

· 组织和性能 ·

锰含量对中碳冷镦钢组织和性能的影响

阮士朋^{1,2,3} 赵爱民¹ 李宝秀^{2,3} 李世琳^{2,3}

(1 北京科技大学冶金工程研究院,北京 100083;2 邢台钢铁有限责任公司技术中心,邢台 054027;

3 河北省线材工程技术研究中心,邢台 054027)

摘要 分析和研究了 0.75% ~ 1.54% Mn 对中碳冷镦钢 Φ16 mm 热轧盘条 (C: 0.45%, 0.22Si, 0.75 ~ 1.54Mn, 0.007 ~ 0.008P, 0.003 ~ 0.004S) 组织和性能的影响。盘条热轧的终轧温度为 880 °C, 缓冷。结果表明, 锰含量由 0.75% 增加到 1.54%, 盘条抗拉强度由 661 MPa 增加到 821 MPa, 增加了 160 MPa; 钢的组织中铁素体比例由 49% ~ 53% 降低到 9% ~ 13%, 珠光体含量显著增加, 且珠光体片层间距由 0.5 μm 降低到 0.25 μm; 淬透性能得到显著提高, 淬透性系数由 3.19 mm 增加到 8.81 mm。

关键词 锰含量 中碳冷镦钢 热轧盘条 组织 力学性能 淬透性

Effect of Manganese Content on Structure and Properties of Medium-Carbon Cold-Heading Steel

Ruan Shipeng^{1,2,3}, Zhao Aimin¹, Li Baoxiu^{2,3} and Li Shilin^{2,3}

(1 Metallurgy Engineering Research Institute, University of Science and Technology, Beijing 100083; 2 Technology Center, Xingtai Iron and Steel Corp Ltd, Xingtai 054027; 3 Hebei Engineering Research Center for Wire Rod, Xingtai 054027)

Abstract The effect of 0.75% ~ 1.54% Mn on structure and properties of Φ16 mm hot-rolled coil of medium-carbon cold-heading steel (C: 0.45%, 0.22Si, 0.75 ~ 1.54Mn, 0.007 ~ 0.008P, 0.003 ~ 0.004S) has been analyzed and studied. The end-rolling temperature of hot-rolling coil is 880 °C, slow-cooling. Results show that with increasing manganese in steel from 0.75% to 1.54%, the tensile strength of coil increases from 661 MPa to 821 MPa, i. e. that increases by 160 MPa; the percentage of ferrite in structure of steel decreases from 49% ~ 53% to 9% ~ 13%, the pearlite content in structure increases obviously and the pearlite lamellar spacing reduces from 0.5 μm to 0.25 μm; and the hardenability of steel improves significantly, that is the hardenability coefficient of steel increases from 3.19 mm to 8.81 mm.

Material Index Manganese Content, Medium-Carbon Cold-Heading Steel, Hot-rolled Coil, Structure, Mechanical Properties, Hardenability

中碳冷镦钢主要用于制造 8.8 级及以上高强度紧固件, 因此要求具有良好的淬透性和冷成型性能。而中碳冷镦钢的淬透性能往往较差或波动大, 大于 M16 的螺栓淬透性能往往不理想^[1], 这在一定程度上限制了中碳冷镦钢在大尺寸紧固件上的应用。合金元素可显著提高钢的淬透性, 因此中碳冷镦钢中往往通过添加一定含量的锰、硼、铬、钼等合金元素来提高钢的淬透性, 扩大其生产紧固件的应用尺寸范围。锰能固溶于 γ-Fe 或 α-Fe 中起到固溶强化效果, 同时还能显著提高钢的淬透性, 细化轧材的珠光体组织, 从而提高钢的强度和硬度。

1 试验材料及方法

试验所用钢坯为邢钢生产的冷镦钢钢坯, 编号分别为 1# (低锰中碳冷镦钢) 和 2# (高锰中碳冷镦钢), 其生产工艺流程为: 转炉-LF 精炼-280 mm × 325 mm 大方坯连铸机, 其化学成分见表 1。

将试验 280 mm × 325 mm 铸坯经过加热及开坯

轧制成横截面为 160 mm × 160 mm 的热轧钢坯, 再将热轧钢坯依次经加热、粗轧、中轧、精轧、控冷等工序轧制成 Φ16 mm 的热轧盘条, 控轧控冷工艺方案按照表 2 进行, 两个成分钢种采取相同的工艺制度。

对轧制后的盘条利用 WDW50 微控电子万能试验机进行力学性能测试, 利用 Leica DM2700M 光学

表 1 试验中碳冷镦钢的化学成分 / %

Table 1 Chemical composition of tested medium-carbon cold-heading steel / %

编号	C	Si	Mn	P	S
1#	0.45	0.22	0.75	0.007	0.004
2#	0.45	0.22	1.54	0.008	0.003

表 2 试验中碳冷镦钢的控轧控冷工艺参数

Table 2 Parameters of control rolling and cooling process for tested medium-carbon cold-heading steel

编号	Mn/ %	开轧温度/ °C	进精轧 温度/°C	吐丝温度/ °C	冷却方式
1#	0.75	1 060	900	880	缓冷
2#	1.54	1 060	900	880	缓冷

显微镜(OM)和扫描电镜(SEM)进行显微组织观察。

末端淬火试样从轧制过程的2#剪上进行截取(2#剪样直径为32 mm),并将样品加工成直径25 mm,长度100 mm且带有凸缘的标准末端淬火试样。按照Jominy法进行末端淬火试验和硬度测试,淬火加热温度为850℃,保温时间30~35 min。

2 试验结果及分析

2.1 不同锰含量中碳冷镦钢力学性能对比

低锰1#钢和高锰2#钢轧制Φ16 mm热轧盘条的力学性能检测结果对比见表3。可见,在相同的轧制工艺条件下,2#钢的抗拉强度明显高于低锰1#钢,平均抗拉强度达到821 MPa,而低锰1#钢的抗拉强度平均值仅有661 MPa;2#钢的平均伸长率和断面收缩率略有降低,但降低不明显。抗拉强度提高不利于后续的冷加工变形,一般需进行球化退火来软化组织。

2.2 不同锰含量中碳冷镦钢显微组织对比

由图1可见,试验钢的显微组织均由铁素体和珠光体组成,但1#钢中铁素体呈块状分布,铁素体比例达49%~53%,明显高于2#钢,2#钢中铁素体呈断续网状,铁素体较薄,铁素体比例为9%~13%。

由图2可见,低锰1#钢热轧盘条的珠光体片层间距较大,平均约为0.5 μm,而高锰2#钢热轧盘条的珠光体片层间距较小,平均约为0.25 μm。

2.3 不同锰含量中碳冷镦钢淬透性能对比

不同锰含量的中碳冷镦钢淬透性对比见图3。淬透性曲线一般可分成3个部分^[2],第1部分为高硬度稳定区,该区由水冷端开始至一定距离,此时曲线很稳定,硬度下降很少;第2部分为过渡区,该区硬度急剧下降,使曲线出现一个比较明显的转折;第3部分为低硬度稳定区,该区硬度下降较少,但硬度值很低。从图3对比可以看出,在第1部分的高硬度稳定区, $J_{1.5}$ 处的硬度值基本一致,这主要是由于

表3 锰含量对试验中碳冷镦钢热轧盘条的力学性能的影响
Table 3 Effect of manganese content on mechanical properties of tested hot-rolled coil of medium-carbon cold-heading steel

编号	Mn/%	抗拉强度/ MPa	伸长率/ %	断面收缩率/ %
1#	0.75	661	23	50
2#	1.54	821	22	49

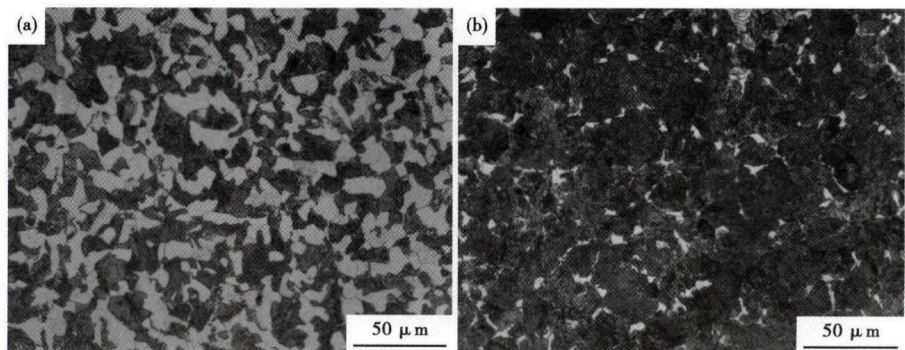


图1 锰含量0.75%,1#(a)和1.54%,2#(b)Φ16 mm中碳冷镦钢热轧盘条的金相组织形貌
Fig.1 Morphology of structure of medium-carbon cold-heading steel Φ16 mm hot-rolled coil with 0.75% Mn, No1 (a) and 1.54% Mn, No2 (b)

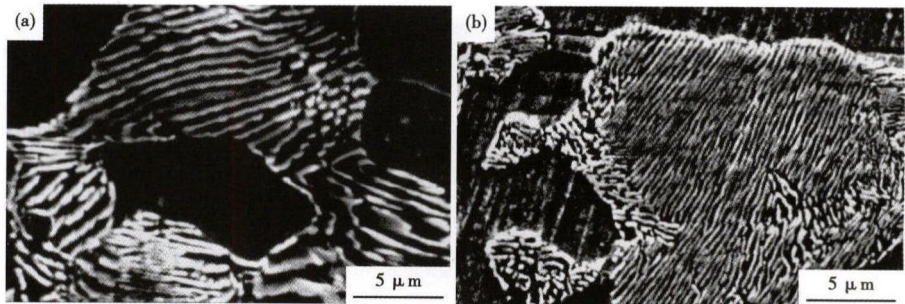


图2 锰含量0.75%,1#(a)和1.54%,2#(b)Φ16 mm中碳冷镦钢热轧盘条的珠光体片层形貌
Fig.2 Morphology of pearlite lamella in medium-carbon cold-heading steel Φ16 mm hot-rolled coil with 0.75% Mn, No1 (a) and 1.54% Mn, No2 (b)

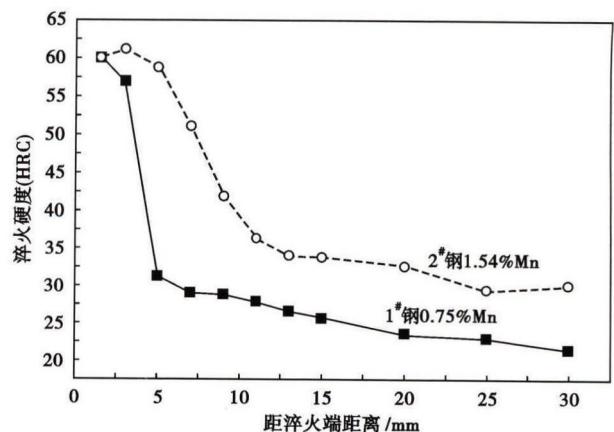


图3 锰含量对试验中碳冷镦钢末端淬火硬度曲线的影响
Fig.3 Effect of manganese content on end quenching hardness curves of tested medium-carbon cold-heading steel

淬火端硬度主要受钢中碳含量的影响,两个试验钢种的碳含量相同,所以检测的淬火端硬度值基本一致,但随着距淬火端距离的增加,1#钢硬度下降较明显,2#钢高硬度区保持距离较长;在第2部分过渡区,1#钢硬度急剧下降,2#钢硬度下降趋势较平缓;在第3部分低硬度稳定区,2#钢硬度明显高于1#钢。综上所述,2#钢淬透性明显优于1#钢。

2.4 结果讨论

不同锰含量中碳冷镢钢对比分析可知,高锰2#钢抗拉强度高于低锰1#钢 160 MPa,这主要是由于锰含量的增加,使2#钢在相同的生产工艺条件下获得了较多比例的细珠光体组织,相对于铁素体来说,珠光体具有更高的强度,且随着珠光体片层间距的减小,强度会进一步增加。锰是奥氏体形成元素,会扩大奥氏体相区,使 A_3 点温度降低,也就是说在高温段抑制了铁素体的析出;同时随着锰含量增加,会使铁碳相图中的共析点左移,即共析转变的碳含量降低,从而促使珠光体含量的增加。

同时锰可使铁碳相图中的 A_1 点温度(共析转变温度)降低,也就是说使珠光体转变温度降低,相当于使珠光体转变的过冷度增加,而珠光体片层间距的大小主要决定于珠光体的形成温度,碳钢中珠光体的片层间距与过冷度的关系可用公式(1)表达^[3]。 $S_0 = C/\Delta T$ (1)

式中: $C = 8.02 \times 10^3$ nm; S_0 -珠光体片层间距/nm; ΔT -过冷度/K。

按公式(1)计算1#钢的过冷度 ΔT 约为 16.04 K,而2#钢的过冷度约为 32.08 K,如果忽略其他因素的影响,认为2#钢过冷度的增加主要是由于锰含量降低了 A_1 点温度的影响,则锰含量由 0.78%增加到 1.54%使中碳冷镢钢的 A_1 点温度降低了约 16.04 K。

评价钢种淬透性的方法除了前面常用的 Jominy 法外,还有临界直径法以及各种方程计算方法等^[4,6]。表4为参照 ASTM255 标准计算1#钢和2#钢的理想临界直径 D_1 ,其中 f_C 、 f_{Si} 、 f_{Mn} 分别为 C、Si、Mn 各合金元素因子,可见1#钢的 D_1 值只有 23.1 mm,而2#钢的 D_1 值达到 59.2 mm,是1#钢的 2.56 倍,明显高于1#钢。

金满^[5,6]通过理论推导提出了计算钢淬透性的一个新的数学模型,并给出了评价钢的淬透性系数 h ,其数值等于淬透性曲线拐点的总距离,其计算方法见公式(2),本试验钢种的 Cr、Ni、Mo、B 元素均为

表 4 锰含量对试验中碳冷镢钢的理想临界直径 D_1 和淬透性系数 h 的影响

Table 4 Effect of manganese content on ideal critical diameter D_1 and hardenability coefficient h of tested medium-carbon cold-heading steel

编号	Mn/ %	C/ %	Si/ %	f_C	f_{Si}	f_{Mn}	D_1 / mm	h / mm
1#	0.75	0.45	0.22	0.225	1.154	3.500	23.1	3.19
2#	1.54	0.45	0.22	0.225	1.154	8.974	59.2	8.81

残余,因此可忽略,则计算的试验钢的 h 值见表4,可见2#钢的 h 值为 8.81,是1#钢的 2.76 倍。

$$h = \{6.9[Mn]^2 + 3.2[Si] + 22.6[Cr]^2 + 23.1[Mo] + (13.0[Cr] + 2.5[Mo] + 9.7)[Ni] + 7.9[B] \times 10^3 + 2.5\} [C] \quad (2)$$

针对下游客户制造直径 30 mm 规格的 10.9 级高强度紧固件需求,向客户推荐了2#钢,经下游客户制作螺栓并进行调质处理后,紧固件的各项性能检测均满足要求。

3 结论

(1) 锰含量由 0.75% 增加到 1.54%,可使中碳冷镢钢热轧盘条的抗拉强度平均增加 160 MPa,对伸长率和断面收缩率影响不明显。

(2) 锰含量由 0.75% 增加到 1.54%,可使中碳冷镢钢热轧盘条中铁素体含量显著降低,珠光体含量明显提高,且使珠光体片层间距得到明显细化。淬透性能明显提高,含 1.54% Mn 钢(2#)的淬透性系数 h 值是 0.75% Mn 钢(1#)的 2.76 倍。

参考文献

- [1] 冯 琴. 五种冷镢钢材料的选材分析[J]. 热处理技术与装备, 2010, 31(1): 26-31.
- [2] 祖荣祥. 硼钢淬透性曲线的特点及分析[J]. 金属热处理, 1985(6): 3-10.
- [3] 崔 崑. 钢的成分、组织与性能(上册)[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 152.
- [4] 余柏海. 计算淬透性及机械性能的非线性方程[J]. 钢铁, 1985, 20(3): 40-49.
- [5] 金 满, 连建设, 江中浩. 描述钢淬透性的一个新数学模型[J]. 金属学报, 2006, 42(3): 265-272.
- [6] 金 满, 连建设, 江中浩. 结构钢端淬曲线预测新方法[J]. 金属学报, 2006, 42(4): 405-410.

阮士朋(1983-),男,博士生,副主任工程师,2006年河北工业大学(本科)毕业,高品质线材产品研发。

E-mail: shipenguan@163.com

收稿日期: 2017-02-08