

## 铬、锰对 HRB400 钢筋力学性能的影响

高菊<sup>1</sup> 闫绍维<sup>2</sup> 马立兴<sup>1</sup> 尹金枝<sup>1</sup>

(1 华北理工大学迁安学院, 迁安 064400; 2 河北唐银钢铁有限公司, 唐山 063000)

**摘要** 针对钢中残留铬元素含量高的特点,在试验室条件下分析研究了几组不同 Cr、Mn 含量试验用钢,铬、锰合金元素含量对 HRB400 试验钢筋力学性能及显微组织的影响;并利用扫描电镜、电子探针等手段分析了 HRB400 试验钢筋力学性能与珠光体含量、析出物微观组织的关系。结果表明,在锰含量分别为 1.15%、1.25%、1.35% 低、中、高锰条件下,随 Cr 含量的增加,试验钢筋屈服强度、抗拉强度随之提高,微量铬元素起一定的强化作用,从而可减少 Mn 元素加入量;Cr 含量由 0.1% 增加至 0.3% 珠光体含量增加,且晶粒度平均在 8~9 级,钢中有 Cr-Fe-Mn 复合合金渗碳体和铬碳化物析出;0.125~0.135% Mn, 0.20% Cr 试验钢筋组织和力学性能达到国标规定的要求;且根据试验结果并结合当前合金元素的价格,吨钢可节约成本约 20 元。

**关键词** 合金化 HRB400 钢筋 力学性能

## Effects of Cr and Mn on Mechanical Properties of Steel Bar HRB400

Gao Ju<sup>1</sup>, Yan Shaowei<sup>2</sup>, Ma Lixing<sup>1</sup> and Yin Jinzhi<sup>1</sup>

(1 School of Qian' An, North China University of Science And Technology, Qian' An 064400;  
2 Hebei Tangyin Iron Steel Co Ltd, Tangshan 063000)

**Abstract** Concerning the phenomenon of high residual Cr in steel bar, the influence of the mass fraction of Cr, Mn alloy elements on the mechanical properties and microstructure of HRB400 test steel bars in laboratory conditions is studied. The relationship between mechanical properties and the content of pearlite, and the microstructure of precipitated particles was also analyzed by transmission electron microscopy. The experimental results are as follows. At low, medium and high Mn content of 1.15%, 1.25% and 1.35% respectively, the yield strength and tensile strength of test steel bars raised with the increase of Cr. Cr played a certain strengthening role, which can reduce Mn addition. The content of pearlite raised with increasing Cr from 0.1% to 0.3%, the average grain size was 8~9. Meanwhile, Cr-Fe-Mn composite alloy cementite and Cr carbide have been precipitated from steel. The microstructure and mechanical properties of the reinforced rebar with 0.125%~0.135% Mn, 0.20% Cr meet the requirements of international standard. Based on the test results and the current price of alloying elements, the cost per ton of steel can be reduced by about 20 yuan.

**Material Index** Alloying, HRB400 Steel Bar, Mechanical Properties

热轧带肋钢筋生产通常采用三种基本工艺,即微合金化、轧后余热处理和超细晶化<sup>[1-2]</sup>。余热处理工艺因为可焊性等问题不为中国场所认可<sup>[3-6]</sup>。目前我国 400MPa III 级以上的钢筋生产工艺,大多采用添加钒、铌等合金元素的方式保证强度<sup>[7-12]</sup>,出于降低生产成本的目的,本试验研究了不同配比的 Cr、Mn 合金元素含量对 HRB400 试验钢筋力学性能及显微组织的影响。通过用 Cr 代替部分 Mn 进行成分设计试验,以期利用钢中残留的铬元素对强度的贡献,替代部分锰元素对强度的贡献,降低硅锰合金的使用量。

### 1 成分设计

试验用钢选定碳含量 0.22%,低锰 1.10%~

1.20%、中锰 1.20%~1.30%、高锰 1.30%~1.40% 三个类别,每个类别中,Cr 含量分别为 0.10%、0.20% 和 0.30%,试验用钢的成分设计见表 1。

表 1 试验用钢的成分设计/%

Table 1 Composition design of experimental steel /%

编号	C	Mn	S	P	Si	Cr	备注
1	0.22	1.15	≤0.040	≤0.040	0.30~0.40	0.10	
2	0.22	1.15	≤0.040	≤0.040	0.30~0.40	0.20	低锰
3	0.22	1.15	≤0.040	≤0.040	0.30~0.40	0.30	
4	0.22	1.25	≤0.040	≤0.040	0.30~0.40	0.10	
5	0.22	1.25	≤0.040	≤0.040	0.30~0.40	0.20	中锰
6	0.22	1.25	≤0.040	≤0.040	0.30~0.40	0.30	
7	0.22	1.35	≤0.040	≤0.040	0.30~0.40	0.10	
8	0.22	1.35	≤0.040	≤0.040	0.30~0.40	0.20	高锰
9	0.22	1.35	≤0.040	≤0.040	0.30~0.40	0.30	

### 2 试验方法

使用 100 kg 真空感应熔炼炉进行冶炼,对冶炼后的 9 支钢锭进行成分分析,结果见表 2。再将钢锭锻成 20 mm × 25 mm × 300 mm。开锻温度 1 100 ~ 1 150℃,终锻温度 900 ~ 950℃,锻后空冷。拉伸性能所用试样参照国标 GB/T228-2010,精加工成直径为 Φ8mm,标距长度 50 mm 的拉伸试样。

### 3 试验结果与分析

#### 3.1 钢筋的化学成分及力学性能检测结果

表 2 结果表明,9 支钢锭成分均在设计成分范围内。对表 2 中的数据与国标要求进行对比,可以发现:

(1) Mn1.15% 的低锰方案中,当 Cr = 0.11% 时,出现了下屈服强度低于 400 MPa 的问题,不能满足国标要求;当 Cr = 0.20% 时,下屈服强度仅为 410 MPa,不能保证时效后仍满足国标,应予舍弃;当 Cr = 0.30% 时,下屈服强度 426 MPa,获得了较为理想的性能。

(2) Mn1.25% 的中锰方案中,当 Cr = 0.10% 时,下屈服强度仅为 418 MPa,不能保证时效后仍满足国标,应予舍弃;当 Cr ≥ 0.20% 时,下屈服强度处于

440 MPa 以上,获得了较为理想的性能。

(3) Mn1.35% 的高锰方案中,当 Cr = 0.29% 时,出现了强屈比 < 1.25 的问题,不能满足国标要求,因此在高锰条件下,钢中 Cr 含量宜低于 0.30%。

#### 3.2 铬、锰含量对钢筋强度的影响

在其他元素含量基本相同时,考察铬含量对强度的影响。比较 2 和 3 号、5 和 6 号、7 和 8 号,在锰含量分别为 1.15%、1.25%、1.35% 时,增加铬含量起到强化作用。见图 1(a)(b) 所示。

#### 3.3 铬、锰含量对钢筋韧性的影响

由图 1 可知,在锰含量分别为 1.15%、1.25%、1.35% 时,试验钢的断后伸长率均符合国标的规定,随铬含量升高,含铬镍钢筋的断后伸长率呈现出不同程度的降低。

#### 3.4 含 Cr 钢筋的显微组织结果

从表 3 中可以看出,试样金相组织均为铁素体 + 珠光体。3<sup>#</sup>、5<sup>#</sup>、6<sup>#</sup>、7<sup>#</sup>、8<sup>#</sup> 试样珠光体沿轧制方向分布均匀成带状,且铁素体晶粒大小比较平均。经过晶粒度评级,铁素体晶粒度平均在 8 ~ 9 级。2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>、5<sup>#</sup>、6<sup>#</sup>、7<sup>#</sup>、8<sup>#</sup> 试样随着 Cr 含量的增加,珠光体含量增加。结果如图 2 所示。

#### 3.5 含 Cr 钢筋的夹杂物、析出物分析

表 2 Φ8 mm 钢筋化学成分及力学性能  
Table 2 Chemical composition and mechanical properties of Φ8 mm Steel Bar

编号	成分/%								方案	抗拉强度/MPa	下屈服强度/MPa	断后伸长率/%	强屈比 (>1.25)	屈屈比 (<1.30)
	C	Mn	S	P	Si	Ni	Cr	Cu						
1	0.24	1.15	0.016	0.031	0.37	0.12	0.11	0.01		596	397	22	1.50	0.99
2	0.23	1.15	0.013	0.03	0.35	0.13	0.20	0.01	低锰	613	410	25	1.50	1.03
3	0.22	1.15	0.010	0.034	0.36	0.17	0.30	0.01		626	426	21	1.47	1.07
4	0.22	1.25	0.026	0.029	0.34	0.12	0.10	0.05		602	418	22	1.44	1.05
5	0.22	1.25	0.010	0.030	0.38	0.10	0.21	0.01	中锰	607	443	23.5	1.37	1.11
6	0.21	1.25	0.017	0.037	0.33	0.12	0.31	0.01		629	455	20	1.38	1.14
7	0.21	1.35	0.019	0.027	0.37	0.11	0.10	0.01		627	434	22	1.44	1.09
8	0.23	1.35	0.014	0.031	0.39	0.13	0.21	0.02	高锰	632	469	20.5	1.34	1.17
9	0.22	1.35	0.017	0.042	0.35	0.14	0.29	0.02		606	489	20	1.24	1.22

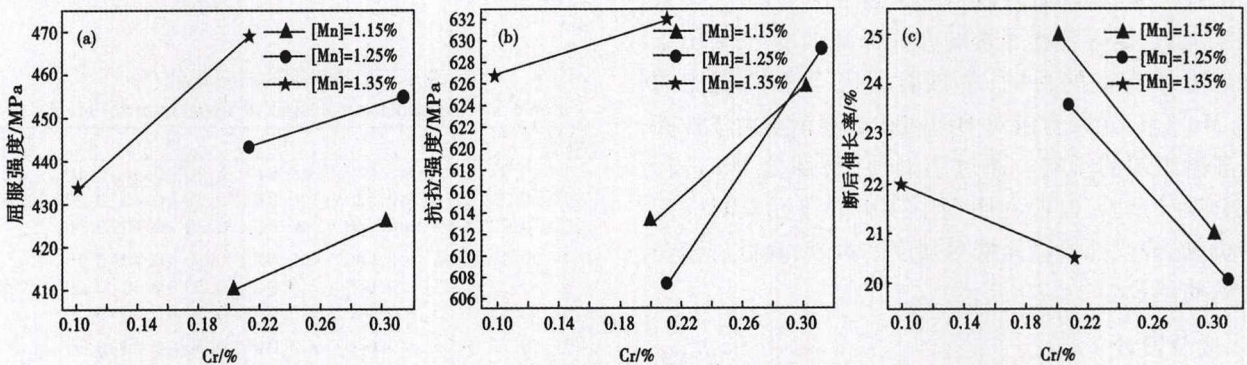


图 1 Cr 含量对试验钢屈服强度(a),抗拉强度(b)和伸长率(c)的影响  
Fig. 1 Effect of Cr content on yield strength (a), tensile strength (b) and elongation (c) of test steel

表3 金相组织结构、珠光体含量和晶粒级别统计  
Table 3 Statistics of microstructure, pearlite content and grain level

编号	显微组织	珠光体百分含量/%	晶粒级别
2	铁素体+珠光体	25.1	8.4
3	铁素体+珠光体	28.7	8.7
5	铁素体+珠光体	25.3	9
6	铁素体+珠光体	27.8	9
7	铁素体+珠光体	23.2	9
8	铁素体+珠光体	25.8	9

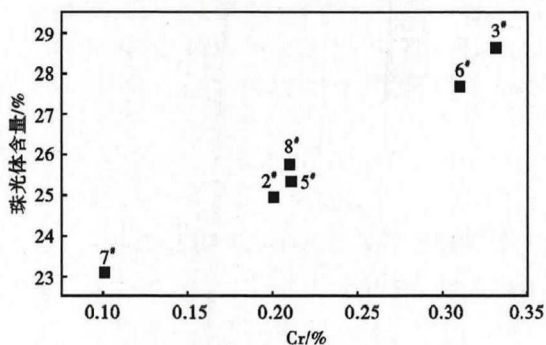


图2 Cr含量对试验钢珠光体含量的影响  
Fig. 2 Effect of Cr content on pearlite of test steel

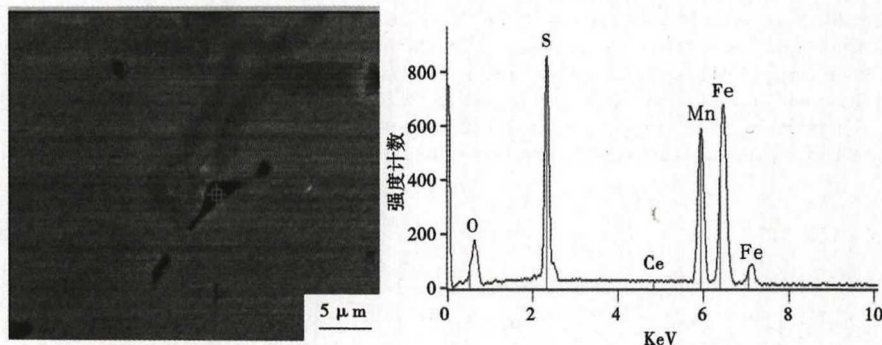


图3 试验钢 MnS 夹杂形貌能谱图  
Fig. 3 Morphology and energy spectrum of MnS inclusion in test steel

图3是在扫描电镜下观察到的3#试样中的夹杂物,通过能谱分析可确定为MnS夹杂,且夹杂尺寸均小于10 μm,弥散分布,对强度性能影响较小。

参考文献

[1] 陈兴银. HRB500E 抗震钢筋开发[J]. 科技创新与应用, 2013(10):54-55.  
 [2] 东 涛. 推进我国微合金化技术开发和应用新局面[J]. 微合金化技术, 2001, 1(1): 9241-9242.  
 [3] 杨爱元. 酒钢 HRB400 带肋钢筋微合金化工艺的研究开发[J]. 甘肃冶金, 2005, 27(1):11-12.  
 [4] 孙 诚, 盛光敏, 李正嵩. 轧后余热处理钢筋与常规轧制钢筋抗震性能对比[J]. 冶金标准化与质量, 2009, 47(2):22-23.  
 [5] 刘宝石, 陈 洁, 朱建国. GB13014《钢筋混凝土用热轧余热处理钢筋》国家标准修订情况综述[J]. 冶金标准化与质量, 2011, 49(4):25-26.  
 [6] 卢彦会, 白占顺. 余热处理生产高强度钢筋性能研究[J]. 山西冶金, 2010, 32(1):21-22.  
 [7] 祝学智, 范银平. 460 MPa 及 500 MPa 级热轧带肋钢筋的研制与开发[J]. 冶金标准化与质量, 2002, 40(4):1-2.

5#和6#试样中发现了细小析出颗粒。通过电子探针对比析出颗粒的组织、化学成分进一步观察得出,5#、6#试样制备样品中的析出颗粒尺寸为40~50 nm的Cr的碳化物相,Cr作为中等碳化物形成元素,以碳化物的形态析出较少,主要在钢中置换Fe形成合金渗碳体(Fe、Cr、Mn)<sub>3</sub>C,通过增加珠光体含量强化性能。渗碳体中含有Cr、Fe、Mn,其成分含量分别为1.03%、4.67%、93.28%。

3.6 成本比较

在锰含量为1.15%~1.35%时,增加[Cr]起到强化作用,部分试验钢筋的强度、塑性可达到HRB400钢筋的性能指标,与不含[Cr],1.45%Mn原钢水配比成分相比,此时节约锰元素0.2%~0.3%。根据试验结果并结合当前锰铁价格,吨钢可降低成本约20元。

4 结论

(1)Cr对组织变化的作用较大,随着Cr含量增加,形成的Cr-Fe-Mn合金渗碳体增加了珠光体含量,进一步提高了强度,部分试验钢筋组织和力学性能达到国标规定的要求。

(2)钢中有Cr-Fe-Mn复合合金渗碳体和铬碳化物析出;可利用珠光体对强度的贡献来减少锰元素加入量;在锰含量为1.15%~1.35%时,与不含[Cr],1.45%Mn原钢水配比成分相比,此时可节约锰元素约0.2%~0.3%。根据试验结果并结合当前合金元素的价格,吨钢可降低成本约20元。

华北理工大学青年基金项目资助(Z201624)

[8] 唐海燕, 李京社, 杨明生, 等. 微合金化 HRB400 高强度热轧钢筋的试制[J]. 特殊钢, 2011, 32(6):31-32.  
 [9] 孟庆宇. 西钢 HRB500 钢筋的工艺开发与实践[J]. 黑龙江冶金, 2012, 32(1):48-49.  
 [10] 张 龙. 余热处理对高强度建筑用钢筋 HRB400 组织和性能的影响[J]. 铸造技术, 2014, 35(10):2264-2265.  
 [11] 完卫国, 孙 维, 郭 湛. 钕微合金化控冷 HRB400 钢筋的试制[J]. 中国冶金, 2011, 21(5):7-8.  
 [12] 胡润璞, 聂雨青. 钒氮微合金化 HRB400 钢筋钢的开发与研究[J]. 炼钢, 2004, 20(3):39-40.

高 菊 (1980-), 女, 硕士 (2009 年河北理工大学), 讲师, 2003 年河北理工大学 (本科) 毕业, 凝固理论与钢质量控制研究. Email: robbg\_1018@163.com

收稿日期 2019-03-09