

· 工艺材料进展 ·

100 t EAF-LF-CC-CR 流程节能冷镦钢的开发

麻 晗 峰公雄

(沙钢钢铁研究院, 张家港 215625)

摘 要 介绍了沙钢 100 t EAF-LF-150 mm × 150 mm CC-CR 流程生产的免球化退火硼钢、省略球化退火和调质处理工艺的冷作硬化非调质钢、在线软化冷镦钢和超高强度紧固件用钢等节能冷镦钢新产品的进展。文中对各钢种的组织、力学性能、淬透性、冷镦性能进行了分析,用户对节能冷镦钢的使用效果良好。

关键词 100 t EAF-LF-CC-CR 流程 冷镦钢 开发

Development of Energy Saving Cold Heading Steels by 100 t EAF-LF-CC-CR Flow Sheet

Ma Han and Mine Kimio

(Institute of Research of Iron and Steel, Shasteel, Zhangjiagang, 215625)

Abstract The progress of new products of energy saving cold heading steels including spheroidizing-annealing-free boron-bearing steels, cold working hardening non-quenched and tempered steels avoiding spheroidizing-annealing and dispensing with quenching and tempering process, online-softening cold heading steels and ultra-high strength steels for lock bolts etc produced by 100 t EAF-LF-150 mm × 150 mm CC-CR process flow sheet at Shasteel is presented. The structure, mechanical properties, hardenability and cold-heading performance of each developed steel grade are analyzed in this article. The application effect of energy-saving cold heading steels at users is well.

Material Index 100 t EAF-LF-CC-CR Flow Sheet, Cold Heading Steels, Development

与传统冷镦钢相比,高强度冷镦钢可节省材料 20% 以上;非调质钢和免退火钢可为下游客户减少热处理成本,减少能源消耗和碳排放^[1-4]。

钢铁行业能耗约占全国总能耗的 16%,CO₂ 排放的 12%^[5]。在钢铁生产过程中,高炉炼铁消耗了 80% 以上的能源,排放了 90% 以上的 CO₂^[6]。电弧炉炼钢主要以废钢为原料,高炉铁水用量少于 40%,与转炉流程相比可以减少 50% 的 CO₂ 排放。据估算,沙钢电弧炉流程每吨钢可节能 300 kg 标准煤,减少 CO₂ 排放 1.2 t 以上。

多年来,沙钢一直致力于研究冷镦钢的电弧炉短流程生产技术,相继解决了小方坯表面质量、中心偏析、夹杂物控制等核心问题^[7]。目前的主要生产工艺为:100 t 电弧炉(EAF)→100 t LF 精炼→6 机 6 流连铸 150 mm × 150 mm 小方坯→(方坯检测、修磨)→高线无扭控轧→减定径机组→大盘卷控制冷却。

为确保冷镦钢质量,在电弧炉炼钢方面,选用优质废钢,降低杂质元素含量;采用热装铁水工艺,加强泡沫渣操作,减少电弧引起的增氮;严禁出钢大量下渣,出钢时加铝,以确保生成的脱氧产物在精炼过程中充分上浮;严格规范精炼操作,精炼终渣碱度控制在 2.0 ~ 2.5,白渣时间 ≥ 15 min。连铸过程中,加

强钢包、中间包、结晶器连接部分的密封,严格保护浇铸,防止吸氮和二次氧化;连铸过程中适当提高过热度,以减少大型夹杂物;稳定拉速和过热度,并根据拉速和过热度匹配冷却水量,调节电磁搅拌位置,以减少连铸坯表面缺陷和中心偏析。轧钢过程中,定期检查轧辊质量和更换轧辊,严格确保轧线对中,防止线材划伤;通过控轧控冷得到设计组织。此外对部分高级别钢种,还要采取铁水预脱硫以降低硫含量、采用真空精炼以降低氢和氮含量、采用方坯精整进一步提高表面质量。最近几年,沙钢相继开发出了一批高端冷镦钢产品。

1 免球化退火硼钢的开发

钢材冷却时,在析出先共析铁素体之前,硼元素发生晶界偏聚或析出 M₂₃(B, N)₆ 化合物,降低界面能,抑制铁素体形核,从而提高淬透性^[8]。另一方面,加硼还可降低碳含量,使盘条软化,省略拉拔前的球化退火,降低使用成本,实现节能减排^[9]。

生产硼钢时,采用严格的控轧控冷工艺,精轧温度控制在 (920 ± 10) °C,集卷温度控制在 (870 ± 5) °C,相变之前采取快冷,在 650 ~ 720 °C 的相变温度范围内延长保温时间,从而增加铁素体含量,增大

珠光体片层间距,以降低盘条强度,提高材料的冷变形能力。

1.1 SAE 10B21 含硼冷镦钢

按 SAE-J403 标准研发的 SAE 10B21 含硼冷镦

钢(表 1)主要用于 8.8 级高强度紧固件。加入少量 Ti 以固定钢中的自由 N、确保自由 B 含量,为进一步增加淬透性,Φ20 mm 以上大规格盘条中添加 0.2% 左右的 Cr。

表 1 SAE 10B21 钢化学成分 / %
Table 1 Chemical composition of SAE steel 10B21 / %

项目	C	Si	Mn	P	S	B	Ti	Al	Cr	O	N
标准	0.18~0.23	≤0.10	0.60~0.90	≤0.030	≤0.050	0.000 5~0.003 0	-	-	-	-	-
实际	0.19~0.23	≤0.10	0.70~0.90	≤0.015	≤0.010	0.001~0.003	≤0.04	0.03	≤0.30	≤0.003	≤0.006

图 1(a) 是 Φ24 mm SAE 10B21 热轧盘条的金相组织照片,铁素体含量约为 75%,硬度 73HRB,盘条屈服强度 315 MPa,抗拉强度 500 MPa,断面收缩率 60%,伸长率 27%。而一般 8.8 级免球化退火冷镦钢热轧盘条的硬度为 75HRB,抗拉强度 568 MPa。

Grossmann 淬透性试验结果表明,880 ℃ 60 min,水淬,Φ26 mm 以下样品已完全淬透。

Φ30 mm 样品未完全淬透,心部和边缘的硬度差超过 4HRC。由此可以判断,沙钢生产的 SAE 10B21 钢的临界淬透直径为 Φ26 mm,而普通 8.8 级冷镦钢盘条的临界淬透直径 ≤16 mm。Φ25 mm × 100 mm 试样 880 ℃ 1 h,水冷末端淬透性检测结果表明完全符合要求。随后对盘条进行 460 ℃ 1 h 的回火处理。屈服强度为 930 MPa,抗拉强度 1 000 MPa,断面收缩率 66%,伸长率 16%,室温冲击功为 174 J。对原始盘条进行的冷镦试验表明,其中 20 个 1/4 冷镦样品均未发生开裂。

1.2 SWRCHB323

SWRCHB323 硼钢用于制造 8.8、9.8 级紧固件,沙钢开发 B323 钢的目标是替代以 35K 钢为代表的传统 8.8 级冷镦钢,其化学成分如表 2 所示。可见其碳含量明显低于 35K 钢,B 含量控制在 0.001%~0.003%,加入少量 Ti 以固定钢中的自由

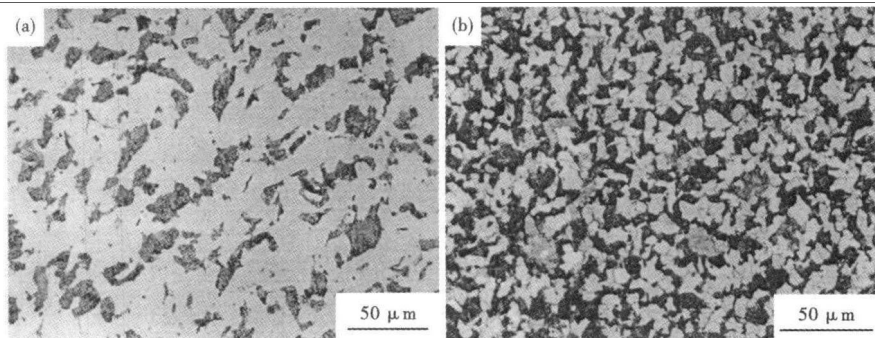


图 1 冷镦钢盘条组织形貌:(a)Φ24 mm,含硼钢 10B21;(b)Φ12 mm,非调质钢 SGNCH8
Fig. 1 Morphology of structure of cold heading steel coil: (a) Φ24 mm, boron-bearing steel 10B21; (b) Φ12 mm, non-tempered and tempered steel SGNCH8

N、确保自由 B 含量和淬透性,Ti 与 N 的质量比略高于 TiN 的化学计量比,一般控制在 3.5 以上,考虑到 N 含量通常在 $(40 \sim 70) \times 10^{-6}$,因此 Ti 含量控制在 0.02%~0.04%。为了进一步提高淬透性,SWRCHB323 中的 Mn 含量也相应有所提高。

对直径 24、26、28 mm 热轧盘条进行 870 ℃ 45 min 水冷的 Grossmann 淬透性试验,结果表明,Φ26 mm 以下样品已完全淬透;Φ28 mm 样品未完全淬透,心部和边缘的硬度差值超过 7HRC。由此可以判断,沙钢 10B21 钢的临界淬透直径为 26 mm,远超过 35K 钢。

B323 盘条的抗拉强度、断面收缩率和硬度分别为 525 MPa、62.5% 和 76HRB,而 35K 盘条的抗拉强度、断面收缩率和硬度分别为 595 MPa、50.0% 和 85HRB,可见与传统 8.8 级冷镦钢相比,B323 盘条具有强度低、塑性好、硬度低的优点。B323 盘条

表 2 SWRCHB323 和 SWRCH35K 钢的化学成分和气体含量
Table 2 Chemical composition and gas content of steel SWRCHB323 and SWRCH35K

钢种	化学成分 / %								气体 / 10^{-6}	
	C	Si	Mn	P	S	Al	Ti	B	O	N
SWRCHB323	0.24	0.16	0.84	0.011	0.006	≤0.04	≤0.04	0.001 0~0.003 0	16	57
SWRCH35K	0.35	0.15	0.75	≤0.020	≤0.015	≤0.04	-	-	≤30	≤70

870 ℃ 45 min 淬火, 450 ℃ 90 min 回火调质后产品性能如表 3 所示, 各项检测结果均完全满足国标对 8.8 级紧固件的要求。

试制结果表明 B323 盘条完全满足 8.8 级螺栓的生产和性能要求, 而且可省略拉拔前的球化退火, 不增加模具消耗, 降低使用成本, 减少污染。

2 冷作硬化非调质钢

非调质钢具有以下优点: (1) 使用中可省略球化退火和调质处理工序, 提高材料利用率; (2) 无热处理变形; (3) 尺寸效应不敏感, 硬度分布比较均匀; (4) 非调质冷锻钢制作的紧固件的屈强比高, 在服役过程中不容易出现滑扣、变形等质量问题; (5) 非调质钢的耐延迟断裂和抗氢脆能力也优于调质钢^[10-15]。

8.8 级和 9.8 级螺栓用非调质冷锻钢均为铁素体 + 珠光体组织。沙钢 8.8 级冷作强化非调质钢 SGNCH8 的成分控制范围如表 4 所示。该成分的特色是主要使用 Mn、Cr 等常规元素, 利用 C、Mn 的固溶强化提高强度, 通过 Cr₃C₂、AlN 等颗粒进行沉淀强化和细晶强化, 限制 Si 含量以保持铁素体的塑性和材料的冷变形能力, 该成分的设计思想是在保证性能的条件下降低成本。

为准确进行组织控制, 在配备 Stelmor 风冷线的高线车间进行了轧制生产, 采用了较高的加热温度以确保合金元素充分溶解, 采用较低的空燃比防止脱碳, 降低精轧温度以细化奥氏体晶粒, 降低吐丝温度以提高强度。SGNCH8 热轧盘条的微观组织如图 1(b) 所示, 是典型的铁素体 + 珠光体组织, 其中铁素体含量约 45%, 铁素体平均晶粒尺寸 5 ~ 7 μm, ASTM 晶粒度级别为 11 ~ 12 级。盘条的力学性能检测结果如表 5 所示。

每个拉拔道次的烘烤条件均为 400 ℃ 30 min, 在拉拔过程中, 若不烘烤, 随着断面缩减率 (γ) 的增加, 抗拉强度 (TS) 逐渐提高。断面缩减率在 30% 左右时鲍辛格效应最佳, 可以有效地减小冷变形抗力, 减少模具消耗^[16]。从图 2 可知, 在断面缩减率 30% 左右时也可以得到较好

表 3 调质处理后 B323 钢的力学性能

Table 3 Mechanical properties of steel B323 quenched and tempered

直径/ mm	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	断面收缩率/ %	伸长率/ %	硬度值 (HRC)	冲击功/J	
						-25 ℃	-50 ℃
20	897	929	70.5	18.0	29.5	195	189
GB/T3098.1-2000	-	>830	>52	-	23~34	>30	

表 4 SGNCH8 钢的化学成分

Table 4 Chemical composition of steel SGNCH8

化学成分/%					气体/10 ⁻⁶	
C	Si	Mn	Cr	Al	O	N
0.20 ~ 0.30	<0.10	1.5 ~ 1.8	0.5 ~ 0.7	0.02 ~ 0.05	<30	<70

表 5 非调质冷锻钢 SGNCH8 热轧盘条的力学性能

Table 5 Mechanical properties of hot rolled coil of non-quenched and tempered cold heading steel SGNCH8

直径/ mm	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	断面收缩 率/%	屈强比	硬度值 (HRB)
12	420 ~ 440	686 ~ 702	60 ~ 67	0.59 ~ 0.62	93 ~ 98
13	420 ~ 440	675 ~ 740	60 ~ 66	0.59 ~ 0.62	92 ~ 98

的综合力学性能, 烘烤后抗拉强度可提高 60 MPa 左右, 伸长率可提高 7% 左右, 同时, 烘烤过程还能起到消除可动位错、减少永久伸长的作用。以上实验结果可得, 8.8 级非调质冷锻钢的最佳拉拔断面缩减率在 20% ~ 30%, 烘烤制度为 400 ℃ 30 min。

对 Φ12 mm SGNCH8 热轧盘条进行了冷锻试验, 绝大部分盘条样品经冷锻后未发生开裂, 1/3 冷锻完好率在 95% 以上, 1/2 冷锻完好率为 100%。拉拔减径 18% (Φ12 mm 至 Φ10.9 mm) 后经过 1/4 冷锻的 8 个样品均保持完好。

Φ12 mm SGNCH8 热轧盘条在标准件厂经“机械剥壳→拉拔减径→搓丝→低温烘烤处理”, 制造 M12 的牙条, 生产过程顺利, 原料完全能够满足牙条

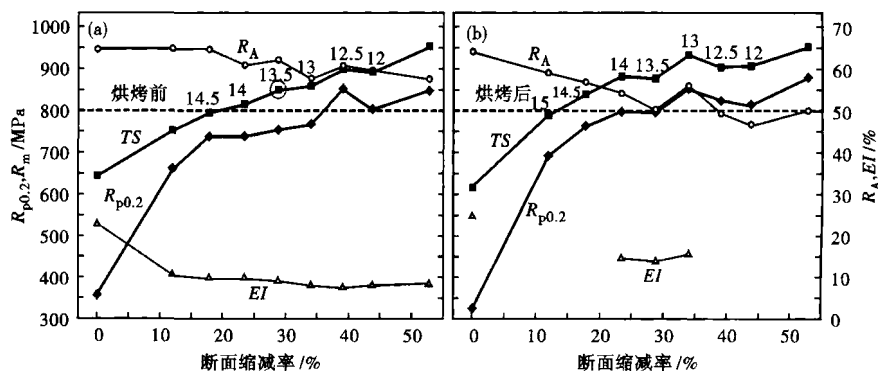


图 2 SGNCH8 钢盘条冷拉变形量对力学性能影响: (a) 烘烤前; (b) 烘烤后

Fig. 2 Effect of cold drawing deformation of coil on mechanical properties of steel SGNCH8: (a) before baking; (b) after baking

表6 $\Phi 12$ mm SGNCH8 钢盘条生产 8.8 级 M12 牙条的力学性能

Table 6 Mechanical properties of 8.8 grade M12 thread rod manufactured by $\Phi 12$ mm coil of steel SGNCH8

SGNCH8	抗拉强度/ MPa	屈服强度/ MPa	伸长率/ %	断面收缩 率/%	屈强比
M12	830 ~ 870	751 ~ 791	13 ~ 16	58 ~ 62	0.89 ~ 0.91

制造过程的要求。最终成品 M12 牙条的力学性能检测结果如表 6 所示,屈服强度、抗拉强度分别为 750、830 MPa 以上,屈强比 0.9。沿横截面直径上硬度为 24 ~ 26HRC,波动范围 ≤ 3 HRC。

3 在线软化冷镦钢

紧固件用户在使用高强度冷镦钢之前通常要进行 5 ~ 30 h 的球化退火,中碳钢为 720 $^{\circ}\text{C}$,合金钢为 780 $^{\circ}\text{C}$,该过程需要消耗大量能源,增加环境负担,还容易引起表面脱碳、氧化等问题,降低成材率与合格率。热轧盘条在线软化是解决该问题的有效方法,其基本原理是利用高温盘条自身的热量,延长相变温度区间的保温时间,促使片状珠光体发生球化和 Ostwald 长大,从而降低材料硬度,提高冷加工性能^[17,18]。

沙钢大盘卷车间在工艺控制方面,主要措施是降低精轧温度和吐丝温度,提高相变前冷却速度,延长相变时间。图 3 给出了在线软化前后 SWRCH35K 冷镦钢热轧盘条的组织变化情况,在线软化后,珠光体组织发生了不同程度的变化,珠光体团与铁素体的界面变得模糊,表明部分渗碳体发生了溶解,许多渗碳体片层发生断裂、球化,如图 3(b)

中插图所示。

拉伸试验结果表明,在线软化后盘条强度降低了 25 MPa,由软化前的 596 MPa 降至软化后的 571 MPa,断面收缩率提高了 7%,由 42% 增至 49%,HRB 硬度值降低了 3,由 88 降至 85,1/3 冷镦合格率从 70% 提高到 85% 以上,软化效果明显。

4 超高强度紧固件用钢

12.9 级以上超高强度冷镦钢设计过程中必须考虑耐延迟断裂性能,主要通过添加 Ti、Cr、Mo、V、Nb、Al 等元素形成细小的碳氮化物颗粒,这些颗粒可以起到氢陷阱作用,降低钢中的可扩散氢浓度,防止固溶氢聚集形成氢分子,从而抑制氢脆^[19-21];另一方面,这些小颗粒还可以起到钉扎晶界、细化晶粒的作用,减少 P、S 等元素在晶界的偏聚,防止在晶界上形成连续的碳化物薄膜;此外,Mo 在回火过程中的析出物还可起到提高强度的作用,这些都有利于提高耐延迟断裂性能^[22]。沙钢 SCM435 的化学成分如表 7 所示。

通过 Gleeble 3800 热模拟实验测定了沙钢

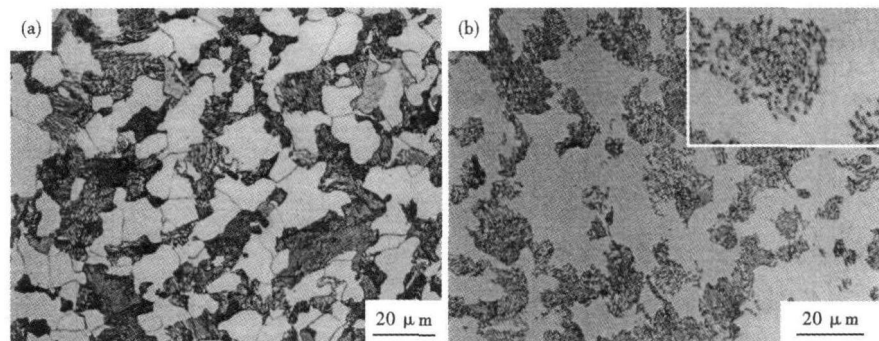


图3 SWRCH35K 钢热轧盘条的组织形貌:(a)在线软化前;(b)在线软化后

Fig. 3 Morphology of structure of steel SWRCH35K hot rolled coil: (a) before in-line softening; (b) after in-line softening

表7 SCM435 钢化学成分/%

Table 7 Chemical composition of steel SCM435 / %

项目	C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Mo
沙钢	0.36	0.17	0.68	0.008	0.003	0.03	0.97	0.18
JIS G 3509-1: 2003 标准	0.33 ~ 0.38	0.15 ~ 0.35	0.60 ~ 0.90	≤ 0.030	≤ 0.030	-	0.90 ~ 1.20	0.15 ~ 0.30

SCM435 的 CCT 曲线,如图 4 所示,图 4 中 F、P、B 和 M 分别表示铁素体、珠光体、贝氏体和马氏体。现场的冷却速率通常在 0.30 K/s 左右,根据 CCT 曲线判断,所得组织应为铁素体 + 珠光体 + 贝氏体的混合组织。

图 5(a) SCM435 冷镦钢热轧盘条的组织为铁素

体 + 珠光体 + 贝氏体,三者比例分别为 30%、30%、40%。对原始盘条样品进行了退火,条件为 780 $^{\circ}\text{C}$ 5 h \rightarrow 炉冷至 650 $^{\circ}\text{C}$ \rightarrow 空冷至室温,退火后材料组织发生明显变化,贝氏体转变为珠光体,许多珠光体发生球化,如图 5(b) 所示。退火前,盘条的抗拉强度、断面收缩率、硬度分别为 857 MPa、45%、102HRB,

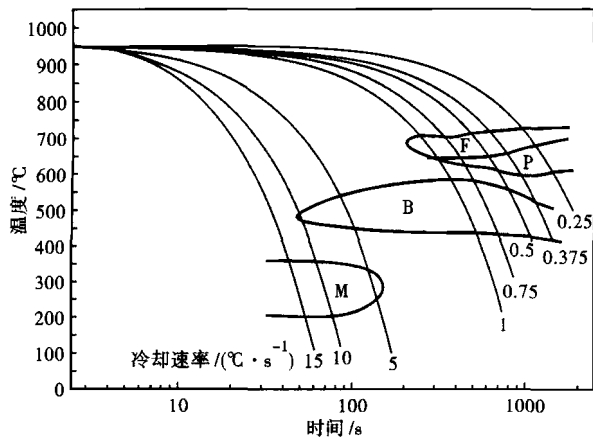


图 4 SCM435 钢连续冷却转变 (CCT) 曲线

Fig. 4 Continuous cooling transformation (CCT) curves of steel SCM435

退火后材料硬度下降到 80HRB, 1/3 冷锻钢合格率接近 100%。

6 结论

(1) 沙钢 8.8 级含硼冷锻钢 10B21 和 B323 的抗拉强度比 35K 低 70 ~ 100 MPa, 冷变形性能优异, 可省略拉拔前的球化退火工艺, 材料的完全淬透直径可达 Φ26 mm, 成品抗拉强度超过 920 MPa, 各项性能满足 8.8 级紧固件要求。

(2) 沙钢 8.8 级冷作硬化非调质钢使用过程可省略球化退火和调质处理工艺, 成品压条完全满足

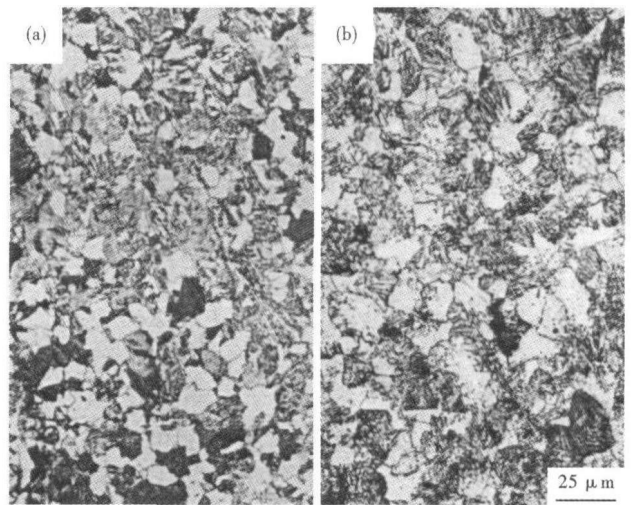


图 5 SCM435 钢盘条的组织形貌: (a) 热轧态; (b) 退火态

Fig. 5 Morphology of structure of steel SCM435 coil: (a) as-hot-rolled; (b) as-tempered

8.8 级紧固件要求。

(3) 通过在线软化, 高强度冷锻钢盘条中渗碳体发生了球化和长大, 抗拉强度降低了 25 MPa, 可减免下游客户的球化退火工艺。

(4) 成功开发出 12.9 级冷锻钢 SCM435, 调质处理后各项指标完全满足 12.9 级螺栓的要求。

(5) 采用短流程工艺生产冷锻钢盘条, 每吨钢可节能 300 kg 标准煤, 减少 CO₂ 排放 1.2 t 以上, 具有显著的节能减排效果。

参考文献

- 木田慶一. 21 世紀の線材・棒鋼を考えろ, R&D. 神戸製鋼技報, 2000, 50(1): 2
- 惠卫军, 翁宇庆, 董瀚. 高强度紧固件用钢. 北京: 冶金工业出版社, 2009
- 戴宝昌. 重要用途线材制品生产新技术. 北京: 冶金工业出版社, 2001
- 徐效谦, 阴绍芬. 特殊钢钢丝. 北京: 冶金工业出版社, 2005
- 娄湖山. 钢铁工业节能减排的历史重任. 冶金能源, 2009, 28(4): 3
- 王维兴. 科学评价中国钢铁工业能耗现状与国内外对标. 四川冶金, 2009, 31(4): 1
- 方峰, 蒋建清, 陈少慧, 等. 小方坯连铸连轧生产 1860 MPa 级 PC 钢绞线用高碳热轧盘条的研究. 钢铁, 2004, 39(1): 33
- Llewellyn D T. Boron in Steel. Ironmaking and Steelmaking, 1993, 20(5): 338
- 惠卫军, 董瀚, 翁宇庆. 高强度螺栓钢的发展动向. 机械工程材料, 2002, 26(11): 1
- 董成瑞, 任海鹏, 金同哲. 微合金非调质钢. 北京: 冶金工业出版社, 2000
- 先越蓉. 冷锻钢的生产和发展. 特殊钢, 2005, 26(3): 31
- 鹿磯正人, 千葉政道. 非調質ボルト用線材. R&D. 神戸製鋼技報, 2002, 52(3): 52
- Kanisawa H, Mori T, Okuno Y. Development of Wire Rod With Low Flow Stress for Non-heat-treated Fasteners. Wire Journal International, 1990, 4: 32
- 获原好敏. 自動車用ボルト・ねじ. 特殊鋼, 1995, 44(12): 7
- 张先鸣. 我国冷锻钢的现状和发展. 金属制品, 2009, 35(2): 43
- 马晓平, 惠卫军, 刘春明, 等. 冷作强化非调质钢冷变形过程中的鲍辛格效应. 钢铁研究学报, 2007, 19(1): 39
- 田鹏, 惠卫军, 聂朝胤, 等. 中碳冷锻钢软化的发展现状和趋势. 材料导报, 2008, 22(12): 44
- 于同仁, 惠卫军, 张步海, 等. TMCP 在线软化处理中中碳冷锻钢的研究开发. 理化检验-物理分册, 2006, 42(6): 271
- 惠卫军, 董瀚, 翁宇庆. 耐延迟断裂高强度螺栓钢的研究开发. 钢铁, 2001, 36(3): 69
- Matsuyama S. Delayed Fracture of High Strength Steels. ISIJ International, 1994, 40(9): 679
- 栢武杨. 氢损伤与滞后断裂. 北京: 冶金工业出版社, 1988
- Pressouyre G M. A Classification of Hydrogen Traps in Steel. Metallurgical Transactions A, 1979, 10A(10): 1571

麻 吟(1977-), 男, 高级研究员, 2000 年南京理工大学毕业, 2006 年中科院金属所博士毕业, 钢铁材料研究和开发。

收稿日期: 2011-01-19