

## Mn 含量对低碳冷镢钢 SWRCH22A 组织和性能的影响

王冬晨<sup>1,2</sup> 阮士朋<sup>1,2</sup> 董庆<sup>1,2</sup> 李敏锐<sup>1</sup> 张国安<sup>1</sup>

(1 邢台钢铁有限责任公司技术中心, 邢台 054027; 2 河北省线材工程技术创新中心; 邢台 054027)

**摘要** 分析研究了 Mn 含量 0.78% ~ 0.92% 对 0.20% 碳冷镢钢  $\Phi 20$  mm 热轧盘条组织和力学性能的影响。盘条热轧的终轧温度为 880 °C, 缓冷。结果表明, Mn 含量由 0.78% 增加至 0.92% 时, 盘条抗拉强度由 485 MPa 升高至 508 MPa, 增加了 23 MPa, 伸长率由 31% 降至 28%, 下降了 3 个百分点, 断面收缩率由 58% 降 52%, 下降 6 个百分点; HRB 硬度值增加 4.5; 试验钢组织中铁素体晶粒尺寸由 28  $\mu\text{m}$  降低至 18  $\mu\text{m}$ , 珠光体比例由 23% 增加至 26%; 且珠光体片层间距有所减小, 淬透性能提高。

**关键词** Mn 含量 低碳冷镢钢 SWRCH22A 热轧盘条 组织 力学性能

## Effect of Mn Content on Microstructure and Properties of Low-Carbon Cold-Heading Steel SWRCH22A

Wang Dongchen<sup>1,2</sup>, Ruan Shipeng<sup>1,2</sup>, Dong Qing<sup>1,2</sup>, Li Minrui<sup>1</sup> and Zhang Guoan<sup>1</sup>

(1 Technology Center, Xingtai Iron and Steel Corp Ltd, Xingtai 054027;

2 Hebei Province Engineering and Technology Innovation Center for Wire Rod, Xingtai 054027)

**Abstract** Effect of 0.78 ~ 0.92% Mn on structure and mechanical properties of  $\Phi 20$  mm hot-rolled coil of 0.20% carbon cold-heading steel has been analyzed and studied. End-rolling temperature of hot-rolling coil is 880 °C, slow-cooling. Results show that with increasing Mn in steel from 0.78% to 0.92%, the tensile strength of coil increases from 485 MPa to 508 MPa, i. e. that increases by 23 MPa; the elongation decreases from 31% to 28%, i. e. decreases by 3 point of percentage, and the reduction of area decreases from 58% to 52%, i. e. decreases by 6 point of percentage; the HRB hardness value increases by 4.5. The size of ferrite groups in structure of test steel reduces from 28  $\mu\text{m}$  to 18  $\mu\text{m}$ , the pearlite content in structure increases from 23% to 26% and the pearlite lamellar spacing decreases slightly; the hardenability of steel improves.

**Material Index** Mn Content, Low-Carbon Cold-Heading Steel SWRCH22A, Hot-rolled Coil, Structure, Mechanical Properties

低碳冷镢钢具有优良的冷镢性能和拉拔性能, 因其良好的成形性, 被广泛应用于航空、汽车、电器等领域, 主要用于制造各种中、高强度螺栓、螺钉、铆钉、自攻螺钉等紧固件以及各种变形量较大的零部件。在冷镢成型变形量较大的零部件时, 材料对表面微裂纹的敏感性增加, 同时加工硬化导致冷镢时变形抗力增加, 对冷镢成型过程以及冷镢模具的服役寿命不利<sup>[1-2]</sup>。本文研究了低碳冷镢钢 SWRCH22A 盘条中 Mn 含量对低碳冷镢钢盘条组织和力学性能的影响。

### 1 试验材料及方法

试验材料为邢钢生产低碳冷镢钢 SWRCH22A 盘条, 其成分符合 JIS G3507-2005 要求, 组织要求为铁素体 + 珠光体, 性能方面无具体范围要求。试验钢成分及编号如表 1 所示。盘条的生产工艺流程为: 80 t 转炉 → LF → 280 mm × 325 mm 大方坯连铸 → 大方坯加热 → 开坯 (160 mm × 160 mm 热轧坯) →

钢坯加热 → 高压水除鳞 → 控制轧制 → 控制冷却, 成品盘条规格为  $\Phi 20$  mm。控轧控冷工艺方案执行表 2 工艺参数, 试验钢除 Mn 含量不同外, 其它工艺参数均保持一致。

利用 CMT5305 微控电子万能试验机对试验钢盘条进行力学性能测试, 采用 Leica DM2700M 光学显微镜和扫描电镜 (SEM) 进行显微组织观察。按照 GB/T225-2006《钢淬透性的末端淬火试验方法 (Jominy 试验)》要求, 取轧制过程样机加工成直径  $\Phi 25$  mm, 长度 100 mm 且带有凸缘的标准末端淬火试样, 淬火加热温度为 890 °C, 保温时间 30 ~ 35 min。

### 2 试验结果及分析

#### 2.1 Mn 含量对冷镢钢盘条力学性能的影响

热轧盘条的力学性能检测结果见表 3。可见, 在相同的轧制工艺条件下, 2# 试验钢的平均抗拉强度较 1# 试验钢高 23 MPa, 平均伸长率和断面收缩率 2# 试验

表1 试验钢的化学成分/%  
Table 1 Chemical composition of tested steel/%

试验钢	C	Si	Mn	S	P	Al
1#	0.20	0.03	0.78	0.004	0.015	0.04
2#	0.20	0.04	0.92	0.004	0.017	0.05
SWRCH22A JIS G3507	0.18~0.23	≤0.10	0.70~1.00	≤0.10	≤0.10	≥0.02

表2 试验钢的控轧控冷工艺参数

Table 2 Parameters of control rolling and cooling process for tested steel

试验钢	Mn/%	开轧温度/℃	进精轧温度/℃	吐丝温度/℃	冷却方式
1#	0.78	1120	920	880	缓冷
2#	0.92	1120	920	880	缓冷

表3 Mn 含量对低碳冷镢钢 SWRCH22A 热轧盘条力学性能的影响

Table 3 Effect of Mn content on mechanical properties of tested hot-rolled coil of low-carbon cold-heading steel SWRCH22A

试验钢	Mn/%	抗拉强度/MPa	伸长率/%	断面收缩率/%
1#	0.78	485	31	58
2#	0.92	508	28	52

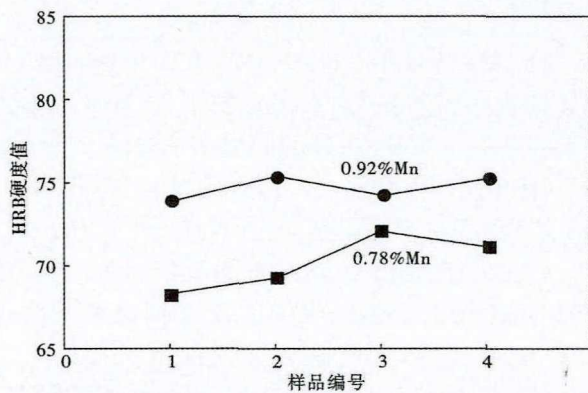


图1 Mn 含量对低碳冷镢钢热轧盘条硬度的影响  
Fig.1 Effect of Mn content on hardness of tested hot-rolled coil of low-carbon cold-heading steel

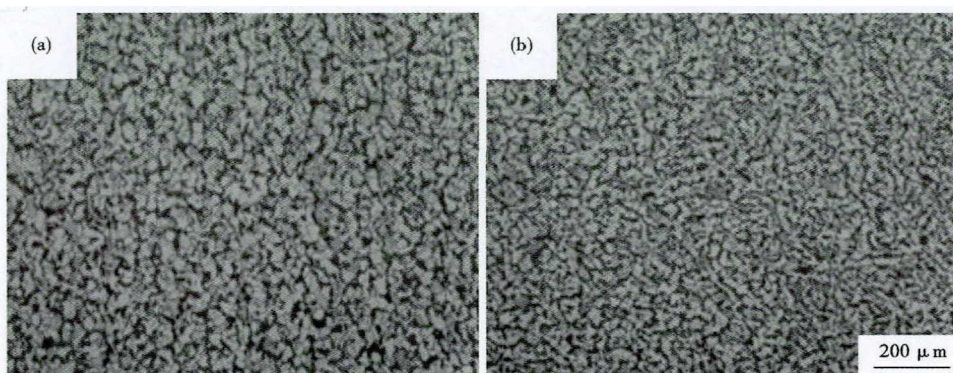


图2 1#, 0.78% Mn (a) 和 2#, 0.92% Mn (b) 低碳冷镢钢热轧盘条金相组织  
Fig.2 Structure of tested hot-rolled coil of low-carbon cold-heading steel with 0.78% Mn, 1# (a) and 0.92% Mn, 2# (b)

钢分别较 1# 试验钢低 3% 和 6%。

## 2.2 Mn 含量对冷镢钢盘条硬度的影响

1# 钢 0.78% Mn 与 2# 钢 0.92% Mn 热轧盘条的硬度对比情况如图 1 所示。可见,在相同的轧制工艺条件下,2# 试验钢的硬度高于 1# 试验钢,随着 Mn 含量由 0.78% 增加至 0.92%, HRB 硬度值平均提高 4.5。

## 2.3 Mn 含量对冷镢钢盘条组织的影响

由图 2 可见,两种试验钢的显微组织均由块状铁素体和珠光体组成。1# 钢盘条组织中珠光体比例约为 23%, 铁素体晶粒平均尺寸约 28 μm; 2# 钢盘条组织中珠光体比例约为 26%, 铁素体晶粒平均尺寸约 18 μm。因此,随着 Mn 含量增加,铁素体晶粒平均尺寸减少约 10 μm, 珠光体比例有所增加。另外,由图 3 低碳钢热轧盘条扫描组织可知,2# 试验钢的珠光体片层间距较 1# 试验钢有所减小。

## 2.4 Mn 含量对冷镢钢淬透性能的影响

从图 4 可以看出,两种试验钢淬透性曲线的高硬度稳定区均不明显, J<sub>1.5</sub> 处两钢种硬度基本一致,这主要与钢中碳含量有关,两试验钢种的碳含量相同,因此淬火端硬度值基本一致;硬度从 J<sub>1.5</sub> 处开始至 J<sub>5.0</sub> 处急剧下降,两钢种下降趋势一致,其中 1# 试验钢下降更为明显;随着距淬火端距离的增加,端淬硬度曲线以 J<sub>5.0</sub> 为转折点开始缓慢下降,但 2# 试验钢硬度值要高于 1# 试验钢。综上可知,2# 试验钢的淬透性优于 1# 试验钢。

## 2.5 结果分析

低碳冷镢钢盘条的强度和硬度值随 Mn 含量的增加而提高,但塑性下降。原因是 Mn 含量的提高使铁碳相图中的共析点左移,即共析转变的碳含量降低,从而促使珠光体的转变量增加,珠光体相对于铁素体具有更高的强度且珠光体片层间距变细,使得低碳钢盘条强度进一步增加<sup>[3]</sup>。此外, Mn 在钢中一部分固溶于铁素体中,另一部分形成含 Mn 合金渗碳体 (Fe, Mn)<sub>3</sub>C, 使基体和碳化物得以强化,从而提高了钢的强度和硬

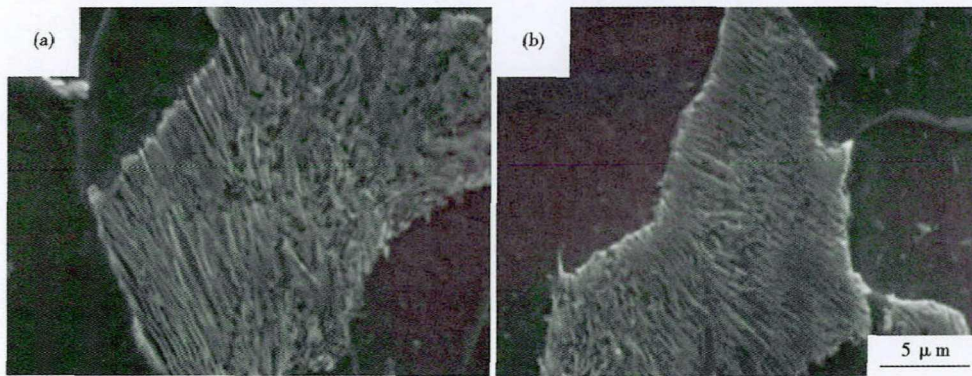


图 3 1<sup>#</sup>, 0.78% Mn (a) 和 2<sup>#</sup>, 0.92% Mn (b) 低碳冷镦钢热轧盘条珠光体形貌, SEM

Fig. 3 Morphology of pearlite in tested hot-rolled coil of low-carbon cold-heading steel with 0.78% Mn 1<sup>#</sup> (a) and 0.92% Mn 2<sup>#</sup> (b), SEM

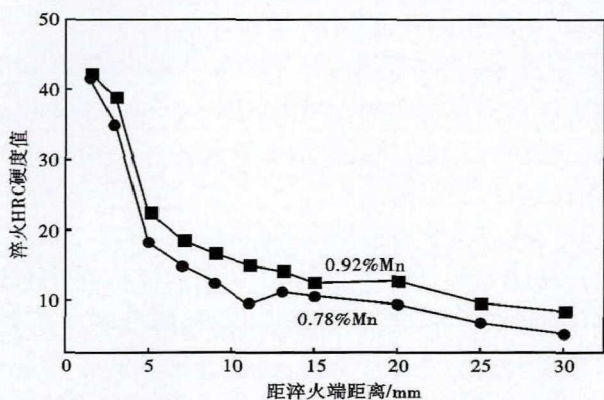


图 4 Mn 含量对低碳冷镦钢末端淬火硬度曲线的影响

Fig. 4 Effect of Mn content on end quenching hardness curves of low-carbon cold-heading steel

度;分布在基体中的合金渗碳体同样有利于材料硬度的提高,但分布在晶界处的合金渗碳体有割裂基体的作用,使得材料的塑性下降<sup>[4]</sup>。

在高速轧制过程中形变和过冷的共同作用下,过冷奥氏体内自由能提高,畸变能增加,形核率大幅度提高,同时 Mn 含量提高有利于奥氏体晶内缺陷密度的增加及高畸变区铁素体的反复高速形核。由于固溶 Mn 含量提高对晶界的“拖曳”作用增强导致铁素体长大速率降低,晶粒长大在时间和空间受到限制,从而使得晶粒细化<sup>[5-6]</sup>。本文采用 Jominy 法对试验钢的淬透性能进行了评价,另外根据金满<sup>[7]</sup>等人理论推导出的计算钢淬透性的数学模型,对淬透性系数  $h$  进行了计算,其计算方法如式(1)所示。

$$h = \{6.9[Mn]^2 + 3.2[Si] + 22.6[Cr]^2 + 23.1[Mo] + (13.0[Cr] + 2.5[Mo] + 9.7)[Ni] + 7.9[B] \times 10^3 + 2.5\}[C] \quad (1)$$

由于试验钢成分中的 Cr、Ni、Mo、B 均为残留元

素,含量可以忽略,根据试验钢的化学成分(表 1)计算得出 1<sup>#</sup> 钢的淬透性系数为 1.36, 2<sup>#</sup> 钢的淬透性系数为 1.69,故 2<sup>#</sup> 试验钢的淬透性能优于 1<sup>#</sup> 试验钢,与 Jominy 法淬透性试验评价结果一致。Mn 能显著降低过冷奥氏体分解速度并使珠光体转变温度 ( $Ar_1$ ) 下降, Mn 在钢中扩散速度远小于 Fe 和 C,使过冷奥氏体发生珠光体转

变的领先相  $(Fe, Mn)_3C$  成核困难,加上开始转变温度 ( $Ar_1$ ) 下降使原子扩散速度减慢及转变孕育期加长,同时钢的 C 曲线向右移动,临界淬火速度显著减小,因而钢的淬透性提高。

### 3 结论

(1) Mn 含量由 0.78% 增加至 0.92%,使得低碳冷镦钢热轧盘条抗拉强度增加了 23 MPa,伸长率下降了约 3 个百分点,断面收缩率下降约 6 个百分点。HRB 硬度值增加 4.5,冷镦成型大型零部件时, Mn 含量应按中下限控制。

(2) Mn 含量由 0.78% 增加至 0.92%,使得低碳冷镦钢热轧盘条组织中的铁素体晶粒尺寸由 28  $\mu m$  细化至 18  $\mu m$ ,珠光体比例由 23% 增加至 26%,珠光体片层间距有所减小,淬透性能提高。

河北省省级科技计划资助(205676134H)

### 参考文献

- [1] 崔 崑. 钢的成分、组织与性能(上册)[M]. 北京:科学出版社, 2013:152.
- [2] 惠卫军,翁宇庆,董 瀚. 高强度紧固件用钢[M]. 北京:冶金工业出版社,2009:13-21.
- [3] 阮士朋,赵爱民,李宝秀,等. 锰含量对中碳冷镦钢组织和性能的影响[J]特殊钢,2017,38(4):46-48.
- [4] 贺年兵,唐建新. 合金元素对低合金耐磨铸钢力学性能的影响[J]. 热加工工艺,2005,34(1):3-7.
- [5] 周荣锋,杨王玥,孙祖庆. 碳锰含量对低碳(锰)钢过冷奥氏体形变过程转变动力学的影响[J]. 金属学报,2004,10(40):1056-1063.
- [6] 周荣锋,杨王玥,孙祖庆. 不同 Mn 含量低碳钢过冷奥氏体形变过程中的铁素体相变[J]. 金属学报,2004,40(1):1-7.
- [7] 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.

王冬晨(1990-),男,硕士,(2017 年钢铁研究总院),工程师,2014 年北华航天工业学院(本科)毕业,高品质线材产品研发及应用研究。E-mail:708979025@qq.com

收稿日期:2021-02-03