同的载荷。总体来讲, WGJ510C2 和 Q235 均比它们
在裸露条件下的耐火极限明显要长(见图 7)。Q235 在涂层
厚度为 27mm 时的耐火极限为 155 min, WGJ510C2 在涂层
厚度为 20mm 时的耐火极限为 158 min,两者的耐火极限基
本相同,均大于《建筑设计防火规范》标准一级防火 150 min
(2.5h)的要求。这说明,在相同的耐火极限要求 150 min 下,
耐火耐候钢 WGJ510C2 比普通建筑用钢 Q235 可以节省防
火涂料 35%,而且此时 Q235 钢在较厚的厚型涂料下从 91
min 开始屈服, WGJ510C2 在相对较薄的厚型涂料下直到
119 min 才开始屈服。

综上所述,新钢种高性能耐火耐候建筑用钢
WGJ510C2 的耐火性能明显优于普通建筑用钢 Q235。

5 耐候试验

图 8 是经过 5 个周期的加速循环腐蚀试验后所得到的
各对比试样的腐蚀动力学曲线。可以看出,随着腐蚀时间的
延长,1 号样 (WGJ510C2) 腐蚀损失的增加没有 2 号样
(Q235)和 3 号样(Q345)快,而且腐蚀失重的顺序依次为 $1<$
 $2<3$ 。这说明耐火耐候钢的耐蚀性较普通建筑用钢要好。时
间越长,耐火耐候钢的耐蚀性表现得越明显。从曲线斜率
的变化也可很明显地看出,在 720h 以前(前 2 个周期),各
钢种的腐蚀速率保持相对均匀;后 3 个周期(1 080h、1 440h、
1 800h)内,每个钢种的表现均是随着腐蚀时间的延长腐
蚀速率逐渐减小。但无论在哪个阶段(周期),4 个钢种的腐
蚀速率顺序依然是 $1<2<3$ 。经过 1 800h 加速循环腐蚀以
后,1 号样的腐蚀率为 2 号样的 80%,为 3 号样的 71%,即分
别减少 20%和 29%。从总体表现来看,同普通建筑用钢相
比,耐火耐候钢腐蚀速率降低的倾向大,稳定的腐蚀速率也
小。

对于耐大气腐蚀钢来说,掌握其耐大气的腐蚀性能尤
为重要。现场曝晒试验是研究大气腐蚀最常用的办法,其优
点是能反映现场实际情况,所得数据直观、丰富、可靠,在一

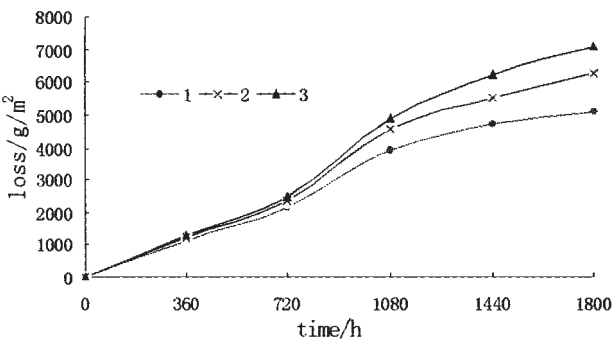


图8 WGJ510C2、Q235 和 Q345 腐蚀时间与腐蚀失重之间的关系曲线

定程度上能综合反映金属材料在大气条件下的腐蚀性能,并可用来估算自然环境下金属的腐蚀寿命,为合理选材、有效设计和制定产品防护标准提供依据。

在武汉 10 个月大气曝晒下锈层引起的失重计算结果见表 12。虽然该腐蚀率远小于室内加速循环腐蚀实验所得到的腐蚀率,但与文献[4]中在沈阳的 1 年挂片数据很接近。由本实验结果可知,在 10 个月的时间段内,真实大气曝晒对比试样的年腐蚀率按由小到大的顺序排列为 $1<2<3$ 。这说明耐火耐候钢的耐腐蚀性能优于普通建筑用钢。这一结果与室内加速循环腐蚀实验结果总体上是吻合的,出现波动的方面可能是大气曝晒时间较短的缘故。

表 12 WGJ510C2、Q235 和 Q345 在 10 个月真实大气腐蚀对比样的失重结果

编号	长 (mm)	宽 (mm)	高 (mm)	表面积 (mm ²)	原始 重量(g)	除锈 重量(g)	失重 (g)	试验 时间(h)	腐蚀率 (mm·a ⁻¹)
1	99.56	99.88	4.02	21 492	314.1	310.5	3.6	7 200	0.0260
2	99.90	99.60	3.88	21 448	300.0	296.2	3.8	7 200	0.0274
3	99.86	99.56	4.02	21 488	312.3	308.1	4.2	7 200	0.0303

6 典型应用

上海市重点工程——中国残疾人体育艺术培训基地,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。该工程决定首次采用武钢研制开发的高性能耐火耐候钢 WGJ510C2 钢。为此,武钢为该工程提供了耐火耐候钢管 $\varphi 219\text{mm}$ 和 $\varphi 273\text{mm}$,共计 200 多 t。该工程网架建成时的雄姿见图 9,建成后的局部照片见图 10。



图9 采用 WGJ510C2 钢建成的上海中国残疾人体育艺术培训基地建筑网架

国家大剧院是中国新时代的标志性建筑,其总建筑面积为 18 万 m²,其中主体建筑约为 13 万 m²、地下附属设施

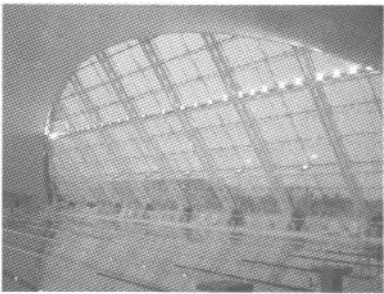


图 10 采用 WGJ510C2 钢建成的上海中国残疾人育艺术培训基地建筑(局部)

约为 5 万 m²。2002 年 2 月,武钢成功地在国家大剧院钢管劲性柱工程项目招标中中标使用耐火耐候钢,并向工程提供 $\varphi 406\text{mm}$ 和 $\varphi 508\text{mm}$ 耐火耐候钢管 254 根,共近 300t。经验收,所有钢管均符合国家大剧院工程技术条件的要求,并成功应用到工程中(见图 11 和图 12)。

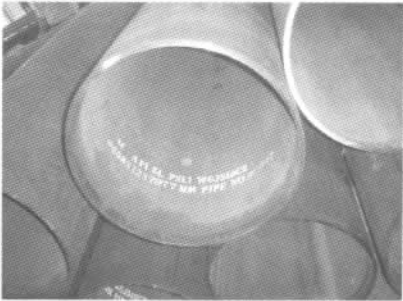


图 11 采用 WGJ510C2 钢制成的国家大剧院用钢管劲性柱



图 12 应用在国家大剧院的 WGJ510C2 钢钢管劲性柱

4 结论

(1)WGJ510C2 钢在 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。在交货使用状态下,该钢具有足够强度的同时,还具有较低的屈强比,既保证了该材料具有良好的冷变形能力和高的塑性变形功,也降低了材料脆性断裂的可能性,具有良好的抗震性能。该钢具有优良的 Z 向性能,其 Z_z 全部高于 Z 向钢最高级别 Z35 的要求,即 $Z_z\geq 35\%$ 。WGJ510C2 钢具有优良的综合力学性能。

(2)WGJ510C2 钢 HAZ 的淬硬性倾向性低,具备低的冷裂纹敏感性,但焊接 50mm 厚板时,需预热 100℃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。

新型钻井技术——激光钻井的研究进展

甘云雁 陈 利

(中国石油大学(北京)石油天然气工程学院 北京 102249)

〔摘要〕 回顾了激光钻井的发展历程,综述了国外激光钻井实验室研究现状,包括激光破岩的机理、影响钻井效率的因素、作后岩石物性的变化以及理想数学模型的建立。在分析激光钻井优缺点的基础上指出了该项技术下一步的研究方向。我国高功率激光技术研究已取得突破性成绩,因而在国内开展激光钻井技术研究前景广阔。

〔关键词〕 钻井 激光 高功率

〔中图分类号〕 TE242.9

〔文献标识码〕 A

〔文章编号〕 1000-7857(2005)03-0037-04

A NEW METHOD OF DRILLING OIL AND GAS WELLS ——LASER DRILLING

GAN Yun-yan CHEN Li

(School of Petroleum & Gas Engineering, China University of Petroleum(Beijing), Beijing 102249, China)

Abstract: The history of the laser drilling was briefly reviewed. And, the present state of the experimental researches in the developed countries, including the mechanism of the laser energy, the factors that affect the drilling efficiency, the change of the rock properties and the numerical model for the laser drilling was summarized. Based on analyzing the advantages and disadvantages of this drilling method, the direction of the further research and its prospects for the research on the laser drilling in China were put forward.

Key Words: drilling, laser, high power

CLC Number: TE242.9

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2005)03-0037-04

油气钻井作为建立开采地下油气资源通道的唯一手段,在油气勘探开发过程中发挥着举足轻重的作用,它的进步推动着石油工业的发展。

随着钻井深度的不断加大,传统钻井方式的能量利用率越来越低,平均仅有 50%的时间用于钻进,20%的时间却

用于起下钻柱,剩下 30%的时间耗费在下套管和注水泥等其它操作上^[1]。这样就大大降低了油气井钻井质量、速度和效益。为了提高钻井效率、降低钻井成本,最主要的方法之一就是发展快速钻井技术。激光具有以下普通光所不可比拟的特性:(1)亮度极高(即功率密度大),比普通光强 10^6

收稿日期:2004-07-20

作者简介:甘云雁,女,1980~;北京市昌平区府学路中国石油大学(北京)石油天然气工程学院,硕士研究生,从事油气田开发研究;

E-mail: ganyunyan2004@yahoo.com.cn

张士诚,男,1963~;北京市昌平区府学路中国石油大学(北京)石油天然气工程学院,主要从事油气田开发研究;E-mail:

wzsc@bjpeu.edu.cn

(3)中型炉耐火试验,WGJ510C2 裸钢梁比 Q235 裸钢梁耐火极限的提高幅度高达 43.5%,WGJ510C2 钢比 Q235 钢的软化温度高出约 100~120℃,随着防火涂料厚度增加,WGJ510C2 耐火极限增加的优势比 Q235 要明显。标准炉耐火试验的结果也表明,裸露 WGJ510C2 钢梁的耐火极限比裸露 Q235 钢梁的耐火极限高出 44.4%,这与中型炉的同类实验结果相当接近。在考虑建筑设计一级防火标准(150min)时,试验结果表明,同 Q235 钢相比,使用 WGJ510C2 钢可以使薄型防火涂料节省 36.5%~50%,厚型防火涂料可节省 26%。由此可见,新钢种 WGJ510C2 的实际耐火性能明显优于普通建筑用钢 Q235。

(4)室内加速循环腐蚀试验的结果表明,经过 1 800h 加速循环腐蚀以后,WGJ510C2 的腐蚀率为 Q235 钢的 80%、为 Q345 钢的 71%,即分别减少 20%和 29%。经过武汉 10 个月大气曝晒试验的结果也表明,WGJ510C2 的耐候性

能也明显优于 Q235 和 Q345。

(5)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两大工程的建造,且实用效果良好。

参考文献(References)

- [1] 李风,覃文清.钢结构防火保护——钢结构防火涂料[A]. 见:上海钢结构防火技术国际研讨会论文集[C], 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]. 见:上海钢结构防火技术国际研讨会论文集[C], 2001:94
- [3] 陈晓,秦晓钟.高性能压力容器和压力钢管用钢[M].北京:机械工业出版社,1999
- [4] 夏茂森,蔡漳平,刘江,等.塔桅结构用 JT245 耐大气腐蚀钢板的研制开发[A]. 见:耐蚀金属材料第九届学术年会论文集[C]

(责任编辑 苏 青)