

500 MPa Nb-Ti 微合金高强度汽车车轮钢 510CL 开发和性能

肖 尧

(攀钢集团研究院有限公司钒钛钢研究所, 攀枝花 617000)

摘要 开发试验的 510CL 钢(/% : 0.08C, 0.07Si, 1.25Mn, 0.008P, 0.005S, 0.023Nb, 0.018Ti) 经半钢脱硫-200 t 顶底复吹转炉-LF-230 mm × 1 650 mm 板坯连铸-连轧成 5.0 mm 板。为了保证车轮钢具有良好的焊接性能, 采用了低碳 Nb-Ti 微合金化, 并结合 TMCP(热机械控制轧制工艺) 技术开发出 500 MPa 高强度车轮钢。试验钢的扩孔率超过 100% 和焊接性能良好, 其冷成形性能和疲劳寿命均达到用户的技术指标, 使用后试验钢达到设计要求。

关键词 500 MPa 车轮钢 疲劳寿命 扩孔性能应用

Development and Application Performance of 500 MPa Nb-Ti Microalloying High Strength Steel 510CL for Auto Wheel

Xiao Yao

(Institute of Vanadium and Titanium Steel, Pangang Group Research Institute Co Ltd, Panzhihua 617000)

Abstract The 5.0 mm strip of developed tested steel 510CL (/% : 0.08C, 0.07Si, 1.25Mn, 0.008P, 0.005S, 0.023Nb, 0.018Ti) is produced by semi-steel desulphurization-200 t top and bottom combined blowing converter-LF-230 mm × 1 650 mm slab casting-continuous rolling process. In order to ensure the better welding performance of wheel steel, the 500 MPa high strength wheel steel is developed by low carbon Nb-Ti microalloying combined TMCP (Thermo-Mechanical Control Process) technology. The hole-expansion rate of tested steel is more than 100%, the welding performance is better, the cold-forming performance and the fatigue life of steel all meet the user technical index, and after application the test steel is up to design requirement.

Material Index 500 MPa Steel for Auto Wheel, Fatigue Life, Hole-Expansion Performance

由于车轮制作对钢板的综合性能要求高, 加上表面质量和厚度公差的高要求, 限制了国内只有少数厂家才能生产, 而日本等一些发达国家早已实现了高强车轮钢生产^[1-5]。随着节能减重及车轮结构发展需要, 市场对高强车轮钢需求越来越迫切, 也对高强车轮钢品种质量提出了更高要求^[6]。

1 成分设计与性能要求

500 MPa 级高强汽车车轮移动用钢主要用于轿车等乘用车, 轮辋与轮辐分别采用滚压与冲压的方式成形, 最终通过焊接的方式连接在一起, 这对材料的焊接性能与尺寸精度有很高的要求。所以在成分设计时, 在低 C-Mn 钢的成分基础上, 采用 Nb-Ti 微合金化, 使带钢在再结晶过程中 Nb 的析出物拖曳晶界, 对晶界及轧制变形过程中产生的位错起钉扎作用, 有效细化晶粒。同时, Ti 的加入可以有效改善含 Nb 钢连铸坯边部角裂倾向, 同时 Ti 的析出物由于具有良好的热稳定性, 可在焊接过程中有效阻止奥氏体粗化, 对焊接性能有明显的改善作用^[7]。试验钢的成分设计如表 1 所示。

试验钢主要力学性能要求如表 2 所示。表 2 中

表 1 试验钢化学成分 / %

Table 1 Chemical composition of tested steel / %

C	Si	Mn	P	S	Nb	Ti
≤0.10	≤0.15	≤1.30	≤0.020	≤0.008	≥0.015	0.015~0.025

表 2 高强度车轮钢的力学性能要求

Table 2 Mechanical properties requirement of high strength wheel steel

厚度/mm	R_{el} /MPa	R_m /MPa	A / %	180°冷弯试验, B = 35 mm d = 0.5 a
2.0~6.0	≥410	510~630	≥24	

所列拉伸试验与冷弯试验规定值适用于横向试样。

2 工业试制

试验钢工艺流程为: 200 t 顶底复吹转炉提钒 → 半钢脱硫 → 200 t 顶底复吹转炉炼钢 → LF 精炼 → 230 mm × 1 650 (或 1 930) mm 板坯连铸 → 加热炉加热 → 高压除鳞 → 粗轧 → 热卷箱 → 精轧 → 层流冷却 → 卷取 → 精整 → 发货。

2.1 炼钢工艺

试验钢按照成分设计在西昌钢钒 200 t 转炉上冶炼, 在 LF 工序进行钙处理, 使夹杂物变性, 对比

钙处理前后效果如图1所示。经LF后浇钢温度控制 $1530 \sim 1545$ °C,钢水经立弯型板坯连铸机铸成 $230 \text{ mm} \times 1650$ (或 1930) mm尺寸板坯。

2.2 控制轧制

试验钢坯成分(/%)为 0.08C 、 0.07Si 、 1.25Mn 、 0.008P 、 0.005S 、 0.023Nb 、 0.018Ti 。在步进式加热炉中完成加热,经 2050 mm CVC7 机架热连轧机组进行轧制。Nb-Ti 微合金化可以有效推迟再结晶,由它们形成的第二相粒子可以有阻止晶粒长大,获得细小的铁素体晶粒,同时,Ti 的第二相析出物具有强烈的析出强化效果。为保证 Nb 充分固溶,加热温度设定为 (1220 ± 20) °C,要求板坯加热时间大于 160 min。粗轧采用单机架5道次轧制,或者采用双机架“1+5”或“3+3”6道次。为保证粗轧过程再结晶完全,要求粗轧后三道次压下大于 30% 。轧粗轧后经7机架精轧机组轧制至规格 5.0 mm,低的精轧开轧温度能够在一定程度上改善带钢的表面质量,所以精轧入口温度设定为 (1030 ± 20) °C,终轧温度设定为 (870 ± 20) °C,卷温为 (600 ± 20) °C。

析析出物的成分是 Nb-Ti 化合物。

3 试制结果及分析

3.1 常规力学性能分析

本文中针对使用性能研究对象均为规格为 $5.0 \text{ mm} \times 1350 \text{ mm}$ 钢带,通过对头、中、尾3个部位取样同时对对应样板进行沿轧制方向 0° (轧向), 45° , 90° (横向)3个方向的拉伸性能检验分析试验钢的力学性能波动情况,如图2所示。从检验结果上看,横向性能波动大于纵向波动,从总体情况上看,屈服强度波动为 24 MPa ,抗拉强度 23 MPa ,延伸率为 3% 。表明试验钢性能稳定,波动小。

3.2 组织及析出物分析

对试验热轧钢板(5 mm)取样分析钢中的夹杂及其金相组织,夹杂按 GB/T 10561 标准评级,晶粒度按 GB/T 6394 标准评定。热轧钢带经显微镜观察如图3所示,显微组织由铁素体加珠光体组成,其中铁素体占 93% ,珠光体占 7% ,晶粒度 12.5 级。Nb、Ti 元素的加入有效阻碍了晶粒的长大,细化了晶粒。

试验钢的特设电镜形貌如图4所示,析出物形态不规则,弥散分布,尺寸在 $10 \sim 80 \text{ nm}$,能谱仪分

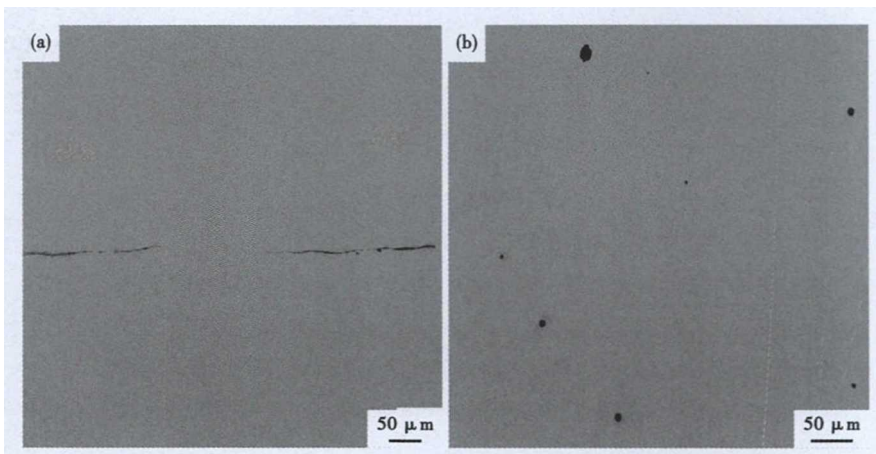


图1 未经钙处理(a)和经钙处理(b)试验钢中夹杂物形貌
Fig.1 Morphology of inclusions in tested steel without calcium treatment (a) and with calcium treatment (b)

析析出物的成分是 Nb-Ti 化合物。

3.3 低温冲击性能分析

珠光体对冲击转变温度的不利影响是很明显的,增加碳含量会增加珠光体含量,这一点在设计成份时已经作了考虑。图5是试样尺寸(mm)为 $5 \times 10 \times 55$ 时的夏比冲击功曲线,试验冲击样采用V型缺口试样,分别在室温下、 0 °C、 -20 °C、 -40 °C、 -60 °C、 -80 °C进行冲击韧性试验。

室温下,横向试样冲击功平均值为 60 J ,纵向试样冲击功平均值 95 J ,接近 100 J ;而横向 -50 °C冲

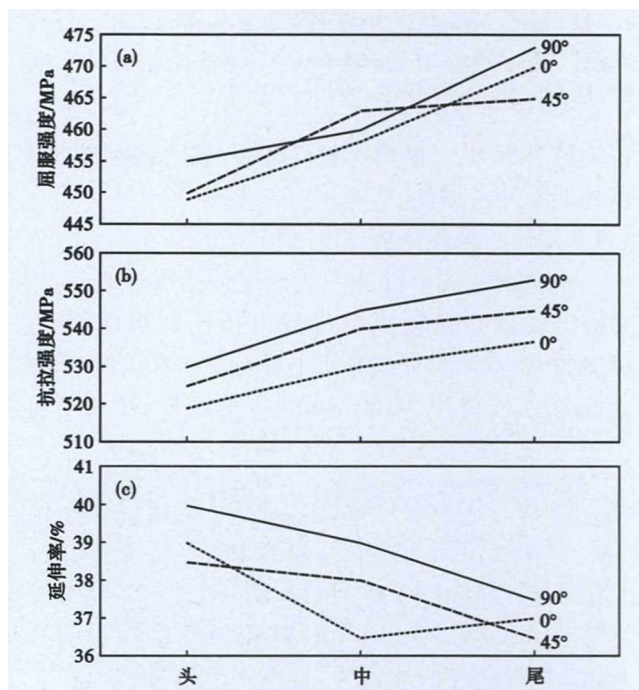


图2 试验500 MPa 车轮钢的抗拉强度(a),屈服强度(b)和延伸率(c)

Fig.2 Tensile strength (a), yield strength (b) and elongation (c) of tested 500 MPa wheel steel

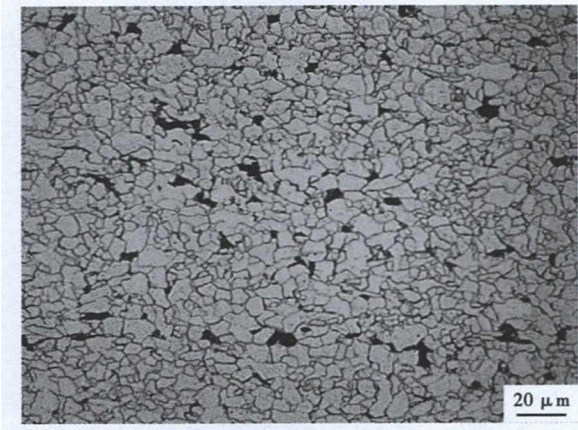
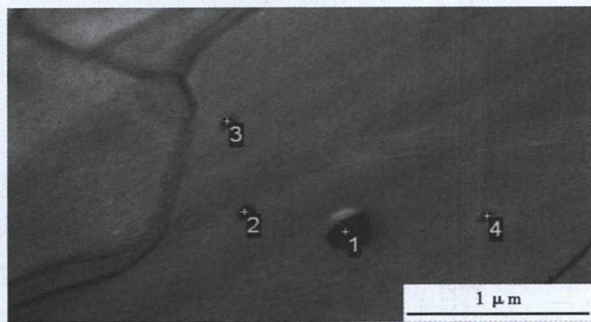


图 3 试验钢 5 mm 热轧板的组织形貌

Fig.3 Morphology of structure of tested steel 5mm hot-rolled plate



析出物	Ti/%	Nb/%	总和/%
1	76.64	23.36	100.00
2	85.96	14.04	100.00
3	88.29	11.71	100.00
4	84.80	15.20	100.00

图 4 试验钢析出物 TEM 形貌和能谱分析

Fig.4 Morphology of precipitates in tested steel, TEM, and energy dispersive spectrum (EDS) analysis

击功超过 50 J,且断口为韧性断裂,表明钢板具有优良的低温冲击韧性。

3.4 延伸凸缘性分析

车轮钢的成形性能一般用延伸凸缘性表示,为掌握试验钢在轮辐成型过程中扩孔翻边性能,在 BHB-80 型双向拉伸试验机上进行了扩孔试验,将试验钢加工成外径为 100 mm 的方形试样,中心开孔

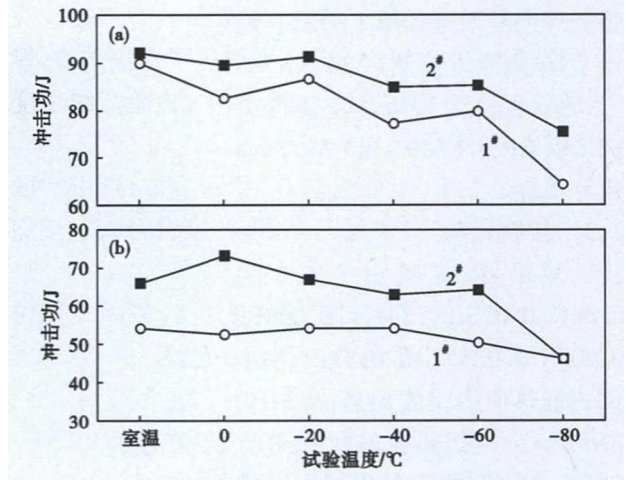


图 5 试验钢热轧板纵向(a)和横向(b)夏比冲击功

Fig.5 Longitudinal (a) and horizontal (b) impact energy of tested steel hot-rolled plate

16.5 mm,用 Φ55 mm 的圆柱形冲头进行扩孔,测定产生裂纹时孔直径 d 。扩孔率 λ 计算公式:

$$\lambda = \frac{d - d_0}{d_0} \times 100\%$$

式中: d_0 - 原始直径; d - 产生裂纹时的孔径。试验结果见表 3,试验钢扩孔率均值大于 100%,表明试验钢具有优良的延伸凸缘性能。

3.5 轮辐试制结果

试验钢批量运用于日上及东风等汽车车轮生产厂家,钢板经过落料及焊接等十余道工序完成轮辐制造,经过与轮辐焊机完成车轮制造。国内高强度轮辐用钢焊接采用的焊接方法主要为闪光焊,试验钢的焊接设备主要为济南诺斯思达和艺能生产,设

表 3 试验钢的扩孔率
Table 3 Hole-expansion rate of tested steel

编号	扩孔率/%				平均扩孔率 λ /%
1	112.5	100.2	100.2	111.0	106.0
2	119.0	112.5	123.5	118.5	118.4
3	130.6	128.3	134.9	116.6	127.6
4	128.9	127.8	133.5	142.1	133.0

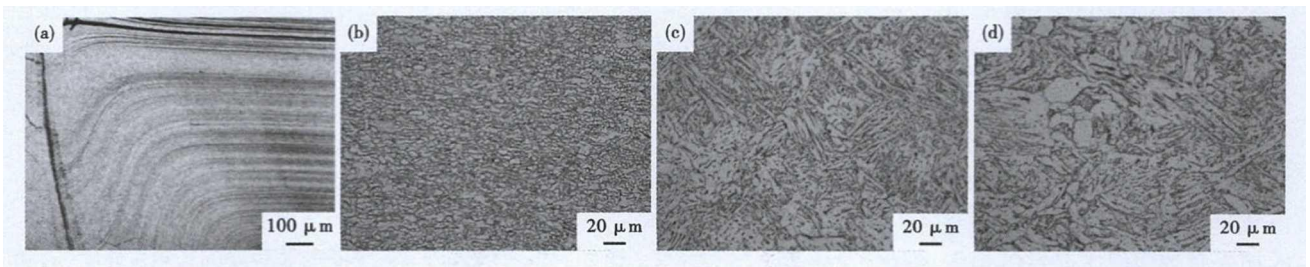


图 6 试验钢热轧板材焊接接头流线角度(a),母材(b),热影响区(c)和焊缝组织(d)形貌

Fig.6 Welding joint flow line angle (a), morphology of structure of base metal (b), heat affected zone (c) and weld (d) of hot-rolled plate of tested steel

备功率 400 kVA、800 kVA、1 250 kVA。为掌握试验钢焊接性能,按用户大生产工艺进行了焊接试验,焊后不同部位的金相组织见图 6,其中,检验流线角度腐蚀液为饱和苦味酸溶液,流线角度在 50° ~ 70°。焊缝区组织为针状铁素体加块状铁素体,热影响区为针状铁素体加少量珠光体,母材组织为铁素体加少量珠光体。

焊接接头的拉伸试验结果见表 4,其断裂部位均在母材处,未出现热影响区断裂现象。

焊接接头硬度分布见图 7, HV 值为 193 ~ 233,且硬度分布合理,在热影响区未出现软化。

车轮径向疲劳试验标准按照《GB/T5334-2005 乘用车车轮性能要求和试验方法》执行,径向疲劳试验结果见表 5。

车轮弯曲疲劳试验标准按照《GB/T5334-2005

表 4 试验钢热轧板材焊后常温拉伸试验结果

Table 4 Ambient tensile examination results of welded hot-rolled strip of tested steel

编号	R_m /MPa	A / %	Z / %	断裂部位
1	560	24.0	63.0	母材
2	560	26.5	62.5	母材
3	560	25.0	62.0	母材

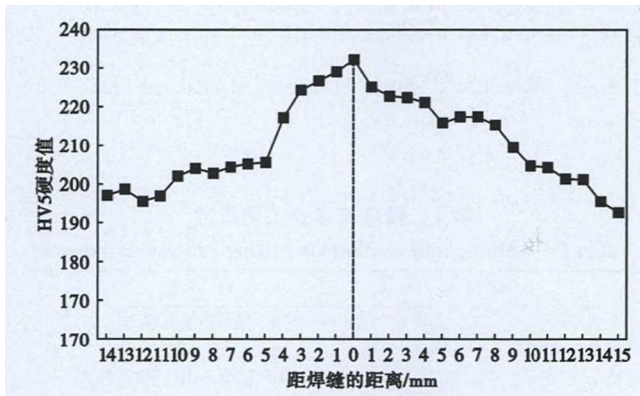


图 7 焊接接头硬度分布

Fig. 7 Distribution hardness of welded joint

表 5 试验车轮钢径向疲劳试验结果

Table 5 Radial fatigue examination results of tested wheel steel

试验目的	验证 P490CL 材料是否满足径向疲劳测试	
试验依据	GB/T5334-2005 乘用车车轮性能要求和试验方法	
试验要求	载荷(N)	12 375
	旋转次数	≥80 万次
	轮胎型号	165/70R14
试验条件	载荷(N)	12 375
	轮胎型号	165/70R14
	实验设备	RFT-02 径向疲劳试验机
试验结果	完成旋转次数大于 80 万次无可见裂纹	
判定	合格	

表 6 试验车轮钢弯曲疲劳试验结果

Table 6 Bending fatigue examination results of tested wheel steel

试验目的	验证 P490CL 材料满足动态弯曲疲劳性能要求	
试验依据	GB/T5334-2005 乘用车车轮性能要求和试验方法	
试验要求	高载弯矩(旋转次数)	2 054 N·m(≥9 万次)
	低载弯矩(旋转次数)	1 670 N·m(≥20 万次)
试验设备	CFT-02 弯曲疲劳试验机	
试验结果	高载弯矩旋转次数	≥90 000 次
	低载弯矩旋转次数	≥200 000 次
(a) 完成性能检验要求旋转次数后无可见裂纹;(b) 完成性能检验要求旋转次数后偏移增量未超过初始偏移量的 10%		
判定结果	通过弯曲疲劳测试,检验结果为合格	

乘用车车轮性能要求和试验方法》执行,弯曲疲劳试验结果见表 6。

4 结论

(1)采用低碳、低硅成分设计,利用 Nb、Ti 在钢中的细晶强化和析出强化复合作用保证高强高成形性能,成功开发出了抗拉强度 500 MPa 级高强车轮钢。

(2)通过采用控轧控冷工艺,试验钢获得了细小的铁素体和少量珠光体组织,组织均匀,铁素体晶粒度为 12.5 级;产品力学性能稳定,各向性能差异小;冷弯性能好,低温冲击韧性好,扩孔率均大于 100%;轮辋闪光对焊的焊缝处未出现裂纹和颈缩,热影响区未见软化或硬化现象。

(3)产品主要用于东风、金固及日上车轮公司等知名企业制作车轮轮辐及轮辋,其冷成形性能及疲劳寿命均达到了用户要求的技术指标,试制车轮全部装车使用,开发的试验钢达到设计要求,并能满足用户要求。

参考文献

- [1] 刘文华. 高强度钢在汽车轻量化中的应用[J]. 汽车工艺与材料, 2008(11):49-51.
- [2] Kang Yonglin. Advances in the Development of Automobile Sheets Abroad [J]. Bao Steel Technology, 1999(1):31-34.
- [3] 马鸣图. 汽车结构用钢的进展[J]. 汽车工程, 2005(3):269-273.
- [4] 姚贵升. 采用低合金高强度钢制造车轮以减轻重量[J]. 汽车材料, 2000(8):14-20.
- [5] 陈红桔. 控轧控冷工艺对钕钛微合金钢组织和性能的影响[J]. 钢铁研究总院学报, 1999(11):38-43.
- [6] 小宫幸久(日本). 汽车用钢铁材料的现状和发展动向[J]. 鞍钢技术, 2004(4):65-67.
- [7] 袁向前. 钕含量对钕钛微合金化钢强度的影响[J]. 轧钢, 2006(12):12-14.

肖 尧(1989-),男,硕士(2013 年东北大学),工程师,2011 年东北大学(本科)毕业,汽车车轮及汽车结构钢研究。

E-mail: yaoyao12412@126.com

收稿日期:2018-06-12