

高强度螺栓用 QB30 冷镦钢盘条的研发与生产

李永超^{1,2} 陈继林^{1,2} 郭明仪^{1,2}

(1 邢台钢铁有限责任公司, 邢台 054027; 2 河北省线材工程技术研究中心, 邢台 054027)

摘 要 开发的 QB30 冷镦钢盘条(C : 0.27 ~ 0.32%, Si : $\leq 0.20\%$, Mn : 0.90 ~ 1.10%, P : $\leq 0.020\%$, S : $\leq 0.020\%$)的冶金流程为铁水预脱硫-80 t BOF-LF-RH 真空脱气-4 流 280 mm $\times$ 325 mm 方坯连铸机-堆冷处理-开坯-修磨-高速线材轧制工艺。通过 BOF 高拉碳补吹操作控制 BOF 终点 $[\text{C}]$ 0.07% ~ 0.15% 和 $[\text{P}]$ $\leq 0.013\%$, 铁水 $[\text{P}]$ $\leq 0.095\%$ 和 $[\text{S}]$ $\leq 0.03\%$, 控制 LF 精炼渣碱度 $R = 4 \sim 10$, $(\text{FeO} + \text{MnO}) \leq 1.0\%$, RH 真空度 ≤ 90 Pa 等工艺措施, QB30 钢 $\Phi 18$ mm 盘条的抗拉强度为 591 MPa, 伸长率 29%, 断面收缩率 60%, 氮含量 0.004 0%, 总氧含量 0.001 8%, 非金属夹杂 0 ~ 1.5 级, 满足用户使用要求。

关键词 高强度冷镦钢 QB30 盘条 研发 工艺控制

Development and Production of QB30 Cold Heading Steel Wire-Rod for High Strength Bolt

Li Yongchao^{1,2}, Chen Jilin^{1,2} and Guo Mingyi^{1,2}

(1 Xingtai Iron and Steel Co Ltd, Xingtai 054027; 2 Hebei Engineering Research Center for Wire-Rod, Xingtai 054027)

Abstract The metallurgical flowsheet for developed cold heading steel QB30 wire-rod (C : 0.27 ~ 0.32%, Si : $\leq 0.20\%$, Mn : 0.90 ~ 1.10%, P : $\leq 0.020\%$, S : $\leq 0.020\%$) is hot metal pre-desulphurization- 80 t BOF- LF- RH vacuum degassing- 4 strands 280 mm $\times$ 325 mm bloom casting- stacking cooling- blooming- grinding- high speed wire rolling process. With the process measures including using BOF high catch carbon reblow practice, controlling BOF end $[\text{C}]$ 0.07% ~ 0.15% and $[\text{P}]$ $\leq 0.013\%$, hot metal $[\text{P}]$ $\leq 0.095\%$ and $[\text{S}]$ $\leq 0.03\%$, controlling LF refining slag basicity $R = 4 \sim 10$ and $(\text{FeO} + \text{MnO}) \leq 1.0\%$, and RH vacuum ≤ 90 Pa, of $\Phi 18$ mm wire coil of steel QB30 the tensile strength is 591 MPa, elongation is 29% and reduction of area is 60%, the nitrogen content and total oxygen content in steel respectively are 0.004 0% and 0.001 8%, and the rating of non-metal inclusions in steel is 0 ~ 1.5 to meet the requirement of user.

Material Index High Strength Cold Heading Steel QB30, Wire-Rod, Development, Process Control

冷镦钢是生产各种汽车及机械用紧固件的重要原材料, QB30 属于中碳含硼冷镦钢, 常用于生产 10.9 级高强度紧固件, 用途高端。因此对线材的化学成分、冷镦性能、金相组织、淬透性、脱碳层等有着严格的要求, 国内生产此钢种的企业较少。为进一步拓展高端冷镦钢市场, 提高产品竞争力, 完善冷镦钢系列产品种类, 对 QB30 冷镦钢进行开发和生产。

1 化学成分控制

碳含量可增加钢的强度和硬度, 但降低冷镦钢的变形抗力, 恶化冷镦性能, 因此 C 含量应按照中下限控制。

硅为铁素体强化元素, 在拉拔和冷镦过程中提高钢的加工硬化率, 降低钢的变形能力, 因此 Si 含量尽量控制在 0.1% 以下^[1]。

锰在钢中与硫结合形成 MnS, 避免钢在高温下发生热脆现象; Mn 能够使珠光体变细和数量增多, 提高冷镦钢的弹性和强度, 此外, Mn 还能提高冷镦钢的淬透性, 从而使大直径规格的冷镦钢经热处理

后强度和硬度大幅提高。但 Mn 太高将降低钢的塑性和韧性, 增加冷镦开裂率^[2]。因此, 除用户明确要求外, 按照中限控制。

硼在钢中主要起淬透作用, 一般控制在 0.000 8% ~ 0.003 0%。B 含量太低, 起不到淬透性作用; 含量太高, 会形成硬脆相 $\text{Fe}_{23}(\text{B}, \text{C})_6$, 既浪费合金, 又达不到提高淬透性的作用^[3]。因此, B 含量应按照中限控制。

铝在钢中既是良好的脱氧剂, 又可与 N 元素结合成 AlN 起到细化晶粒作用。但 Al 含量偏高, 将恶化钢水洁净度, 影响正常浇注, 铸坯角部开裂概率增加, 因此成品 Als 应严格控制在 0.025% ~ 0.045%。

S、P、As、Sb、Sn、O、N 等对于冷镦钢属于有害元素, 恶化钢的冷镦性能和塑性, 应尽量降低其含量。

2 生产工艺流程

为保证最终成品的表面质量和内部质量, QB30 生产流程采用了大方坯工艺:

高炉铁水 + 废钢 $\rightarrow$ 铁水预脱硫 $\rightarrow$ 80 t 顶底复吹

转炉→LF-RH 双精炼-4 流大方坯工艺(280 mm × 325 mm)-堆冷处理-钢坯检验-大方坯加热-开坯-检验-修磨-步进梁式加热炉加热-高速线材轧制。

3 生产工序质量控制

3.1 钢水洁净度

3.1.1 [P]、[S]的控制

脱磷控制主要依托转炉的氧化性气氛进行脱磷,入炉铁水要求 $P \leq 0.095\%$ 。通过采用低硅锰铁水,入炉铁水温度 $\geq 1300\text{ }^{\circ}\text{C}$,终点碳采用高拉补吹操作、降低终点钢水氧化性,控制 $[P] \leq 0.013\%$ 。出钢采用滑板挡渣+在线下渣检测设备,严格控制下渣,避免后期钢水回磷。

脱硫采用铁水预脱硫+LF 精炼工艺进行控制。对铁水进行预脱硫,要求铁水 $S \leq 0.03\%$;LF 工序快速造高碱度白渣(表 1),要求白渣保持时间 $\geq 15\text{ min}$;造白渣时选用 $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 渣系,控制精炼渣碱度 $R=4\sim 10$, $(\text{FeO}+\text{MnO}) \leq 1.0\%$,LF 总精炼时间控制在 $40\sim 50\text{ min}$,以保证脱硫和脱氧效果。

3.1.2 钢中氧、氮含量

钢中气体氧、氮的过量存在会严重影响钢的时效性能及疲劳性能,以及最终螺栓的耐延迟断裂性能。因此采用如下工艺以控制钢中氧和氮含量:

(1)在转炉工序采用终点高拉碳,要求终点 $C=0.07\%\sim 0.15\%$,出钢氧含量控制在 400×10^{-6} 以下,从源头上防止钢水过氧化;出钢采用铝块进行预脱氧,在出钢约 10 t 时从炉后加入铝块;

(2)LF 工序采用电石和铝粒进行扩散脱氧,同时保持炉内微正压,避免钢水吸气;

(3)RH 工序采用本处理模式(表 2),保证真空度 $\leq 90\text{ Pa}$,纯脱气时间 $\geq 20\text{ min}$,真空复压后钢中自由氧小于 5×10^{-6} ;

(4)喂钙线前将底吹氩气流量调整为软吹弱氩气流量 $50\sim 150\text{ L/min}$,避免喂丝和软吹过程钢液翻

腾裸露造成吸气。

3.1.3 非金属夹杂物

夹杂物的存在严重影响钢的冷敏性能及疲劳性能,因此应采取措施减少钢中非金属夹杂的数量。由于非金属夹杂的控制是一个系统工程,因此冶炼过程每个工序的控制都不容忽视,具体操作为:

(1)在转炉工序采用终点高拉碳,从源头上防止钢水过氧化;同时采用滑板挡渣和在线下渣检测,严格控制转炉出钢下渣;

(2)RH 软吹工序,通过斯托克斯公式计算,保证软吹时间 $\geq 15\text{ min}$,以促进大尺寸夹杂物的有效上浮;

(3)连铸工序采用全程保护浇注,确保长水口氩封,并使用长水口密封垫、浸入式水口,控制钢水吸氮量在 7×10^{-6} 以下;

(4)连铸过程采用优质耐火材料生产的中间包、水口和塞棒,减少其对钢水的污染;

(5)结晶器液面自动控制系统,保证液面波动控制在 $\pm 3\text{ mm}$ 以内;

(6)控制钢水过热度在 $15\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$,保证全程恒拉速浇注,减少非稳态浇注造成的卷渣。

3.2 堆冷处理

为保证铸坯表面质量和内部质量,铸坯下冷床后采取坯库堆冷处理,可有效缓解氢致裂纹和热应力裂纹的产生,减轻铸坯的内部应力。加热炉采取冷坯装炉。

3.3 轧制控制

QB30 冷镦钢除要求良好的铸坯质量外,轧制工艺尤为关键^[4]。采用适当偏低的加热温度,将开轧温度控制在 $950\sim 1050\text{ }^{\circ}\text{C}$,使预精轧入口温度小于或接近非再结晶温度,使晶粒在奥氏体未再结晶区进行变形,非再结晶区变形量控制在 50% 以上,使钢中积累一定的畸变能,为奥氏体相变做准备。

合理控制炉内气氛是减少脱碳的有效途径。在高温段,炉内应尽量保持还原性气氛^[5]。因此,生产时严格控制炉内气氛,保证残氧量 $\leq 3\%$ 。

轧制工艺的关键在于增大奥氏体非再结晶区变形量,使奥氏体充分变形积累大量位错,增加晶格畸变能,降低过冷奥氏体稳定性^[6]。由于奥氏体过渡变形,积累的应变能在转变成珠光体的过程中不能充分释放,因此珠光体仍有较大的畸变能,处于不稳定状态。根据能量趋低原理,在随后用户进行的球化退火过程中,渗碳体片会析出、溶断并聚集,转变为粒状珠光体、铁素体+粒状珠光体组织硬度低,冷

表 1 LF 终渣主要成分和碱度

Table 1 Main ingredient of LF refining end slag and basicity

终渣成分/%						碱度 (R)
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MnO	FeO	MgO	
55.38	6.08	22.27	0.23	0.60	7.50	9.1

表 2 RH 工序主要参数

Table 2 Main parameters of RH process

真空度/ Pa	纯脱气时间/ min	复压定氧/ 10^{-6}	软吹氩气量/ ($\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$)	软吹时间/ min
84	25	3.5	92	18

表 3 Φ18 mm QB30 钢盘条的化学成分和力学性能
Table 3 Chemical composition and mechanical properties of Φ18 mm wire-rod of steel QB30

项目	化学成分/%						力学性能		
	C	Si	Mn	S	P	B	抗拉强度/ MPa	伸长率/ %	断面收缩 率/%
标准	0.27~0.32	≤0.20	0.90~1.10	≤0.020	≤0.020	0.000 8~0.003 0	≤630	≥20	≥50
实测	0.30	0.08	0.98	0.008	0.012	0.002 5	591	29	60

成型性好,是生产紧固件的理想组织。

吐丝温度控制在850 ℃ 以下,线材在相变前具有较大的过冷度,增加奥氏体内部的畸变能量,促进新相在奥氏体晶界处形核,同时固定轧制过程中产生的大量位错,迫使 C 曲线向右下方移动,有利于减少相变过程的时间和降低相变温度。

斯太尔摩辊道采用延迟冷却方式,保证相变的充分进行和组织的均匀分布,以便得到较为理想的力学性能和金相组织。

4 产品性能

4.1 化学成分及力学性能检验

表 3 为生产的 Φ18 mm 规格 QB30 盘条的化学成分和力学性能情况,均达到用户指标。

4.2 冷镦性能

冷镦性能良好指的是线材具有较低的变形抗力,在大挤压变形条件下不产生开裂。一般除进行冷顶锻检验外,断面收缩率也是衡量冷镦性能的主要指标,低碳冷镦钢的断面收缩率应不小于 60%,中碳及低合金钢的断面收缩率应为 50%~60%^[7]。

对不同规格的成品盘条进行取样后,在冷镦试验机上进行 1/3 冷镦检验,见图 1。结果表明,试制盘条冷镦性能良好,未出现表面开裂现象。

从表 3 中可以看出,断面收缩率为 60%,满足了用户的需求。

4.3 金相组织

图 2 是 QB30 Φ18 mm 盘条的心部金相组织。从图 2 中可以看出,盘条的组织 and 晶粒度控制良好。金相组织为均匀的 F+P,晶粒度达到 8 级。通过对盘条脱碳层的检验,盘条没有发现全脱碳,单边总脱碳层深度(铁素体+过渡层)均控制在 0.8% D 以内,最好的可达到 0.5% D 以内。

4.4 非金属夹杂物

非金属夹杂物的存在,尤其是脆性夹杂,破坏了钢基体的连续性,剥落后易形成凹坑或裂纹,在冷镦成形时极易形成裂纹源,热处理时易造成应力集中,产生淬火裂纹^[8]。

对于冷镦钢,一般要求距表面 2 mm 的 B 类夹



图 1 QB30 钢的 1/3 冷镦样品形貌
Fig. 1 Morphology of 1/3 cold upsetting samples of steel QB30

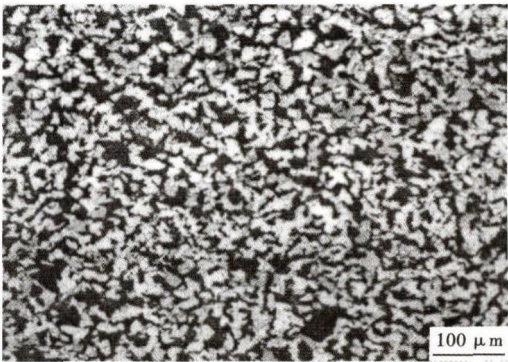


图 2 QB30 钢盘条的心部组织形貌
Fig. 2 Morphology of core structure of steel QB30 wire-rod

表 4 QB30 钢的非金属夹杂物和气体含量
Table 4 Nonmetallic inclusion grade and gas content in steel QB30

项目	非金属夹杂/级					N/%	T[O]/%
	A 细	B 细	C 细	D 细	Ds		
标准	≤2.0	≤1.5	≤1.0	≤1.5	≤1.0	≤0.005 0	≤0.002 0
实测	1.0	0	0	1.5	0.5	0.004 0	0.001 8

杂物不应大于 20 μm,且[N]≤0.006 0%,T[O]≤0.003 0%^[9]。

由于 QB30 用于生产 10.9 级高强度螺栓,因此对其非金属夹杂物和气体含量进行了检验。依据 GB/T10561-2005 对其夹杂物进行了观察和评级,见表 4。没有发现 B 类、C 类及 B 类 C 类复合型夹杂,A 类夹杂物为 1.0 级,D 类和 Ds 类夹杂物均小于 1.5 级。

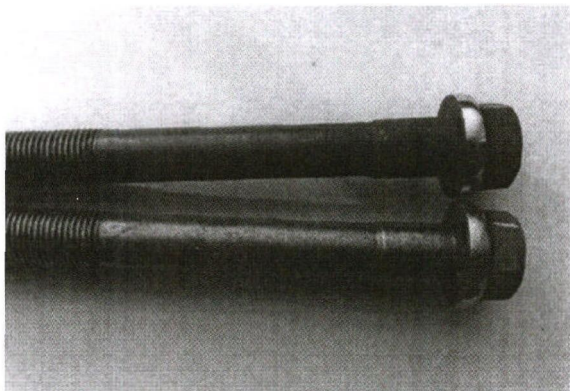


图 3 QB30 钢螺栓形貌
Fig. 3 Morphology of bolt of steel QB30

5 产品应用

为充分了解盘条的应用情况,技术研发人员对下游用户的使用进行了跟踪。盘条到厂后,经过酸洗磷化,两次拉拔(即粗拉和精拉)和两次退火(即软化退火和球化退火)后进行冷镦、调质和滚丝处理,最后进行螺栓的筛选分检。通过现场检测结果表明, QB30 各项性能指标良好,满足用户要求。图 3 为 QB30 钢螺栓的形貌。

6 结论

(1) 采用低硅锰铁水,转炉终点高拉碳,出钢滑板挡渣和在线下渣检测等措施,将转炉终点 P 有效控制在 0.013% 以下,通过采用铁水预脱硫和 LF 精炼强化脱硫,将成品硫含量控制在 0.010% 以下。

(2) 采用 RH 真空脱气处理,将钢水中的 [N] 控制在 0.005 0% 以下, T[O] 控制在 0.002 0% 以下,降低了钢中有害气体的含量。

(3) 通过采用优质耐火材料、控制钢水过热度

和保证恒拉速等措施,有效降低了非金属夹杂,尤其是 B 类和 D 类脆性夹杂。

(4) 通过采取堆冷、冷装轧制,控制加热炉内残氧气氛、精轧温度、吐丝温度和冷却方式,获得了均匀的铁素体 + 珠光体组织,晶粒度达到 8 级,抗拉强度 591 MPa、断面收缩率 60%,伸长率 29%,总脱碳层 $\leq 1.0\%$ D,满足了用户对热轧盘条的要求。

(5) QB30 冷镦钢盘条生产的高强度螺栓能够达到下游紧固件用户的使用要求。

参考文献

- [1] 惠卫军,翁宇庆,董瀚,等. 高强度紧固件用钢[M]. 北京:冶金工业出版社,2009:20-22.
- [2] 左都伟. 含铝冷镦钢生产工艺研究及质量控制[D]. 武汉:武汉科技大学,2011:11-13.
- [3] 熊青. 合金元素对 40MnBH 钢组织性能的影响研究[D]. 镇江:江苏大学,2010:12-14.
- [4] 戈春刚,杜月和. ML35CrMo 冷镦钢线材控冷工艺[J]. 金属制品,2004,30(2):23-25.
- [5] 李长胜,程先舟,盛光兴,等. 武钢汽车用弹簧钢盘条脱碳的控制[A]. 第七届中国钢铁年会论文集[C]. 北京:2009:180-183.
- [6] 范银平,巫保振,李静宇. SCM435 冷镦钢线材的开发[J]. 金属制品,2008,34(1):26-27.
- [7] 李莎. 冷镦钢与钢的冷镦性能评价[D]. 唐山:河北理工大学,2006:10-12.
- [8] 钟盛钢,张先鸣. 影响风电机组用高强度紧固件质量的原材料因素[J]. 金属制品,2010,36(2):66-69.
- [9] Zhang L F, Thomas B G. State of the Art in Evaluation and Control of Steel Cleanliness[J]. ISIJ International,2003,43(3):271-291.

李永超(1985-),男,硕士(2012年北京科技大学),工程师,2009年河北理工大学毕业,中低碳冷镦钢开发和工艺控制。
E-mail:Liyongchao1220@163.com

收稿日期:2016-02-03

“讲文明树新风”公益广告

绿色环保
爱我家园