

Cr-Mo-Nb 系耐火抗震螺纹钢的开发及力学性能

李海滨 任红娃 窦亚斌 车巨龙 李明林 谈彪

(西宁特殊钢股份有限公司技术质量中心, 西宁 810005)

摘要 耐火抗震螺纹钢要求 600 °C ≥ 1 h 的高温屈服强度不能低于常温屈服强度的 2/3。本文研究了 Cr-Mo-Nb 钢的耐火抗震螺纹钢的 20 °C 和 600 °C 力学性能。结果表明, 开发的 0.21% C, 0.40% Si, 1.25% Mn, 0.32% Cr, 0.40% Mo, 0.015% Nb 钢, 在 20 °C 室温时, 屈服强度在 400 ~ 520 MPa, 强屈比大于 1.25, 在 600 °C 高温时, 屈服强度为 316 MPa, 高温屈服强度与室温屈服强度的比值达到 0.71, 并且高温屈服强度比标准要求 2/3 值高 18 MPa, 满足耐火抗震螺纹钢要求。

关键词 Cr-Mo-Nb 抗震耐火钢 微合金化

Development of Cr-Mo-Nb Refractory and Anti-Seismic Rebar Steel and Mechanical Properties

Li Haibing, Ren Hongwa, Dou Yabin, Che Julong, Li Minglin and Tan Biao
(Technical Quality Center, Xining Special Steel Co Ltd, Xining 810005)

Abstract It is needed of refractory and anti-seismic rebar steel to maintain at 600 °C for more than 1 h, the high temperature yield strength can not be lower than the normal temperature yield strength of 2/3. In this paper, mechanical properties of refractory and anti-seismic Cr-Mo-Nb steel at 20 °C and 600 °C are studied. The results show that the developed 0.21% C, 0.40% Si, 1.25% Mn, 0.32% Cr, 0.40% Mo, 0.015% Nb steel, at 20 °C, the yield strength is 400 ~ 520 MPa, strength-yield ratio is greater than 1.25, at 600 °C, the yield strength is 316 MPa, the ratio of high temperature yield strength to room temperature yield strength reaches 0.71, and the high temperature yield strength is 18 MPa higher than the 2/3 value of the standard requirement, which meets the requirements of refractory rebar steel.

Material Index Cr-Mo-Nb Refractory and Anti-Seismic Steel, Macro-alloying

普通抗震钢筋随着温度的升高, 钢筋的屈服强度会急剧下降, 为此要求在传统的建筑钢筋基础上研制出具有耐火性能的新一代钢筋^[1-2]。

1 试验研究

1.1 耐火钢筋的定义

《GB/T 37622-2019 钢筋混凝土用热轧耐火钢筋》中, 耐火钢筋 (fire resistant steel bars) 定义为: 钢中加入适量的耐火合金元素, 如 Mo、Cr、Ni、Nb、V 等, 使其具有在 600 °C 时其屈服强度不低于常温屈服强度 2/3 的耐火性能并按热轧状态交货的钢筋。即①耐火性能: Rel, 600 °C ≥ 2/3 Rel, 20 °C; ②室温力学性能及其他质量指标满足普通建筑用钢标准的要求; ③抗震性: 室温下 (Rm/Rel) ≥ 1.25, 屈服强度波动范围尽量小; ④焊接性良好; ⑤其他特殊性能根据具体要求设定, 如耐候性等或优于耐候建筑用钢。

1.2 普通抗震螺纹钢耐火性能试验

以普通抗震螺纹钢生产工艺作为研究基础, 添加 Mo 作为提高耐火螺纹钢高温性能的主要合金元素, 最终选定合理的成分配比设计开发耐火抗震螺纹钢^[3-5]。本文对 V、Nb-V、Cr-V 和 Cr-Nb 系 4 种普通抗震螺纹钢 (表 1) 生产工艺下钢筋的耐火性能进

表 1 4 种普通抗震试验钢的化学成分/%

试验钢	C	Si	Mn	P	S	Cr	V	Nb	Al
1#	0.22	0.55	1.35	0.020	0.022	0.06	0.027	-	<0.1
2#	0.21	0.54	1.36	0.018	0.024	0.05	0.014	0.015	<0.1
3#	0.21	0.53	1.36	0.026	0.020	0.35	0.015	-	<0.1
4#	0.22	0.54	1.35	0.022	0.018	0.30	-	0.018	<0.1

表 2 4 种普通抗震试验钢的室温力学性能

Table 2 Mechanical properties of four kinds of ordinary anti-seismic test steels at room temperature

试验钢	Rel/MPa	Rm/MPa	Ag _t /%	R ⁰ _m /R ⁰ _{el}
1#	465	645	15.5	1.39
2#	472	651	14.6	1.38
3#	456	655	12.5	1.44
4#	454	635	13.0	1.40

行研究。

上述试验钢生产工艺流程:70 t 转炉冶炼→LF 精炼→连铸机(170 mm × 170 mm)→连铸坯→推钢式加热炉加热→水除鳞→18 架连轧机轧制(Φ25 mm)→冷床冷却→精整上交。

1.2.1 常温拉伸

根据 GB/T28900-2012《钢筋混凝土用钢材试验方法》对钢筋进行室温拉伸试验(温度:21 ℃),结果如表 2:从表 2 可以看出,4 种试验钢常温屈服强度都超过了 400 MPa,并且强屈比都大于 1.25,最大伸长率达到了 9% 以上,满足 400MPa 级抗震螺纹钢的要求。4 种试验钢中,1# 和 2# 分别为 V 微合金化和 Nb-V 复合微合金化工艺,Agt 值明显大于 3# 和 4# Cr 复合强化工艺,这是因为 V、Nb 强化机制与 Cr 强化机制有着本质区别,V、Nb 析出强化效果明显对于屈服强度有显著提升,而 Cr 元素主要起到固溶强化效果,在提高屈服强度的同时显著提高抗拉强度,因此含有 Cr 的螺纹钢强屈比明显较大^[6-7]。

1.2.2 高温拉伸

以 0.5 ℃/s 的加热速度将试验钢加热到 600 ℃ 后保温 1 h,然后通过拉伸测试得到应力-应变曲线。 R^{0}_{el} -屈服强度实际值, R^{0}_{m} -抗拉强度实际值。因高温导致屈服点不明显,取 0.2% 应变时的应力作为钢的屈服强度,结果如表 3。

按照 GB/T 37622-2019 标准要求,高温屈服强

度(600 ℃)和室温屈服强度(20 ℃)的比值最小要达到 2/3。表 3 数据显示 4 种普通抗震螺纹钢的耐火性能远远不能满足要求。

2 耐火抗震螺纹钢的成分设计及验证

2.1 耐火抗震螺纹钢设计思路

以 4# 试验钢作为研究基础,根据钢的合金化原理,选择 Mo 作为提高螺纹钢高温性能的主要合金元素,主要是因为 Mo 固溶于铁素体中可以强化铁素体基体,高温下 Mo 在铁素体中扩散速度较慢,因而可以显著提高钢的高温强度和蠕变强度,并且固溶的 Mo 容易在晶界上偏聚,提高钢的高温强度。

根据资料显示:Mo 在钢中主要起固溶强化作用,除此之外钢中为合金元素 Nb、Mo 的析出存在相互促进作用,Mo 含量从 0 增至 0.6%,析出体积分数可由 0.019% 增加到 0.025%,Mo 的添加增大析出相的晶格常数,使析出相与基体之间的错配度从 2.5% 增加到 3.3%,也会增加钢的常温屈服强度和抗拉强度。

2.2 耐火抗震螺纹钢试验 I

以 4# 试验钢作为基础在保持不变的基础上添加 Mo,具体设计如表 4 所示:

上述试验钢生产工艺流程:70 t 转炉冶炼→LF 精炼→铸机(170 mm × 170 mm)→连铸坯→推钢式加热炉加热→水除鳞→18 架连轧机轧制(Φ25 mm)→冷床冷却→精整上交。

从表 5 可知,5#、6# 和 7# 试验钢常温屈服强度均在 400 ~ 520 MPa,且强屈比均大于 1.25,满足 400 MPa 级抗震螺纹钢的标准要求,但是 6# 和 7# 屈服强度与标准相比偏高,从质量和成本上来说都是不合理的。与表 2 对比后发现,添加 Mo 后螺纹钢的常温屈服强度和抗拉强度均增加,且屈服强度增加幅度大于抗拉强度,强屈比与不含 Mo 抗震螺纹钢相

比有所降低,主要是 Nb 与 Mo 相互促进析出强化作用大于 Mo 自身固溶强化作用所致。

表 6 中只有 7# 试验钢高温屈服强度比常温屈服强度比值大于 2/3,满足耐火钢的标准。虽然 7# 试验钢 YS 比值仅为 0.68,但是 7# 常温屈服强度达到了 482 MPa,高温屈服强度也达到了 328 MPa,适当降低 7# 试验钢的常温屈服强度且保持高温性能可有效提高 YS 比值。

2.3 耐火抗震螺纹钢试验 II

表 3 4 种普通抗震试验钢的高温力学性能

Table 3 High temperature mechanical properties of four common anti-seismic test steels

试验钢	试验温度/℃	Rel/MPa	YS 比	2/3R ⁰ _{el} (常温)	R _m /MPa	Agt/%	R ⁰ _m /R ⁰ _{el}
1#	600	144	0.31	310	227	16.0	1.58
2#	600	156	0.33	315	251	11.2	1.61
3#	600	169	0.37	304	293	14.0	1.73
4#	600	186	0.41	304	306	15.0	1.64

表 4 试验 I 钢的化学成分/%

Table 4 Chemical composition of test I steel/%

试验钢	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Nb	Al
5#	0.21	0.55	1.34	0.024	0.020	0.32	0.20	0.015	<0.1
6#	0.22	0.54	1.35	0.019	0.022	0.31	0.30	0.018	<0.1
7#	0.21	0.54	1.33	0.020	0.017	0.30	0.40	0.016	<0.1

表 5 试验 I 钢的室温力学性能

Table 5 Mechanical properties of test I steel at room temperature

试验钢	Rel/MPa	R _m /MPa	Agt/%	R ⁰ _m /R ⁰ _{el}
5#	461	636	13.4	1.35
6#	473	646	12	1.31
7#	482	650	11	1.35

表 6 试验 I 钢高温力学性能

Table 6 Test 1 steel mechanical properties at high temperature

试验钢	试验温度/℃	Rel/MPa	YS 比	2/3R ⁰ _{el} (常温)	Rm/MPa	Agt/%	R ⁰ _m /R ⁰ _{el}
5 [#]	600	245	0.52	316	331	13.6	1.35
6 [#]	600	301	0.61	331	371	12.8	1.23
7 [#]	600	328	0.68	323	400	11.2	1.22

表 7 试验 II 钢的化学成分/%

Table 7 Chemical composition of test 2 steel/%

试验钢	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Nb	Al
8 [#]	0.21	0.40	1.25	0.024	0.020	0.32	0.40	0.015	<0.1

根据 Hall-Petch 提出的低碳钢屈服强度和抗拉强度与成分、组织、晶粒度的关系,可分别用(1)式和(2)式表述:

$$\sigma_s = 102.4 + 32.1[Mn] + 82.6[Si] + 17.2d^{-1/2} \quad (1)$$

$$\sigma_b = 290.1 + 27.0[Mn] + 81.3[Si] + 3.8[\text{珠光体}] + 17.2d^{-1/2} \quad (2)$$

式中: d -晶粒直径

对于低碳钢,屈服强度与 Mn、Si 含量以及晶粒尺寸 d 有关,抗拉强度与 Mn、Si 含量以及珠光体含量有关,且也与晶粒尺寸 d 有关。C 含量的高低仅通过珠光体含量的高低影响到抗拉强度,对屈服强度没有影响^[8,9]。试验 II 中需要降低螺纹钢常温屈服强度到 450 MPa 左右,并且要保持钢材的韧性,综合考虑通过适当降低 Mn、Si 来满足综合性能要求,具体成分如表 7 所示:

试验钢生产工艺流程:70 t 转炉冶炼→LF 精炼→铸机(170 mm×170 mm)→连铸坯→推钢式加热炉加热→水除鳞→18 架连轧机轧制(Φ25 mm)→冷床冷却→精整上交。

从表 8 可知,与试验 I 中 7[#]试验钢相比,试验 II 中 8[#]试验钢常温屈服强度降低 37 MPa,抗拉强度降低 31 MPa,且 8[#]试验钢屈服强度在 400~520 MPa,

表 8 试验 II 钢的室温力学性能

Table 8 Mechanical properties of test 2 steel at room temperature

试验钢	Rel/MPa	Rm/MPa	Agt/%	R ⁰ _m /R ⁰ _{el}
8 [#]	445	619	13.7	1.39

表 9 试验 II 钢高温力学性能

Table 9 High temperature mechanical properties of steel test 2

试验钢	试验温度/℃	Rel/MPa	YS 比	2/3R ⁰ _{el} (常温)	Rm/MPa	Agt/%	R ⁰ _m /R ⁰ _{el}
8 [#]	600	316	0.71	298	374	12.1	1.18

强屈比大于 1.25 满足抗震性能指标要求,符合 400 MPa 级抗震螺纹钢的标准要求。

表 9 中 8[#]试验钢高温屈服强度与常温屈服强度的比值(YS 比)达到了 0.71,并且高温屈服强度比标准要求 2/3 值高 18 MPa,满足耐火螺纹钢要求。

3 结论

(1)Cr-Nb 系普通抗震螺纹钢耐火特性优于 V 系、V-Nb 系和 Cr-V 系,因此 Cr-Nb 系抗震螺纹钢适合作为耐火螺纹钢的研究方向。

(2)使 Cr-Mo-Nb 系耐火抗震螺纹钢的高温屈服强度与常温屈服强度比值大于 2/3,Mo 的含量要达到 0.4% 左右;当 Mo 含量达到 0.4% 时,高温屈服强度(600 ℃)和室温屈服强度(20 ℃)的比值达到了 0.68,满足《GB/T 37622-2019 钢筋混凝土用热轧耐热钢筋》中关于耐火性能的要求。

(3)在 8[#]试验钢(0.21% C,0.4% Si,1.25% Mn,0.32% Cr,0.4% Mo,0.015% Nb),室温屈服强度在 400~520 MPa,强屈比大于 1.25 满足抗震性能指标要求,且高温屈服强度与常温屈服强度的比值(YS 比)达到了 0.71,完全满足 400 MPa 级抗震螺纹钢的标准要求。

参考文献

- [1] 乔晓峰,李春辉,王芳. 高强度螺纹钢生产工艺的研究[J]. 中国金属通报,2018(7):116-117. DOI:10.3969/j.issn.1672-1667.2018.07.068.
- [2] 全国钢标准化技术委员会(SAC/TC183). 钢筋混凝土用热轧耐热钢筋:GB/T 37622-2019[S]. 2019.
- [3] 吕立锋. 建筑用耐热钢筋的成分设计及其组织与性能研究[D]. 沈阳:东北大学,2012. DOI:10.7666/d.J0118986.
- [4] 蒲玉梅,奚铁. 马钢建筑用高效结构钢材的开发应用[J]. 钢结构,2007,22(1):70-72,88. DOI:10.3969/j.issn.1007-9963.2007.01.020.
- [5] 于孟山,盛光敏,詹苏宇. 抗震钢筋研究现状[J]. 材料导报,2010,24(z1):454-458.
- [6] 沈俊昶,刘志勇,杨才福,等. 建筑用耐热钢的高温强化机理[J]. 钢铁研究学报,2007,19(4):75-79. DOI:10.3321/j.issn:1001-0963.2007.04.018.
- [7] 傅民安,张立龙. 螺纹钢生产余能利用及其发展前景[J]. 江西科学,2006,24(4):226-229. DOI:10.3969/j.issn.1001-3679.2006.04.026.
- [8] 王厚昕,李正邦. 我国热轧钢筋的发展和现状[J]. 材料与冶金学报,2006,5(2):141-145. DOI:10.3969/j.issn.1671-6620.2006.02.015.
- [9] 谢克非,李军红,周天瑞. 浅谈冷轧带肋钢筋现阶段的生产应用和发展前景[J]. 南方金属,2003(3):5-8. DOI:10.3969/j.issn.1009-9700.2003.03.002.

李海滨(1969-),男,工程师,1990年东北工学院(本科)毕业,轧制工艺研究。E-mail:839663935@qq.com

收稿日期:2021-03-29