

文章编号:1000-582X(2008)01-0024-05

## 轧后水冷对 HRB400 钢筋力学性能的影响

刘旭东<sup>1</sup>, 盛光敏<sup>1</sup>, 蒋莉萍<sup>1</sup>, 龚士弘<sup>1</sup>,  
杨茂麟<sup>2</sup>, 刘永林<sup>2</sup>, 王丽鹃<sup>2</sup>, 魏福龙<sup>2</sup>, 孙城<sup>2</sup>

(1. 重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆 400030; 2. 水城钢铁(集团)有限公司, 贵州 六盘水, 553028)

**摘要:**HRB400 钢筋运用范围逐渐增大, 将成为今后的主流产品。对水城钢铁公司生产的轧后不同冷却制度的  $\Phi 25$  V 强化钢筋的强度、塑性、冲击韧性、高应变低周疲劳性能等力学性能指标进行了测定, 并利用显微硬度测试、金相观察及扫描电镜断口观察, 发现轧后水冷工艺造成了组织和成分不均匀, 使得钢筋强度和高应变低周疲劳性能没有明显提高, 并降低了钢筋韧性。试验结果表明水钢 HRB400 钢筋可以达到国家标准要求, 但轧后水冷对于钢筋性能影响不明显。最后总结出在水钢目前实际生产条件下, 应不采用轧后控冷工艺。

**关键词:**钢筋; 轧制; 力学性能; 轧后冷却速度

中图分类号: TG142.41

文献标志码: A

## Effects of Cooling Velocity after Rolling on the Mechanical Properties of HRB 400 Reinforced Steel Bar

Liu Xudong<sup>1</sup>, Sheng Guangmin<sup>1</sup>, Jiang Liping<sup>1</sup>, Gong Shihong<sup>1</sup>,  
Yang Maolin<sup>2</sup>, Liu Yonglin<sup>2</sup>, Wang Lijuan<sup>2</sup>, Wei Fulong<sup>2</sup>, Sun Cheng<sup>2</sup>

(1. College of Materials Science and Engineering Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China;  
2. Shuicheng Steel (group) Co. Ltd., Liupanshui 553028, P. R. China)

**Abstract:** The mechanical properties of V reinforced steel bars with diameter of 25 mm, treated by different cooling velocity after rolling, such as strength, ductility, impact toughness, and fatigue properties under high strain low cycle were systematically investigated. By using the microhardness measure, microstructure observation and SEM, it was found that non-homogeneous component and texture, which were generated by water cooling after rolling, made strength and fatigue properties under high strain low cycle of steel bars increase unapparently, and made impact toughness of steel bars reduce. Test results show that steel bars produced by Shuicheng Steel Co. Ltd reach the demand of national norms and that cooling after rolling affects mechanical properties unapparently. It is concluded that in such production conditions cooling after rolling should not be used.

**Key words:** reinforced steel bar; rolling; mechanical properties; cooling velocity after rolling

随着人们对住房需求的增加, 国家建筑业向着大型化、高层化的方向高速发展, 伴随着钢筋作为建筑结构的加强材料得到了广泛的应用, 同时对钢筋综合性能的要求也越来越高。钢筋通过添加微合金

元素, 配合以控制轧制技术使其强度和综合性能不断增强, 常用钢筋已由早期的 16 Mn 发展到 20 MnSi, 从 25 MnSi 发展到 HRB400 新 III 级钢筋。目前, 已有很多试验<sup>[1-4]</sup>对钢筋添加的微合金元素及

收稿日期: 2007-7-20

作者简介: 刘旭东(1983-), 男, 重庆大学硕士研究生, 主要从事钢筋抗震性能的研究工作。

盛光敏(联系人), 男, 重庆大学教授, 博士生导师, (E-mail) gmshe@cqu.edu.cn。

控制轧制工艺进行了研究。有报道提出<sup>[5]</sup>控轧后水冷可能提高钢筋强度,从而可以使得钢筋在降低合金成分后,仍能满足国家标准的规定,以减少生产成本。总之,对 HRB400 Ⅲ级钢筋的轧制工艺及其轧后控冷工艺进行研究,其成果可直接用于指导生产实践,有较强的研究意义。

该试验利用水城钢铁(集团)有限公司试生产的钒强化钢筋。通过一系列试验测定了这批钢筋的强度、塑性、冲击韧性、高应力低周疲劳性能等多种力学性能指标,并分析了控轧后不同冷却速度对钢筋这些力学性能指标的影响,并提出了生产实践的指导性建议。

## 1 试验材料及试验方法

### 1.1 试验材料

试验材料为水城钢铁集团有限公司试生产的规格为  $\Phi 25$  mm 钒强化钢筋。钢坯由水钢炼钢厂的 80 t 的转炉冶炼,冶炼过程中充入氮气。钢化学成分如表 1 所示,同时用 LecoTC-436 型氮氧气体分析仪对钢中气体进行了分析也列于表 1 中。特别的,

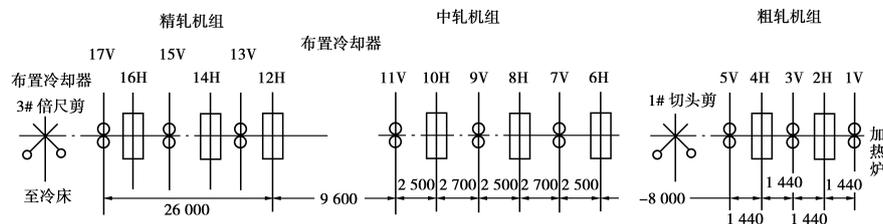


图1 轧机布置示意图

钢筋的轧制过程为:钢坯在加热炉中加热至  $1100 \sim 1150$  °C,出炉后以  $12$  m/s 的轧制速度进行轧制。为了降低进精轧温度,在中轧和精轧机组之间安装了对钢坯进行预冷的长为  $6.7$  m 的冷却水管,此水管水压恒定为  $1.1$  MPa,使得进精轧温度在  $870 \sim 920$  °C 范围内变化。轧制完成后,为了实现轧后的控冷工艺,随后采用两段长均为  $7.2$  m 的冷却水管对钢筋进行穿水冷却,两段水管间距  $12$  m。不同的冷却速度通过控制冷却水管内喷嘴提供的水压大小来实现。如表 2 所示轧后控冷工艺分为 3 种:

(1)终轧后两冷却水管都不提供水压,钢筋通过管道后空冷,即为 31,41 号钢;

(2)终轧后冷却水管同时提供  $0.7$  MPa 水压,钢筋通过管道后空冷,即为 32,42 号钢;

(3)终轧后冷却水管同时提供  $1.3$  MPa 水压,钢筋通过管道后空冷,即为 33,43 号钢。

### 1.2 试验方法

强度和塑性是衡量钢筋性能好坏的重要指标,试验通过对未加工的钢筋进行拉伸试验,测定其屈服强度( $R_{el}$ )抗拉强度( $R_m$ )以及延伸率( $A$ )。

钢材低温脆断,常造成灾难性事故。钢筋韧性的大小与钢筋的韧脆转变温度(DBTT)直接相关。把钢筋加工分别加工成标准的夏氏 V 形缺口冲击试

为研究轧后水冷对于低碳含量钢的影响程度,4 号钢筋降低了碳含量,其碳含量要低于国家标准 GB1499-1998 的规定。

表1 试验钢筋化学成分表(wt%)

钢号	C	Mn	Si	V	P	S	O/ppm	N/ppm
3	0.19	1.33	0.56	0.059	0.024	0.024	44	101
4	0.14	1.32	0.52	0.059	0.029	0.027	50	84

表2 试验钢筋控冷制度

钢号	编号	水冷制度
	31	控轧后空冷
3	32	控轧后 0.7 MPa 水冷
	33	控轧后 1.3 MPa 水冷
	41	控轧后空冷
4	42	控轧后 0.7 MPa 水冷
	43	控轧后 1.3 MPa 水冷

两种钢筋均采用相同得轧制工艺,轧制分为初轧,中轧及精轧三个部分,其中初轧机 5 台,中轧和精轧机各 6 台,轧制时机组配置如图 1 所示:

样,分别在  $-40$  °C,  $-20$  °C,  $0$  °C 及室温 ( $27$  °C) 条件下按照 GB4195-84 进行系列冲击试验,试验采用乙醇加液氮降温,达到设定的温度后,保温  $20$  min 左右。根据相关标准,冷却温度与设定温度之差(过冷度)取  $2 \sim 4$  °C。由能量法( $A_{kv} = 27$  J 时所对应的温度)在冲击曲线上截取获得韧脆转变温度。

试验在 Instron Model 1342 液压伺服材料试验机上按照 GB3075-82(金属轴向疲劳试验方法)进行。试验采用轴向应变控制,控制 4 个应力水平分别为  $\pm 1\%$ 、 $\pm 1.5\%$ 、 $\pm 2\%$ 、 $\pm 2.5\%$ ,应变频率为  $0.1 \sim 0.4$  Hz,采用对称正弦波循环。模数转换器通过计算机自动采集应力响应数据。试验条件为大气环境,室温。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 强度与塑性

拉伸试验结果如表 3 所示。

从表 3 的数据可以看出,试验钢筋的总伸长率  $A$  达到  $28\%$  以上,4 字头的钢筋甚至达到了  $30\%$ ,远远超过 GB 1499—1998 规定的  $14\%$ 。碳含量为  $0.19\%$  的钢筋,无论其控冷工艺如何,都达到了 GB 1499—1998 中对Ⅲ级钢筋的技术要求。但碳含量为  $0.14\%$  的钢筋,虽然屈服强度  $R_{el}$  都在国家标准

规定的 400 MPa 以上。

表 3 热轧态钢筋的拉伸试验结果

编号	$R_{el}/\text{MPa}$	$R_m/\text{MPa}$	$A/\%$	$R_m/R_{el}$
31	474	597	28.9	1.26
32	459	582	28.6	1.27
33	474	605	28.2	1.28
41	402	530	32.2	1.32
42	423	546	31.7	1.29
43	443	571	30.4	1.29

但其抗拉强度  $R_m$  只有编号为 43 的钢筋达到了国家标准规定的 570 MPa。试验钢筋的  $R_m/R_{el}$  值都大于 GB 50011—2001(建筑抗震设计规范)规定的 1.25, 3 号钢筋已达到国家各标准对于 III 级钢筋的要求。

较高碳含量的钢筋在 0.7 MPa 水冷后钢筋的强度和塑性都有所降低, 1.3 MPa 水冷后强度提高, 塑性降低; 碳含量较低的钢筋随着冷却速度的提高, 强度逐渐提高, 塑性逐渐降低。这是由于表面高的冷却速度使得马氏体、贝氏体组织在钢筋表面的形成, 穿水冷却时表面冷却速度高于心部, 穿水后心部的余热传向表面,

使得表面温度重新升高, 最终得到回火马氏体组织。这种马氏体类型组织可以使钢筋得强度和硬度得到提高。

同时从表 2 可以看出, 32 钢筋比较异常, 其强度和塑性都比空冷钢筋低。

为了研究其原因, 对 3 号头钢筋横截面心部开始沿半径进行维氏硬度测量。如图 2 所示。显微硬度的分布实际上反映了冷却时冷却速度的分布, 冷却速度高的地方晶粒越细小硬度也大。由图 2 可以看出, 31 号样品表面和心部的硬度差最小, 而 32 和 33 号样品的表面与心部硬度差较大。特别是冷却水压力为 0.7 MPa 的 32 号试样, 其表面硬度甚至比冷却速度更高的钢筋高出很多。这表明, 当冷却水压较低时, 因冷却能力不足使得截面上的冷却速度分布更不均匀。另外, 不同位置的钢筋表面上的冷却速度也不均匀。这些冷却速度的不均匀导致了硬

度分布的不均匀, 进而导致钢筋表面、心部间残余应力的产生, 从而影响钢筋的强度和塑性。32 号钢筋正是因为这种冷却的不均匀, 使得其强度和塑性都偏低。

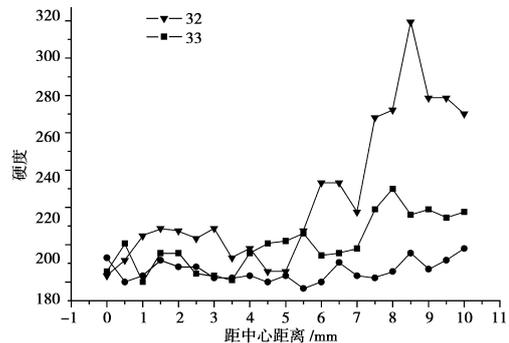


图 2 钢筋横截面硬度分布图

同时, 为了研究不同冷却速度对钢筋表面的晶粒度大小和组织的影响, 对钢筋横截面边缘部分进行了金相观察, 如图 3 所示。

由图 3 可以看出, 试样边缘的晶粒随着冷速的提高而明显变小。晶粒大小的不同也解释了边缘硬度的差异。正如前面的分析, 观察到 33 和 43 号钢筋边缘部分由于冷却速度较大, 已经产生了灰色的非珠光体组织。这种组织可能会对钢筋的服役的安全产生不利影响, 在钢筋生产中应避免出现这种组织。

由以上试验结果可知, 按照上述冷却装置控冷后, 轧后较快速度水冷可以使得钢筋的强度提高, 冷却水压不足时不但不能提高强度, 反而会由于组织更加不均匀而同时降低钢筋强度和塑性。在获得了一定的冷速后, 随着冷速提高, 钢筋强度会逐步提高, 塑性逐步降低。但是, 强度的提高量和塑性的降低量并不明显, 冷却水压到达 1.3 MPa 时钢筋边缘部分有明显的灰色异常组织产生。钢筋碳含量较低 (0.14%) 时提高其水冷压力至 1.3 MPa 以上虽然可以使其强度可达到国家标准要求, 但由于钢筋中产生了不宜出现的非珠光体组织, 也不利于工程应用。

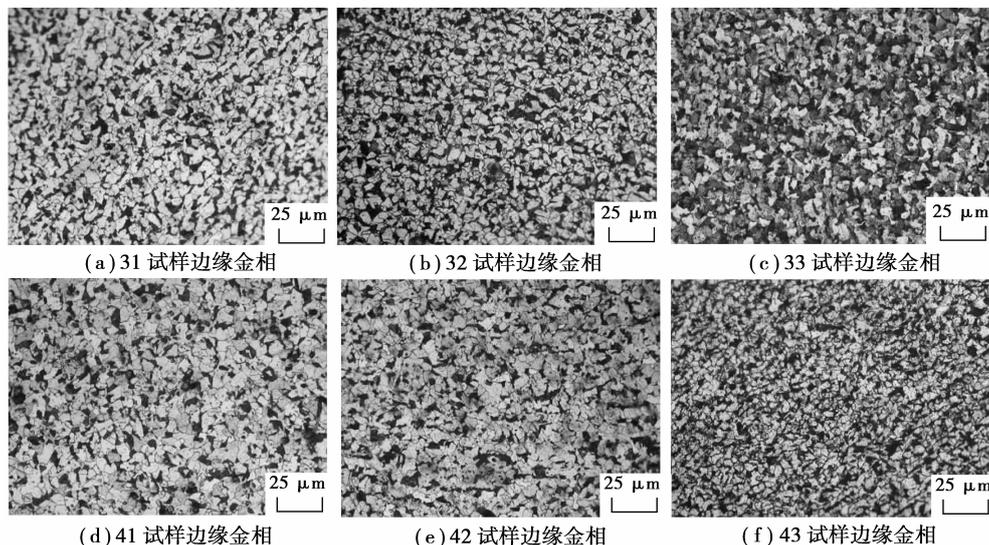


图 3 边缘金相组织图

### 2.2 韧脆转变温度

进行夏比系列冲击试验,分别绘制 3 字头和 4 字头号钢的冲击曲线,如图 4-5 所示。

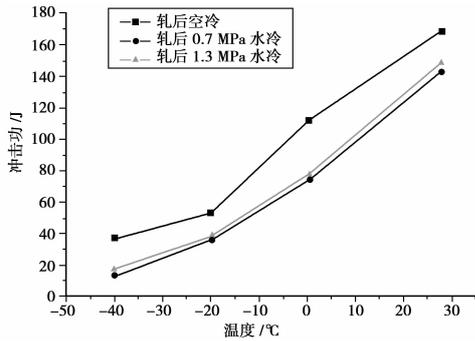


图 4 31,32 和 33 的冲击曲线

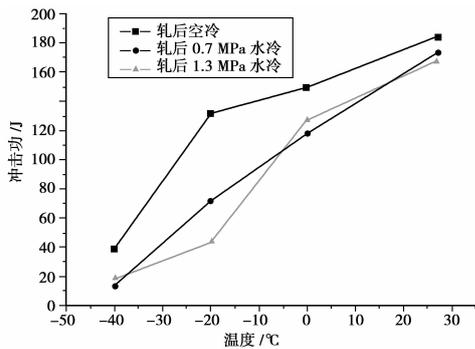


图 5 41,42 和 43 的冲击曲线

可以看出各号钢的韧脆转变温度 (DBTT) 都达到了  $-20\text{ }^\circ\text{C}$  以下,3 号钢筋在国内大部分地区服役都不会因为温度问题而造成脆性断裂。

空冷的 31 和 41 号钢,冲击韧性在各温度都要高出同系列的另两种钢筋,这是由于水冷加大了钢筋内部的内应力,这种内应力会使得钢筋韧性降低。其韧脆转变温度都要低于  $-40\text{ }^\circ\text{C}$ ,其中碳含量较低时低温韧性较高。轧制后水冷会使钢筋韧性下降,但冷却水压的大小对低温韧性和韧脆转变温度的影响并无明显规律,对于碳含量较高的钢筋,较高的冷却速度其冲击韧性也较高;碳含量较低的钢筋,冷却速度低时在绝大多数的温度区间都拥有较高的韧性,冷却速度较高时只是在  $0\text{ }^\circ\text{C}$  附近的韧性比冷速低的钢筋高。

取 31 号钢筋韧性最低时 ( $-40\text{ }^\circ\text{C}$  时) 的冲击断口进行扫描断口分析。分析区域为图 6 中的 1、2、3、4 区,可以清楚的观察到韧性断口形貌和脆性断口形貌的转变,如图 7 所示。

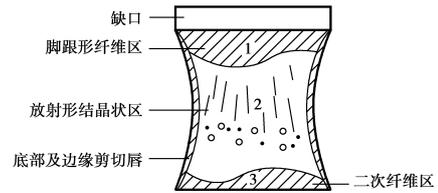
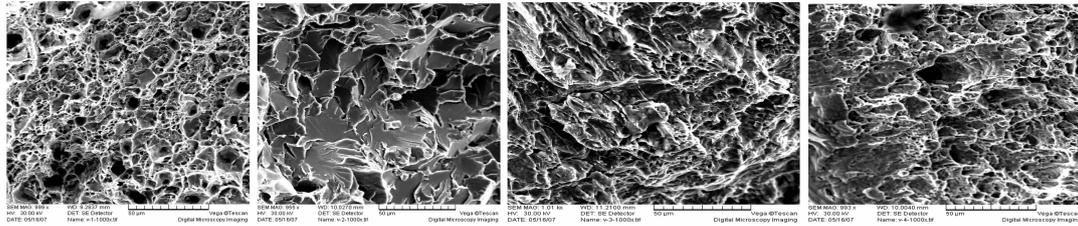


图 6 扫描电镜观察区域图

通过图 7 可以观察到,在靠近缺口的区域 1,断口形貌为明显的韧窝状韧性断口;在放射区中心区域 2 为代表脆性断裂的解理断裂;远离缺口的区域 3 为脆性与韧性断口并存的断口形貌;剪切唇中央区域 4 为韧窝状断口。可见试样总体上应属于韧性断裂,这与冲击试验结果相一致。



(a) 区域1扫描结果 (b) 区域2扫描结果 (c) 区域3扫描结果 (d) 区域4扫描结果

图 7 不同区域扫描结果图

### 2.3 高应变低周疲劳试验

地震是交变载荷,有资料称<sup>[6]</sup>,地震可作为高应变低周疲劳处理。为了测定水钢 HRB400 钢筋的抗震性能和控冷工艺对钢筋抗震性能的影响,对 3 字头号钢筋的高应变低周疲劳性能进行了测试。

在交变载荷作用时,每个应变值都会有一个应力值与之对应,通常在一定周次后,连接各应力,应变点可形成一个封闭的曲线,称为应力-应变滞回曲线。按照吸能的观点,该环的面积越大,则表示钢筋在受到循环载荷的时吸收的能量越多,从而反映了材料抵抗地震的能力。为了计算方便,试验通过数据对 Coffin-Manson 公式及 Hollomon 公式拟和,计算出循环稳定后(本试验取 100 周时)总应变 ( $\Delta\epsilon_t$ ) 与应力幅值 ( $\sigma_a$ )。并把它们的乘积用以近似表示滞回曲线所包围区域的面积。

高应变低周疲劳寿命如表 4 所示:

表 4 钢筋高应变低周疲劳寿命

试样编号	总应变 $\Delta\epsilon_t$	$N_f$	试样编号	总应变 $\Delta\epsilon_t$	$N_f$	试样编号	总应变 $\Delta\epsilon_t$	$N_f$
31	0.020	719	32	0.020	730	33	0.020	716
	0.030	253		0.030	254		0.030	329
	0.040	162		0.040	165		0.040	188
	0.050	135		0.050	106		0.050	127

Hollomon 公式用来描述应力与应变的关系。公式如(1)和(2)所示

$$\sigma_a = k\epsilon_a^n, \tag{1}$$

$$\sigma_a = h\epsilon_{pa}^m \tag{2}$$

公式(1)和(2)中  $\sigma_a$  表示应力幅值,  $\epsilon_a$  表示应变幅,  $\epsilon_{pa}$  表示塑性应变幅,  $k, h, m, n$  为材料参数。对此公

式在双对数坐标轴下线性拟和结果如表 5 所示:

表 5 循环应力-应变关系式

试样编号	$\sigma_a-\varepsilon_{pa}$ 关系	$\sigma_a-\varepsilon_a$ 关系
31	$\sigma_a = 1\ 300.17\varepsilon_{pa}^{0.174\ 2}$	$\sigma_a = 1\ 452.11\varepsilon_a^{0.211\ 7}$
32	$\sigma_a = 1\ 224.62\varepsilon_{pa}^{0.162\ 9}$	$\sigma_a = 1\ 367.72\varepsilon_a^{0.197\ 4}$
33	$\sigma_a = 1\ 116.86\varepsilon_{pa}^{0.137\ 2}$	$\sigma_a = 1\ 218.99\varepsilon_a^{0.167\ 2}$

Coffin-Manson 公式用以描述疲劳寿命与总应变的关系。其公式如(3)所示:

$$\Delta\varepsilon_i = B(2N_f)^{-b} + C(2N_f)^{-c} \quad (3)$$

公式(3)中, $\Delta\varepsilon_i$ 表示总应变, $N_f$ 表示循环周数, $B$ 、 $b$ 、 $C$ 、 $c$ 分别为疲劳强度系数、疲劳强度指数、疲劳塑性系数和疲劳塑性指数,它们都为材料参数。对其进行双对数坐标轴下线性拟和,结果如表 6 所示:

表 6 拟合后的 Coffin-Manson 公式

试样编号	Coffin-Manson 公式拟合结果
31	$\Delta\varepsilon_i = 1.327\ 7(2N_f)^{-0.633\ 7} + 0.015\ 8(2N_f)^{-0.131\ 1}$
32	$\Delta\varepsilon_i = 0.886\ 6(2N_f)^{-0.5749} + 0.018\ 5(2N_f)^{-0.15\ 2}$
33	$\Delta\varepsilon_i = 1.477\ 1(2N_f)^{-0.644\ 3} + 0.018\ 2(2N_f)^{-0.142\ 6}$

将  $N_f = 100$  周代入表 6 中的 Coffin-Manson 公式,得到疲劳圈数为 100 周时所对应的总应变  $\Delta\varepsilon_i$ ,由此得到总应变幅  $\varepsilon_a = \Delta\varepsilon_i/2$ ,将  $\varepsilon_a$  值代入表 5 中的循环应力-应变关系,即可求出相对应的  $\sigma_a$  值。由此计算得到钢筋抗震性能主要指标: $\Delta\varepsilon_i \cdot \sigma_a$ ,定义该值为循环韧度,计算结果如表 7 所示。

表 7 钢筋的循环韧度计算结果

试样编号	$\sigma_a/\text{MPa}$	$\Delta\varepsilon_i$	循环韧度/( $\text{J} \cdot \text{cm}^{-3}$ )
31	676.275	0.054 12	37
32	654.399	0.050 43	33
33	672.770	0.057 17	38

循环韧度是钢筋的主要抗震性能指标,其大小表示钢筋应力应变循环一周的吸能多少,可用来评价钢筋抗震性能的好坏。由表 7 可知,31 号钢与 33 号钢循环韧度几乎相同,由于 33 号钢循环周数比 31 号钢略高,可以认为 33 号钢的抗震性能比 31 号钢略好,也即是说,较大的水压可以略微提高钢筋的抗震性能,但是效果并不显著。这是由于水冷细化了钢筋表面的晶粒,增大了表面硬度,而疲劳裂纹往往在表面首先形成,这种晶粒的细化和表面强度的提高有助于阻碍裂纹的形成与扩展,从而提高了钢筋抗震性能。钢筋在较低冷却速度下,由于冷速过低,如图 2 所示,钢筋边缘部分有较高内应力,这使得钢筋边缘裂纹形成更加容易,从而降低了钢筋的抗震性能。

### 3 讨论

轧后冷却速度过低会使得钢筋的塑性和强度都降低,之后继续增大冷却水压强度略微提高性,塑性略微降低,同时使得钢筋边缘产生非珠光体组织;轧后水冷会降低钢筋的韧性,并略微优化钢筋抗震性能。

总之,轧后水冷无论冷速快慢,上述的冷却水管控冷工艺都不能明显改善钢筋的力学性能。但轧后水冷反而会增加生产线长度,从而降低了生产效率,提高了钢筋生产成本,并严重增加了厂房噪声。因

此,在没有更好控冷设备前提下,建议在实际生产中不采用轧后控冷工艺。

### 4 结论

1)生产的 31 号钢筋可以达到 HRB400 III 级钢筋的要求,实际生产可按照此成分和轧制温度控制。

2)碳含量为 0.19% 的钢筋在冷速较慢时强度和塑性都有所下降;当达到一定冷却速度后继续提高冷速可使得钢筋强度略微提高,塑性略微降低;碳含量为 0.14% 的钢筋在 0.7 MPa 水压下冷却已可使其强度提高。其中冷却速度对碳含量低的钢筋的影响较为明显。水压 1.3 MPa 时两种钢筋边缘都产生了非珠光体组织。

3)轧后水冷工艺会降低钢筋韧性,但冷速快慢对于韧性影响不大。

4)提高水冷速率,并不能明显改善钢筋的循环韧度。

5)在水钢目前生产实际条件下,轧后冷却速度对钢材的强韧性无明显影响,建议在实际生产中不采用此工艺。

### 参考文献:

- [1] 龚士弘,盛光敏. 微钒钛高抗震性能建筑结构钢及其控轧工艺[J]. 钢铁, 1998,33(11):30-33.  
GONG SHIHONG, SHENG GUANGMIN. Vanadium titanium micro-alloyed high anti-seismic structural steels and its controlled rolling technology [J]. Iron and Steel, 1998,33(11):30-33.
- [2] 王祖滨. 低合金钢和微合金钢的发展[J]. 中国冶金, 1999(3): 19-23.  
WANG ZUBIN. Development of low-alloy and micro-alloy steels[J]. China Metallurgy, 1999(3): 19-23.
- [3] 杨永权,杨才福,柳书平. 钒氮微合金化钢筋的研究[J]. 钢铁钒钛, 2000,21(3):12-14.  
YANG YONGQUAN, YANG CAIFU, LIU SHUPING. Study of V-N micro-alloyed steel for reinforcing bars [J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2000,21(3):12-14.
- [4] 杨才福,杨永权,柳书平. 钒氮微合金化钢筋的强化机制[J]. 钢铁, 2001,36(5):55-57.  
YANG CAIFU, YANG YONGQUAN, LIU SHUPING. Strengthening mechanism in V-N micro-alloyed reinforcing bar steels [J]. Iron and Steel, 2001,36(5):55-57.
- [5] 刘祥等. HRB400 III 级热轧带肋钢筋的开发和应用[J]. 江苏冶金, 2001,6(29): 24-26.  
LIU XIANG. Exploiting and application of HRB400 [J]. Jiangsu Metallurgy, 2001,6(29): 24-26.
- [6] 龚士弘,盛光敏. 抗震设计用钢探讨[J]. 工程抗震, 1995,(2):37-42.  
GONG SHIHONG, SHENG GUANGMIN. Discussion on steels for anti-seismic design [J]. Earthquake Resistant engineering, 1995,(2):37-42.
- [7] 束德林. 金属力学性能[M]. 北京:机械工业出版社, 1999.

(编辑 张小强)