

Cr 对 460 MPa 级抗震耐火 建筑用钢性能影响

杜 平¹, 武凤娟¹, 曲锦波¹, 丛菁华², 王学敏²

(1. 江苏省(沙钢)钢铁研究院板带材研究室, 江苏 张家港 215625;

2. 北京科技大学材料科学与工程学院, 北京 100083)

摘 要: 设计了两种不同 Cr 含量 460 MPa 级抗震耐火建筑用钢, 并进行了室温和高温机械性能检测, 0.4%Cr 和 0.8%Cr 试验钢的性能均满足抗震钢屈服比 ≤ 0.83 , 并且耐火钢 600 °C 保温 3 h 后屈服强度 ≥ 307 MPa 的标准。JMatPro 热力学软件对 460 MPa 级抗震耐火建筑用钢的析出相进行计算, 采用光学显微镜和透射电子显微镜方法对钢中的析出相进行了分析。结果表明, 试验钢随 Cr 含量的升高, 室温抗拉强度升高, 屈服比降低, 具有更好的抗震性能。Cr 的增加, 减少了高温稳定性较差的析出相的析出, 降低了析出相中 Mo 的含量, 促使 Mo 更多地溶入基体中, 从而提高了抗震钢的高温固溶强化作用和耐火性能。

关键词: 建筑用钢; Cr 含量; 抗震性能; 耐火性能; 屈服比

中图分类号: TF76, TG142.1

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2021)04-0138-06

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2021.04.023

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听
语
音
聊
科
研
与
作
者
互
动

Effect of Cr on the properties of 460 MPa anti-seismic and fire-resistant construction steel

Du Ping¹, Wu Fengjuan¹, Qu Jinbo¹, Cong Jinghua², Wang Xuemin²

(1. Branch of Plate and Strip, Institute of Research of Iron and Steel, Sha Steel Group, Zhangjiagang 215625, Jiangsu, China; 2. School of Material Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: The anti-seismic and fire-resistant 460 MPa construction steels with different Cr content were designed to analyze the microstructure, performance at room temperature and elevated temperature. Both 0.4%Cr and 0.8%Cr steels meet the standards of anti-seismic and fire-resistant steel, that is, yield ratio is less than 0.83 and yield strength is more than 307 MPa after 3 hours soaking at 600 °C. The precipitations were simulated and analyzed by simulation software and using OM and TEM. It is concluded that increasing Cr content has an effect on improving of yield stress at room temperature and the reduction of yield strength ratio. With the increase of Cr content, high elevated temperature instability precipitations and the content of Mo in the precipitations can be decreased and Mo in the matrix can be raised. It has a positive effect on enhanced high elevated temperature solution strengthening and fire-resistance of construction steel because of Mo solid solutions.

Key words: construction steel, Cr, anti-seismic, fire-resistance, yield ratio

收稿日期: 2021-01-08

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFB0304700)。

作者简介: 杜平(1980-), 男, 山东临朐人, 博士, 研究方向: 金属材料研发, E-mail: duping572@163.com。

0 引言

20 世纪 50、60 年代在欧洲和日本开始采用钢结构的建筑形式,并逐渐得到各国广泛关注和认可^[1-4]。截止目前,日本每年的建筑中钢结构建筑的建筑面积已达到 1/3 以上^[5],而我国从 20 世纪 80 年代才开始应用和推广建筑用钢,近年来得到广泛关注,建筑用钢也由 Q235、Q345 级别发展为 Q390、Q420 级别,甚至 Q460 级别,但具有优良综合性能的高级别建筑用钢应用较少。

因其特殊的使用环境,建筑用钢应具备抗震、耐火、易焊接等性能,抗震性能通过降低屈强比来实现,耐火性能相对难以实现,通常采用增加 Mo 和析出相的量,减缓钢材在高温时强度降低幅度。应用较多的耐火钢主要采用高 Mo 的设计,新日铁、川崎等开发的耐火钢 Mo 含量在 0.30%~0.90%,国内鞍钢、莱钢、武钢等开发的耐火钢 Mo 含量在 0.50% 以上^[6-9],Mo 提高耐火钢的成本,研究表明添

加 Cr 能提高抗氧化和蠕变性能,因此笔者采用低 Mo 成分设计,分析 Cr 在 460 MPa 耐火建筑用钢中的作用,尝试获得低成本耐火钢的新的设计思路。

1 试验材料和方法

笔者采用 460 MPa 建筑用钢的成分体系,设计 1[#]、2[#]两种试验钢成分,1[#]钢 Cr 为 0.40%,2[#]钢 Cr 为 0.80%,具体如表 1 所示,分析不同的 Cr 含量对建筑用抗震耐火钢性能影响。试验所用钢坯在 150 kg 真空感应炉中冶炼,钢锭开坯切割后的截面尺寸为 140 mm×120 mm×240 mm(厚度×宽度×长度),钢板的成品厚度为 20 mm。1[#]钢和 2[#]钢在试验室 φ500 二辊可逆轧机上轧制,坯料加热温度为 1 180 ℃,保温时间 1 h,热轧工艺分为两阶段(γ 再结晶区+γ 未再结晶区)控制轧制,γ 再结晶区轧制温度控制在 1 020~980 ℃,γ 未再结晶区开轧温度控制 860 ℃,轧后进行层流冷却,冷却速度 10 ℃/s,终冷温度为 330~350 ℃,具体工艺参数如表 2 所示。

表 1 460 MPa 级抗震耐火钢的化学成分
Table 1 Chemical compositions of 460 MPa anti-seismic and fire-resistant construction steel %

钢号	C	Si	Mn	Cr	Mo	Nb+Ti	Cu+Ni	Al	P	S
1 [#]	0.055	0.25	1.39	0.40	0.27	0.047	0.55	0.03	0.005 2	0.004 1
2 [#]	0.056	0.24	1.37	0.80	0.26	0.046	0.56	0.03	0.005 2	0.004 1

表 2 460 MPa 级抗震耐火钢工艺参数
Table 2 Technology parameters of 460 MPa anti-seismic and fire-resistant construction steel

编号	一阶段开轧温度/℃	一阶段终轧温度/℃	二阶段开轧温度/℃	二阶段终轧温度/℃	二次轧制厚度/mm	开冷温度/℃	终冷温度/℃	冷却速率/(℃·s ⁻¹)
1 [#]	1 020	982	860	826	60	783	342	9.20
2 [#]	1 020	986	860	828	60	786	348	9.14

参照 GB/T 228.1—2010、GB/T 228.2—2015 在钢板宽度方向上取室温及高温力学性能试样,取样方向与轧制方向垂直,设计 M10 螺纹试样,试样直径为 5.0 mm。室温拉伸试验在室温下进行。高温拉伸试验所用试样与室温拉伸试验所用试样相同,在 600 ℃ 下保温 3 h 后,在 600 ℃ 进行高温拉伸试验。在试验钢板宽度四分之一处取组织观察所用试样,用标准金相程序抛光和 4% 硝酸酒精溶液侵蚀后,借助 Zeiss Axio 和 Zeiss EVO18 扫描电镜 (SEM) 进行显微组织观察。将侵蚀后的试样放入扫描电镜中观察,随机选取视场,在适当放大倍数下拍摄照片,并利用 Image pro-plus 软件统计铁素体体积分数和

马奥岛尺寸、体积分数。试验钢金相观察试样在 600 ℃ 保温 3 h 后,采取萃取复型方法制样,在 JEM-2100F 型透射电镜上观察碳膜上附着的析出相。

2 试验结果与讨论

2.1 机械性能

表 3 为 1[#]和 2[#]试验钢室温及高温力学性能,可见 1[#]和 2[#]试验结果均满足 460 MPa 耐火钢的性能且均达到了 GB/T 19879—2015 规定的 Q460GJ E 级性能指标,具有良好的屈强比、较高的抗拉与屈服强度和优良的塑韧性,同时耐火性能达到 GB/T 28415—2012 规定 600 ℃ 保温 3 h 后标准室温屈服

强度的 2/3 以上, 即 307 MPa。对比两种成分的试验钢, 1[#]和 2[#]试验钢室温时屈服强度相差 4.4 MPa, 但是 2[#]试验钢在 600 °C 下保温 3 h 的高温屈服强

度比 1[#]试验钢高 29 MPa。在 Ni、Nb、Mo、Cu、Ti 基本相同成分下, 重点分析 Cr 对 460 MPa 耐火钢高温强度的影响。

表 3 室温和高温机械性能

Table 3 Mechanical properties of experimental steels at room temperature and elevated temperature

编号	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	屈强比	断后延伸率/%	-40 °C 冲击功/J	高温屈服强度/MPa	高温抗拉强度/MPa
1 [#]	538.7	693.2	0.78	21.0	209.6	379.8	429.9
2 [#]	543.1	723.3	0.75	20.3	231.4	407.8	466.2

2.2 显微组织观察

图 1 为不同 Cr 含量的 1[#]和 2[#]试验钢的显微组织, 均由铁素体+粒状贝氏体构成, 1[#]试验钢的铁素体体积分数 12.8%, 2[#]试验钢的铁素体体积分数为 8.2%, 2[#]试验钢晶粒尺寸小于 1[#]试验钢, 同时 2[#]试验钢相比 1[#]试验钢 M/A 岛尺寸细小, 见表 4; 1[#]和 2[#]钢

的屈强比≤0.8, 当 Cr 由 0.4% 提高到 0.8%, 屈强比有一定程度的降低, 由 0.78 降至 0.75, 延伸率略微降低, 同时低温韧性和室温强度有一定程度的升高, 这主要是由于 Cr 的添加, 提高试验钢在冷却过程的淬透性, 得到更多的贝氏体组织, 2[#]试验钢晶粒及马奥岛更细小, 更有利于强度和韧性提高。

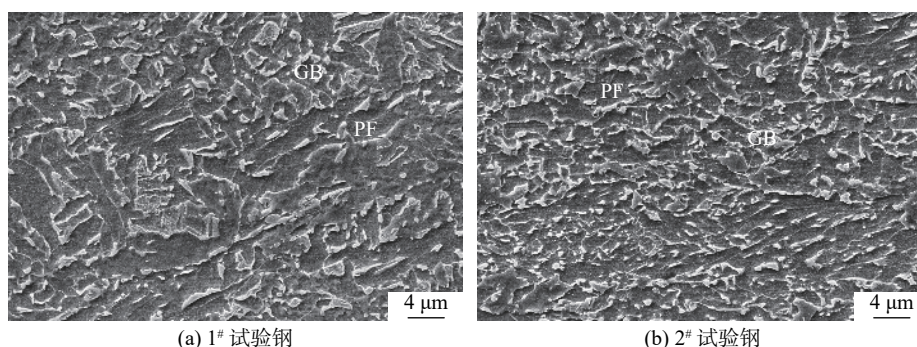


图 1 试验用钢显微组织
Fig. 1 SEM microstructure of the steel with different Cr content

表 4 马奥岛平均尺寸与体积分数

Table 4 Average size and volume fraction of the MA constituents in the tested steels

编号	平均尺寸/μm	体积分数/%
1 [#]	0.64	3.19
2 [#]	0.49	2.23

为了进一步分析试验钢中 Cr 元素对析出的影响, 采用萃取复型方法对试验钢 600 °C 保温后样品进行 TEM 观察, 并采用 EDS 分析析出相成分。如图 2 所示, 从 600 °C 保温 3 h 处理后的试验钢析出相形貌及 EDS 能谱中可以看出, 1[#]试验钢和 2[#]试验钢在晶界或板条边界处大尺寸的析出相主要是 Fe、Cr、Mn、Mo 复合的合金碳化物, 1[#]试验钢和 2[#]试验钢大尺寸析出物平均尺寸和体分数见表 5; 通过 EDS 能谱 1[#]试验钢析出相中 Mo 为 9.18%, 2[#]试验

钢析出相中 Mo 为 2.03%, 可以明显看出, 2[#]试验钢的析出碳化物中 Mo 明显低于 1[#]试验钢, 2[#]试验钢中有更多的 Mo 溶入基体中。

2.3 热力学模拟与分析

由上述试验结果可知, 1[#]和 2[#]试验钢高温屈服强度相差 28 MPa, 高温时各种强化方式分别的贡献值不同, 强化机制主要包括细晶强化、沉淀强化、固溶强化和位错强化, 对不同类型的钢, 其强化方式各有特色, 既可是单一的强化方式, 也可是多种强化方式的复合。对低碳高强钢来讲, 其屈服强度与各强化方式的经验公式如式(1)所示^[10-11]:

$$\sigma_y = \Delta\sigma_0 + \Delta\sigma_{ss} + \Delta\sigma_{gb} + \sqrt{\Delta\sigma_{dis}^2 + \Delta\sigma_{orowan}^2} \quad (1)$$

式中, σ_y 为试验钢整体屈服强度, $\Delta\sigma_0$ 为 P-N 力(位错运动的晶格阻力), $\Delta\sigma_{ss}$ 为固溶强化增量, $\Delta\sigma_{gb}$ 为细晶强化增量, $\Delta\sigma_{orowan}$ 为沉淀强化增量, $\Delta\sigma_{dis}$ 为位

错强化增量。

1[#]和 2[#]试验钢相同的成分体系和轧制工艺, 因此在研究强化方式可以忽略其中一部分, 例如, P-N 力、细晶强化、位错强化等。文献 [11] 研究表明, Cr 的质量百分数对强度贡献的系数为-31, 即每增

加 1%, 固溶强化贡献量减少 31 MPa, 因此 Cr 的添加对于强度的贡献在固溶强化方面影响不大, 甚至还会略微降低其固溶强化方式贡献, 因此在本文中也把 Cr 的这部分贡献量忽略, 为此重点讨论 1[#]和 2[#]试验钢的析出强化的作用。

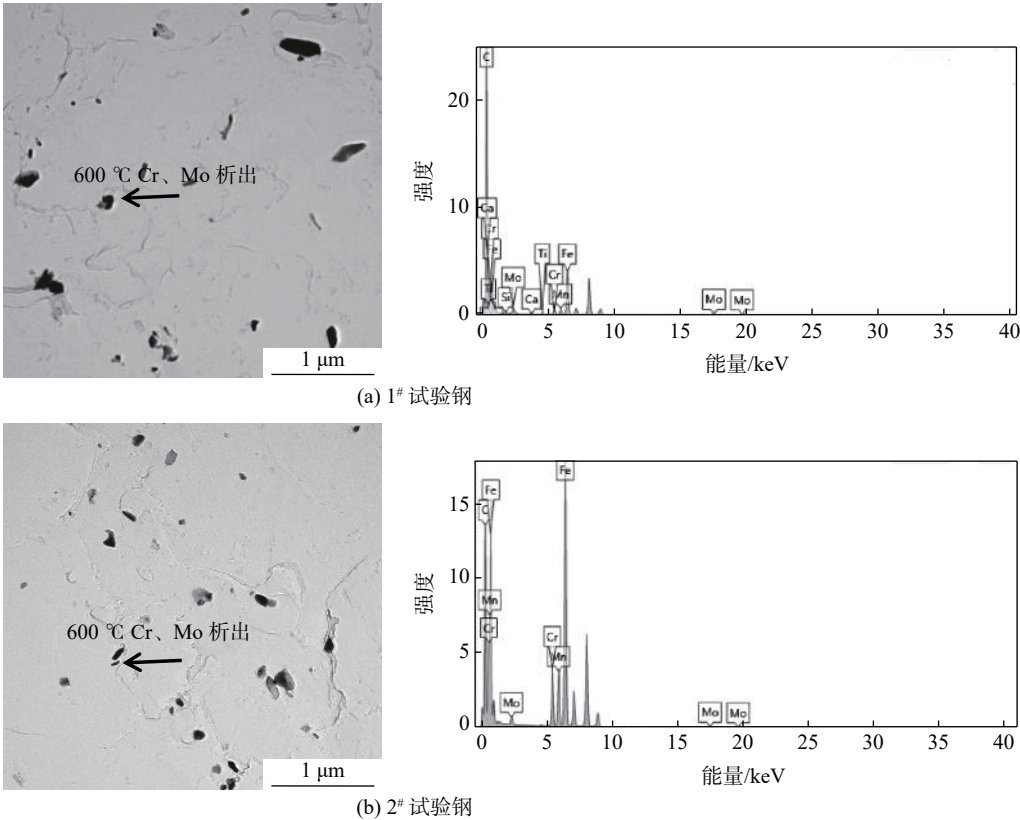


图 2 600 °C 保温处理后试验钢析出相观察图及能谱分析
Fig. 2 The observation and energy spectrum analysis of precipitations for experimental steels hold at 600 °C

表 5 试验钢大尺寸析出物平均尺寸和体积分数
Table 5 Average size and volume fraction of the MA constituents in the tested steels

编号	平均尺寸/nm	体积分数/%
1 [#]	75.4	0.011
2 [#]	67.9	0.008

富 Cr 的析出相在平衡态下为 M_3C 和 M_7C_3 两种类型, 正交晶系结构的在研究析出强化方式的贡献时, 利用 JMatPro 软件进行试验钢 600 °C 保温的碳化物析出情况进行了模拟, 重点模拟讨论 M_3C 和 M_7C_3 两种碳化物, 如图 3 所示, 从图 3 可以看出, 在保温 3 h 内, 析出相 M_3C 含量逐渐降低, 析出相 M_7C_3 大幅增加, 添加 0.8%Cr 的 2[#]试验钢中 M_3C 和 M_7C_3 两种析出相量低于 1[#]试验钢, 这两种析出

相的高温稳定性都较差, 因此在高温时强化效果不明显, 仿真模拟结果与试验结果相一致。

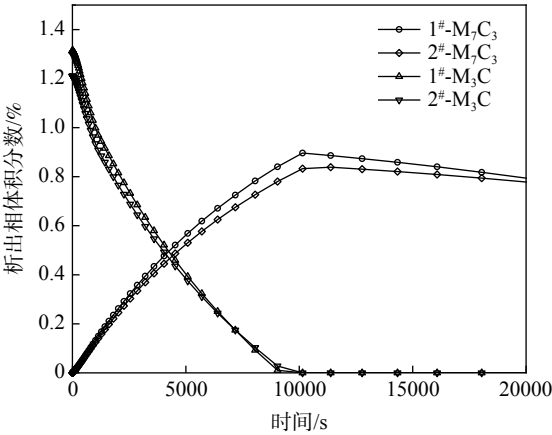


图 3 JMatPro 模拟析出相体积分数随时间变化
Fig. 3 The change of JMatPro simulation precipitations volume fraction with time

文献[12-13]的研究表明, $\text{Mo} < 0.3\%$ 时, 为固溶强化, $\text{Mo} \geq 0.3\%$ 时, 为固溶强化和沉淀强化, 本试验采用 1[#]试验钢 Mo 为 0.27%, 2[#]试验钢 Mo 为 0.26%, 1[#]和 2[#]试验钢 Mo 均小于 0.3%, 因此认为试验钢的固溶强化对高温强度作用更大, Mo 的高温强化机理主要为固溶强化, 在含 Mo 钢中, 加入 Cr 能改变 Mo 在碳化物和固溶体之间的分配, 当加入的 Cr 量不足以形成渗碳体以外的其它碳化物时, Cr 能使 Mo 从渗碳体中被排除, 溶入基体, 同时当加入 Cr 的可以形成渗碳体以外的其他类型碳化物时, 将引起 Mo 的碳化物减少, 也同样使 Mo 溶入基体中。利用 JMatPro 软件进行试验钢碳氮化物 M(C, N) 析出相中 Cr、Mo 元素计算, 见图 4, 随着温度升高, 1[#]、2[#]试验钢中 Cr、Mo 元素在碳氮化物

M(C, N) 析出相中的含量降低, 2[#]试验钢碳氮化物 M(C, N) 析出相中 Cr 元素含量高于 1[#]试验钢, Mo 元素含量低于 1[#]试验钢, 2[#]试验钢碳氮化物 M(C, N) 析出相中由更多的 Cr, 而 Mo 更多的溶于基体中, 因此, Cr 的增加促使 Mo 更多地溶入基体中, 通过提高基体中 Mo 的含量, 起到很好的抗高温软化能力, 2[#]试验钢析出相中 Mo 元素含量较 1[#]试验钢低, 大部分的 Mo 溶于基体中, 因此 Mo 的固溶强化作用也会越来越明显, 这也验证 Mo 在高温时的固溶强化作用比室温明显, Mo 在高温时具有很好的固溶强化效果。Cr 的增加促使高温下的 Mo 更多的溶入基体中, 提高钢材整体高温强度, 具有更好的耐火性能。

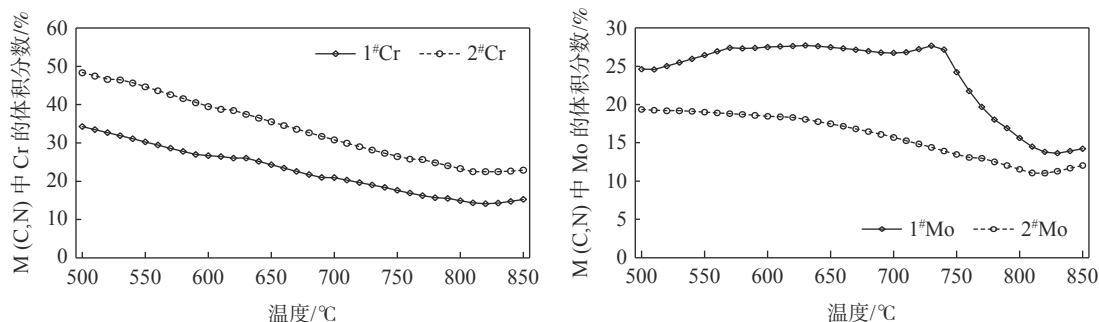


图 4 Cr、Mo 元素在析出相 M(C, N) 中的分布
Fig. 4 Distributions of Cr、Mo in precipitations M(C, N)

3 结论

1) 采用不同 Cr 含量 460 MPa 级抗震耐火建筑用钢的成分设计和 TMCP 工艺生产出性能优异的建筑结构用钢, 得到了稳定贝氏体组织, 综合力学性能优异, 1[#]试验钢屈强比 0.78, 2[#]试验钢屈强比 0.75, 满足屈强比低于 0.83 的标准要求, 600 °C 保温 3 h 后 1[#]试验钢屈服强度 379.8 MPa, 2[#]试验钢屈服强度 407.8 MPa, 高温屈服强度均满足大于 307 MPa 的标准要求。

2) 试验建筑结构用钢中随着 Cr 含量的升高, 力学性能得到改善, 2[#]试验钢室温强度略有升高, 屈强

比低于 1[#]试验钢, 具有更好的抗震性能; 2[#]试验钢在 600 °C 保温 3 h 的高温屈服强度比 1[#]试验钢高 29 MPa, 高温耐火性能优于 1[#]试验钢。

3) 随着 Cr 的增加, 减少高温稳定性较差的析出相的析出, 降低析出相中 Mo 的含量, 促使 Mo 更多地溶入基体中, 提高基体中 Mo 的含量, 起到抗高温软化能力。通过模拟分析添加 0.8%Cr 的 2[#]试验钢中 M_3C 和 M_7C_3 两种析出相量低于 1[#]试验钢, 2[#]试验钢析出相中 Mo 元素含量较 1[#]试验钢低, 2[#]试验钢中有更多的 Mo 溶于基体中, 具有更好的高温强度, 良好的耐火性能。

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] Li Chunzhi, Ma Longteng, Tian Zhihong, *et al.* Research of high performance Q460 Structural steel with fire resistant and weather resistant[J]. China Metallurgy, 2018, 28(7): 19–23.
(李春智, 马龙腾, 田志红, 等. 高性能Q460耐火耐候结构钢的研发[J]. 中国冶金, 2018, 28(7): 19–23.)
- [4] Wan Weiguo, Wu Jiecai, Wu Baoqiao, *et al.* Research on properties and process of fire-resistant steel[J]. China Metallurgy, 2005, 15(7): 33–37.
(完卫国, 吴结才, 吴保桥, 等. 耐火钢的性能及工艺研究[J]. 中国冶金, 2005, 15(7): 33–37.)
- [5] Liu Qingchun, Yong Qilong, Zheng Zhiwang. Effect of vanadium on microstructure and high temperature properties of fire-resistant steels[J]. Iron and Steel, 2016, 51(7): 76–80.
(刘庆春, 雍岐龙, 郑之旺. 钒对耐火钢显微组织及高温性能的影响[J]. 钢铁, 2016, 51(7): 76–80.)
- [6] Ma Longteng, Wang Yanfeng, Di Guobiao, *et al.* Microstructural stability of Q60FRW fire-resistant steel[J]. Journal of Materials Engineering, 2019, 47(10): 82–89.
(马龙腾, 王彦峰, 狄国标, 等. Q460FRW耐火钢的组织稳定性[J]. 材料工程, 2019, 47(10): 82–89.)
- [7] Wang Lianqing, Ma Wenjiang, Wang Hongying. Research on the mechanical properties of 460 MPa fire-resistant steel at high temperature[J]. Steel Construction, 2019, 34(11): 110–112.
(王连庆, 马文江, 王红缨. 460 MPa耐火钢高温力学性能研究[J]. 钢结构, 2019, 34(11): 110–112.)
- [8] Zhang Zhengyan, Yong Qilong, Sun Xinjun. Microstructure and mechanical properties of precipitation strengthened fire-resistant Steel containing high Nb and low Mo[J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2015, 22(4): 337–342.
- [9] Liu Jixiong Wang Qingfeng Li Pinghe. Study on weld ability of high toughness refractory and weather resistant construction steel[J]. Iron and Steel, 2002, 37(12): 40–44.
(刘继雄, 王青峰, 李平和. 高性能耐火耐候建筑用钢焊接性能研究[J]. 钢铁, 2002, 37(12): 40–44.)
- [10] Gladman T. The physical metallurgy of microalloyed steels[M]. London: CRC Press LLC, 2002.
- [11] Li Pinghe, Liu Jixiong, Chen Xiao. Study on microstructure of high performance fire-resistant and weathering construction steel[J]. Iron and Steel, 2005, 40(6): 72–75.
(李平和, 刘继雄, 陈晓. 高性能耐火耐候建筑结构用钢的显微组织研究[J]. 钢铁, 2005, 40(6): 72–75.)
- [12] Wang Yanhua. Study on microstructure and properties of heat-resistant steel for ultra-supercritical steam[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2006.
(王艳华. 超超临界汽轮机耐热钢组织和性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2006.)
- [13] Wan Rongchun. Study on strengthening mechanism of Mo and replacement of Mo in fire-resistant steel[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012.
(万荣春. 耐火钢中Mo的强化机理及其替代研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.)

编辑 邓淑惠

2021年6月中国钛精矿进口35.81万t

根据海关数据显示, 2021年6月中国钛精矿进口35.81万t, 环比增加57.94%, 同比增长80.75%; 1~6月钛精矿累计进口197.88万t, 同比增长29.13%, 同比2020年1~6月总量增长约44.63万t。

摘自 <https://luliao.lgmi.com/html/202107/27/7609.htm>