

工程机械用 TQ960E 微合金化低碳高强度钢的开发

孟传峰^{1,2} 王一德² 卫英慧¹ 崔天变² 王育田²

(1 太原理工大学材料科学与工程学院, 太原 030024; 2 山西太钢不锈钢股份有限公司技术中心, 太原 030003)

摘要 研究了工程机械用 TQ960E 微合金化低碳高强度钢的化学成分设计、钢质纯净度提升、热处理工艺试验、析出物分析等, 结果表明, TQ960E 钢 12 mm 热轧板 (/%: 0.18C, 0.23Si, 1.50Mn, 0.010P, 0.003S, 0.06Ti, 0.002B, 0.0063N, 0.0013O) 最佳淬火温度 860 ~ 900 °C, 回火温度 300 ~ 350 °C, 工业化试制出的钢板屈服强度 ≥ 1 000 MPa, 抗拉强度 ≥ 1 100 MPa, 延伸率 ≥ 10%, -40 °C 冲击功 ≥ 34 J, 满足国内工程机械用超高强钢的标准及应用要求。

关键词 工程机械 高强钢 微合金化 热处理 力学性能 开发

The Development of Mechanical Engineering of TQ960E Microalloyed High Strength Low Carbon Steel

Meng Chuanfeng^{1,2}, Wang Yide^{1,2}, Wei Yinghui¹, Cui Tianxie² and Wang Yutian²

(1 School of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024; 2 Technology Center, Shanxi Taigang Stainless Steel Co., Ltd., Taiyuan 030003)

Abstract The chemical composition design, steel purity improving, the heat treatment process and precipitates analysis of the The mechanical engineering of TQ960E microalloyed high strength low carbon steel were studied. The results indicate that for the 12 mm hot-rolled plate of steel TQ960E (/%: 0.18C, 0.23Si, 1.50Mn, 0.010P, 0.003S, 0.06Ti, 0.002B, 0.0063N, 0.0013O) the optimum quenching temperature is 860 ~ 900 °C and the tempering temperature is 300 ~ 350 °C. The steel plates were developed and produced by industrialization, with the yield strength no less than 1 000 MPa, the tensile strength above 1 100 MPa, the elongation above 10% or higher and the Charpy impact energy at -40 °C no less than 34 J. The steel can meet domestic standard and application requirements of high strength steel for engineering machinery.

Material Index Mechanical of Engineering, High Strength Steel, Microalloyed, Heat Treatment, Mechanical Properties Development

工程机械用高强钢长期依赖进口, 材料中加入 Cr、Ni、Mo 等贵重合金, 价格高且交货周期长, 制约着国内工程机械企业的快速发展。因此开发国产经济型超高强钢具有十分重要的现实意义。

钛是一种成本廉价的微合金元素, 铁素体型高强钢以 Ti 作为唯一的微合金元素添加到钢中, 能够提高强度且降低成本。但钛的化学活性很大, 易与氧、硫、氮、碳等元素形成化合递增顺序为 TiC-Ti(C,N)-Ti₄C₂S₂-TiN-Ti₂O₃^[1], 影响有效钛的作用^[2], 导致钛微合金化钢的性能不稳定。随着冶金技术的进步, 使含钛钢生产中存在的问题逐步得到解决, 钛微合金化钢的生产已引起人们的重视。钛微合金化在实际生产中也得到广泛的应用^[3-5]。硼处理钢具有较高的淬透性且成本低廉, 由于冶金技术的进步, 硼的高淬透性得以良好控制。

但工程机械用 Ti-B 微合金化 960 MPa 级高强钢 TQ960E 的开发及应用未见报道。

表 1 精炼与连铸工艺参数

Table 1 Refining and continuous casting process parameters

项目	参数
冶炼炉型	顶底复吹转炉
钢水容量/t	180
精炼方式	LF 精炼 + RH 真空处理
精炼渣成分/%	58CaO-25Al ₂ O ₃ -6SiO ₂
连铸坯断面尺寸/(mm × mm)	220 × 1 500
连铸保护浇注	氩封保护, 长水口
二冷水量	强冷

1 TQ960E 试样制备及实验方法

1.1 生产流程

TQ960E 高强度钢板生产流程为: 180 t 转炉 → LF 精炼 → RH 真空处理 → 220 mm 厚坯连铸 → 2 250 mm 轧机轧制 → 层流冷却 → 卷取 → 横切 → 钢板淬火 + 低温回火 → 性能检测。精炼与连铸主要工艺参数见表 1。

1.2 化学成分设计

(1) 碳。碳是钢铁材料中主要合金元素,主要作用如下:一是形成固溶体,提高钢的强度;二是耐磨性、淬透性提高,但钢的塑性、韧性、焊接性能、耐腐蚀性能降低。TQ960E 超高强钢中碳含量控制在 0.16% ~ 0.20%。

(2) 锰。锰在钢中具有较强的固溶强化,但锰含量的提高会降低钢的焊接性能,为了综合改善强韧性并兼顾焊接性能,TQ960E 高强钢中锰含量控制在 1.30% ~ 1.60%。

(3) 钛。钢中 TiC 的析出强化、Ti₂O₃ 诱导晶内铁素体形核细化晶粒、Ti₂O₃ 阻止奥氏体晶粒长大提高焊接性能、变形硫化物提高横向韧性。但考虑到钛含量偏高,铸坯易开裂,综合考虑 Ti 含量控制在 0.04% ~ 0.08%。

(4) 硼。微量硼极大提高钢的淬透性,硼含量在 0.001% ~ 0.003% 最优。

TQ960E 高强钢的化学成分设计见表 2。

2 钢质纯净度控制

连铸中间包熔炼分析成分如表 3。

表 2 试验钢化学成分/%

Table 2 Chemical composition of test steel / %

C	Si	P	S	Mn	Ti	B
0.16 ~ 0.20	0.17 ~ 0.27	≤ 0.015	≤ 0.005	1.30 ~ 1.60	0.04 ~ 0.08	0.001 ~ 0.003

表 3 试验 TQ960E 钢中间包钢水化学成分和气体含量/%
Table 3 Chemical composition and gas content in liquid of test steel TQ960E in tundish / %

C	Si	P	S	Mn	Ti	B	N	O
0.18	0.22	0.010	0.003	1.48	0.048	0.002	0.006 0	0.001 2

试制前期主要存在 B 类非金属夹杂物 3 级,带状组织 3 级,影响钢板的最终力学性能,特别是低温冲击功数值偏低。

(1) 热轧钢板 B 类夹杂物超标检测分析。对热轧钢板夹杂物的形貌和成分进行了电镜分析。点状夹杂物主要含 Ti、N 元素,点状夹杂物的形貌和成分见图 1。

(2) 氮化钛大颗粒析出控制。氮化钛如在凝固初期析出弥散细小的颗粒,作为 δ 铁素体形核核心从而起到细化晶粒的作用;但如冷却速率不当,易形成大型氮化钛类型的夹杂物,破坏钢的基体的连续性。

凝固过程钛、氮偏析的情况和实际浓度积的计算方法如下。

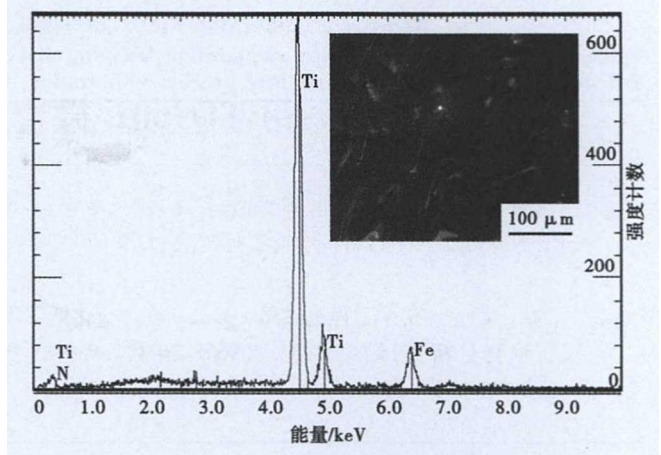


图 1 TQ960E 钢 12 mm 热轧板夹杂物的形貌和成分
Fig. 1 Morphology and analysis of inclusions in 12 mm hot-rolled plate of steel TQ960E

$$\begin{aligned}
 [Ti] &= [Ti]_0 (1 - f_s)^{k_{Ti} - 1} \\
 [N] &= [N]_0 / f_s (K_N - 1) + 1 \\
 Q &= [Ti] [N] \\
 TiN &= [Ti] + [N] \\
 K &= 10^{(-17.040/T + 6.40)}
 \end{aligned}$$

式中:[Ti],[N]-凝固过程中凝固前沿液相中的钛、氮含量;[Ti]₀,[N]₀-液相中初始钛、氮含量;f_s-固相率;k_{Ti}-钛的平衡溶质分配因数;K_N-氮的平衡溶质分配因数;Q-钛和氮的实际浓度积。K-凝固过程中钛和氮平衡浓度积;T-凝固过程中液相线温度。

通过计算得出的结论为:随着初始氮含量增加,TiN 的开始析出提前,随着过冷度的增加,TiN 的析出明显提前进行。析出提前进行有利于获得细小弥散的颗粒,有利于铸坯获得细晶粒。

但由于氧和钛的结合能力大于氮,必须将钢液中溶解氧控制在极低的水平,抑制氧化钛的析出。要使凝固过程中最大限度的析出 TiN,必须将钢中的溶解氧含量控制在 3 × 10⁻⁶ ~ 5 × 10⁻⁶。

综上所述,要使氮化钛在洁净钢凝固初期析出,从而达到细化凝固组织目的,工艺上要做到较高的氮含量;合理的钛含量;极低的溶解氧含量;较大的过冷度;采取强冷措施。

(3) 带状组织控制分析。带状组织形成原因:钢坯固有的枝晶偏析在轧制延伸过程中,沿轧制方向平行排列、呈层状分布、形成条带的铁素体晶粒与珠光体晶粒交替排列的组织,称为带状组织。带状组织的存在使钢的组织分布不均匀,影响钢材的力学性能。

表 4 工艺优化前后化学成分、精炼渣成分、技术参数,夹杂物级别和带状组织对比

Table 4 Comparison of chemical composition, refining slag composition, technical parameters, rating of inclusion and banded structure between before and after process optimization

工艺	化学成分/%								精炼渣成分/%	技术参数	规格/mm	B类夹杂物/级	带状组织/级
	C	Mn	Si	Ti	P	S	B	O					
优化前	0.16 ~ 0.20	1.30 ~ 1.60	0.17 ~ 0.27	0.04 ~ 0.08	≤ 0.015	≤ 0.003	0.001 ~ 0.003	≤ 0.002 0	58CaO-25Al ₂ O ₃ -6SiO ₂	(1) LF 精炼 T[O] ≤ 30 × 10 ⁻⁶ ; (2) LF 喂硅钙线后软搅拌时间 5 min; (3) 中间包钢水温度 (1539 ± 5) °C。	12 30	3 1	3 3
优化后	0.18 ~ 0.20	1.40 ~ 1.60	0.17 ~ 0.27	0.04 ~ 0.06	≤ 0.015	≤ 0.003	0.002 ~ 0.003	≤ 0.001 5	58CaO-25Al ₂ O ₃ -6SiO ₂	(1) LF 精炼 T[O] ≤ 20 × 10 ⁻⁶ ; (2) LF 喂硅钙线后软搅拌 7 min; (3) 中间包钢水温度 (1534 ± 5) °C。	12 30	0 0	2 2

如果连铸的浇注温度较高,在浇注末期,锰、硅元素就容易沿连铸坯粗大柱状晶到中心等轴晶的枝晶间区域位置形成偏析。应采取控制钢水的过热,使用轻压下等措施。以减轻铸坯的中心偏析缺陷。

(4) 生产工艺优化。工艺改进前后的化学成分、精炼渣成分、技术参数见表 4。

(5) 实验效果。工艺改进前后的夹杂物、带状组织对比见表 4。

3 实验室热处理工艺试验

从 12 mm 厚热轧卷板上取样进行化学成分分析,具体检测值为(%) : 0.18C, 0.23Si, 0.010P, 0.003S, 1.50Mn, 0.06Ti, 0.002B, 0.006 3N, 0.001 3O。

从 12 mm 厚热轧卷板上切取横向拉伸和纵向冲击试样,在实验室电加热炉中进行加热、保温,淬火介质为水,回火为空冷。热处理后的试样加工成 50 mm × 335 mm;冲击韧性实验采用标准夏比 V 型缺口冲击试验方法,加工成(mm) 10 × 10 × 55 规格,

然后在室温下进行实验。

采用 Axiovert 25 CA (Zeiss) 金相显微镜和 HITACHI-SU1500 扫描电子显微镜观察不同热处理的金相组织。析出物形貌在 JEM-2100 透射电子显微镜下观察。

(1) 淬火温度对性能和组织的影响。淬火试验工艺: 750、800、850、900 °C 保温 30 min, 水冷 + 300 °C 保温 1 h, 空冷。

由图 2 可知,随着淬火温度提高,强度提高、伸长率、冲击功降低。

由图 3 可知,随着淬火温度的提高,铁素体比例减少,直至消失。淬火温度选择 860 ~ 900 °C。

(2) 回火温度对力学性能和组织的影响。回火试验工艺: 850 °C 保温 30 min, 水冷 + 200 °C、240 °C、300 °C、400 °C 保温 1 h, 空冷。

由图 4 可知,随着回火温度的提高,强度降低,伸长率在 400 °C 呈下降趋势,冲击功变化不太明显。

由图 5 可知,随着回火温度的升高,组织变化不

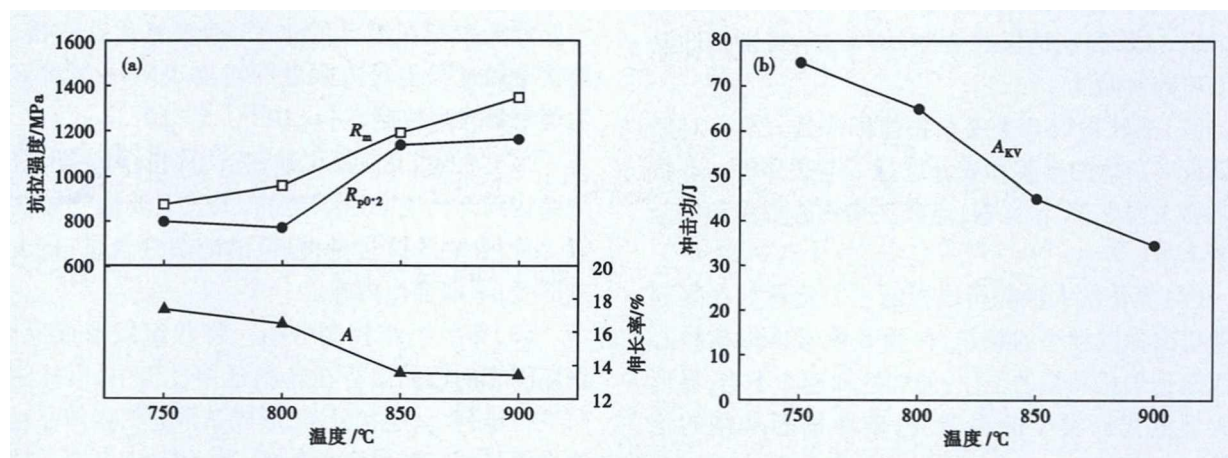


图 2 淬火温度对 TQ960E 钢(a)强度及伸长率(b)冲击功的影响,300 °C 回火

Fig. 2 Effect of quench temperature on (a) tensile strength and elongation and (b) impact energy of steel TQ960E, tempered at 300 °C

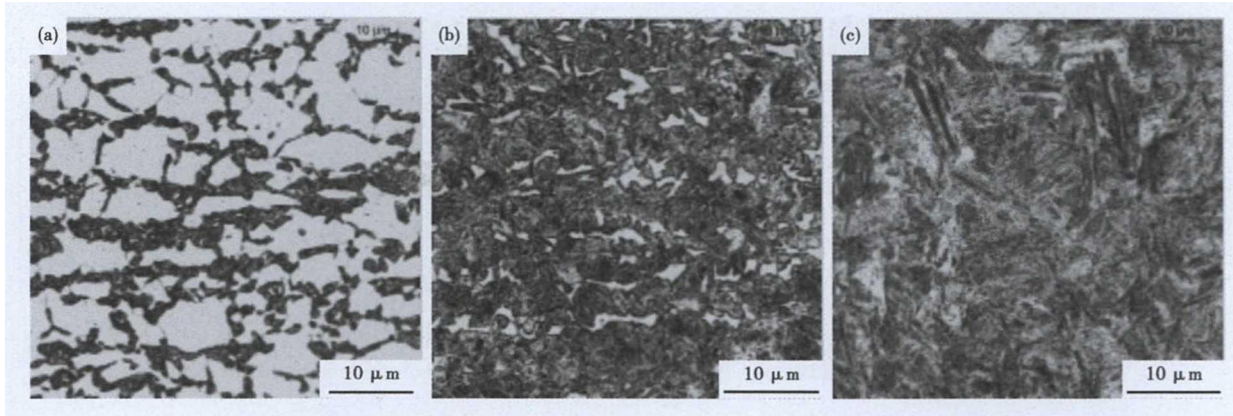


图3 淬火温度(a) 750℃; (b) 850℃; (c) 900℃对 TQ960E 钢组织的影响

Fig.3 Effect of quench temperature (a) 750℃; (b) 850℃; (c) 900℃ on structure of steel TQ960E

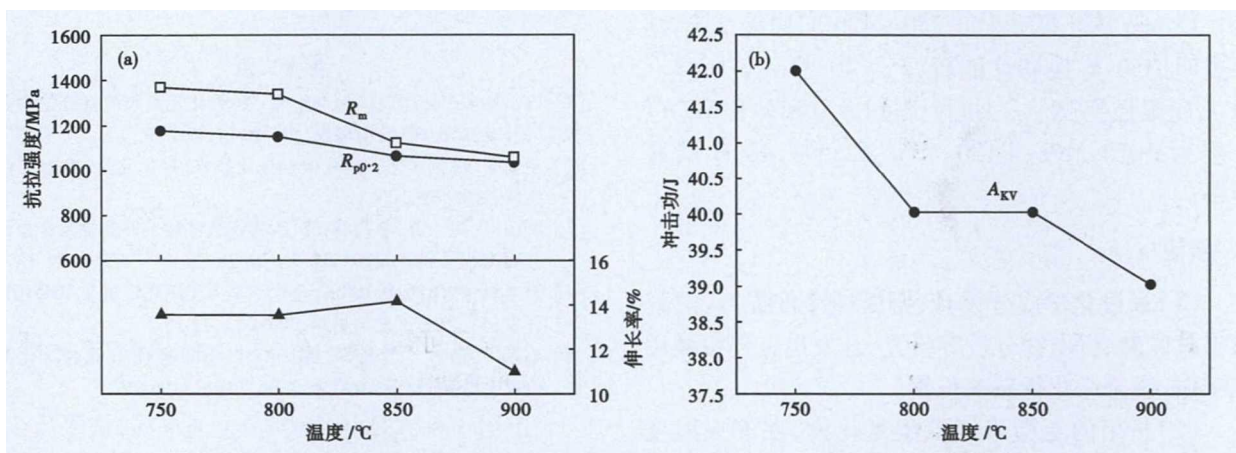


图4 回火温度对 TQ960E 钢(a) 抗拉强度及伸长率和(b) 冲击功的影响, 850℃ 淬火

Fig.4 Effect of temper temperature on (a) tensile strength and elongation and (b) impact energy of steel TQ960E, quenched at 850℃

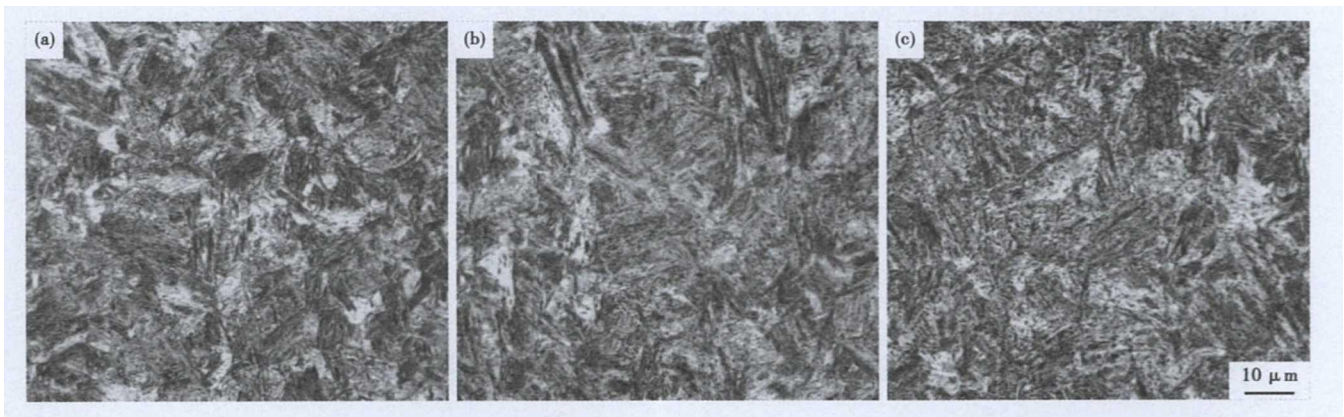


图5 回火温度(a) 240℃; (b) 300℃; (c) 400℃对 TQ960E 钢组织的影响, 850℃ 淬火

Fig.5 Effect of temper temperature (a) 240℃; (b) 300℃; (c) 400℃ on structure of steel TQ960E, quenched at 850℃

太明显, 回火温度选择 300 ~ 350℃。

(3) 最佳热处理工艺选择。淬火温度 860 ~ 900℃, 回火温度 300 ~ 350℃, 强韧性匹配良好。

4 试验结果

4.1 析出物分析

钢板热处理工艺采用 900℃ 淬火 + 350℃ 回火试样进行透射电镜检测分析, 亚微米级碳氮化物, 其作用为淬火温度范围内, 亚微米级碳氮化物有热稳定性良好; 有效钉轧奥氏体晶粒长大; 纳米级碳氮化物, 其作用是回火温度范围内, 纳米碳氮化物析出;

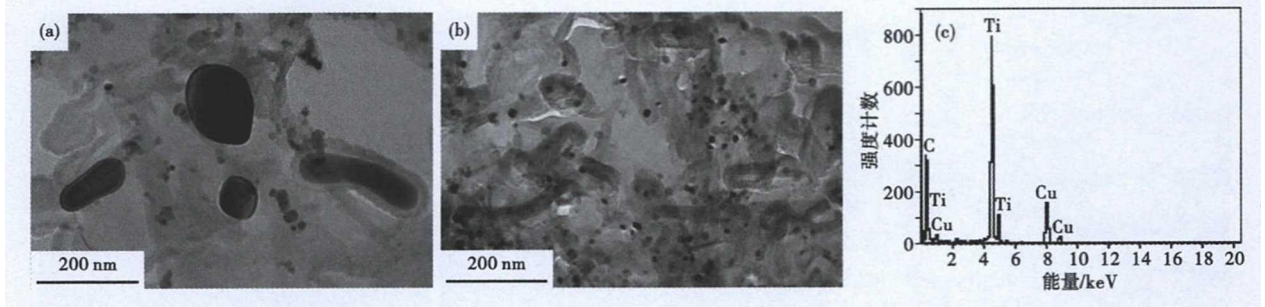


图 6 实验钢析出的碳氮化物形貌(a)(b)及能谱分析(c)
 Fig. 6 Morphology (a)(b) and energy spectrum analysis (c) of carbo-nitride precipitates in test steels

平均尺寸约 10 nm, 体积分数约 2.8%。

4.2 工业化试制性能数据

12 mm 热轧板大生产 250 ~ 400 °C 回火试验, 结果表明, 350 °C 强韧性较好, -40 °C A_{KV} 为 48 ~ 53 J, 屈服强度($R_{p0.2}$)、抗拉强度(R_m)和伸长率(A)分别为 1 070 MPa、1 130 MPa、12.5%, 冷弯试验合格。

5 结论

(1) 通过化学成分设计、钢质纯净度提升、热处理工艺试验、析出物分析等研究, 开发出工程机械用 TQ960E 微合金化低碳高强钢。

(2) 析出的亚微米级钛碳氮化物, 在淬火温度范围内具有热稳定性, 有效钉轧奥氏体晶粒长大; 纳米级碳氮化物在回火温度范围析出, 平均尺寸约 10 nm, 体积分数约 2.8%。

(3) 实验室摸索出最佳钢板淬火温度 860 ~ 900 °C, 回火温度 300 ~ 350 °C, 工业化试制出的钢板屈服强度 $\geq 1\ 000$ MPa, 抗拉强度 $\geq 1\ 100$ MPa, 伸长率

$\geq 10\%$, -40 °C $A_{KV} \geq 34$ J, 满足工程机械用超高强钢的标准和应用要求。

参考文献

- [1] Lutz Meyer. 钛在低碳钢中作为一种强化元素和控制硫化物元素[J]. 徐新华译. 宝钢情报, 1989(s): 149-158.
- [2] 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: 69, 100.
- [3] 魏向东, 关勇, 李劲羽, 等. 改善钢板冷加工性能的微合金化工艺研究[J]. 钢铁, 2002, 37(1): 28-38.
- [4] 万兰凤, 冷祥贵. 铌钛微合金化汽车大梁用热轧板带 BMS10L 的开发[J]. 汽车工艺与材料, 2005(4): 12-15.
- [5] 毛新平, 陈学文, 李烈军, 等. EAF-LF-CSP 流程 Ti 微合金化钢炼钢工艺研究[J]. 河南冶金, 2006, 14(S1): 96-99.

孟传峰(1972-), 男, 博士研究生(2018年太原理工大学), 高级工程师, 太原理工大学(本科)毕业, 高强度钢研究。
 E-mail: mengcf@163.com.cn

收稿日期: 2018-06-12

欢迎全国冶金、机械、耐材及相关
行业在《特殊钢》杂志上刊登工艺设备
和技术、产品研发宣传广告