

文章编号: 1004-0609(2004)S1-0231-06

高性能耐火耐候建筑用钢的高温性能及耐火性能^①

陈 晓¹, 刘继雄¹, 董汉雄¹, 邹德辉¹, 童明伟¹, 熊家锦², 师 华², 郑卫东², 肖利鹏²

(1. 武汉钢铁(集团)公司技术中心, 武汉 430080; 2. 北京航空材料研究院, 北京 100095)

摘 要: 对高性能耐火耐候建筑用钢 WGJ510C2 和普通建筑结构用钢 Q235 在实验室条件下进行了中型炉耐火试验的对比分析。结果表明: 两种钢在不同涂料以及同一涂料的不同厚度下, 其耐火极限均有明显的差异, 在裸露条件下, WGJ510C2 的耐火极限明显优于 Q235; 同样的涂料在一定厚度范围内, 随着防火涂料厚度的增加, 耐火钢的优势也加大; 对于不同的防火涂料, 如使用隔热性能好的涂料, 则耐火钢的优势更大, 即良好的防火涂料的隔热效果更能充分发挥耐火钢的优势。

关键词: 耐火性能; 耐候性能; 建筑用钢; 防火涂料

Mechanical properties at elevated temperature and fire endurance of fire-resistant and weathering construction steel

CHEN Xiao¹, LIU Jixiong¹, DONG Hanxiong¹, ZOU Dehui¹, TONG Mingwei¹,

XIONG Jiajing², SHI Hua², ZHENG Weidong², XIAO Lipeng²

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

2. Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

Abstract: Mechanical properties of the high fire-resistant and weathering construction steel WGJ510C2 were compared with those of the conventional carbon construction steel Q235 at high temperature and high profiled bar fire-resistant capability in lab. The results show that the fire endurance of the two steels obviously varies in different fire protection coats or different thickness in common fire protection coats. The fire endurance of WGJ510C2 in bareness is much better than that of Q235, and the advantage of WGJ510C2 is more remarkable with the increase of thickness in the certain range for the same fire coat. The fire-resistant ability of WGJ510C2 is proportional to heat insulation of different fire coat.

Key words: fire-resistant; weathering; construction steel; fire protection coat

随着建筑事业的发展, 采用钢结构的建筑也在迅速增加。钢结构具有自重轻、施工周期短、能解决大空间的复杂问题、整体柔性和抗震性较好以及资源的可再生利用等优点。有鉴于此, 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% 左右。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。钢材的力学强度是温度的函数^[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温度值(破坏极限时的温度值)而使其失去支撑能力时, 此时的温度值定义为该钢材的临界温度^[1]。国家检测中心试验表明, 钢梁在火场中 20~ 25 min 就会失去强度垮塌。钢结构的防火保护主要依靠防火涂料来实现, 它能形成耐火隔热保护层以提高钢结构的耐火极限, 而

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

提高钢材本身在高温下的屈服强度,是从根本上改善了钢结构的耐火性能。

武汉钢铁(集团)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的许用指标。目前该钢种已成功应用到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设,并得到业主、设计、施工等方面的高度赞誉。

1 实验

1.1 高温拉伸试验

耐火耐候钢的力学性能及冷弯性能技术要求见表 1。对厚度为 10 mm 和 50 mm 的 WJG510C2 钢板取横向拉伸试样(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。

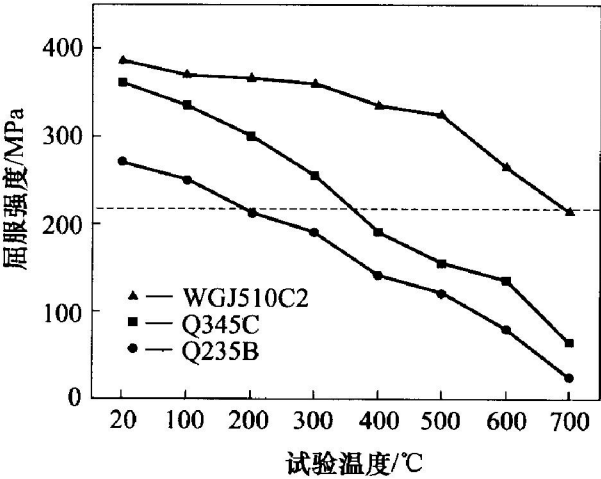


图 1 10 mm 厚 WJG510C2 和 Q235、Q345 钢板高温拉伸试验结果

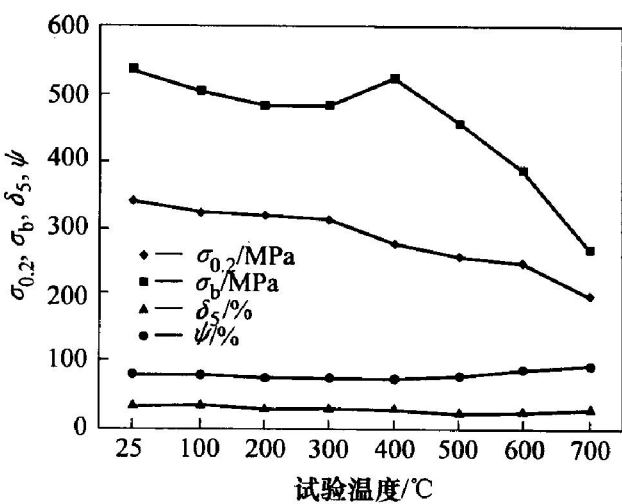


图 2 50 mm 厚钢板高温拉伸试验结果

从图 1 中可以看出,随着温度的升高,WJG510C2 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。

从图 1 和图 2 中还可以看出,两种厚度 WJG510C2 钢板在 600 ℃温度下屈服强度的平均值分别为 265 MPa 和 250 MPa,均高于室温下各自屈服强度的 2/3,满足耐火建筑钢板的设计要求。而 Q235 钢在 300 ℃时的屈服强度已经小于 200 MPa,达不到耐火钢结构的要求。

1.2 耐火试验

分别用 10 mm 厚的 Q235 和 WJG510C2 钢板焊接成 H 型中型炉用钢梁,其规格均为:长 1560 mm,高 80 mm,凸缘宽 40 mm。防火涂料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

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

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一个厚度(1.46 mm)。GJ-3 涂料则涂覆了两种厚度(1.50 mm 和 3.00 mm)。涂覆完后再经过规定时间的养护在中型耐火极限炉中进行耐火试验。

北京航空材料研究院自行研制的中型耐火极限炉是根据 GB 9978《建筑构件耐火试验方法》的设计原理按比例缩小研制,已经过上百次的试验,经与国家标准梁炉结果对比,中型梁炉的试验结果与国家标准梁炉有很强的可比性。由于在中型炉设计中将原来的四点加载改成了两点加载,使得钢梁的下弦拉应力最大区域加大,所以,中型炉的结果要比国标炉高 20%~30%^[3]。

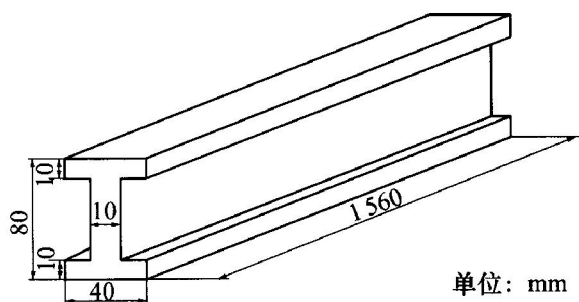


图 3 H 型中型炉用钢梁示意图

耐火试验按 Q/6S 801-1999《中型耐火极限炉试验方法》进行,垂直两点加载,载荷 105MPa,两侧及底面共三面受火。

1.2.1 裸露钢梁的耐火试验

Q235 钢梁和 WGJ510C2 钢梁的裸露耐火试验结果曲线分别如图 4 和图 5 所示。

从图 4 中可以看出,20 min 左右钢梁挠度变化速率增大,此时钢梁温度在 530℃左右,23 min 钢梁温度达 587℃,挠度急剧上升,即普通 Q235 钢

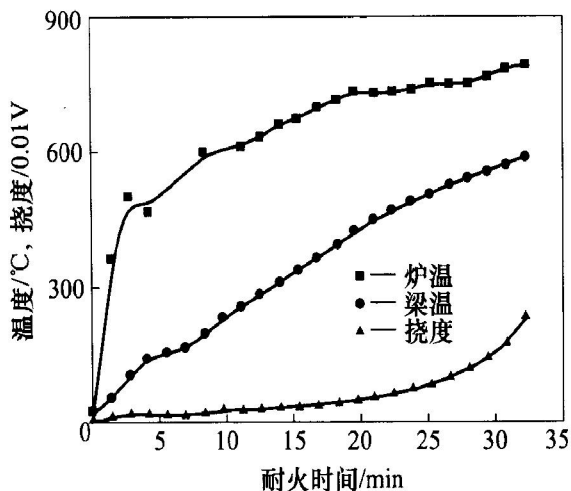


图 4 Q235(无涂层)耐火试验

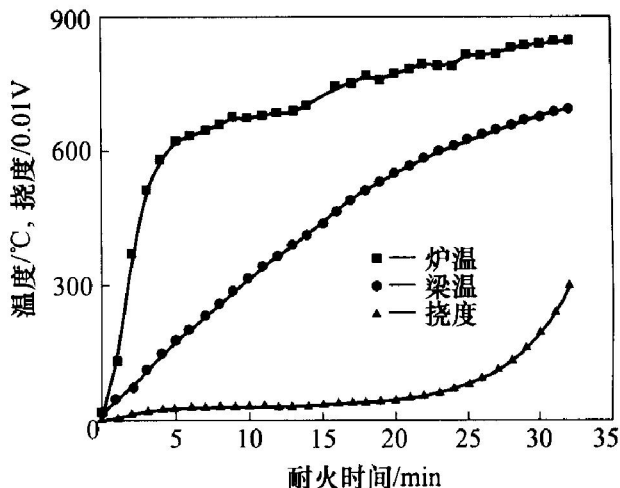


图 5 WGJ510C2(无涂层)耐火试验

梁的耐火极限约为 23 min。

图 5 显示,在试验进行到 26 min 时钢梁变形加快,此时对应的钢梁温度是 640℃以上。试验到 30 min 时钢梁已进入挠度的快速上升阶段。WGJ510C2 钢梁在中型炉中的耐火极限为 32 min,此时的失效温度为 694℃。

1.2.2 涂覆 1.50 mm 厚 GJ-3 防火涂料的钢梁耐火试验

Q235 钢梁和 WGJ510C2 钢梁在涂覆 1.50 mm 厚 GJ-3 防火涂料后的耐火试验结果曲线分别如图 6 和图 7 所示。

图 6 表明,试验在 60 min 时,即钢梁的温度在 530℃左右,挠度变化加快,72 min 时变形达到设定值,试验结束。涂覆 1.50 mm 厚 GJ-3 涂料的 Q235 钢梁在中型炉中的耐火极限应为 72 min,此时失效温度为 575℃。

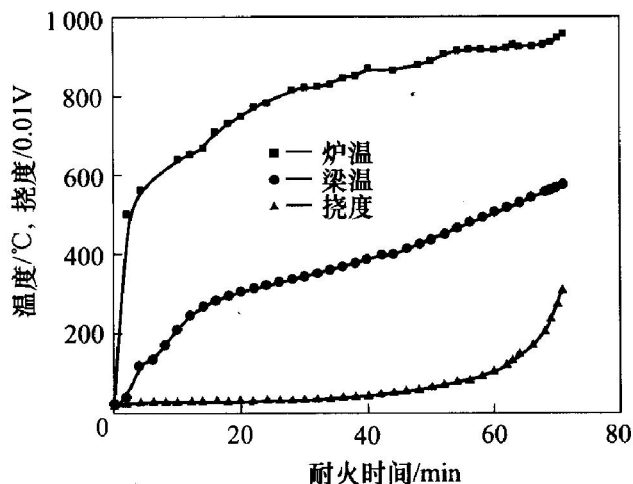


图 6 Q235(1.50 mm 厚 GJ-3 涂料)耐火试验

图 7 表明,当试验时间为 74 min,钢梁温度约在 650℃时,钢梁变形速率加大,86 min 挠度到达

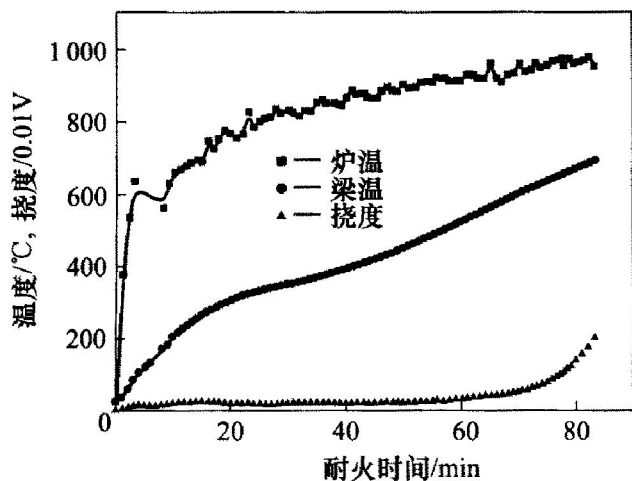


图7 WGJ510C2(1.50 mm厚GJ-3涂料)耐火试验

设定值。涂覆1.50 mm厚GJ-3涂料的WGJ510C2钢梁在中型炉中的耐火极限约为86 min, 此时的失效温度为707 °C。

1.2.3 涂覆3.00 mm厚GJ-3防火涂料的钢梁耐火试验

Q235钢梁和WGJ510C2钢梁在涂覆3.00 mm厚GJ-3防火涂料后的耐火试验结果曲线分别如图8和图9所示。

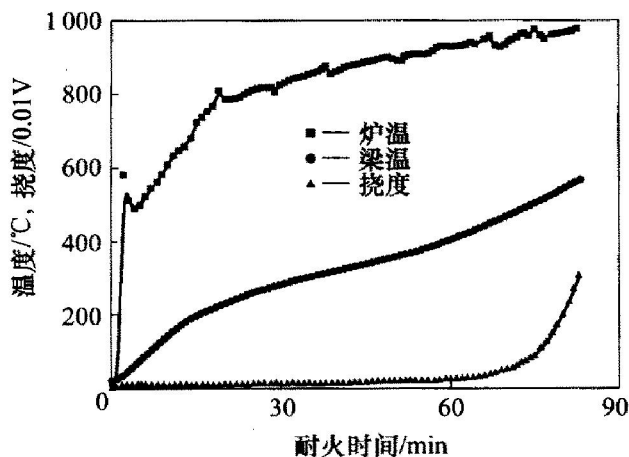


图8 Q235(3.00 mm厚GJ-3涂料)耐火试验

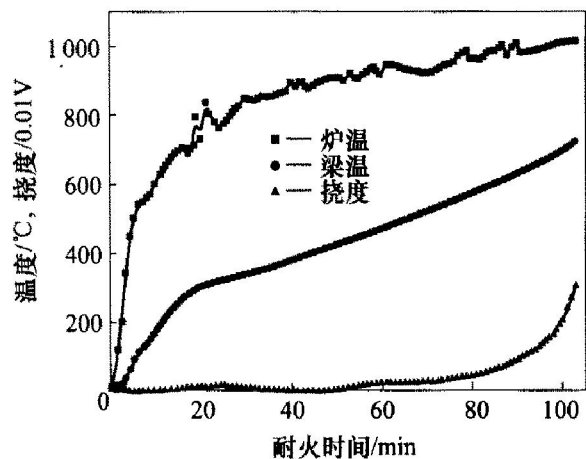


图9 WGJ510C2(3.00 mm厚GJ-3涂料)耐火试验

从图8可以看出, 试验进行到76 min左右, 也就是钢梁温度在530 °C时挠度变化加快, 83 min挠度到规定值, 即涂覆3.00 mm厚GJ-3涂料的Q235钢梁在中型炉中的耐火极限约为83 min, 此时的失效温度为560 °C。

从图9可以看出, 时间超过85 min时, 钢梁在650 °C以上, 挠度变化加快。103 min时挠度达到设定值, 所以耐火极限为103 min, 此时的失效温度为713 °C。

1.2.4 涂覆1.46 mm厚Herberts 38091防火涂料的钢梁耐火试验

Q235钢梁和WGJ510C2钢梁在涂覆1.46 mm厚Herberts防火涂料后的耐火试验结果曲线分别如图10和图11所示。

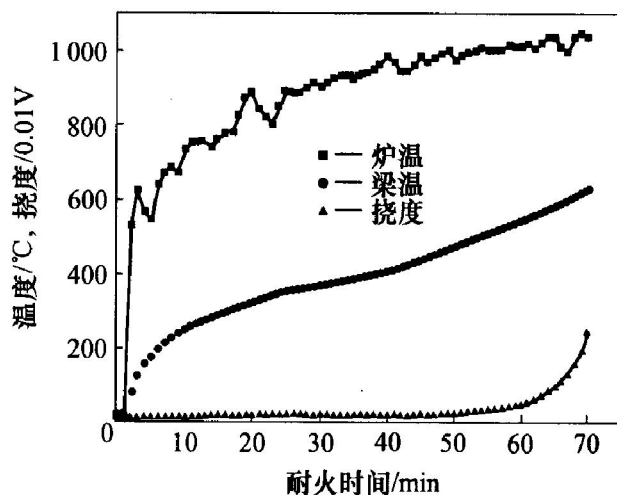


图10 Q235(1.46 mm厚Herberts涂料)耐火试验

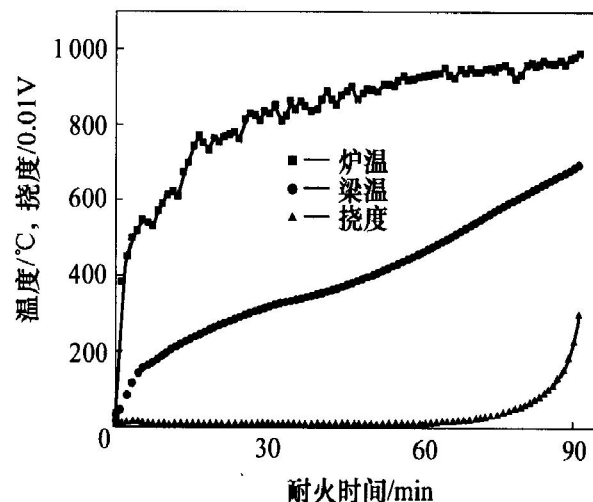


图11 WGJ510C2(1.46 mm厚Herberts涂料)耐火试验

从图10中可以看出, 试验进行到64 min, 钢梁温度为520 °C, 变形加快, 在72 min时试验结束。涂覆1.46 mm厚Herberts防火涂料的Q235钢梁耐火极限约为72 min, 此时的失效温度为583 °C。

图11表明, 试验进行到83 min左右时即钢梁

温度在 630 ℃以上,挠度变化加快。91 min 挠度达到设定值,耐火极限应在 91 min,此时的失效温度为 692 ℃。

2 分析与讨论

在试验过程中使用计算机采集火场温度、钢梁温度以及钢梁中点挠度,试验中设定的试验结束标志是钢梁中心点挠度变化为 20 mm,相对于位移传感器的电势值为 3.5 V。

2.1 两种裸露钢梁的比较

从试验中可以看出, WGJ510C2 制成的钢梁比普通 Q235 钢梁本身的耐火极限要长约 9 min。Q235 钢梁在 530 ℃以后变形加快,当梁温达 580~600 ℃时,挠度急剧上升达到耐火极限。而 WGJ510C2 钢梁在 530 ℃时变形速度仍较慢,直到 650 ℃后变形速度才快速上升,而且随温度上升速度也较快,达到 700 ℃时挠度呈直线上升,达到耐火极限,这说明 WGJ510C2 的软化温度要比 Q235 钢高 100 ℃或更多,可以断定这 9 min 的时间是耐火耐候钢梁本身软化温度提高的结果。

2.2 涂覆 1.50 mm 厚 GJ-3 防火涂料的不同钢梁的比较

涂覆 1.50 mm 厚 GJ-3 防火涂料以后, Q235 和 WGJ510C2 钢梁的耐火极限分别达到了 72 min 和 86 min。说明涂覆防火涂料后钢梁的耐火极限提高了,而两种钢梁之间的差距也由原来无涂层状态时的约 9 min 增加到了 14 min,这表明涂覆防火涂料后 WGJ510C2 的优势更加明显。

Q235 钢梁在 530 ℃变形加快,梁温达到 580~600 ℃时变形急剧增加。而 WGJ510C2 则是在 650 ℃后变形快速上升,700 ℃达到耐火极限。钢梁本身的软化温度没变。

两种钢梁由于受到防火涂料的保护,其升温速率比裸钢要缓慢,而软化温度 100 ℃以上的差异所对应的时间差异会比裸钢长,表现在最终结果上钢梁的耐火极限增加值不仅仅是裸钢的 9 min,而是增加到了 14 min。

2.3 涂覆 3.00 mm 厚 GJ-3 防火涂料的不同钢梁的比较

当涂层厚度增加到 3.00 mm 后, Q235 和 WGJ510C2 的耐火极限分别达到了 83 min 和 103

min。两者相差 20 min,比 1.50 mm 时的 14 min 差值又增加了 7 min,说明对于相同的防火涂料,厚度增加时其防火隔热效果也会相应增加,而且由于涂层更厚,隔热效果更好,钢梁升温速率会降低。两种钢梁软化温度之间的差异使在这此之间的时间差异进一步加长,即对于 WGJ510C2 而言,由于软化温度的提高所造成的差异会因为涂覆防火涂料厚度的增加而进一步加大,防火性能的优势更加明显。

从实验结果中还可以看出两种钢梁的软化温度仍然在 530 ℃和 650 ℃左右,并没有随涂料的增加而发生变化。

2.4 涂覆 1.46 mm Herberts 38091 防火涂料的不同钢梁的比较

德国的 Herberts 38091 涂料是当今世界上性能最好的涂料之一,在国内市场,由于该涂料有较大的技术优势,成为众多防火涂料厂商的研究和仿制目标。WGJ510C2 的中型梁比 Q235 钢梁在涂覆 1.46 mm 厚 Herberts 38091 涂料的中型炉的耐火极限要长 19 min,几乎是裸钢差异的 2 倍,这是由于 Herberts 38091 涂料的隔热性能比较好,所以两种钢梁 100 ℃的软化温度差异所对应的时间更长。

Q235 中型梁的软化温度是在 530 ℃左右, WGJ510C2 也在 650 ℃左右,和裸钢几乎一样,但涂覆防火涂料后耐火极限从 9 min 延长到 19 min 正说明了该涂料在防火隔热性能上的优势。由于防火涂料性能的提高使耐火极限提高的更多。

表 2 是两种钢梁涂覆两种涂料的结果对照。从以上分析和讨论中可以看出, Q235 与 WGJ510C2 中型梁的软化温度分别为 530 ℃和 650 ℃左右, Q235 达到耐火极限的温度大约在 580~600 ℃, WGJ510C2 达到耐火极限温度大约在 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。

两个钢种的耐火极限对比结果分别为裸钢相差 9 min,涂 1.50 mm GJ-3 时相差 14 min, 3.00 mm GJ-3 时相差 21 min,涂 1.46 mm 38 091 时,相差 19 min。这些差别主要取决于防火涂料本身的隔热效果。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。在不同涂层条件下, WGJ510C2 相比于 Q235 延长的耐火时间不同,也就是说 WGJ510C2 的耐火优势可以依靠优质的防火涂料来体现。

表 2 两种小型钢梁在裸露和不同涂覆状态下的试验结果对照

试验钢种	裸钢		GJ-3(1.50 mm)		GJ-3(3.00 mm)		Herberts 38091(1.46 mm)	
	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	32	694	86	707	103	713	91	692

从表 2 中还可以看出,在涂层为 1.50 mm 左右时,GJ-3 和 Herberts 38091 涂料涂覆在 Q235 钢梁耐火极限一样,若使用 WGJ510C2 钢梁,则 Herberts 38091 涂料的结果比较好,这说明 Herberts 38091 涂料的高温隔热性能更好。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 ℃范围内的隔热性能上有差异。

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 3)来看,对于 GJ-3 防火涂料要达到 83 min 的耐火时间,使用耐火耐候钢 WGJ510C2 时可以减薄 50%。对于 Herberts 38091 涂料要达到约 90 min 的耐火时间,使用耐火耐候钢 WGJ510C2 时,涂层可以减薄近 40% 左右。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,从而大大降低了工程成本,并提高了钢结构的有效使用空间。

表 3 在相同耐火时间下 Q235、WGJ510C2 涂料厚度的对比表

试验钢种	GJ-3	Herberts 38091
Q235	3.00 mm(83 min)	2.30 mm(87 min)
WGJ510C2	1.50 mm(86 min)	1.46 mm(91 min)

3 结论

1) 耐火耐候钢在高温(600 ℃)下的屈服强度高于其室温下屈服强度的 2/3,满足建筑用耐火钢板的耐火设计要求。

2) 在裸露条件下,高性能耐火耐候建筑用钢 WGJ510C2 的耐火极限明显优于普通建筑结构用钢 Q235,耐火极限的提高幅度高达 39.1%。

3) 同样品质的涂料在一定厚度范围内,随着防火涂料厚度增加,耐火钢的优势也增长;对于不同品质的防火涂料,使用防火性能好的防火涂料可以大大加强耐火钢的优势;隔热性能好的涂料耐火钢的优势也大,即防火涂料的隔热效果对耐火钢优势的体现起着很大的作用。

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] 郑卫东,师 华,熊家锦,等. 中型卧式耐火极限炉设计原理及应用探讨[J]. 消防技术与产品信息, 2002. 10.

(编辑 何学锋)