

卷取后冷却工艺对 700 MPa 微合金钢带材组织和性能的影响

董方¹ 武利平¹ 宿成² 闫瑞军¹ 沈国慧³ 刘月¹

(1 内蒙古科技大学材料与冶金学院, 包头 014010; 2 包钢(集团)公司研发销售部, 包头 014010;
3 北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083)

摘要 700 MPa 微合金钢(‰: 0.05C, 0.18Si, 1.80Mn, 0.010P, 0.003S, 0.15Mo, 0.10Ti, 0.75Nb, 0.035V, 0.030Al, 0.0020Ca)的冶炼工艺为 240 t BOF-LF-2150 mm 板坯连铸。通过利用金相显微镜、扫描电镜、能谱仪和拉力试验机试验了 700 MPa 级微合金高强度钢轧后, 10 mm 钢带从 600 °C 卷取时直接取样经 3.7 h 冷却至室温(25 °C)的空冷工艺, 和钢带 600 °C 卷取后并堆放在一起经 36.2 h 缓慢冷却到室温(25 °C)的缓冷工艺的组织性能。结果得出缓冷工艺下, 钢带的贝氏体较少, 屈服强度高(732 ~ 740 MPa)、抗拉强度低(793 ~ 799 MPa)、伸长率大(21.0% ~ 23.0%); 空冷工艺下, 钢带的贝氏体较多, 屈服强度低(647 ~ 654 MPa)、抗拉强度高(811 ~ 831 MPa)、伸长率较小(15.0% ~ 17.0%)。综合分析, 采用缓冷工艺钢带的力学性能要优于空冷钢带的力学性能。

关键词 Ti-Nb-V 微合金高强度钢 钢带 卷取 空冷工艺 缓冷工艺 组织 力学性能

Effect of Cooling Process after Coiling on Structure and Properties of 700 MPa Microalloying Steel Strip

Dong Fang¹, Wu Liping¹, Su Cheng², Yan Ruijun¹, Shen Guohui³ and Liu Yue¹

(1 School of Materials and Metallurgy, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010;
2 Research and Sales Department, Baotou Iron and Steel Group Co, Baotou 014010;
3 School of Metallurgy and Ecological Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083)

Abstract The steelmaking process of 700 MPa microalloying steel (‰: 0.05C, 0.18Si, 1.80Mn, 0.010P, 0.003S, 0.15Mo, 0.10Ti, 0.75Nb, 0.035V, 0.030Al, 0.0020Ca) is 240 t BOF-LF-2150 mm slab casting. The structure and mechanical properties of hot-rolled 10 mm strip of 700 MPa microalloying high strength steel air-cooling process-coiling at 600 °C and direct sampling air-cooling for 3.7 h to ambient (25 °C) and slow-cooling process-coiling at 600 °C and coils stacked slow-cooling for 36.2 h to ambient (25 °C) are observed and tested by using optical microscope, scanning electron microscope, energy spectrometer and tensile tester. Results are obtained that with slow-cooling process the amount of bainite in steel strip is relatively less, the steel strip has higher yield strength (732 ~ 740 MPa), lower tensile strength (793 ~ 799 MPa) and larger elongation (21.0% ~ 23.0%); and with air-cooling process the amount of bainite in steel strip is rather more, the steel strip has lower yield strength (647 ~ 654 MPa), higher tensile strength (811 ~ 831 MPa) and rather lower elongation (15.0% ~ 17.0%). Comprehensive consideration, the mechanical properties of steel strip with slow-cooling process are better than that with air-cooling process.

Material Index Ti-Nb-V Microalloying High Strength Steel, Strip, Coiling, Air-Cooling Process, Slow-Cooling Process, Structure, Mechanical Properties

目前, 汽车起重机、混凝土泵车、自卸车、集装箱等领域广泛应用的 700 MPa 级微合金高强度钢板需大量的进口, 国内对 700 MPa 级及以上级别的钢带开发技术尚不成熟。在 700 MPa 级及以上级别的钢带研发领域里, 追求材料高强度和优良使用性能的同时降低成本与自身质量, 从而实现材料的轻量化, 达到安全、节能和环保的目的^[1-2]; 此外在结构钢领域里, 增加用料的强度, 减轻构件的自重, 代表了结构钢的发展方向^[3]。微合金高强度钢是在碳素钢和普通低合金高强度钢的基础上迅速发展起来的工程结构用钢, 采用添加铌、钒、钛等微合金提高钢的强度^[4-5], 这样既减轻机械设备自重, 又节省了燃料, 提升机械设备的工作效率。在微合金高强度钢的发展与生产进程中, 在保证

产品创新与升级的前提下, 对材料强度等级提出较高的要求。

本文通过自行设计冶炼的微合金高强度钢, 分析冷却工艺对钢带屈服强度、抗拉强度及伸长率的影响。分别取钢带在两种不同冷却工艺下的试样: 钢带在轧后冷却到 600 °C 时, 卷取后直接取样在空气中自然冷却到室温的钢样, 即空冷试样; 钢带以 600 °C 卷取以后, 堆放在封闭的成品库进行缓慢冷却至室温切取钢样, 即缓冷试样, 进行力学试验研究。通过金相显微镜、扫描电镜对空冷与缓冷试样组织形貌观察, 并分析比较二者拉伸试验断口形貌特征, 研究了冷却工艺对钢带强度及伸长率的影响规律。

1 试验材料及方法

1.1 试验钢制备

采用 240 t 顶底复吹转炉炼钢, 钢水元素成分 (%) 控制在 $C < 0.055$, $0.07 \sim 0.14$ Si, $1.40 \sim 1.60$ Mn, $P < 0.010$, $S < 0.010$, $Al \geq 0.040$; 转炉终点一次命中或补吹次数不超过一次, 出钢温度 ≥ 1620 °C。

LF 精炼过程加入硅铁、锰铁、铌铁、钒铁等合金调整到目标成分; RH 真空处理结束后, 调整氩气流量使钢水处于软吹状态, 喂入 Si-Ca 线进行钙处理, 喂丝后钢水 [Ca] 为 0.001% ~ 0.003%, 喂丝后保证软吹时间 ≥ 15 min。

连铸保证钢种液相线温度为 1521 °C, 第 1 包中间包钢水过热度 25 ~ 40 °C, 其它炉次钢水过热度 15 ~ 30 °C; 铸机采用恒拉速控制, 根据实际生产情况可采取降速或关流, 尽可能使铸机拉速控制在 1.0 ~ 1.5 m/min, 坯料尺寸 (mm) 为 230 (厚) × 1500 (宽) × 1100 (长)。

粗轧机轧制温度设定为 980 ~ 900 °C, 精轧机轧制温度为 850 ~ 800 °C, 轧后产品厚度为 10 mm, 当温度达到 600 °C 时, 并以 4 m/s 的速度进行卷取, 每卷钢带的重量平均为 28.9 t。

采用的空冷工艺, 即卷取后直接取 (mm) 100 × 100 × 10 钢板在空气中自然冷却到室温 (25 °C), 该试验钢平均冷却到室温需 3.7 h, 再切取所需试验钢样; 缓冷工艺, 即钢带以 600 °C 卷取以后, 堆放在封闭的成品库进行缓慢冷却至室温 (25 °C), 试验钢平均冷却到室温需 36.2 h, 再切取所需钢样。

本试验的钢样取自同成分、同轧制批次、不同冷却工艺的 700 MPa 级微合金高强度钢中部位, 试样厚度均为 10 mm, 轧制态为热轧状态, 化学成分见

表 1 试验钢的化学成分 / %

Table 1 Chemical composition of tested steel / %

C	Si	Mn	P	S	Al	Ti	Nb	V	Mo	Ca
0.05	0.18	1.80	0.010	0.003	0.030	0.10	0.075	0.035	0.15	0.002

表 1。

1.2 试样的制备与方法

(1) 采用电火花钨丝切割机, 切取试样大小为 (mm) 10 × 10 × 10, 将切割完成的试样经过磨样、抛光、腐蚀 3 道工序后, 满足试验所进行组织形貌观察。分别通过光学金相、扫描电镜、能量散射谱仪、力学性能试验测试进行分析研究。

(2) 本试验根据 GB/T228-2002 对试验钢板的拉伸试样进行加工, 采用电子万能拉伸试验机进行拉伸试验, 通过电脑出图获得材料的屈服强度、抗拉强度, 利用扫描电子显微镜观察拉伸断口形貌。

2 试验结果

2.1 显微组织

缓冷与空冷试验用钢的显微组织如图 1(a, b) 所示。可以看出, 通过蔡司 (ZEISS) 金相显微镜 (OM) 把试样组织放大 500 倍进行显微组织观察, 图 1(a) 缓冷试验钢的显微组织类型为多边形铁素体 + 贝氏体 (少); 图 1(b) 空冷试验钢的显微组织类型为多边形铁素体 + 贝氏体 (多)。所以缓冷试验钢的屈服强度和伸长率明显高于空冷试验钢的, 而空冷试验钢和缓冷试验钢的抗拉强度相差不大。

为了进一步确定缓冷取样与空冷取样金相组织的类型, 通过扫描电镜 (SEM) 观察其金相组织结构分别见图 1(c) 和图 1(d)。可以看出, 颜色为黑色的组织即为铁素体组织, 颜色为银白色的为贝氏体组织, 从图 1(c, d) 中明显看出, 空冷组织 (d) 中贝

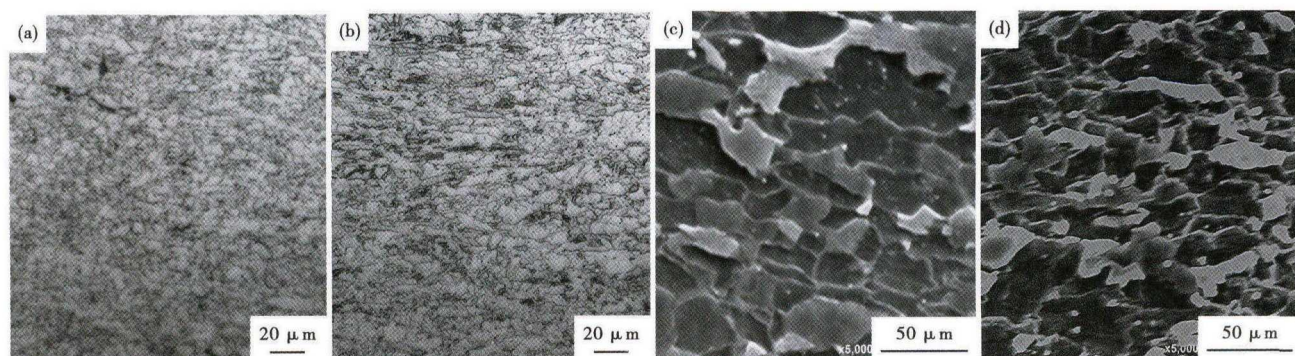


图 1 缓冷 (a)(c) 与空冷 (b)(d) 试验钢带的组织形貌: (a)(b) 光学; (c)(d) 扫描电镜

Fig. 1 Morphology of structure of tested steel strip with slow-cooling process (a) and (c), and with air-cooling process (b) and (d); (a) and (b) optical; (c) and (d) SEM

氏体所占比例多于缓冷组织(c)的,但第二相析出物也明显少于缓冷组织的。

2.2 缓冷与空冷的力学性能

取相同成分3炉次试验钢,缓冷试样与空冷试样的力学性能见表2所示,但缓冷试样与空冷试样的强度和伸长率有显著差异,其特征为:缓冷试样屈服强度高、抗拉强度低、伸长率大;空冷试样屈服强度低、抗拉强度高、伸长率小。

由图2(a)可看出,缓冷试样断口形貌由韧窝组成,断裂形式为韧性断裂,韧窝越多,说明试验钢的塑性变形越大;由图2(b)可看出,空冷试样断口形貌由韧窝+解理面组成,断裂形式为韧性与脆性混合断裂形式,断裂面沿解理面方向分离,裂纹扩大非常迅速。

2.3 第二相析出物

缓冷与空冷组织析出物基本都为(Ti, Nb)C,但空冷与缓冷组织的铁素体基体上析出(Ti, Nb)C第

二相粒子的数量有显著的差异,已从图1(c, d)看出,缓冷的析出物明显多于空冷的。在图3中,图3(a)和图3(b)分别是通过能谱仪(EDS)测量缓冷、空冷析出物的化学成分,可以确定析出物的成分为合金元素Ti和Nb。有研究指出,微合金高强钢中的析出物在轧制过程中或轧后有效抑制再结晶的晶粒长大^[6]。此外,在微合金钢中,当Ti≥0.05%时,

表2 缓冷(a)与空冷(b)钢带的力学性能,纵向
Table 2 Mechanical properties of steel strip with slow-cooling process (a) and air-cooling process (b), longitudinal direction

试验编号	取样状态	R _{0.2} /MPa	R _m /MPa	A/%
1(a)	缓冷	734	794	21.5
1(b)	空冷	647	811	16.0
2(a)	缓冷	732	793	21.0
2(b)	空冷	650	831	15.0
3(a)	缓冷	740	799	23.0
3(b)	空冷	654	828	17.0

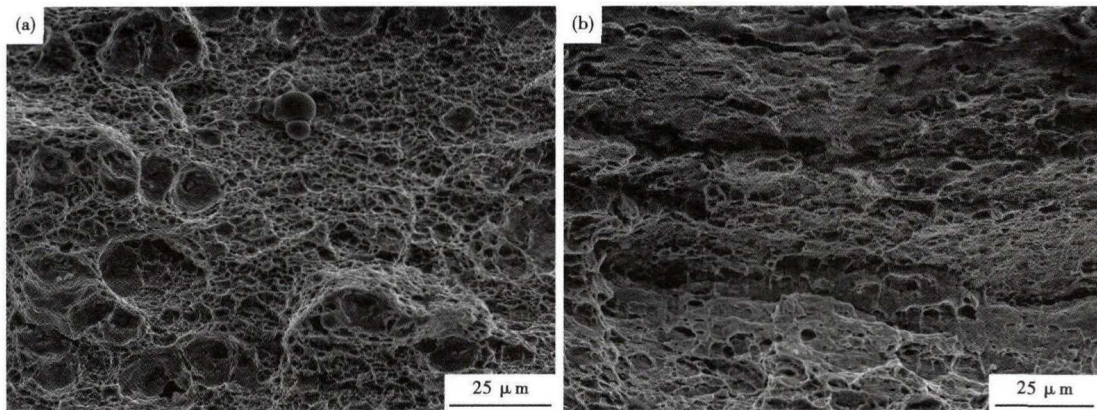


图2 缓冷(a)和空冷(b)试验钢带断口形貌,SEM

Fig.2 Morphology of fracture of tested steel strip with slow-cooling process (a) and with air-cooling process (b), SEM

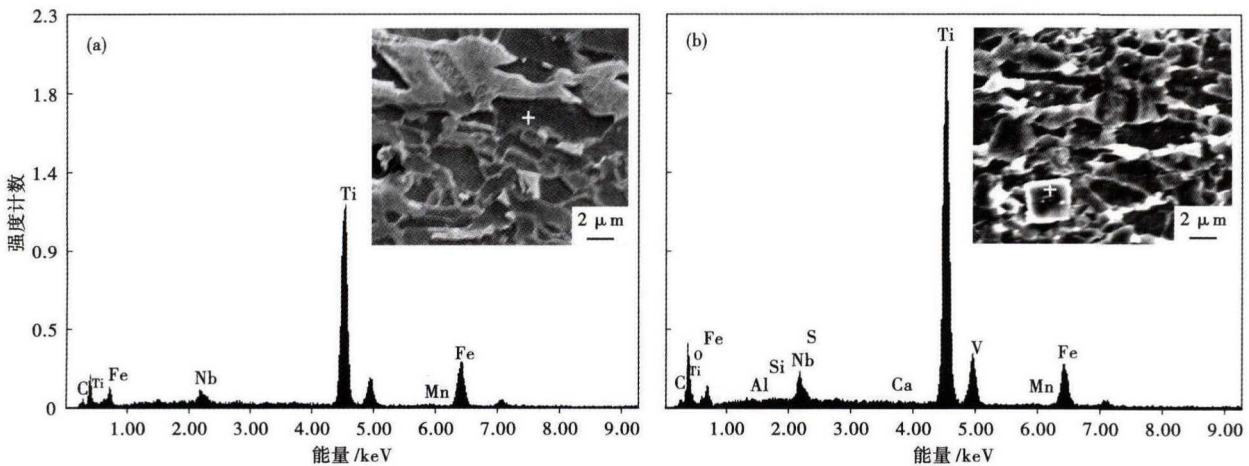


图3 缓冷(a)与空冷(b)试验钢带组织的析出物

Fig.3 Structure and precipitates in tested steel strip with slow-cooling process (a) and with air-cooling process (b)

在铁素体基体内出现大量的细小沉淀粒子,体现出较强的沉淀强化效果^[7]。

3 结果分析与讨论

研究表明,屈服强度和抗拉强度随着卷取温度的降低而升高^[8]。本试验钢设定冶炼的卷取温度为 600 ℃,介于后期研究分析钢样的空冷组织的贝氏体颗粒远远多于缓冷组织的含量,又因为贝氏体组织的形成的温度范围在 600 ℃ ~ Ms,又可以认为卷取温度快速降低到贝氏体的形成范围之间会有利于提高试验钢的抗拉强度。卷取温度设定好了,会得到最佳析出强化效果,当卷取温度高时,导致析出物长大过快使析出强化减弱;反之,卷取温度过低时,析出的第二相颗粒滞留在铁素体基体中,即欠时效状态^[9]。

另外,根据 Fe-C 合金相图可知,碳含量一定时,钢带从轧制到卷取成型,温度在降低,其内部组织由奥氏体到铁素体再到贝氏体变化。当在空冷条件下取样,温度降低较快,贝氏体的温度转变区时间较长,使形成的贝氏体相对较多;相反,钢带在缓冷过程中,温度降低较慢,钢带自发发生自回火过程,转变成较多铁素体组织,贝氏体的温度转变区时间相对较短,从而形成较少的贝氏体组织。

根据试验结果及分析可知,钢带冷却形成的铁素体组织多时,材料的屈服强度和塑性好;钢板冷却形成的贝氏体组织多时,材料的抗拉强度高。

4 结论

(1)空冷钢带贝氏体组织多于缓冷钢带,缓冷钢带铁素体组织多于空冷钢带,使缓冷钢带的屈服强度和伸长率高于空冷钢带。依次为缓冷试验钢的 $R_{0.2}$ 在 730 ~ 740 MPa、 R_m 在 790 ~ 800 MPa、 A 在 21% ~ 23%;空冷试验钢的 $R_{0.2}$ 在 630 ~ 670 MPa、 R_m 在 810 ~ 830 MPa、 A 在 15% ~ 17%。

(2)700 MPa 微合金钢带最佳冷却工艺为 600 ℃ 以上卷取后,封闭堆放缓冷 36.2 h 到室温 (25 ℃)。

(3)铁素体基体中析出的第二相粒子 (Ti, Nb) C 越多,沉淀强化作用越明显,屈服强度越高。

(4)卷取温度 ≤ 600 ℃ 时,钢带处于欠时效状态,若要提高微合金钢的屈服强度,改善钢的塑性,可设定较低的卷取温度,利于提高钢带的力学性能。

(5)钢带中铁素体组织多,会提高钢带的屈服强度和塑性指标;钢带中的贝氏体组织多,则会提高钢带的抗拉强度。

参考文献

- [1] 康永林,孙建林. 高强度薄钢板研究的新进展及其在汽车上的应用[J]. 钢铁,2002,37(5):65-67.
- [2] 徐祖耀. 我国应尽早发展高强度钢[A]. 中国工程院化工、冶金与材料工程学部第六届学术会议特邀报告会议论文集,北京:化学工业出版社,2007;403-404.
- [3] 潘辉,王昭东,李飞,等. 700 MPa 级高强工程机械用钢产品设计和生产实践[J]. 中国冶金,2014,24(10):1-5.
- [4] 康小兵. 微合金元素铌、钛对低碳微合金钢组织-性能影响的研究[D]. 鞍山:辽宁科技大学硕士学位论文,2005.
- [5] 唐一凡. 采用国际标准推动微合金钢的发展[J]. 宽厚板,1997,3(3):5-11.
- [6] Li Y, Wilson J A, Crowther D N, et al. The Effects of Vanadium, Niobium, Titanium and Zirconium on the Microstructure and Mechanical Properties of Thin Slab Cast Steels[J]. ISIJ International. 2004, 44(6):1093-1102.
- [7] 柏明卓. CSP 工艺生产低碳钢中细小析出相的研究[D]. 北京:北京科技大学,2005.
- [8] 康永林,傅杰,柳得棹,等. 薄板坯连铸连轧钢的组织性能控制[M]. 北京:冶金工业出版社,2006,87-88.
- [9] 白晓虹,刘东升. 屈服强度 700MPa 级冷成型用热轧带钢的开发[J]. 钢铁,2013,48(7):79-80.

董方(1964-),男,硕士(1995年北京科技大学),教授,1987年东北大学(本科)毕业,钢铁冶金新工艺技术研究。
E-mail:dongfang9407@163.com

收稿日期:2017-04-06