

建筑结构用高强抗震耐火 H 型钢组织性能研究

宋振东¹, 王学敏², 谢振家², 王 敏¹, 惠治国¹, 卜向东¹, 祁 祯¹

(1. 内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心, 内蒙古 包头 014010;
2. 北京科技大学, 北京 100083)

摘 要: 采用 TEM、金相显微镜、EBSD 等分析手段, 研究建筑结构用高强抗震耐火 H 型钢的微观组织对其强度、韧性及高温强度的影响。结果表明, 在合理的化学成分设计前提下, 不需要控轧控冷手段, 热轧后试验钢获得空冷贝氏体和铁素体两相组织。观察 600 °C 保温 3 小时后的组织发现, 在铁素体内部有纳米级相间析出物存在, 析出物的行间距约在 24 ~ 34 nm 之间。热轧建筑结构用高强抗震耐火 H 型钢的屈服强度 ≥ 500 MPa, 延伸率 $\geq 22\%$, 屈服比 ≤ 0.85 , -20 °C 冲击功 ≥ 34 J, 600 °C 保温 3 小时后屈服强度 ≥ 310 MPa。

关键词: 高强; 耐火; 组织; 性能

中图分类号: TU511.3; TG142; TG335

文献标识码: B

文章编号: 1009 - 5438(2024)02 - 0058 - 05

Study on Microstructure and Properties of High - strength Anti - seismic Fire - resistant H Beam for Building Structure

Song Zhen - dong¹, Wang Xue - min², Xie Zhen - jia², Wang Min¹,
Hui Zhi - guo¹, Bu Xiang - dong¹, Qi Zhen¹

(1. Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010,
Inner Mongolia Autonomous Region, China;
2. University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: The effects of microstructure of high - strength anti - seismic fire - resistant H beam for building structure on its strength, toughness and high temperature strength are studied with such analysis means as TEM (transmission electron microscope), metallographic microscope and EBSD (electron back - scattered diffraction). The results showed that the controlled rolling and controlled cooling were not needed under the premise of reasonable chemical composition design, two - phase structure of air cooling bainite and ferrite for test steel after hot rolling was obtained. It is found by observing the microstructure after holding at 600 °C for 3 hours that there is nano - level interphase precipitates in ferrite and their line spacing is about 24 ~ 34 nm. For the hot rolled high - strength anti - seismic fire - resistant H beam for building structure, its yield strength ≥ 500 MPa, elongation $\geq 22\%$, yield ratio ≤ 0.85 , impact energy at -20 °C ≥ 34 J and yield strength after holding at 600 °C for 3 hours ≥ 310 MPa.

Key words: high - strength; fire - resistant; microstructure; properties

从 20 世纪 60 年代开始,在日本,钢结构逐渐在商业建筑、住房及其他建筑中采用,如今日本每年钢结构的建筑面积已经达到所有形式建筑面积的 1/3 以上^[1-3]。发达国家的建筑钢结构用钢占比达 30%,国内仅占 5%~6%。发达国家的钢结构建筑发展比我国早,钢材强度等级应用水平远高于我国,德国柏林“索尼中心”、日本横滨“Landmark 大厦”均采用了屈服强度 690 MPa 级钢板^[4],日本新日铁住金研发中心大楼更是采用了屈服强度 880 MPa 级钢板。H 型钢在钢结构建筑中通常作为建筑的梁和柱使用,相对焊接 H 型钢,热轧 H 型钢具有更高的可靠性、经济性并且能够提高劳动生产率,因此研发高强抗震耐火热轧 H 型钢对建筑结构用钢具有十分重要的意义。

我国建筑钢结构总量将每年以 6%~7% 的速度增长。钢结构产业属于成长型朝阳行业,发展前

景很好^[5]。建筑结构在向高层和大跨距方向发展,必须使用强度更高的钢材,以减轻结构重量及减少钢结构用材的厚度,降低建造成本,减少能源和矿产资源的消耗,同时提高其安全可靠^[6]。钢结构建筑的主要缺点是耐火性能较差,需要在钢结构表面覆盖大量的耐火材料,因此开发高强度、抗震、耐火等综合性能优异的热轧 H 型钢尤为关键。

1 试验材料及方法

采用 100 t 转炉冶炼,经 LF 和 VD 精炼后采用异型坯连铸,轧制成规格为 H300×150 的 H 型钢。建筑结构用高强抗震耐火 H 型钢的化学成分设计思路主要包括以下两点:①通过 Mo、Cr、Cu 等合金元素“固溶”提高耐腐蚀性;②通过 Mo、V、Ti、Nb 等“纳米析出”提高耐火性。建筑结构用高强抗震耐火 H 型钢化学成分见表 1。

表 1 建筑结构用高强抗震耐火 H 型钢的化学成分(质量分数)

钢种	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	V	Nb	Mo
BG460SWF	≤0.11	≤0.30	≤1.30	≤0.010	≤0.010	≤0.40	≤0.30	≤0.40	≤0.10	≤0.06	≤0.4

其中提高耐火性关键技术为控制 Mo、Nb、V、Ti 碳化物均匀析出、相间析出及高温稳定性;通过组织控制,提高组织高温稳定性,实现耐火性能提高。

建筑结构用高强抗震耐火 H 型钢拉伸形式为直板拉伸,用型号为 WAW-600C 的微机控制电液伺服万能试验机检验建筑结构用高强抗震耐火 H 型钢的拉伸性能。高温拉伸试样为符合 GB/T 228.2—2015 标准的试样,用 WDW-200C 电子拉伸

试验机在 600℃ 保温 3 小时后测量高温屈服强度。冲击试样尺寸为 7.5 mm×10 mm×55 mm,采用型号为 NI750 的冲击试验机来测量其 -20℃ 的低温冲击韧性。建筑结构用高强抗震耐火 H 型钢加热轧制工艺见表 2。由于建筑结构用高强抗震耐火 H 型钢含有较多的合金元素,加热时间较长有利于合金元素更好地扩散,起到固溶强化作用,来提高其强度。

表 2 加热轧制工艺

编号	预热段温度/℃	加热段温度/℃	均热段温度/℃	加热时间/h	开轧温度/℃
1	700	1 201	1 243	8.12	1 151
2	700	1 201	1 243	8.28	1 144

建筑结构用高强抗震耐火 H 型钢精轧机 CCS 轧制参数见表 3,为了获得细小的晶粒度,要求终轧

温度在轧钢设备允许的条件下尽可能低。

表 3 CCS 轧制参数

编号	1 道次温度/℃	3 道次温度/℃	终轧温度/℃	压缩比/%	轧制力/kN
1	965	962	820	90	3 000
2	1 007	989	880	90	3 000

2 结果与讨论

2.1 力学性能

对轧制后的建筑结构用高强抗震耐火 H 型钢按照 GB/T 2975—2018 标准取样,检验其力学性能和冲击性能,检验结果见表 4 和表 5。

表 4 力学性能

编号	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	延伸率/%	屈强比	600 °C 高温屈服强度/MPa
1	547	788	22.5	0.69	321
2	581	850	22.5	0.68	324

表 5 冲击性能

编号	试样尺寸(宽×高×长) /mm	冲击功(−20 °C) /J		
		70	54	71
1	7.5×10×55	70	54	71
2	7.5×10×55	75	73	61

从表 4 和表 5 可以看出,建筑结构用高强抗震耐火 H 型钢的屈服强度已经达到 500 MPa 以上,抗拉强度达到 800 MPa 左右,并且具有较低的屈强比,说明建筑结构用高强抗震耐火 H 型钢具有良好的抗震性能。另外建筑结构用高强抗震耐火 H 型钢的经过 600 °C 保温 3 小时后屈服强度在 310 MPa 以

上,表明建筑结构用高强抗震耐火 H 型钢具有很好的高温强度,增加了钢结构发生火灾后的安全性能,解决了钢结构在火灾后强度急剧降低的缺点。根据表 5 低温冲击韧性检验结果可知,建筑结构用高强抗震耐火 H 型钢在具有高强度和抗震性及高温稳定性同时,材料还有良好的低温韧性来保证建筑结构的抗冲击性能。

2.2 显微组织

采用金相显微镜对轧后的高强抗震耐火 H 型钢的组织进行观察,金相组织照片见图 1。由图 1 可以看出高强抗震耐火 H 型钢空冷的组织为贝氏体和铁素体两相组织,其中贝氏体组织占主导地位。

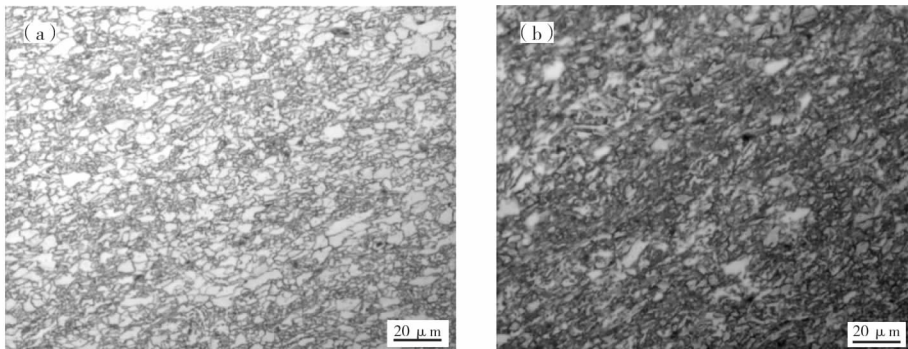


图 1 高强抗震耐火 H 型钢的显微组织

从图 1 中可以看出,图 1(a)相对于图 1(b)铁素体组织较多,贝氏体组织较少,造成这一现象的主要原因是,由于 H 型钢断面较复杂,在实际冷却过程中,各部分的冷却速度不同导致组织中铁素体和贝氏体比例不一致。高强抗震耐火 H 型钢的铁素体组织很好地保证了材料的韧性及塑性,而贝氏体组织是高强抗震耐火 H 型钢强度及高温强度的重要保证。通过扫描电镜(SEM)观察高强抗震耐火 H 型钢电子背散射衍射(EBSD)照片如图 2 所示。

由图 2 可知,高强抗震耐火 H 型钢的铁素体晶粒尺寸细小,经 EBSD 统计分析,晶粒尺寸为 1.13 ~ 8.99 μm ,通过细晶强化来保障高强抗震耐火 H 型钢的强度及韧性是材料具有高强度及韧性的关键因素之一。

2.3 透射电镜(TEM)分析

利用透射电镜研究了热轧态高强抗震耐火 H 型钢在 600 °C 高温下保温后铁素体中的纳米级析出相,如图 3 所示。热轧空冷后,铁素体中既有无规则

析出相,也有界面析出相。

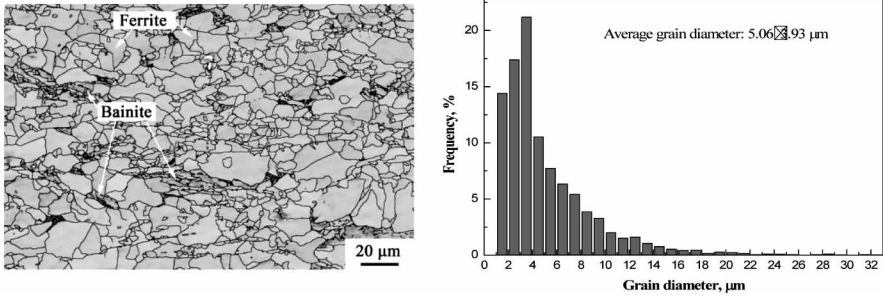
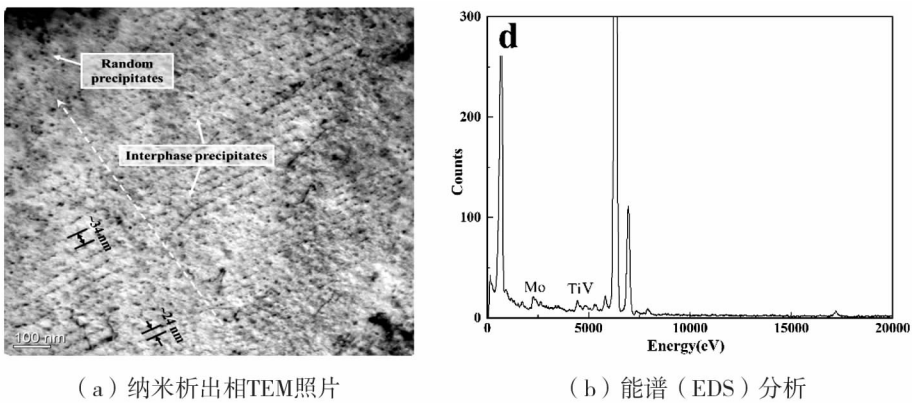


图2 高强抗震耐火 H 型钢的 EBSD 组织



(a) 纳米析出相TEM照片

(b) 能谱 (EDS) 分析

图3 600 °C 高温下保温后铁素体中的纳米级析出相

沿白色虚线箭头方向,析出物的行间距从 24 nm 增加到 34 nm,析出物在铁素体内分布没有规律性。图 3(a) 观察结果表明,铁素体晶粒内界面析出相的排距不均匀;图 3(b) EDS 分析结果表明,这些析出物为 (Ti, V)C 复合碳化物。在奥氏体 (γ) 向铁素体 (α) 的转变过程中,存在一个相对低能的阶地 γ/α 面和一个相对高能的平台 γ/α 面。高能平台 γ/α 面在相变过程中移动过快,不利于碳化物的析出。而低能阶地 γ/α 面是不可移动的,碳化物在平面内析出。当透射电镜的电子束平行于析出台阶面时,可以观察到图 3(a) 成排排列的界面析出相。当钢在高温拉伸时,析出相阻碍了晶界滑移,位错密度增加,从而提高了钢的高温性能。

3 结论

(1) 在对高强抗震耐火 H 型钢化学成分精确设计的前提下,在空冷的情况下,高强抗震耐火 H 型钢屈服强度 ≥ 500 MPa, 延伸率 $\geq 22\%$, 屈强比 ≤ 0.85 , -20 °C 冲击功 ≥ 34 J, 600 °C 保温 3 小时后屈

服强度 ≥ 310 MPa。

(2) 在空冷的条件下,建筑结构用高强抗震耐火 H 型钢的组织为贝氏体和铁素体。贝氏体组织可以有效的提高材料的强度及耐火性能,而铁素体组织是建筑结构用高强抗震耐火 H 型钢具有良好的低温韧性的关键因素,在 600 °C 保温 3 小时后铁素体有纳米级相 (Ti, V)C 复合碳化物析出,进一步增加了材料的耐火性能。

参 考 文 献

- [1] Ishii T, Fujisawa S, Ohmori A. Overview and Application of Steel Materials for High - Rise Building [J]. JFE Technical Reports, 2008 (21): 1 - 7.
- [2] Yoshifumi S. Recent Trend and Future Direction in the Technology for Structural Steels Used in Buildings [J]. Nippon Steel Technical Reports, 2007, 387: 7 - 9.
- [3] Sakumoto Y. Research On New Fire - Protec-

- tion Material and Fire - Safe Design [J]. Struct. Eng, 1999, 125(12):1415 - 1422.
- [4] Pocock G. High Strength Steel Use in Australia, Japan and the US[J]. The Structural Engineer, 2006(11):27 - 30.
- [5] 唐帅. 低屈强比 590 MPa 级建筑结构用钢开发[D]. 沈阳:东北大学, 2010.
- [6] 童明伟. 550/690 MPa 级高强韧低屈强比结构钢开发及抗断能力研究[D]. 武汉:武汉科技大学, 2016.

参考文献著录规则(二)

4 连续出版物中的析出文献

著录格式:

析出文献主要责任者. 析出文献题名[文献类型标识/文献载体标识]. 连续出版物题名:其他题名信息, 年,卷(期):页码[引用日期]. 获取和访问路径. 数字对象唯一标识符.

示例:

- [1] 袁训来,陈哲,肖书海,等. 蓝田生物群:一个认识多细胞生物起源和早期演化的新窗口[J]. 科学通报, 2012, 55(34):3219.
- [2] 余建斌. 我们的科技一直在追赶:访中国工程院院长周济[N/OL]. 人民日报, 2013 - 01 - 12(2)[2013 - 03 - 20]. http://paper.people.com.cn/rmrb/html/2013-01/12/nw.D110000renmrb_20130112_5-02.htm.
- [3] 李炳穆. 韩国图书馆法[J/OL]. 图书情报工作, 2008, 52(6):6 - 12[2013 - 10 - 25]. <http://www.docin.com/p-400265742.html>.

5 专利文献

著录格式:

专利申请者或所有者. 专利题名:专利号[文献类型标识/文献载体标识]. 公告日期或公开日期[引用日期]. 获取和访问路径. 数字对象唯一标识符.

示例:

- [1] 邓一刚. 全智能节电器:200610171314.3[P]. 2006 - 12 - 13.
- [2] 西安电子科技大学. 光折变自适应光外差探测方法:01128777.2[P/OL]. 2002 - 03 - 06[2002 - 05 - 28]. <http://211.152.9.47/sipoasp/zljs/hyjs-yx-new.asp?recid=01128777.2&leixin=0>.
- [3] TACHIBANA R, SHIMIZU S, KOBAYASHI S, et al. Electronic watermarking method and system:US6915001 [P/OL]. 2005 - 07 - 05[2013 - 11 - 11]. <http://www.google.co.in/patents/US6915001>.

6 电子资源

著录格式:

主要责任者. 题名:其他题名信息[文献类型标识/文献载体标识]. 出版地:出版者, 出版年:引文页码(更新或修改日期)[引用日期]. 获取和访问路径. 数字对象唯一标识符.

示例:

- [1] 中国互联网络信息中心. 第29次中国互联网络发展现状统计报告[R/OL]. (2012 - 01 - 16)[2013 - 03 - 26]. <http://www.cnnic.net.cn/hlwfzyj/hlwxzbg/201201/P020120709345264469680.pdf>.
- [2] 北京市人民政府办公厅. 关于转发北京市企业投资项目核准暂行实施办法的通知:京政办发[2005]37号[A/OL]. (2005 - 07 - 12)[2011 - 07 - 12]. http://china.findlaw.cn/fagui/p_1/39934.html.
- [3] BAWDEN D. Origins and concepts of digital literacy[EB/OL]. (2008 - 05 - 04)[2013 - 03 - 08]. <http://www soi.city.ac.uk/~dbawden/digital%20literacy%20chapter.pdf>.