

· 研究与开发 ·

# 低成本超高强度热轧锚杆钢筋的开发

吴明安<sup>1</sup>, 董红卫<sup>2</sup>, 詹卫金<sup>1</sup>

(1. 首钢长治钢铁有限公司, 山西 长治 046031; 2. 中冶东方工程技术有限公司, 山东 青岛 266000)

**摘要:**在钢铁市场竞争日益残酷的情况下, 低成本战略是制胜之道。首钢长钢公司利用新建100万t棒材车间具备完善的控制控冷的优势, 通过采用微合金化化学成分设计+控轧控冷工艺路线, 成功开发出低成本超高强度的热轧锚杆钢筋。经检测, 该产品屈服强度达到690 MPa, 抗拉强度达到860 MPa, 冲击功达到36 J, 具有良好的综合性能。

**关键词:**低成本; 微合金化; 控轧控冷; 超高强度; 热轧锚杆钢筋

**文献标志码:**A **文章编号:**1003-9996(2015)增刊1-0072-03

## Development of low cost and high strength hot rolled anchor steel bars

WU Ming-an<sup>1</sup>, DONG Hong-wei<sup>2</sup>, ZHAN Wei-jin<sup>1</sup>

(1. Shougang Changzhi Iron & Steel Co., Ltd., Changzhi 046031, China;

2. BERIS Engineering Technology Co., Ltd., Qingdao 266000, China)

**Abstract:** In the case of iron and steel market competition is becoming more and more cruel, low cost strategy is winning formula. By adopting micro-alloying chemical composition design and controlled rolling and controlled cooling technology, a low cost and high strength of the hot rolled anchor bar was successfully developed in the new rolling plant which had perfect control cooling condition advantage in Shougang Changzhi Iron and Steel Co., Ltd. After the examination, the product yield strength was 690 MPa, the tensile strength was 860 MPa and impact value was 36 J, the good comprehensive performance was obtained.

**Key words:** low cost; microalloyed; controlled rolling and controlled cooling; high strength; hot rolled anchor steel bars

## 1 前言

锚杆支护是煤矿井巷中应用广泛的一项重要支护技术, 这种支护方式具有支护效果好, 成本低等诸多特点。伴随着煤矿生产企业对煤炭开采效率及生产的安全性要求的进一步提高, 600 MPa级热轧锚杆钢筋应用已越来越广泛。

当前, 伴随国内钢铁企业同质化竞争的加剧, 如何在确保钢筋性能的基础上, 降低微合金元素使用量, 增加企业效益, 成为摆在当前所有钢铁企业面前的一道难题。控轧控冷工艺作为提高低碳微合金钢力学性能的有效途径, 主要利用细晶强化和析出强化等强化机制, 采用不同变形及冷却工艺, 以提高钢材的综合力学性能。

## 2 产品技术条件

(1) 钢筋力学性能要求。

依据用户使用要求, 同时保证力学性能, 600 MPa级热轧锚杆钢筋力学性能见表1。

表1 钢筋力学性能

Table 1 Mechanical properties of anchor steel bar

规格/mm	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	断后伸长率/%	室温冲击功/J
φ22	≥600	≥800	≥17	≥34

(2) 钢筋外形、尺寸及允许偏差。

钢筋表面无纵肋, 横肋为单项左旋, 肋形为月牙肋, 具体要求与普通强度锚杆钢筋相同, 具体尺寸见表2。

## 3 生产工艺

### 3.1 钢坯化学成分设计

目前, 500 MPa级锚杆钢筋的主要化学成分:  $w(C)=0.18\% \sim 0.25\%$ ,  $w(Si)=0.40\% \sim 0.60\%$ ,  $w(Mn)=1.30\% \sim 1.60\%$ 。力学性能: 屈服强度不小于500 MPa, 抗拉强度不小于670 MPa, 伸长率不小于20%。

正确设计600 MPa级锚杆钢筋的化学成分是获得合格性能的前提, C含量的提高可以提高强度,

收稿日期: 2015-05-18

作者简介: 吴明安(1972—), 男, 工程师, 首钢长治钢铁公司轧钢厂总工程师。

表 2 钢筋尺寸和允许偏差

Table 2 Size and tolerance of dimension of anchor steel bar

规格/mm	内径 $d$ /mm		横肋高 $h$ /mm		横肋顶宽 $b$ /mm	横肋间距 $L$ /mm		不圆度/mm
	公称尺寸	允许偏差	公称尺寸	允许偏差		公称尺寸	允许偏差	
$\phi 22$	22.1	+0.6 +0.1	0.8	+0.3 -0.2	1.1	12	$\pm 0.5$	$\leq 0.3$

但会恶化钢的韧性和焊接性能;Si 是炼钢过程中脱氧元素,适量加入可以提高钢的强韧性;Mn 主要起到固溶强化效果;P、S 是钢中有害元素,炼钢的主要目的之一是去除杂质,净化钢质;加入微量 V 是本钢种的设计关键,利用 V 很强的沉淀析出强化作用,使其在热加工过程中细化相转变组织,改进钢的强韧性。

在参考 500 MPa 级锚杆钢筋的主要化学成分的基础上,600 MPa 级锚杆化学成分控制要求: $\omega(\text{C})=0.26\% \sim 0.30\%$ , $\omega(\text{Si})=0.60\% \sim 0.80\%$ , $\omega(\text{Mn})=1.60\% \sim 1.80\%$ , $\omega(\text{P}) \leq 0.025\%$ , $\omega(\text{S}) \leq 0.010\%$ , $\omega(\text{V})=0.19\% \sim 0.24\%$ 。

### 3.2 生产工艺流程及装备

150 mm $\times$ 150 mm 方坯 $\rightarrow$ 加热 $\rightarrow$ 粗轧机组 $\rightarrow$ 中轧机组 $\rightarrow$ 1# 冷却器 $\rightarrow$ 精轧机组 $\rightarrow$ 2# 冷却器 $\rightarrow$ 倍尺飞剪 $\rightarrow$ 冷床 $\rightarrow$ 定尺剪切 $\rightarrow$ 检验 $\rightarrow$ 包装 $\rightarrow$ 计量 $\rightarrow$ 入库。

该产品在新建的 100 万 t 棒材生产线上轧制。该线有一座步进梁式加热炉,采用自动燃烧技术,可灵活控制开轧温度及断面温差;全线 18 架高刚度短应力轧机,平立交替布置,保证轧制稳定性;在精轧机组前、精轧机组各机架之间、精轧机组后以及倍尺飞剪后均设有穿水冷却控制系统,能够灵活、精确地控制轧制温度及冷却速度;倍尺飞剪采用进口设备,双电机串联传动,既保证了足够的剪切速度,又可实现在低温下剪切;冷床和精整设备采用常规选项及布置。

### 3.3 控轧控冷操作要点

为降低微合金元素 V 添加量,达到降低生产成本的目的,轧钢工序采用了控轧控冷工艺,为确保此次 600 MPa 级锚杆钢筋的开发成功,在参考  $\phi 22$  mm HRB400E 热轧带肋钢筋控轧控冷工艺的基础上,相关工艺技术人员制定了 3 种控轧控冷工艺操作方案,以达到确定最优方案的目的,见表 3。

表 3 控轧控冷工艺方案

Table 3 Controlled rolling and controlled cooling schemes

方案	开轧温度/ $^{\circ}\text{C}$	进精轧温度/ $^{\circ}\text{C}$	终轧温度/ $^{\circ}\text{C}$	水压/MPa	水温/ $^{\circ}\text{C}$
1	970 $\sim$ 1 000	900 $\sim$ 950	810 $\sim$ 850	1.6 $\sim$ 2.0	$\leq 35$
2	970 $\sim$ 1 000	880 $\sim$ 930	810 $\sim$ 850	1.6 $\sim$ 2.0	$\leq 35$
3	970 $\sim$ 1 000	880 $\sim$ 930	830 $\sim$ 870	1.6 $\sim$ 2.0	$\leq 35$

## 4 试制结果分析

### 4.1 力学性能

首钢长钢公司于 2012 年 7 月份开始试制 600 MPa 级锚杆钢筋,累计轧制 190 余吨,共分 3 个批次进行轧制,期间采取每批次抽检 3 支锚杆钢筋进行性能检验,具体力学性能见表 4。

表 4 试制钢筋力学性能

Table 4 Mechanical properties of developed anchor steel bars

方案	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%	冲击功/J
1	695 $\sim$ 705	875 $\sim$ 880	19.5 $\sim$ 20.5	32 $\sim$ 36
2	692 $\sim$ 708	868 $\sim$ 872	19.0 $\sim$ 20.0	36 $\sim$ 40
3	689 $\sim$ 694	863 $\sim$ 868	18.0 $\sim$ 19.5	33 $\sim$ 38

由表 4 可见,方案 2 下钢筋屈服强度控制在 692 $\sim$ 708 MPa 区间内,抗拉强度在 868 $\sim$ 872 MPa 区间内,伸长率在 19% $\sim$ 20% 区间内,符合产品性能要求,方案 1 和方案 3 虽屈服强度、抗拉强度和伸长率符合产品性能要求,但其冲击功低于产品性能要求,由此可看出,方案 2 符合产品性能控制要求。

由表 4 看出,产品屈服强度皆达到 689 MPa 以上,抗拉强度皆达到 863 MPa 以上,远高于产品设计要求,屈服强度和抗拉强度富余量皆很充足,方案 2 虽符合产品性能控制要求,但其冲击功仅高出产品设计 2 J 以上,方案 1 与方案 3 冲击功还略有不足,甚至部分低于产品设计要求,为此,可通过调整化学成分,适当降低屈服强度和抗拉强度,以达到提高冲击功的目的。

### 4.2 金相组织

经对 3 种方案下锚杆钢筋的金相组织进行分析,如表 5 所示,钢筋芯部全部为铁素体与珠光体组织,边部和肋部为珠光体、铁素体与少量的贝氏体

组织,边部要比芯部组织晶粒度细小,芯部晶粒度为 8.0~8.5 级,边部晶粒度为 9.0~9.5 级,金相组织达到产品设计要求。

表 5 钢筋金相组织

Table 5 Microstructures of anchor steel bars

方案	晶粒度(级别)		组织	
	芯部	边部	边部	芯部
1	8.0	9.0	F+P+少 B	F+P
2	8.5	9.5	F+P+少 B	F+P
3	8.0	9.0	F+P+少 B	F+P

由表 4 力学性能和表 5 金相组织统计数据可得出:方案 2 下钢筋力学性能与金相组织晶粒度均优于方案 1 与方案 3,由此得出,适当降低精轧机前入口温度和终轧温度,可有效控制奥氏体再结晶及晶粒长大过程,细化晶粒组织,从而达到产品性能设计要求。

## 5 生产工艺改进

为进一步提高产品冲击功,降低生产成本,进

行了如下工艺优化:

(1)根据试制过程中产品金相组织与性能分析,决定进一步将开轧温度降低 20 °C,精轧入口温度降低 30 °C,在未结晶区轧制,以达到进一步细化晶粒的目的;

(2)根据产品力学性能检验结果,抗拉强度富余量大,冲击功较低,因此决定适当降低 V 含量,并将添加方式变为钒氮合金和钒铁组合加入,改进后可降低 C、Si、N 对冲击功的不利影响。

## 6 结语

依据此次试制过程的一系列实践证明,采用添加微合金元素和控轧控冷工艺相结合的工艺路线,成功开发出的 600 MPa 级热轧锚杆钢筋,其力学性能和金相组织均已达到产品设计要求,显著降低生产成本,与普通强度锚杆钢筋相比,使用 600 MPa 级热轧锚杆钢筋,煤矿开采效率能够提高 10% 以上,具有安全、高效、经济的优点。