

## Ti 微合金化 Q345D 钢中厚板的组织和力学性能

周家林<sup>1</sup> 黄高<sup>1</sup> 向上<sup>1</sup> 潘成刚<sup>1</sup> 赖春明<sup>1</sup> 胡唐国<sup>1</sup>

(1 武汉科技大学钢铁冶金及资源利用省部共建教育部重点实验室, 武汉 430081; 2 武汉钢铁股份有限公司, 武汉 430083)

**摘要** 研究了铁水脱硫处理-150 t 转炉-RH-保护浇铸-控轧控冷工艺生产的 Ti 微合金化 Q345D 钢( /% : 0.15C, 0.27Si, 1.36Mn, 0.019Ti, 0.011P, 0.003S, 0.026Als) 30 mm × 2 500 mm 中板的力学性能、组织和析出物。结果表明, Ti 微合金化 Q345D 钢的抗拉强度 ≥ 525 MPa, 屈服强度 ≥ 390 MPa, 延伸率 ≥ 29%, -40 °C 冲击功 125 J; 该钢组织为珠光体 + 铁素体 + 少量索氏体, 晶粒度为 12 ~ 14 级; 钢中夹杂物主要为 MnS 和 Ti<sub>4</sub>C<sub>2</sub>S<sub>2</sub>, 钢中析出物为 50 ~ 250 nm 弥散分布的 TiN; 钢的强度增加主要是 TiN 细晶强化作用引起的。

**关键词** Q345D 钢 中厚板 Ti 微合金化 TiN 析出物 细晶强化

## Structure and Mechanical Properties of Medium and Heavy Plate of Ti Microalloyed Q345D Steel

Zhou Jialin<sup>1</sup>, Huang Gao<sup>1</sup>, Xiang Shang<sup>1</sup>, Pan Chenggang<sup>1</sup>, Lai Chunming<sup>1</sup> and Hu Tangguo<sup>2</sup>

(1 Key Laboratory for Ferrous Metallurgy and Resources Utilization of Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081; 2 Wuhan Iron and Steel Group Co Ltd, Wuhan 430083)

**Abstract** The mechanical properties, structure and precipitates of medium plate 30 mm × 2 500 mm of Ti microalloyed Q345D steel ( /% : 0.15C, 0.27Si, 1.36Mn, 0.019Ti, 0.011P, 0.003S, 0.026Als) produced by hot metal desulphurizing-150 t converter-RH-shielding casting-control rolling and cooling process have been studied. Results show that of Ti microalloying Q345D steel the tensile strength is ≥ 525 MPa, yield strength ≥ 390 MPa, elongation ≥ 29% and the -40 °C impact energy is 125 J; the structure of steel consists of pearlite, ferrite and minor sorbite with grain size grade 12 ~ 14; the main inclusions in steel are MnS and Ti<sub>4</sub>C<sub>2</sub>S<sub>2</sub>, the precipitates in steel are dispersive-distributed 50 ~ 250 nm TiN; and the increment of strength of steel is mainly caused by fine-grain strengthening of TiN.

**Material Index** Q345D Steel, Medium and Heavy Plate, Ti Microalloying, TiN Precipitates, Fine-Grain Strengthening

Q345D 钢是一种低合金高强度钢, 由于良好的耐腐蚀、耐低温性能和良好的加工和焊接性能而被广泛应用于化工、石油、船舶等领域<sup>[1]</sup>。微合金元素 Ti 是强碳、氮化物形成元素, 能与 N、C 结合, 形成稳定的氮化物、碳化物和碳氮化物, 通过细晶强化和析出强化改善材料的性能; Ti 能变质钢中的硫化物, 可形成不易塑性变形的 Ti<sub>4</sub>C<sub>2</sub>S<sub>2</sub>, 改善材料的纵向性能的差异及冷成型性能<sup>[2,6]</sup>。但钛单独作为微合金化元素应用较少, 主要是因为 Ti 微合金钢的性能波动比较大<sup>[2,6]</sup>。由于我国钛铁的产量较高、价格相对低廉<sup>[7]</sup>, 研究和发展的钛微合金钢具有更低的成本。

通过对钢厂 Ti 微合金化 Q345D 中厚板的生产试验研究, 结果表明, 产品组织、性能均符合国家标准并实现批量化生产, 为拓展 Ti 微合金化高强度钢的生产应用范围做了有益的尝试。

### 1 试验材料与方法

#### 1.1 试验材料及力学性能要求

通过 TMCP (Thermo-Mechanical Control Process) 工艺, 充分发挥 Ti 的细化晶粒和沉淀强化作用, 可以获得综合性能良好的低成本、高性能 Ti 微合金钢。但 Ti 加入量过多易形成粗大的 Ti(C, N) 夹杂物, 可能对钢的韧性不利<sup>[8]</sup>。在保证性能要求的前提下, 尽可能按成分下限控制 Ti 含量, 有利于降低成本; 碳是钢中主要的强化元素, 为保证强度、成形性能及焊接性能, 控制碳含量在 0.12% ~ 0.16%; 锰通过固溶强化和细化铁素体晶粒及增加珠光体量等作用来改善钢的强韧性。

试验材料选取横断面为 30 mm × 2 500 mm 的 Q345D 含 Ti 钢中厚板成品, 依照 GB/T3274-2007 要求, 试验 Q345D 钢的化学成分及力学性能要求分别见表 1、表 2。

#### 1.2 生产工艺

Q345D 含 Ti 钢的生产流程为: 铁水脱硫处理-150 t 转炉冶炼-RH 真空处理-全程保护浇铸-板坯精整-加热-控轧控冷-精整-正火热处理。Q345D 含钛钢板控轧控冷工艺: 横断面为 210 mm × 1 150 mm 的

表 1 Q345DTi 钢的化学成分和碳当量  
Table 1 Chemical composition of Q345DTi steel and carbon equivalent

项目	化学成分/%							C <sub>eq</sub>
	C	Si	Mn	Ti	P	S	Als	
国标	≤0.18	≤0.55	≤1.70	≤0.20	≤0.030	≤0.03	≥0.015	≤0.44
目标	0.155	0.25	1.4	0.020	≤0.018	≤0.005	0.025	≤0.44
试样	0.148	0.27	1.36	0.019	0.011	0.003	0.026	≤0.44

注:碳当量 C<sub>eq</sub> = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15

表 2 Q345DTi 钢的力学性能要求  
Table 2 Requirement for mechanical properties of Q345DTi steel

厚度范围/ mm	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	延伸率/ %	180°弯曲 试验	冲击功 (-20℃)/J
≤16	≥345	470~630	≥22	D=2a	≥34
16~40	≥335	470~630	≥22	D=3a	≥34
40~60	≥325	470~630	≥22	D=3a	≥34

铸坯加热到温度(1 230 ± 20)℃;四辊粗轧开轧温度 ≥1 050℃,终轧温度 ≥960℃,前三道次每道次压下量 ≥20 mm;四辊精轧开轧温度 ≤960℃,终轧温度 830~870℃,最后三道次累计压下率 ≥30%;开冷温度 ≥770℃,返红温度 700~730℃。

### 1.3 性能测试、组织观察

对 Ti 微合金化中厚板分别按照 GB/T228-2002 金属材料室温拉伸试验方法,在钢板厚度的 1/4 和 1/2 位置分别沿横向、纵向取样进行力学性能检验;分别在钢板的表面、厚度的 1/4 处和心部沿横向和纵向取样,制备金相试样进行光学显微镜和电镜观察,分析其组织构成、夹杂物和析出物的形态分布;按照 GB/T229-2007 金属夏比冲击试验方法,分别在钢板的表面、厚度 1/2 和 1/4 处、心部 4 个位置沿横向和纵向取样,并分别在 -40、-20、0、20℃ 4 个温度下进行冲击实验,并用扫描电镜观察断口形貌。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 力学性能

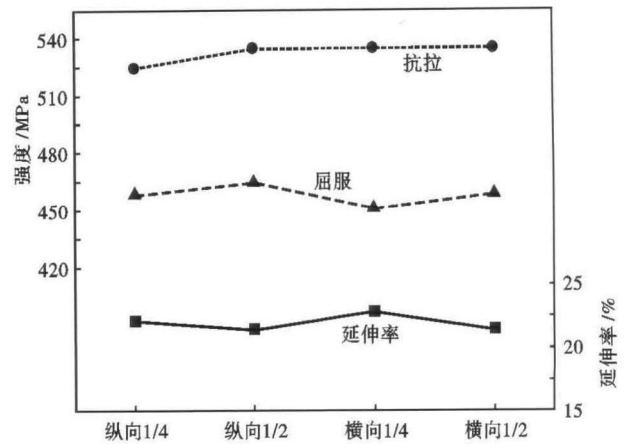


图 1 Q345DTi 钢板室温力学性能  
Fig. 1 Ambient mechanical properties of Q345DTi steel plate

图 1 为试验钢在室温下不同部位的力学性能,由图 1 可知,试样纵向和横向力学性能相差不大;结合表 2 可知,钢厂生产的 Q345D 含钛钢的屈服强度、抗拉强度以及延伸率均符合标准要求,弯曲试验也全部合格。

### 2.2 显微组织

图 2 是 30 mm 钢板不同位置试样纵截面在光学显微镜下观察到的显微组织,表 3 是实测的显微组织构成及晶粒度。组织均以铁素体 + 珠光体 + 少量回火索氏体组成,并且主要以块状或片层状分布,晶粒相对均匀、细小,晶粒度为 12~14 级,带状组织为 0.5~1 级。

表 3 Q345DTi 30 mm 钢板不同部位的晶粒度和珠光体的百分比  
Table 3 Grain size grade and pearlite percentage of Q345DTi steel 30 mm plate at different location

取样位置	晶粒度/级	珠光体百分比/%
上表层	14	15
上 1/4 处	13	20
1/2 处	13	25
下 1/4 处	12.5	20
下表层	14	20

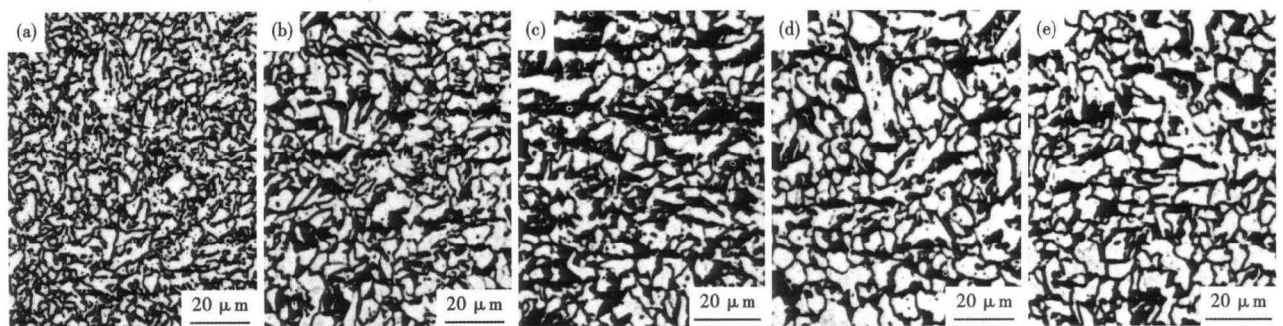


图 2 Q345DTi 钢板的组织形貌:(a) 上表层;(b) 上 1/4 处;(c) 1/2 处;(d) 下 1/4 处;(e) 下表层  
Fig. 2 Morphology of structure of Q345DTi steel plate: at (a) upper surface layer; (b) upper 1/4; (c) 1/2; (d) lower 1/4; (e) bottom surface

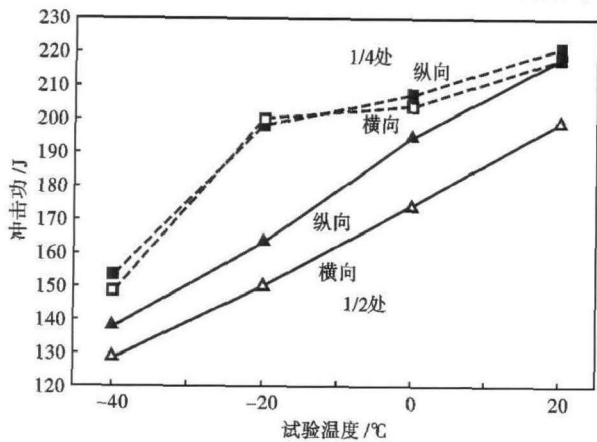


图3 Q345DTi 钢板不同部位的冲击功-温度曲线  
Fig. 3 Impact energy-temperature curves of different location of Q345DTi steel plate

结合表3和图2可知,钢板上下表面的晶粒尺寸最细小,心部的晶粒较粗大。这主要是细晶强化作用,细小的晶粒可以阻止位错滑动,因此导致上下表面的强度比心部高。

### 2.3 冲击性能

图3为测得的试验钢不同位置试样在不同温度下的冲击功。从图3中可知,试验钢具有良好的低温冲击韧性,在-40℃时其冲击功最低为125 J,可见含钛Q345D钢韧脆转变温度低于-40℃,完全满足使用性能试验要求。

扫描电镜观察到的钢板1/2厚度处-40℃横向冲击试样断口形貌(图4)。由图4可知,断口大多数都是撕裂韧窝,其断口表面颜色呈灰暗色,有明显的塑性变形特征,断口大部分为韧性断口的纤维区,韧窝细小均匀,很少部分为解理断口。

### 2.4 钢中夹杂物

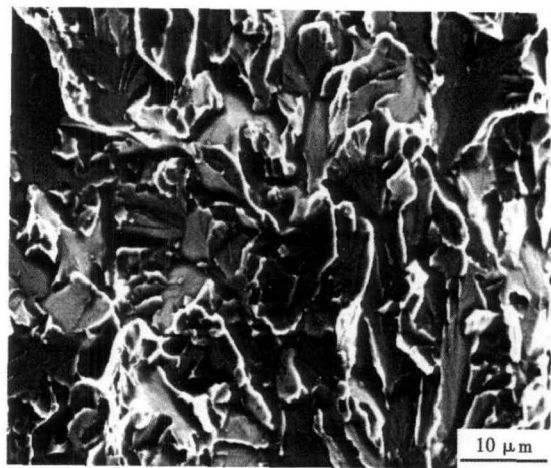


图4 Q345DTi 钢板横向冲击的断口形貌(1/2厚度, -40℃)  
Fig. 4 Morphology of cross impact fracture of Q345DTi steel plate at 1/2 thickness and -40℃

试验钢中观察到的主要夹杂物为MnS(图5a)、 $Ti_4Mn_2S_2$ (图5b)。由于Ti与S有较强的亲和力,形成比MnS硬度更高、尺寸更细小的 $Ti_4Mn_2S_2$ 粒子,呈外延平滑的圆形,在轧制过程中不变形或者变形较小,可以减少轧制后成长条边缘尖锐的MnS的出现,从而降低MnS的危害,以有效地改善试验钢的冲击韧性。

### 2.5 钢中析出物

图6为利用萃取复型技术在透射电镜下观察到的Ti微合金化Q345D钢中的析出物和能谱分析,表明在试验钢中存在大量尺寸为纳米级的立方及近似圆形(少量块状的)析出物,均为TiN粒子。长方形析出物尺寸100~250 nm,是在连铸凝固过程中高温析出的,可以为相变的形核以及第二相粒子的析出提供有利的位置;立方形粒子析出温度较低,

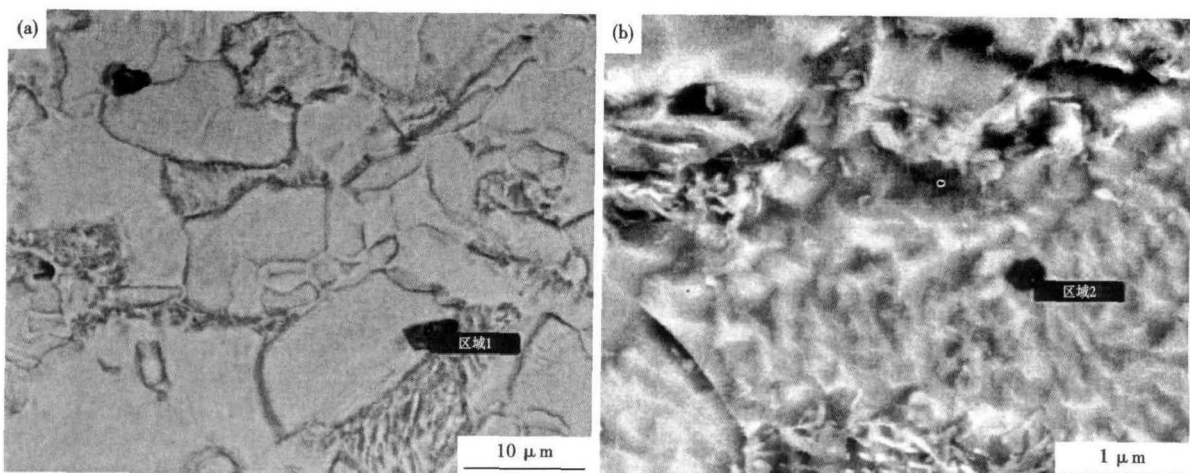


图5 Q345DTi 钢板中夹杂物的形貌:(a) MnS(区域1);(b)  $Ti_4Mn_2S_2$ (区域2)  
Fig. 5 Morphology of inclusions in Q345DTi steel plate: (a) MnS (area 1); (b)  $Ti_4Mn_2S_2$ (area 2)

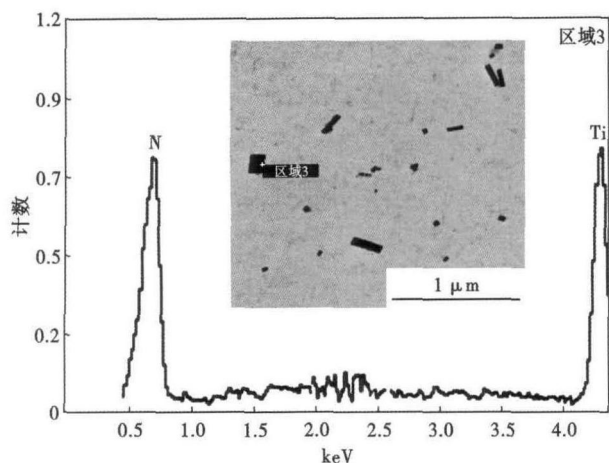


图6 Q345DTi钢板析出物TiN的形貌,TEM及能谱图  
Fig.6 Morphology of precipitates TiN in Q345DTi steel plate, TEM and energy dispersive spectrum

应该属于固态析出机制,析出后颗粒长大相对较困难,其尺寸较小(50~150 nm),在均热和随后的热轧过程中能钉扎奥氏体晶界,阻止加热及轧制过程中奥氏体晶粒的长大,同时抑制形变奥氏体晶粒的回复和再结晶,细化铁素体晶粒起到细晶强化作用<sup>[8-9]</sup>。

## 2.6 强化机理分析

研究表明<sup>[5,9-10]</sup>,根据形成析出物的化学自由能,钛的化合物在钢中的稳定性从小到大依次为 $Ti_2O_3$ -TiN- $Ti_4C_2S_2$ -Ti(C,N)-TiC<sup>[8]</sup>。当钛含量较低时,钛首先结合钢中的氮,几乎全部形成TiN,此时不能形成 $Ti_4C_2S_2$ ,钢中的硫以MnS形态存在;当钛含量增加并超过3.4[N]%时,开始形成 $Ti_4C_2S_2$ ,此时MnS与 $Ti_4C_2S_2$ 并存;当钛含量增加到可将钢中的氮和硫全部固定时,即钛的含量超过[Ti]% = 3.4

[N]% + 3[S]%时,MnS将全部被 $Ti_4C_2S_2$ 所代替,此时钛的沉淀强化作用很小;当钛含量继续增加时,多余的钛与碳形成TiC,细小而弥散的TiC在低温时析出起沉淀强化作用,对强度的提高有很大的贡献。

试验中微量钛合金化Q345D钢的钛含量很低(0.019%),由图5和图6可知,夹杂物主要是MnS与 $Ti_4C_2S_2$ 并存,因此观察不到Ti(C,N)、TiC的粒子,试验用钢强度的提高,主要是固态析出的弥散分布TiN粒子细化铁素体晶粒的细晶强化作用的结果;也避免了对温度和冷速变化敏感的TiC的低温析出过程所导致的力学性能的波动,保证了带钢通板的组织均匀、性能稳定<sup>[9]</sup>。

## 3 结论

(1)微量钛合金化Q345D钢的抗拉强度达到525 MPa以上,屈服强度达到390 MPa以上,延伸率达到29%以上,力学性能均匀稳定满足标准要求。

(2)-40℃冲击功达到125 J,冲击断口形貌为韧性断口,表明Q345D钢脆性转变温度低于-40℃,具有良好的低温冲击韧性。

(3)钛微合金化Q345D钢的组织均以铁素体+珠光体+少量回火索氏体,晶粒度为12~14级,晶粒均匀、细小。

(4)钛微合金化Q345D钢的主要夹杂物为MnS与 $Ti_4C_2S_2$ 并存,析出物为TiN,不会生成TiC粒子,其强化机制为TiN粒子的细晶强化作用。

## 参考文献

- [1] 周许,王立新,胡建成,等.提高低合金高强度钢Q345D低温冲击功的工艺研究[J].大型铸锻件,2011,15(1):22-25.
- [2] 许峰云,白秉哲,方鸿生.低合金高强度钢钛微合金化进展[J].金属热处理,2007,32(12):29-33.
- [3] Yi Hai-long, Liu Zhen-yu, Wang Guo-dong, et al. Development of Ti-Microalloyed 600 MPa Hot Rolled High Strength Steel[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2010, 17(12):54-58.
- [4] Mao Xin-ping, Huo Xiang-dong, Sun Xin-jun, et al. Strengthening Mechanisms of a New 700 MPa Hot Rolled Ti-Microalloyed Steel Produced by Compact Strip Production[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210:1660-1666.
- [5] 毛新平.薄板坯连铸连轧微合金化技术[M].北京:冶金工业出版社,2008:67-162.
- [6] 邱克辉,恭迎春,张佩聪,等.科学可持续发展攀枝花钒钛产业[J].钢铁钒钛,2009,30(3):17-20.
- [7] Yan W, Shan Y Y, Yang K. Effect of TiN Inclusions on the Impact Toughness of Low-carbon Microalloyed Steels[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2006, 37(7):2147-2158.
- [8] 周建,康永林,毛新平,等. Ti微合金钢的成分及工艺对显微组织和力学性能的影响[J].钢铁,2006,41(增刊):343-350.
- [9] 王长军,雍岐龙,孙新军,等. Ti和Mn含量对CSP工艺Ti微合金钢析出特征与强化机理的影响[J].金属学报,2011,47(12):1541-1549.
- [10] 刘丽霞,王世俊,周云,等.钛含量对Nb-Ti微合金化Q345A钢热轧板力学性能的影响[J].特殊钢,2007,28(6):61-62.

周家林(1966-),男,硕士,副教授,1988年武汉钢铁学院(本科)毕业,材料成型过程中的数值模拟及新产品和新技术开发研究。E-mail:459813214@qq.com

收稿日期:2013-12-06