

## 控轧控冷对 38CrMoAl 钢盘条硬度的影响和工艺优化

马志军

(江苏永钢集团有限公司技术部, 张家港 215628)

**摘要**  $\Phi 8 \sim 20$  mm 38CrMoAl 钢 ( $\% : 0.35 \sim 0.42\text{C}, 0.20 \sim 0.45\text{Si}, 0.30 \sim 0.60\text{Mn}, \leq 0.035\text{P}, \leq 0.035\text{S}, 1.35 \sim 1.65\text{Cr}, 0.15 \sim 0.25\text{Mo}, 0.70 \sim 1.10\text{Al}$ ) 的生产工艺为 90 t 转炉-LF-VD-150 mm  $\times$  150 mm 方坯连铸-连轧。分析了成分、轧制温度、冷却速度对 38CrMoAl 钢组织的影响。通过将铸坯加热温度、开轧温度和吐丝温度分别由  $(1\,100 \pm 40)^\circ\text{C}$ ,  $(1\,020 \pm 20)^\circ\text{C}$  和  $(900 \pm 15)^\circ\text{C}$  降至  $(1\,060 \pm 40)^\circ\text{C}$ ,  $(980 \pm 20)^\circ\text{C}$  和  $(840 \pm 15)^\circ\text{C}$ , 同时降低冷却线辊道速度, 盘条 HB 硬度值由 284 ~ 353 降至 221 ~ 254, 显著降低冷拔过程的断丝率。

**关键词** 38CrMoAl 钢 盘条 热轧和冷却工艺 组织 硬度

## Effect of Control Rolling and Cooling on Hardness of Steel 38CrMoAl Coil and Optimization of Process

Ma Zhijun

(Technology Department, Jiangsu Yonggang Group Co Ltd, Zhangjiagang 215628)

**Abstract** The production process of  $\Phi 8 \sim 20$  mm coil of steel 38CrMoAl ( $\% : 0.35 \sim 0.42\text{C}, 0.20 \sim 0.45\text{Si}, 0.30 \sim 0.60\text{Mn}, \leq 0.035\text{P}, \leq 0.035\text{S}, 1.35 \sim 1.65\text{Cr}, 0.15 \sim 0.25\text{Mo}, 0.70 \sim 1.10\text{Al}$ ) is 90 t converter-LF-VD-150 mm  $\times$  150 mm billet casting-continuous rolling. The effect of chemical composition, rolling temperature and cooling speed on structure of steel 38CrMoAl has been analyzed. With decreasing the billet heating temperature, beginning rolling temperature and coil laying-off temperature respectively from  $(1\,100 \pm 40)^\circ\text{C}$ ,  $(1\,020 \pm 20)^\circ\text{C}$  and  $(900 \pm 15)^\circ\text{C}$  to  $(1\,060 \pm 40)^\circ\text{C}$ ,  $(980 \pm 20)^\circ\text{C}$  and  $(840 \pm 15)^\circ\text{C}$ , the HB hardness scale of coil decreases from 284 ~ 353 to 221 ~ 254 obviously to decrease the wire breakage rate in cold drawing process of coil.

**Material Index** Steel 38CrMoAl, Coil, Hot-Rolling and Cooling Process, Structure, Hardness

38CrMoAl 钢是一种高级氮化钢, 具有较好的力学性能, 其常规的热处理工艺为调质加渗氮处理<sup>[1]</sup>。

38CrMoAl 钢属于合金结构钢, 执行国家推荐标准 GB/T3077-2015, 用户在调质处理后工件 HRC 硬度值要求  $\geq 45$ 。该钢种氮化速度较快, 能够在较短的时间内得到较深的氮化层深度, 经热处理后工件具有较高的强韧性、表面硬度和高耐磨性<sup>[2]</sup>, 常用于制造承受冲击负荷及在往复磨损条件下工作的机械零件如镗杆、磨床主轴、自动车床主轴、螺杆、精密丝杆、精密齿轮、橡胶及塑料挤压机上的各种耐磨件等<sup>[3,4]</sup>。

国内钢厂开发的 38CrMoAl 盘条销售到杭州、无锡等地, 用户反映其制品存在拉拔过程中断丝、热处理后工件硬度低、疲劳寿命检验低于同行等问题。在加工现场对盘条取样后进行分析, 认定盘条组织异常是产生不良问题的主要原因。

### 1 38CrMoAl 钢盘条的生产流程

开发该钢种的生产流程为:

90 t 转炉  $\rightarrow$  90 t LF 精炼  $\rightarrow$  VD 真空脱气  $\rightarrow$  150 mm  $\times$  150 mm 小方坯连铸  $\rightarrow$  步进梁式加热炉加热  $\rightarrow$  10 机架的 MORGEN 五代无扭高速线材轧机轧制  $\rightarrow$  109 米风冷线控制冷却  $\rightarrow$  精整、打包。

该高速线材生产线轧制 38CrMoAl 钢的规格在  $\Phi 8.0 \sim 20.0$  mm, 盘条检测 HB 硬度值范围一般为 290 ~ 350, 组织检验如图 1。盘条中含有大量的贝氏体或马氏体-奥氏体组织。

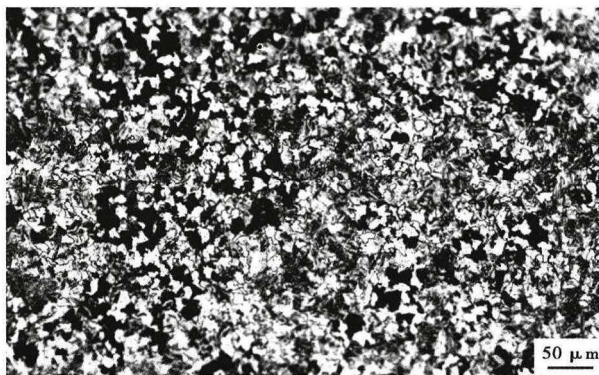


图 1 38CrMoAl 钢盘条组织形貌  
Fig. 1 Morphology of structure of steel 38CrMoAl coil

## 2 38CrMoAl 钢的化学成分

### 2.1 C

C 和 Fe 是钢中最主要的组成, C 的含量越高, 对钢材的强度贡献越大, 但 C 含量越高, 与氧的结合能力越大, 越容易发生化学反应, 增加了脱碳程度, C 含量增加使得钢材的硬度增大。

### 2.2 Cr

Cr 是强碳化物形成元素, 具有降低脱碳深度的能力, 既能显著提高强度、硬度和耐磨性, 又能提高钢的抗氧化性、耐腐蚀性和钢材的淬透性<sup>[5]</sup>, 在 38CrMoAl 钢中应适当增加 Cr 合金的含量。

### 2.3 Mo

Mo 能使钢的晶粒细化, 提高淬透性和热强性能, 在高温时保持足够的强度和抗蠕变能力, 结构钢中加入 Mo, 能提高机械性能, 同时钼具有抑制钢在淬火时而引起的脆性的能力。

### 2.4 Al

钢中加入少量的 Al, 可细化晶粒, 提高冲击韧性, 具有抗氧化性和抗腐蚀性能, Al 与 Cr、Si 合用, 可显著提高钢的耐高温腐蚀能力。Al 的缺点是影响钢的热加工性能、焊接性能和切削加工性能。

## 3 异常组织形成的机理

38CrMoAl 钢较理想组织为珠光体及铁素体组织, 钢中的 C、Cr、Mo、Al 等元素能显著影响过冷奥氏体的稳定性, 含量很高的 Cr、Mo 元素使得淬透性较好, 其 C 曲线向右偏离比较明显, 珠光体区域比较狭窄, 在冷却过程中容易出现速度过快而不能进入到“鼻尖”区域, 过冷奥氏体组织在相变结束后转变为马氏体、贝氏体组织。

马氏体和贝氏体是强度高、硬度高但塑性很差的组织, 其 HRC 硬度值一般在 54 ~ 61, 不利于用户的加工。在相变过程中, 过冷奥氏体的含量影响了异常组织的比例。残余奥氏体的含量随着含碳量及合金元素含量的增加而增加, 同时与相变时的奥氏体晶粒大小、相变的冷却速度有着很大的内在联系。残余奥氏体在经过 C 曲线的“鼻尖”后至 Ms 点以上快速形成贝氏体或马氏体组织, 在 Ms 点以下缓慢冷却时, 过冷奥氏体处于稳定变化状态, 很难向马氏体转变。

## 4 异常组织影响因素分析

在相同时间内, 奥氏体晶粒尺寸、相变速度等对相变是否能够结束以及得到最终组织有很大影响。

### 4.1 加热温度的影响

根据 Hillert 模型, 奥氏体晶粒长大动力学方程<sup>[6]</sup>:

$$D^2 - D_0^2 = C \exp(-Q/RT)t \quad (1)$$

式中:  $D$ - 某一温度的晶粒尺寸/ $\mu\text{m}$ ;  $D_0$ - 奥氏体晶粒原始尺寸/ $\mu\text{m}$ ;  $C$ - 常数;  $Q$ - 晶粒长大的激活能/ $(\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$ ;  $R$ - 气体常数;  $T$ - 加热温度/ $\text{K}$ ;  $t$ - 保温时间/ $\text{h}$ 。

在相同的保温(加热)时间下, 随着加热温度  $T$  的升高, 奥氏体实际晶粒尺寸增大。试验表明, 加热时间 2 h, 940 °C 时奥氏体晶粒平均直径是 31.88  $\mu\text{m}$ , 1 000 °C 时奥氏体晶粒平均直径可达 49.16  $\mu\text{m}$ 。同样, 加热温度越高, 奥氏体晶粒长大的激活能  $Q$  越大, 越有利于实际奥氏体晶粒  $D$  的增大。

轧钢厂正常轧制节奏, 钢坯在步进式加热炉的加热时间一般为 2.0 ~ 2.5 h, 调整加热温度可以有效控制钢坯的奥氏体实际晶粒度大小, 晶粒越大, 需要相变的时间越长, 在相同的转变时间内, 相变完成的难度越大, 因此降低奥氏体晶粒度有利于在较短时间内完成相变、降低残余奥氏体含量。

### 4.2 降低奥氏体长大的速度

钢中第二相粒子能有效阻止高温下奥氏体晶粒粗化。根据 Zener 的研究, 晶粒长大的驱动力与第二相粒子对晶粒长大的钉扎力(阻力)关系为:

$$D_c = A \cdot d/f \quad (2)$$

式中:  $D_c$ - 临界晶粒尺寸;  $d$ - 第二相直径;  $A$ - 比例系数(一般选取 0.17);  $f$ - 第二相在钢中的体积分数<sup>[7]</sup>。可以看出钢的第二相粒子数量越多、尺寸越小, 起到的钉扎作用越大。38CrMoAl 钢中 Al 质量分数很高, 一般在 1% 左右, 与钢中的氮结合形成 AlN 相析出, 可以起到钉扎晶界、降低组织晶粒长大的作用。根据 AlN 在奥氏体中的固溶度积公式:

$$\lg[\text{Al}] \cdot [\text{N}] = -7184/T + 1.79 \quad (3)$$

可以得到在 940 ~ 1 000 °C 时的固溶度积可达到最大值 0.064% ~ 0.065%。说明此温度下 AlN 以析出相形式为最大值, 有利于发挥其钉扎作用, 降低奥氏体的晶粒尺寸。

### 4.3 冷却速度的影响

高淬透性合金含量的增加使得冷却 C 曲线发生移动。图 2 为 38CrMoAl 钢的动态 CCT 曲线。要保证钢的硬度满足标准要求, 38CrMoAl 钢最终的组织为铁素体和珠光体, 应当将钢材轧后冷却速度  $\leq 0.28$  °C/s 以下, 且在 600 °C 前结束相变, 否则钢材

中残余奥氏体会形成部分马氏体或者贝氏体组织。

### 5 生产工艺的优化

#### 5.1 优化 38CrMoAl 钢的化学成分

通过调整化学成分,降低 Cr、Mo 淬透性元素、提高有钉扎晶界作用的 Al 的含量,为降低奥氏体晶粒度创造条件(表1)。

#### 5.2 优化钢的控轧工艺制度

在加热和轧制中,首先优化调整加热炉第二加热段和均热段烧嘴温度,将原来控制目标温度分别下调 20 °C 和 40 °C,使开轧平均温度下降到 960 ~ 980 °C;增大轧线冷却水箱水量。降低轧制过程和吐丝温度,将吐丝温度由原来的 900 °C 下降至 830 ~

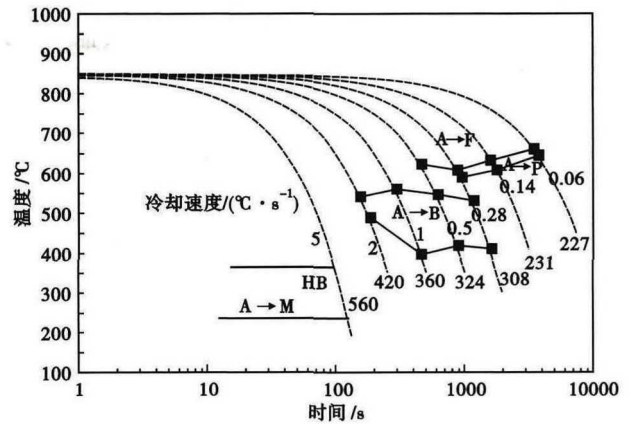


图2 38CrMoAl 钢的动态冷却曲线  
Fig. 2 Dynamic cooling curves of steel 38CrMoAl

表1 38CrMoAl 钢的化学成分/%

Table 1 Chemical composition of steel 38CrMoAl / %

项目	C	Si	Mn	Cr	Mo	Al	P	S
GB/T3077	0.35 ~ 0.42	0.20 ~ 0.45	0.30 ~ 0.60	1.35 ~ 1.65	0.15 ~ 0.25	0.70 ~ 1.10	≤ 0.035	≤ 0.035
内控	0.36 ~ 0.40	0.22 ~ 0.35	0.40 ~ 0.50	1.40 ~ 1.50	0.16 ~ 0.25	0.78 ~ 1.05	≤ 0.015	≤ 0.008
目标	0.36 ~ 0.39	0.22 ~ 0.34	0.43 ~ 0.47	1.42 ~ 1.50	0.16 ~ 0.21	0.80 ~ 1.05	0.006 ~ 0.015	0.001 ~ 0.008

840 °C,有利于钢材吐丝后尽快开始相变。优化前后 38CrMoAl 钢的加热轧制工艺参数见表2。

#### 5.3 降低盘条在斯太尔摩线的冷却速度

对冷却线的工艺进行优化,降低吐丝温度及降低冷却线辊道速度,同时调整保温罩的开启个数,具体见表3。

这些措施,有利于钢材尽快进入到相变区,也有利于降低钢材的冷却速度,有利于相变曲线向右移动到 C 曲线的鼻尖内。从动力学转变来讲,能增加

奥氏体的相变驱动力;从显微结构上来看是提高了位错、变形带、空位以及孪晶等缺陷,增加了铁素体的形核质点,从而使铁素体相变比较容易发生。位错密度的增加,增加了碳原子的扩散通道,有利于铁素体相变的进行。

### 6 检验结果

#### 6.1 优化后盘条的组织

图3为优化工艺后的 Φ12 mm 规格盘条组织,主要是珠光体 + 铁素体组织,其中铁素体比例约 40% 得到科学合理的组织。

#### 6.2 优化前后盘条的硬度

表2 优化前后 38CrMoAl 钢的加热轧制工艺

Table 2 Heating and rolling process of steel 38CrMoAl before and after optimization

工艺	加热炉各段温度控制 / °C			开轧温度 / °C	吐丝温度 / °C
	一加热	二加热	均热段		
优化前	850 ± 50	1 050 ± 50	1 100 ± 40	1 020 ± 20 (目标)	900 ± 15 (目标)
优化后	850 ± 50	1030 ± 50	1 060 ± 40	980 ± 20 (目标)	840 ± 15 (目标)

表3 优化前后 38CrMoAl 钢的控冷工艺

Table 3 Control cooling process of steel 38CrMoAl before and after optimization

工艺	规格 / mm	首段辊道速度 / (m · s <sup>-1</sup> )	各段递增比例	保温罩(2A-8B)开启状态
优化前	Φ ≤ 12 12.5 ~ 20	0.22 0.26	1.2 1.2	2A-5B 盖关闭,其余开 2A-6B 盖关闭,其余开
优化后	Φ ≤ 12 12.5 ~ 20	0.14 0.18	1.05 1.05	2A-8B 盖关闭 2A-8B 盖关闭



图3 工艺优化后 38CrMoAl 钢盘条组织形貌  
Fig. 3 Morphology of structure of steel 38CrMoAl coil after process optimization

表 4 工艺优化前后 38CrMoAl 钢盘条的强度和 HB 硬度值  
 Table 4 Strength and HB hardness scale of steel 38CrMoAl coil before and after process optimization

工艺	规格/ mm	抗拉强度/ MPa	HB 硬度值
优化前	Φ12	1 000 ~ 1 260	291 ~ 353
	Φ20	1 020 ~ 1 140	284 ~ 316
优化后	Φ12	890 ~ 970	235 ~ 254
	Φ20	870 ~ 940	221 ~ 238

在力学试验机和 RH-1E 型硬度仪进行检测,并与原来检测数据进行对比,结果如表 4。

优化后,抗拉强度降低 40 MPa 以上,特别是没有离散的高抗拉强度的性能,离散范围由原来的 260 MPa 降低到 80 MPa 以内;HB 硬度值降低约 50,总体控制到 260 以下。

### 7 结论

(1)适当调整试验钢的成分控制,在保证盘条高淬透性合金元素含量的前提下,发挥细化晶粒的元素作用。

(2)控制加热过程温度,降低钢坯在高温区的吸收的能量,可以降低奥氏体的实际晶粒度,有利于相变的完成。

(3)调整控轧、控冷参数,降低终冷温度,保证

钢的相变时间,有利于减少异常组织的产生,降低盘条的硬度,可以增加下游用户的通用性,使得 38CrMoAl 钢盘条的平均 HB 硬度值降低 40 以上,达到预期目标。

### 参考文献

[1] 冶金工业部《合金钢种手册》编写组. 合金钢种手册(第一册 合计结构钢) [M]. 北京:冶金工业出版社,1983,288-293.  
 [2] 毕革平,张宝川,陈华来,等. 38CrMoAl 钢机筒棒料镗孔切削性能比对分析[J]. 金属热处理,2014,39(8):146-150.  
 [3] 张海,姚凤臣. 38CrMoAl 钢轴向柱塞 C、N、S 三元共渗后的组织和性能[J]. 金属热处理,2016,31(6):65-67.  
 [4] 李 晔,姜 云. 氮离子重叠注入对 38CrMoAl 硬度与耐磨性能影响的研究[J]. 贵州工业大学学报(自然科学版),2003,32(5):24-28.  
 [5] 乔蔡方. 加热炉[M]. 北京:冶金工业出版社,2007:84-85.  
 [6] Renata Stasko, Henryk Adrian and Anna Adrian. Effect of Nitrogen and Vanadium on Austenite Grain Growth Kinetics of A Low Alloy Steel[J]. Materials Characterization,2006,56:44-45.  
 [7] 雍岐龙. 钢铁材料中的第二相 [M]. 北京:冶金工业出版社,2006:192-193.

马志军(1971-),男,高级工程师,1996 年武汉科技大学(本科)毕业,钢铁材料、产品和工艺研究。  
 E-mail:HNAGMZJ@163.COM.

收稿日期:2018-11-28

# 欢迎订阅 2019 年《特殊钢》杂志

全国各地邮局均可订阅(可破订)

邮发代号:38-183      定价:16.00 元/期 96.00 元/年      邮编:435001

地址:湖北省黄石市黄石大道316号、新冶钢-大冶特殊钢股份有限公司《特殊钢》杂志社

电话:0714-6297386 6297313 0714-6297888-8010