

· 组织和性能 ·

硅对 Nb-V 微合金化 Si-Mn-Cr-Mo 系贝氏体轨钢组织和性能的影响

任艳茹¹ 李晓晖² 赵卫东³

(1 鄂尔多斯职业学院,鄂尔多斯 017000;2 江西省科学院,南昌 330096;3 包钢(集团)公司,包头 014010)

摘要 研究了 1 250 MPa 级 Nb-V 微合金化 Si-Mn-Cr-Mo 系贝氏体轨钢(∕% :0.25 C,0.38 ~ 1.56 Si,1.69 ~ 1.76 Mn,1.34 ~ 1.37 Cr,0.32 ~ 0.33 Mo,0.034 ~ 0.036 Nb,0.11 ~ 0.12 V) 硅含量对试验钢显微组织和力学性能的影响。试验结果表明:试验钢热轧后空冷,随着硅含量的增加,试验钢的铁素体 + 珠光体相变被抑制,室温组织中贝氏体、马氏体含量增加,影响钢的强度和硬度,硅含量由 0.38% 提高到 1.56% 时,试验钢的屈服强度由 846 MPa 增至 903 MPa,抗拉强度由 1 280 MPa 增至 1 355 MPa,HBW 硬度值由 353 增至 411。

关键词 Nb-V 微合金化 Si-Mn-Cr-Mo 贝氏体钢轨钢 硅 组织 力学性能

Effect of Silicon on Microstructure and Mechanical Properties of Nb-V Microalloyed Si-Mn-Cr-Mo Series Bainite Rail Steel

Ren Yanru¹, Li Xiaohui² and Zhao Weidong³

(1 Ordos Vocational College, Ordos 017000; 2 Jiangxi Academy of Sciences, Nanchang 330096; 3 Baotou Steel (Group) Corp, Baotou 014010)

Abstract The effects of silicon content on microstructure and mechanical properties of the test 1 250 MPa grade Nb-V microalloyed Si-Mn-Cr-Mo bainite rail steel (∕% :0.25 C,0.38 ~ 1.56 Si,1.69 ~ 1.76 Mn,1.34 ~ 1.37 Cr,0.32 ~ 0.33 Mo,0.034 ~ 0.036 Nb,0.11 ~ 0.12 V) are studied. The test results show that by test steel air cooling after hot-rolling, with the increase of silicon content, the ferrite + pearlite phase transformation test steel is suppressed, and the content of bainite and martensite in the room temperature structure increases to affect the strength and hardness of steel. With silicon content increasing from 0.38% to 1.56%, the test steel's yield strength increases from 846 MPa to 903 MPa, the tensile strength increases from 1 280 MPa to 1 355 MPa, and the HBW hardness value increases from 353 to 411.

Material Index Nb-V Microalloying, Si-Mn-Cr-Mo Bainite Rail Steel, Silicon, Structure, Mechanical Properties

根据贝氏体轨钢合金设计原理和强韧性、耐磨性、焊接性匹配等设计要求,合金元素在贝氏体钢轨钢中发挥特别重要的作用,主要目的是在贝氏体轨钢连续冷却转变过程中尽可能多地生成下贝氏体组织^[1-2],实现高强韧易焊接的目的。

C-Si-Mn-Cr-Mo 系是国内外贝氏体轨钢合金体系的主流设计^[3],有些钢种还添加了 Ni 元素,总的合金加入量为 3.0% ~ 6.0%,同时添加 V、B、Nb、N、Ti 等微合金元素^[2],其中 C 含量在 0.19% ~ 0.55%,大部分在 0.25% ~ 0.40%,属于中碳合金贝氏体,Mn 含量为 1.4% ~ 2.3%,太高的 Mn 含量容易引起组织偏析、形成马氏体^[2],由于 Cr 和 Mn 在贝氏体钢轨钢中作用相近,捷克设计的贝氏体钢轨钢采用高 Cr 低 Mn 设计^[4],Cr 含量在 0.5% ~ 2.0% 波动,Mo 含量为 0.20% ~ 0.45%。只有 Si 的含量范围波动较大,日本设计的贝氏体钢轨钢成分体系中,Si 含量在 0.3% 左右,俄罗斯研制的贝氏体钢轨钢,Si 含量为 1.17% ~ 1.30%^[5-6],鞍钢、铁道科

学研究院、美国研制的贝氏体轨钢(J₆),Si 含量为 1.50% ~ 1.80%。Si 在贝/马复相钢中有抑制渗碳体析出,稳定残余奥氏体,推迟第一类回火脆性的作用,可将回火温度提高至 300 °C 甚至以上而增加韧性及抗延迟断裂性能^[7]。

1 试验材料和方法

1.1 化学成分设计

试验钢的化学成分如表 1 所示,3 种试验钢中 C、Mn、Cr、Nb、V 等元素含量基本保持不变,主要是 Si 含量分别为 0.38%、0.80%、1.56%。

1.2 冶炼及轧制工艺

采用 25 kg 真空感应炉冶炼试验钢,钢锭质量为 25 kg,钢锭最大直径 110 mm,为改善试验钢的枝晶偏析,将试验钢进行均质化处理,工艺为 1 200 °C 保温 4 h 后炉冷。后续的热轧工艺为:将钢锭放置在热处理炉内随炉加热至 1 250 °C,保温 2 h,在 Φ750 mm × 550 mm 二辊可逆式热轧实验机组上进行轧制,开轧温度为 1 180 ~ 1 220 °C,终轧温度为

表 1 试验钢的化学成分/%

试验钢	C	Si	Mn	Cr	Mo	Nb	V
1 [#]	0.25	0.38	1.76	1.35	0.32	0.034	0.11
2 [#]	0.25	0.80	1.69	1.34	0.33	0.035	0.12
3 [#]	0.25	1.56	1.75	1.37	0.32	0.036	0.11

930 ℃, 轧后空冷, 轧制成 20 mm 厚的板材^[8]。

1.3 试验分析

分别取纵向拉伸和横向冲击试样, 根据国标 GB/T228 和 GB/T229, 室温下分别在 120T 电液伺服拉伸试验机和 JBD-300A 低温冲击试验机进行拉伸和冲击试验, 用 TH600 型布氏硬度计测定试验钢及 60 kg/m 表面硬度, 测量 5 点, 然后取平均值。纵向取试验钢的金相试样, 经研磨抛光后采用 4% 的硝酸酒精溶液腐蚀, 在蔡司 Axio observer A1M 金相显微镜下观察试验钢的显微组织形貌^[8]。

2 试验结果与分析

2.1 显微组织分析

不同 Si 含量的试验钢热轧态显微组织如图 1 所示, 所有组织无马氏体带状偏析, 主要以下贝氏体为主, 试验钢 1[#] 的显微组织为下贝氏体, 还有少量的铁素体和珠光体, 试验钢 2[#] 的显微组织为板条状下贝氏体和少量的马氏体, 试验钢 3[#] 的显微组织由板条状贝氏体和马氏体组成, 马氏体含量比试验钢 2[#] 的多, 组织有呈粒状贝氏体的趋势, Si 对 C-Si-Mn-

Cr-Mo 系贝氏体钢轨钢的显微组织影响比较明显, 随着 Si 含量的增加, 铁素体、珠光体含量减少, 马氏体含量增加。

2.2 力学性能分析

从表 2 可知, 随着硅含量的增加, Nb-V 微合金化 C-Si-Mn-Cr-Mo 系贝氏体钢轨钢的抗拉强度、屈服强度略有提高, 断后伸长率、室温冲击吸收功基本保持不变, 对比试验钢 1[#]、3[#] 的拉伸性能可知, Si 含量从 0.38% 增加到 1.56%, 抗拉强度从 1 280 MPa 升高至 1 365 MPa, 增加了 85 MPa, 增加 5.8%, 屈服强度从 864 MPa 提高至 903 MPa, 增加了 39 MPa, 增加 4.5%, 但随着 Si 含量的增加, Nb-V 微合金化 C-Si-Mn-Cr-Mo 系贝氏体钢轨钢的硬度稳步提高, Si 含量从 0.38% 增加到 0.80%, HB 硬度值从 353 升高至 374, 而硅含量进一步增加到 1.56%, 试验钢的 HB 硬度值升高至 411, 和试验钢 1[#] 的硬度相比, 试验钢 3[#] 的硬度增加了 16.4%, 试验钢硬度显著增加的主要原因可能是随着 Si 含量的增加, 试验钢的显微组织中硬度较低的铁素体减少并消失, 同时出现硬度较高的马氏体并逐渐增加。

3 讨论与分析

硅为非碳化物形成元素, 在 Nb-V 微合金化 C-Si-Mn-Cr-Mo 系贝氏体钢成分体系中, 作为固溶元素可以稳定奥氏体, 使 C 曲线右移, 同时可以降低

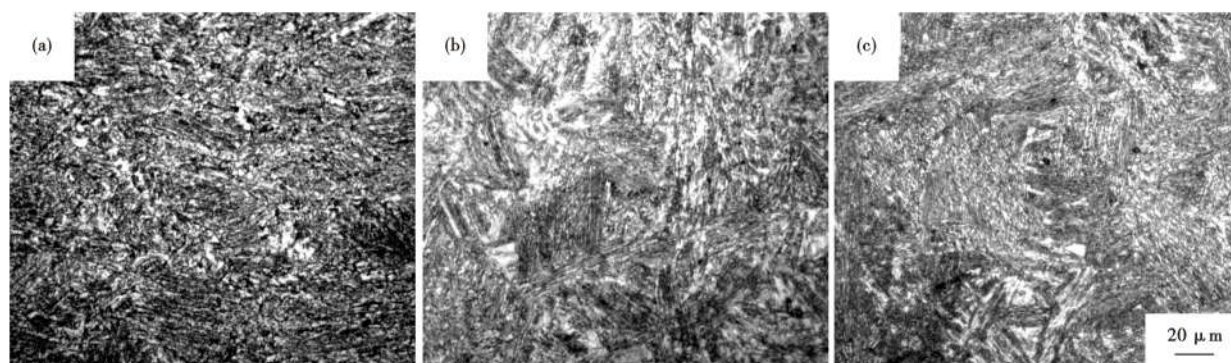


图 1 试验钢 (a) 1[#], 0.38% Si; (b) 2[#], 0.80% Si; (c) 3[#], 0.56% Si 热轧态显微组织

Fig. 1 Microstructure of hot-rolled experimental steels (a) 1[#], 0.38% Si; (b) 2[#], 0.80% Si; (c) 3[#], 0.56% Si

表 2 试验钢热轧态的力学性能

试验钢	$R_{p0.2}$ /MPa	R_m /MPa	A /%	K_{U2} /J (室温)	HBW 硬度值
1 [#]	864	1 280	15.0	64	353
2 [#]	875	1 290	15.5	62	374
3 [#]	903	1 355	16.0	62	411

贝氏体相变温度, 细化贝氏体板条^[9], 所以随着试验钢中 Si 含量的逐渐增加, 在相同的冷速条件下, 铁素体 + 珠光体相变被抑制, 试验钢热轧态显微组织中, 贝氏体和马氏体含量在增加。同时 Si 可以使不连续的残留奥氏体以薄膜状分布在铁素体板条和亚板条之间, 薄膜状残余奥氏体可以提高冲击韧性,

这也是试验钢 3[#]在强度升高的同时室温冲击吸收功没有降低的原因。

通过表 2 可知,硅对 Nb-V 微合金化 C-Si-Mn-Cr-Mo 系贝氏体钢轨强度和硬度的影响并非呈等比线性关系,Si 元素对硬度的影响要大于对强度的影响,这可能是因为贝氏体钢轨的抗拉强度在 1 300 MPa 左右,其强化手段主要有 C、Si、Mn、Cr 等元素的固溶强化,Nb、V 等微合金元素的析出强化,同时还有贝氏体相变的相变强化及位错强度等,影响 Nb-V 微合金化 C-Si-Mn-Cr-Mo 系贝氏体钢轨强度的因素较多,Si 作为固溶元素对该成分体系强度的贡献较小。而布氏硬度考察材料抵抗外物压入的能力,所以基体组织中相的组成和分布是影响 Nb-V 微合金化 C-Si-Mn-Cr-Mo 系贝氏体钢轨硬度的主要因素,随着 Si 含量的增加,试验钢显微组织中,铁素体、珠光体逐渐减少并消失,马氏体含量在增加,所以硬度呈逐渐上升的趋势。

钢轨对表面质量有一定的要求,如 Si 含量太高钢轨表面容易形成氧化物缺陷,显微组织中容易形成马氏体,马氏体增多可能会增加残余应力或者降低冲击韧性,同时增加了合金元素的总量,不利于焊接性能,所以在 Nb-V 微合金化 C-Si-Mn-Cr-Mo 系贝氏体钢轨的成分设计中,建议 Si 元素含量为 0.8%。

4 工业试制

参考试验钢 2[#]的化学成分在钢厂开展工业试制,轧制的钢轨轨型为 60 kg/m,其生产工艺为:铁水脱硫→150 t 转炉冶炼→150 t LF 精炼→VD 真空脱气→连铸→铸坯缓冷至室温→280 mm × 380 mm 连铸坯加热→高压水除鳞→BD1 轧制→BD2 轧制→CCS 轧制(终轧温度 955 ℃)→空冷→矫直→探伤→质量检查→力学性能检测。其工业试制试验钢的主要化学成分及力学性能如表 3、表 4 所示。

参考文献

- [1] Aglan H A, Liu Z Y, Hassan M F, etc. Mechanical and Fracture Behavior of Bainitic Rail Steel [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 151: 268-274.
- [2] 李文亚, 杨维宇, 金自力. 国内外贝氏体钢轨综述 [J]. 包钢科技, 2013, 39(6): 20-24.
- [3] 杨维宇. 高强韧贝氏体钢轨及其在线热处理工艺: 201710098695.5 [P]. 2017-03-21.
- [4] Hlavaty Ivo, Marián Sigmund, Krejčí Lucie, etc. The Bainitic Steels for Rails Applications [J]. Materials Engineering, 2009, 16(4): 44-50.
- [5] Pavlov V V, Godik L A, Korneva L V, etc. Railroad Rails Made of Bainitic Steel [J]. Metallurgist, 2007, 51(3-4): 209-212.
- [6] Vorozhishchev V I, Pavlov V V, Korneva L V, etc. Production of Bai-

表 3 工业试制试验钢的化学成分/%

Table 3 Chemical composition of experimental steel for industrial trial production/%

C	Si	Mn	Cr	Mo	Nb	V	Alt
0.24	0.83	1.75	1.23	0.33	0.031	0.11	≤0.035

表 4 工业试制试验钢热轧态的力学性能

Table 4 Mechanical properties of hot-rolled experimental steels for industrial trial production

$R_{p0.2}$ /MPa	R_m /MPa	A /%	K_{U2} /J(室温)	HBW 硬度值
1 022	1 370	11.0	70	386

对比表 2 和表 4 可知,和实验室冶炼及轧制的性能相比,工业试制 60 kg/m 的 Nb-V 微合金化 C-Si-Mn-Cr-Mo 系贝氏体钢,其热轧态力学性能中强度、室温冲击吸收功、踏面硬度有所升高,而断后伸长率有所降低。

5 结论

(1) Nb-V 微合金化 C-Si-Mn-Cr-Mo 系贝氏体钢轨中,试验钢 1[#]热轧态显微组织为下贝氏体 + 少量的铁素体和珠光体,试验钢 2[#]热轧显微组织为板条状下贝氏体 + 少量的马氏体,试验钢 3[#]热轧态的显微组织由板条状贝氏体和马氏体组成。

(2) Si 含量 0.38% 的试验钢抗拉强度为 1 280 MPa,屈服强度为 864 MPa,伸长率为 15.0%,冲击吸收功为 64 J, HB 硬度值为 353,硅含量 0.80% 的试验钢的抗拉强度为 1 290 MPa,屈服强度为 875 MPa,伸长率为 15.5%,冲击吸收功为 62 J, HB 硬度值为 374, Si 含量 1.56% 试验钢的抗拉强度为 1 355 MPa,屈服强度为 903 MPa,伸长率为 16.0%,冲击吸收功为 62 J, HB 硬度值为 411。

(3) Si 对 Nb-V 微合金化 C-Si-Mn-Cr-Mo 系贝氏体钢轨的断后伸长率和冲击吸收功影响不大,主要影响强度和硬度,但对硬度的影响要大于对强度的影响,当 Si 含量从 0.38% 提高到 1.56% 时,硬度增加 16.4%,而抗拉强度增加 5.8%,屈服强度增加 4.5%。

- [7] 杨忠民. 一种合金体系及其贝氏体钢轨的热处理方法以及贝氏体钢轨: 201510919742.9 [P]. 2015-12-09.
- [8] 李文亚, 张建军, 杨维宇. 高温均质化对高强贝氏体钢显微组织和力学性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2017, 46(2): 248-250.
- [9] 席光兰, 马勤. 贝氏体钢的研究现状和发展展望 [J]. 材料导报, 2016, 4: 78-81.

任艳茹 (1984-), 女, 硕士, 中级讲师, 2008 年内蒙古工业大学(本科)毕业, 冶金材料和机械专业教学与研究。
E-mail: yanru_r08@126.com

收稿日期: 2020-06-24