

## FTSR 热轧 5 mm T510L 高强度钢板的组织和性能

艾星辉<sup>1</sup> 冯运莉<sup>2</sup> 杨琨<sup>2</sup> 杨晓彩<sup>2</sup>

(1 唐山科技职业技术学院冶金系,唐山 063001; 2 河北理工大学金属材料工程系,唐山 063009)

**摘要** 5 mm T510L(0.20% C,1.17% Mn)高强度钢板由 FTSR(Flexible Thin Slab Rolling):铁水预处理-150 t 转炉-LF-85 mm 板坯连铸-控制连轧工艺生产。试验结果表明,5 mm T510L 钢板组织细小、均匀,平均晶粒度 7.0 μm,抗拉强度 625 MPa,伸长率 28%,韧脆转变温度为 -60 °C,应变硬化指数  $n$  值为 0.210,具有良好的成形性。

**关键词** FTSR 工艺 T510L 高强度钢板 组织 力学性能 成形性

## Structure and Properties of 5 mm T510L High Strength Steel Strip Produced by FTSR Process

Ai Xinghui<sup>1</sup>, Feng Yunli<sup>2</sup>, Yang Kun<sup>2</sup> and Yang Xiaocai<sup>2</sup>

(1 Metallurgic Department, Tangshan Scientific and Technical Profession Technique College, Tangshan 063001; 2 Metal Material Engineering Department, Hebei Polytechnic University, Tangshan 063009)

**Abstract** The 5 mm T510L (0.20C, 1.17Mn) high strength steel strip was produced by FTSR (Flexible Thin Slab Rolling); hot metal pretreatment - 150 t LD - LF - 85 mm slab casting - control continuous rolling process. Test results showed that the structure of 5 mm T510L strip was fine and uniform with average grain size 7.0 μm; the tensile strength of steel was 625 MPa, elongation 28%, tough-brittle transition temperature -60 °C; and the steel strip had excellent formability with strain-hardening exponent  $n$  value 0.210.

**Material Index** FTSR Process, T510L High Strength Steel Strip, Structure, Mechanical Properties, Formability

薄板坯连铸连轧生产线是 20 世纪 90 年代初世界新开发成功生产热轧板卷的一项短流程工艺,是继氧气转炉炼钢、连续铸钢之后钢铁工业最重要的革命性技术之一。与传统热轧板卷生产流程相比,由于其独特的工艺流程和特点,薄板坯连铸连轧所生产的产品晶粒细小,强度高,适合生产高强度钢板。其原因表现为:(1)薄板坯连铸连轧铸坯厚度薄,其凝固冷却速率远远大于传统的厚板坯,二次枝晶间距大幅度减小;(2)薄板坯连铸连轧工艺因取消了  $\gamma \rightarrow \alpha$  和  $\alpha \rightarrow \gamma$  两个相变过程而直接轧制,一些合金元素能充分固溶,在随后的轧制过程中也有利于晶粒的细化;(3)薄板坯轧制虽然板坯总压缩比小,但变形速率却大于传统工艺,单道次变形量更大,再结晶进行更快,晶粒尺寸更小;(4)由于其特有的物理冶金过程亦会导致氧化物、硫化物等非金属夹杂物的尺寸显著减小,甚至可以达到纳米级,这些夹杂物对奥氏体再结晶晶粒长大有钉扎作用,导致晶粒细化,使钢材的强度提高<sup>[1]</sup>。

近些年来,随着国民经济的持续发展,国内汽车的消费和产量双双大幅增长,今后几年仍将保持快速增长的趋势。因而,对钢材的数量和质量的要求势必加大。另外,由于减轻车重、降低油耗、减少环

境污染和提高安全性一直是现代汽车性能研究中的重要课题,再加之我国超载现象普遍,所以也极大促进了高强度钢板的生产与应用技术的进步。为了满足市场需求,提高经济效益和市场占有率,唐钢在 FTSR 薄板坯连铸连轧生产线研制开发了 T510L 高强度汽车大梁用钢板。

本试验采用常规力学性能试验、光学显微镜、扫描电镜、透射电镜等手段,对 FTSR 热轧 T510L 高强度汽车大梁板的显微组织、力学性能及冲击韧性进行了分析研究,探讨了化学成分、生产工艺对组织性能的影响。

### 1 FTSR 热轧 T510L 高强度钢板的化学成分及热轧工艺分析

唐钢按内控标准生产 T510L 高强度钢板的化学成分<sup>[2]</sup>见表 1。

表 1 T510L 钢的化学成分/%  
Table 1 Chemical composition of T510L steel / %

钢种	C	Si	Mn	P	S
T510L	0.17 ~ 0.20	0.26 ~ 0.39	1.09 ~ 1.16	0.012 ~ 0.020	0.001 ~ 0.007
国标 Q345B	≤0.20	≤0.55	1.00 ~ 1.60	≤0.040	≤0.040

由表 1 可以看出, T510L 钢 S、P、Si 的含量较国标 GB/T1591-1994 中 Q345B 的低, 较低的杂质含量有利于提高钢的塑性和韧性。

F TSR 热轧 T510L 高强钢板的工艺路线为: 高炉铁水→铁水脱 S 预处理→150 t 转炉冶炼钢水→LF 精炼→浇铸 85 mm 厚板坯→辊底式加热炉→2 架粗轧机→5 架精轧机→层流冷却→卷取→成品。

唐钢 F TSR 热轧 T510L 高强钢板采用大压下和高刚度的轧制。开轧温度一般控制在 1 050 ~ 1 100 °C, 终轧温度控制在 880 ~ 900 °C, 卷取温度控制在 600 ~ 650 °C。表 2 为该生产线生产 5 mm 厚 T510L 高强钢板的轧制工艺参数。

表 2 F TSR 热轧 5 mm T510L 钢板的轧制工艺参数  
Table 2 Rolling parameters for 5 mm T510L steel strip hot rolled by F TSR process

机架号	速度/(m·s <sup>-1</sup> )	温度/°C	厚度/mm
R1	0.55	1 055	48.3
R2	1.05	1 039	25.3
F1	1.90	992	13.8
F2	2.80	971	9.4
F3	4.10	951	6.5
F4	4.90	928	5.4
F5	5.50	913	4.8

## 2 显微组织分析

### 2.1 光学显微组织

试验研究所用钢板均取自唐钢热轧薄板厂生产的 5 mm 厚 T510L 钢板, 分析试验用钢的化学成分为 (%): 0.20C、0.31Si、1.17Mn、0.015P、0.007S。分别在钢板的轧制面、横向、纵向截取试样, 利用 O-LYMPUS-PMG3 光学显微镜观察了 5 mm 厚钢板的显微组织, 拍摄了 3 个不同方向上的显微组织照片(图 1)。

由图 1 可以看出, T510L 汽车钢板的组织基本为大量铁素体加部分珠光体, 铁素体晶粒的外貌呈

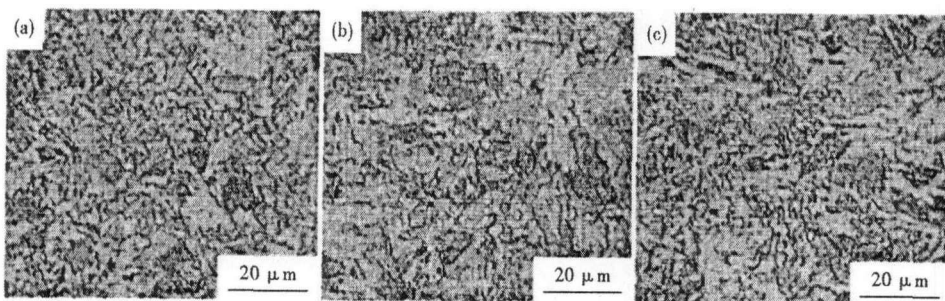


图 1 5 mm T510L 钢板不同方向上的组织形貌: (a) 轧制面; (b) 横向; (c) 纵向  
Fig. 1 Structure morphology of 5 mm T510L steel strip at different direction: (a) rolling surface; (b) cross section; (c) longitudinal section

不规则的多边形状或针状, 较细的多边形铁素体可以提高钢的韧性, 针状铁素体可以提高钢的强度, 图中颜色较暗的区域为珠光体, 呈岛状分布。钢板的横向和纵向没有明显的带状偏析, 从整体看来 5 mm 厚 T510L 钢板的晶粒较为细小均匀, 平均晶粒尺寸为 7.0 μm。

从唐钢 F TSR 热轧 T510L 钢板的轧制工艺看, 2 架粗轧的总变形量大于 50%, 变形温度较高, 在 1 000 °C 以上, 符合发生奥氏体再结晶的临界条件。从工艺布置上来看, 2 架粗轧与 5 架精轧之间有 24.22 m 的距离, 中间轧件在这段距离上的运行保证了奥氏体进行充分的再结晶, 得到均匀、细小的再结晶晶粒<sup>[3]</sup>。

精轧在未再结晶区轧制, 由于温度降低, 变形量相对粗轧变小, 道次间隔时间又很短, 因此回复和再结晶进行的不充分, 应变会在变形道次中积累。随着轧件的变形, 应变的不断积累, 奥氏体晶粒不断拉长而使晶界面积增加, 同时晶内累积有大量的畸变能和畸变带。这些原因都增加了 α 在单位体积 γ 内的形核数量和成核速率。轧件经终轧出口层流冷却段的强力冷却, 很快发生相变, 铁素体在奥氏体晶界和晶粒内部大量形核, 从而得到非常均匀、细小的组织。

热轧后钢材的冷却速度对产生细晶粒组织也至关重要, 如果冷速过慢, 先共析铁素体将长得粗大, 珠光体也呈粗片状, 造成强度和韧性降低。在板材连轧生产中, 卷取温度也是一个重要的控制参数, 一般将卷取温度控制在 600 ~ 650 °C, 然后使板卷缓慢冷却, 这会对钢的塑性和韧性产生良好作用, 若在 600 °C 以下继续快冷, 则往往造成韧性的下降。

### 2.2 扫描电镜分析

在扫描电镜下可以观察到 5 mm 钢板在室温下的组织为形状不规则的铁素体和片层状的珠光体,

沿铁素体晶界析出的链状和粒状碳化物, 这是钢板强度高的原因之一。

### 2.3 透射电镜分析

利用电解双喷减薄仪制取 T510L 钢板的透射电镜试样, 在透射电镜下可以观察到在 5 mm 钢板的组织中存在粒状碳化

物及片层状很细的珠光体,利用透射电镜进一步观察时发现,在 5 mm 钢板中存在着高密度的位错。大量的位错在晶粒内缠绕在一起,有些位错还钉扎着微小的粒子,高密度位错及位错的钉扎作用对于提高钢的强度起到重要的作用。

### 3 力学性能、冲击韧性及成形性分析

#### 3.1 力学性能分析

在 SUN20 电子拉伸试验机上通过拉伸试验测定了 5 mm 厚 T510L 钢板的屈服强度、抗拉强度及伸长率等力学性能,唐钢生产的 5 mm 厚 T510L 钢板的屈服强度为 500 MPa,抗拉强度为 625 MPa,伸长率为 28%。由于 T510L 钢板与国标(GB/T1591-1994)Q345B 钢板的化学成分接近,因此将试验数据与国标 Q345B 钢板的力学性能进行了比较(表 3)。由表 3 中数据可知,FTSR 热轧 T510L 钢板的强度均远高于国标 Q345B 钢板的强度,伸长率也较高。由此可见,T510L 热轧钢板具有较好的综合力学性能。

表 3 5 mm T510L 钢板的拉伸性能  
Table 3 Tensile properties of 5 mm T510L steel strip

钢种	板厚/mm	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	伸长率/ %
T510L	5	500	625	28
国标 Q345B	≤16	≥345	470~630	≥21

#### 3.2 冲击韧性分析

为了研究 FTSR 热轧 T510L 钢板的冲击韧性,取 5 mm 厚钢板进行了室温至 -80 °C 的系列冲击试验,根据国标金属夏比 V 型缺口冲击试验方法 GB/T 229-1994,沿垂直于轧制方向(横向)制取小尺寸非标准试样,试样尺寸为 5 mm × 10 mm × 55 mm,其 V 型缺口深度为 5 mm,试验测得试样在不同温度下的冲击功  $A_{KV}$  值,并根据冲击功计算相应的冲击韧性值  $a_{kv}$ ,冲击试验结果见表 4。

表 4 5 mm T510L 钢板的冲击韧性  
Table 4 Impact toughness of 5 mm T510L steel strip

项目	温度/°C					
	20	0	-20	-40	-60	-80
冲击功( $A_{KV}$ )/J	60	50	44	33	27	17
冲击值( $a_{kv}$ )/(J·cm <sup>-2</sup> )	150	125	110	82.5	67.5	42.5

从表 4 可以看出,5 mm 厚 T510L 钢板的冲击性能良好,在 -60 °C 以上钢板的冲击功达到了国标(GB/T1591-1994)Q345E 级标准,说明钢板在此温度以上具有较好的韧性;在 -60 °C 以下冲击功明显下降,说明其韧脆转变温度在 -60 °C 左右。

#### 3.3 成形性分析

应变硬化指数  $n$  反映材料在塑性变形过程中变形强化的能力<sup>[4]</sup>,它可以用来判断材料的深冲压性能。为了判断 5 mm 厚 T510L 钢板的成形性,按国标 GB5028-1985 制取垂直于轧制方向(横向)的试样,对其进行  $n$  值的测定试验,将试验数据进行处理后,经过拟合分析得到 5 mm 厚 T510L 钢板的  $n$  值为 0.210。对于 C、Mn 钢而言,此  $n$  值已较高,即该钢板具有较好的成形性。

### 4 结论

(1)FTSR 热轧 5 mm 厚 T510L 钢板的室温组织为形状不规则的铁素体和细片层状的珠光体,在铁素体晶界处有链状和粒状碳化物析出。5 mm 厚 T510L 钢板的平均晶粒尺寸为 7.0 μm。

(2)由于晶粒组织细小、均匀且钢中有害元素的含量低,故 T510L 钢板的强度和塑性高,其屈服强度为 500 MPa,抗拉强度为 625 MPa,伸长率为 28%。

(3)5 mm 厚 T510L 热轧钢板的冲击性能良好,在 -60 °C 以下冲击功明显下降,说明其韧脆转变温度在 -60 °C 左右。

唐山市科学技术研究与发展计划资助项目  
(04204501C-227)

#### 参考文献

- 1 崔忠圻. 金属学与热处理. 北京:机械工业出版社,1994
- 2 王天义. 薄板坯连铸连轧工艺技术实践. 北京:冶金工业出版社,2005
- 3 冯运莉,王岭娥,陈华辉. 唐钢 FTSR 连铸薄板坯热连轧低碳钢板的组织和性能. 特殊钢,2005,26(5):54
- 4 梁新邦,李久林,张振武. 金属力学及工艺性能试验方法国家标准汇编. 北京:中国标准出版社,1996

艾星辉(1964-),女,高级讲师,河北机电学院毕业,超细组织钢新品种开发。

收稿日期:2007-12-11