

600 MPa 级 Nb-Ti 微合金高强度钢的开发

殷 胜 万兰凤

(上海梅山钢铁股份有限公司技术中心,南京 210039)

摘 要 开发的 Nb-Ti 微合金高强钢 (/% : 0.04C, 0.34Si, 1.40Mn, 0.010P, 0.004S, 0.098Nb, 0.020Ti, 0.045Al, 0.0025N) 由真空感应炉冶炼, 50 kg 钢锭 40 mm 锻造板坯经试验室单架轧机于 1 200 °C 7 道次轧制成 10 mm 板, 末道次压缩比 ≥ 15%, 终轧温度 880 °C, 喷水冷却至 600 °C, 置于热处理炉 600 °C 30 min, 炉冷至室温, 分别模拟层流冷却和卷取工艺。该钢经 Gleeble 3500 热模拟机试验得出, 高温低塑性区为 650 ~ 800 °C 和 ≥ 1 300 °C。力学性能试验结果为下屈服强度 R_{d1} 625 ~ 640 MPa, 抗拉强度 R_m 705 ~ 710 MPa, 伸长率 18.0% ~ 19.5%。所开发的钢具有碳当量低, 焊接性能好, 成本低等特点。

关键词 600 MPa 级高强度钢 Nb-Ti 微合金化 开发

Development of 600 MPa Nb-Ti Microalloying High Strength Steel

Yin Sheng and Wan Lanfeng

(R&D Center, Shanghai Meishan Iron and Steel Co Ltd, Nanjing 210039)

Abstract Developed Nb-Ti microalloying high strength steel (/% : 0.04C, 0.34Si, 1.40Mn, 0.010P, 0.004S, 0.098Nb, 0.020Ti, 0.045Al, 0.0025N) is melted by a vacuum induction furnace with casting 50kg ingot, forged to 40 mm plate, and rolled at 1 200 °C to 10 mm plate by lab single strand mill with 7 pass, finishing pass reduction ratio ≥ 15%, finishing temperature 880 °C, splashing water cooling to 600 °C, and in furnace at 600 °C for 30 min, furnace cooling to ambient temperature to simulate the laminar flow cooling and coil process. With test by Gleeble 3500 thermal simulation machine, the low plasticity zones of steel at high temperature are 650 ~ 800 °C and ≥ 1 300 °C. Mechanical properties examination results are lower yield strength R_{d1} 625 ~ 640 MPa, tensile strength R_m 705 ~ 710 MPa, and elongation 18.0% ~ 19.5%. The developed steel has the characteristics such as low carbon equivalent, nice weldability, and low cost.

Material Index 600 MPa High Strength Steel, Nb-Ti Microalloying, Development

根据 TMCP (Thermo Mechanical Control Process-热机械控制轧制工艺) 理论, 高强度、高韧性钢要求很高的精轧累积压下率才能进行生产, 否则只有通过合金添加来改变钢的相变特性开发, 但合金的添加会造成钢成本增加。

梅钢 1422 热轧产线属于国外二手设备, 虽然经过多次改造, 但产线精轧机架轧制能力始终偏低, 开发高强钢受限。如果能找到一种精轧负荷不高、成本较低的产品设计, 可使梅钢批量生产高强度钢。

1 研究方案及材料准备

根据梅钢 1422 轧机精轧末机架轧制能力偏低的特点, 需要设计一种“可以在高温终轧产品”, 才能在梅钢 1422 产线实现低轧制负荷生产高强钢的目的。根据 TMCP 理论, 要实现高温终轧, 必须把产品的再结晶温度提高, 只有这样才能满足高强度、高韧性钢生产“在非再结晶区较大的精轧累积压下率”的要求; 而根据合金元素对钢铁产品的再结晶温度的影响规律, Nb 元素成为本次设计的首选。

实验用材料是 5 t 真空感应炉冶炼, 浇注成 50 kg

表 1 Nb-Ti 微合金化高强度钢的成分 /%

Table 1 Chemical composition of test Nb-Ti microalloying high strength steel /%

C	Si	Mn	P	S	Nb	Ti	Al	N
0.04	0.34	1.40	0.010	0.004	0.098	0.020	0.045	0.0025

钢锭, 成分如表 1, 其主要特点是在普通碳锰钢的基础上添加了 Nb, 另外加入微量 Ti, Ti 的加入主要考虑此类产品的焊接性能要求。钢锭经过锻造成 (mm) 40 × 150 × 150 的小板坯; 取小板坯制成热模拟试样, 然后通过热模拟试验研究材料学特性, 确定热轧工艺参数; 随后通过宝钢中试平台的实验轧机将锻件轧成 (mm) 10 × 400 × 100 板料; 最后通过力学性能测试、验证获得试验结果, 最终形成低成本、低轧制负荷的 600 MPa 级产品的一贯制工艺。

2 热模拟试验结果及讨论

2.1 静态相变点及 CCT 曲线

实验设备为热模拟试验机 Gleeble 3500, 试样尺寸 Φ8 mm × 15 mm。静态相变点方案: 利用膨胀法测定试样以 10 °C/s 的速率加热到 1 200 °C, 保温

180 s, 然后以 10 °C/s 冷却到室温, 测定冷却过程
的相变点; 静态 CCT 试验方案: 试样尺寸 $\Phi 8 \text{ mm} \times 76 \text{ mm}$, 试样以 10 °C/s 的速率加热到 1 200 °C, 保温 180 s, 然后以 0.5 ~ 50 °C/s 的速率冷却到室温。取热模拟
试验金相样, 腐蚀剂为 4% 的硝酸酒精, 检测设备为
金相显微镜(Axiophot2)。

由图 1 可知, 在 10 °C/s 冷却速度下, Nb-Ti 微合
合金化钢的 A_{r3} 点为 700 °C^[1], A_{r1} 点为 580 °C。Nb-
Ti 微合金化钢相变特性如图 2 所示的: 其贝氏体转
变曲线强烈左移, 冷却速度大于 5 °C/s 就出现贝氏
体。出现此类相变特性, 只有在普通碳锰钢中添加
Mo 才能出现; 而本设计中应该是高 Nb 成分加入而
造成的^[2]。高的 Nb 合金加入, 加上较低的碳含量,
Nb 在钢中的固溶度很高, 又因 Nb 强烈的溶质“拖
拽”作用, 改变了钢的 CCT 曲线。此作用类似于
Mo, 而 Nb 和 Mo 合金相比成本具有优势。

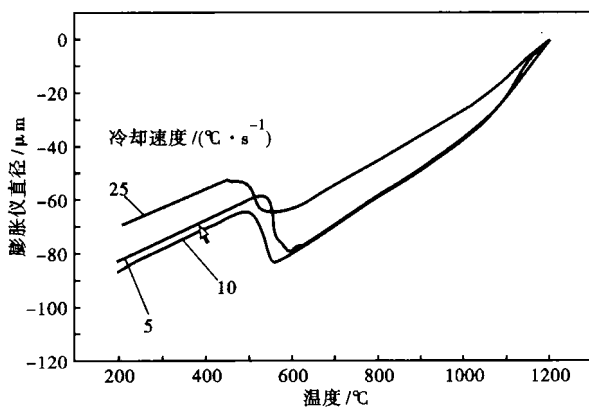


图 1 Nb-Ti 微合金化高强度钢的静态相变点
Fig.1 Statistic phase transformation point of developed Nb-Ti
microalloying high strength steel

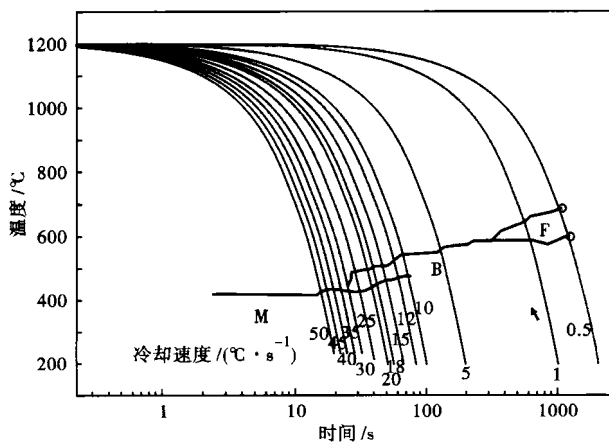


图 2 Nb-Ti 微合金化高强度钢连续冷却转变 (CCT) 曲线
Fig.2 Continuous cooling transformation (CCT) curves of devel-
oped Nb-Ti microalloying high strength steel

2.2 再结晶特性研究

用热模拟试验机 Gleeble 3500, 采用 Double-Hit
方法, 进行双道次压缩试验(图 3)。

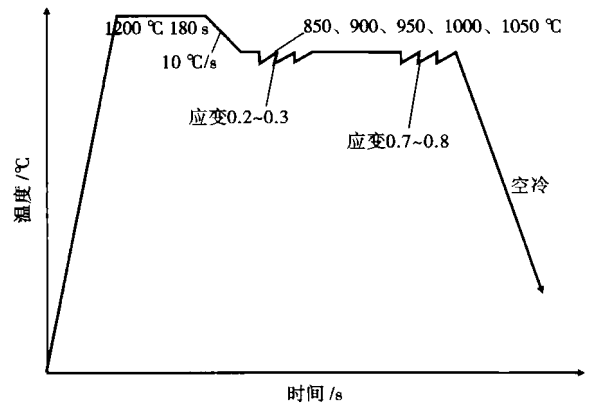


图 3 Nb-Ti 微合金化高强度钢双道次压缩试验方案
Fig.3 Schedule of double pass compression test for Nb-Ti mi-
croalloying high strength steel

Nb-Ti 微合金化钢不同的变形温度下静态软化
率与保温时间的关系曲线如图 4 所示。当变形温度
在 900 °C 以下时, 软化率曲线出现了平台, 静态再结
晶受到抑制, 这主要是因为应变诱导析出行为抑制了
再结晶的发生。

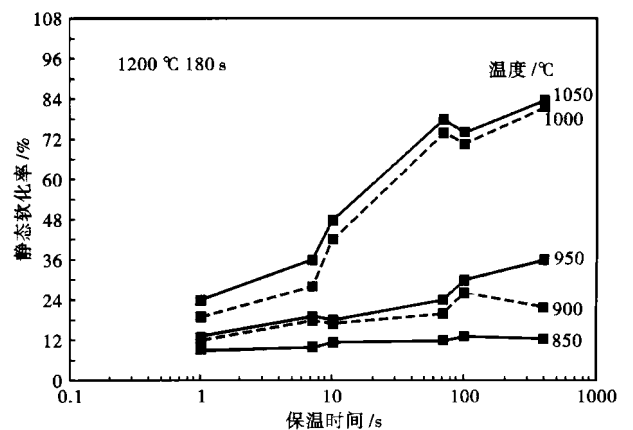


图 4 Nb-Ti 微合金化高强度钢的静态软化图
Fig.4 Statistic softening diagram of developed Nb-Ti microal-
loying high strength steel

根据相变和再结晶特性, 结合梅钢 1422 轧机精
轧末道次轧制能力, 设计 Nb-Ti 微合金化钢的精轧
出口温度(880 ± 20) °C, 卷取温度(600 ± 20) °C。

2.3 高温塑性和高温变形抗力

实验设备为 Gleeble 3500, 试样尺寸为 $\Phi 10 \text{ mm}$
 $\times 120 \text{ mm}$, 采用高温拉伸试验, 在 650 ~ 1 350 °C 的
温度区间内每隔 50 °C 进行一次测试, 测定拉断后试

样的断面收缩率,绘制温度与断面收缩率的关系曲线,获得 Nb-Ti 微合金化钢的高温塑性^[3]。

将试样加热到1 200 ℃,保温 180 s,然后降温至 880 ℃,利用单道次压缩试验获得 Nb-Ti 微合金化钢的变形抗力,并与梅钢成熟产品 B590L(成分:0.06C、0.1Si、1.6Mn、0.05V、0.035Ti、0.03Al)的末道次变形抗力进行对比。

由图 5 可见,与普碳钢(PT-成分:0.09C、0.2Si、1.3Mn、0.035Al)相比,Nb-Ti 微合金化钢存在两个塑性低谷,即 650~800 ℃和 1 300 ℃以上,且 Nb-Ti 微合金化钢低温塑性低于普碳钢,故 Nb-Ti 微合金化钢连铸过程中应对二冷水和轻压下进行优化,提高产品连铸质量,才能最终保证成品的质量要求。

由图 6 可见,Nb-Ti 微合金化钢变形抗力的真应变在 0~0.2 时,Nb-Ti 微合金化钢的变形抗力

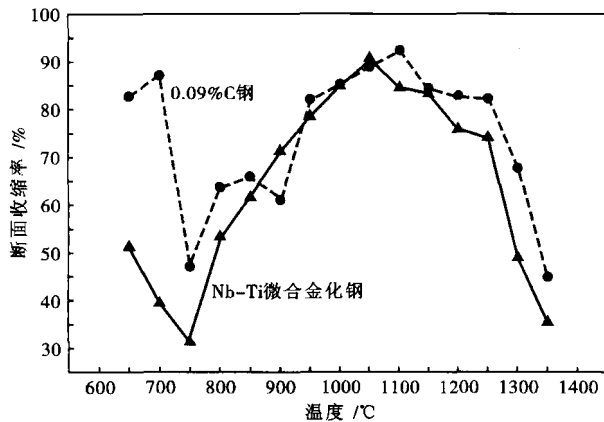


图 5 Nb-Ti 微合金化高强度钢与 0.09% C 普通碳素钢的高温塑性对比

Fig. 5 Comparison of reduction of area at high temperature between developed Nb-Ti microalloying high strength steel and 0.09% C common carbon steel

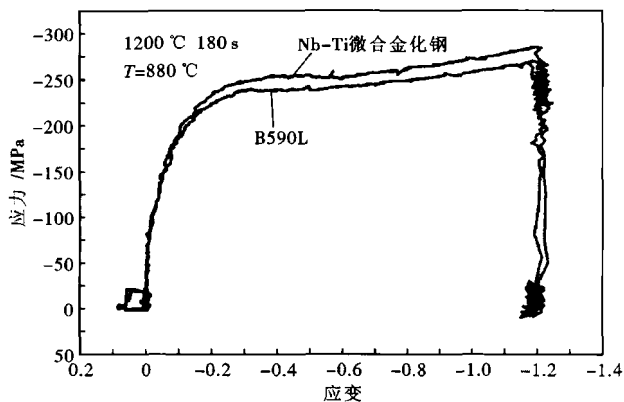


图 6 Nb-Ti 微合金化高强度钢与 B590L 钢的高温应力-应变曲线

Fig. 6 Plasticity deformation resistance of developed Nb-Ti microalloying high strength steel and B590L steel

与 B590L 基本一致;Nb-Ti 微合金化钢的变形抗力在真应变大于 0.2 时,变形抗力略大于梅钢成熟 B590L(屈服强度为 500 MPa 的高强汽车大梁用钢),但两者相差不大;因此,Nb-Ti 微合金化钢对于梅钢 1422 轧机精轧末道次轧制力不存在问题。

3 中试试验及结果

中试设备为宝钢中试平台试验单机架轧机,将经过锻造后的板坯(50 kg)通过热处理炉加热到 1 200 ℃,保温 40 min,随后上轧机进行 7 道次轧制,控制末道次压缩比大于 15% 和末道次出口温度为 880 ℃,模拟精轧过程;然后喷水冷却到 600 ℃,随后将轧制完成的板料放置到热处理炉内保温 30 min 后随炉冷却到室温,分别模拟层流冷却和卷取过程。

将试样加工成 GB/T228 中的 P9 试样,使用 Instron5580 进行拉伸试验,结果如表 2。

表 2 Nb-Ti 微合金高强度钢 10 mm 板的力学性能
Table 2 Mechanical properties of Nb-Ti microalloying high strength steel 10 mm plate

试样编号	下屈服强度 R_{eL} / MPa	抗拉强度 R_m / MPa	断后伸长率 A / %
1	625	705	19.5
2	635	705	19.5
3	640	710	18.0

4 结论

(1)开发的 Nb-Ti 微合金化钢因加入高 Nb 成分,CCT 曲线强烈左移,相当于 Mo 的作用。

(2)该钢在冷却速度大于 5 ℃/s 就会出现细铁素体和贝氏体。

(3)开发的 Nb-Ti 微合金化钢碳当量低,焊接性能好,不含 Mo,合金成本低、轧制负荷低,适合梅钢 1422 产线生产屈服强度高 600 MPa 的高强钢。

参考文献

- 1 王庆敏,赵海洋.含 Nb 微合金低碳钢奥氏体连续冷却转变为.热加工工艺,2010,39(6):25
- 2 侯华兴,杨颖,张涛,等.HTP 工艺生产的 700 MPa 级中厚板的组织与性能.钢铁,2009,44(8):72
- 3 牛济泰.材料和热加工领域的物理模拟技术.北京:国防工业出版社,1999

殷 胜(1980-),男,工程师,2004 年南京理工大学毕业,钢铁材料新产品开发。

收稿日期:2011-11-21