

## 矿用高强度链环钢 23MnNiMoCr54 奥氏体晶粒长大行为的研究

赵海东<sup>1</sup> 刘佳兴<sup>2</sup> 张朝磊<sup>2</sup> 苗红生<sup>1</sup> 刘雅政<sup>2</sup>

(1 西宁特殊钢股份有限公司, 西宁 810005; 2 北京科技大学材料科学与工程学院, 北京 100083)

**摘要** 研究表明:链环钢 23MnNiMoCr54 奥氏体晶粒的粗化温度为 900 °C, 为避免“混晶现象”的发生, 最佳奥氏体化工艺在 850 °C 下保温 30 min。在相同保温时间下, 奥氏体晶粒随着加热温度在 850 ~ 1 100 °C 内升高呈指数关系长大。在相同加热温度下, 平均奥氏体晶粒尺寸与保温时间的关系符合 Beck 模型, 晶粒长大指数  $n$  随着加热温度的升高先降低后升高。依据 Arrhenius 公式拟合得到了链环钢 23MnNiMoCr54 在 950 ~ 1 250 °C 内的奥氏体晶粒长大模型  $D = 2.105 \times 10^3 t^{0.138} \exp(-5.18 \times 10^4/RT)$ 。

**关键词** 矿用高强度链环钢 23MnNiMoCr54 奥氏体 晶粒长大模型

## A Study on Austenite Grain Growth Behaviour of High Strength 23MnNiMoCr54 Link-Chain Steel for Mining

Zhao Haidong<sup>1</sup>, Liu Jia xing<sup>2</sup>, Zhang Chao lei<sup>2</sup>, Miao Hongsheng<sup>1</sup> and Liu Yazheng<sup>2</sup>

(1 Xining Special Steel Co Ltd, Xining 810005; 2 School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083)

**Abstract** The research results show that the coarsening temperature of austenite grains of 23MnNiMoCr54 link-chain steel is 900 °C, in order to avoid “mix grain phenomena” occurred, the optimum austenitizing temperature of steel is 850 °C for 30 min. Austenite grains grow exponentially with the increase of heating temperature from 850 °C to 1 100 °C for same holding time. The relationship between the average austenite grain size and holding time conforms to Beck model at the same heating temperature, the grain growth index ( $n$ ) first decreases and then increases with increase of temperature. The austenitic grain growth model  $D = 2.105 \times 10^3 t^{0.138} \exp(-5.18 \times 10^4/RT)$  for 23MnNiMoCr54 link-chain steel at 950 ~ 1 250 °C is obtained by fitting in Arrhenius formula.

**Material Index** High Strength 23MnNiMoCr54 Link-Chain Steel for Mining, Austenite, Grain Growth Model

随着煤矿机械行业的快速发展, 煤矿综合开采设备也会向着大功率、高可靠性发展, 对矿用链环作为煤矿机械主要设备刮板运输机上的传动链也提出了相应的要求。目前中小规格、低强度级别矿用链环钢已经实现国产化, 大规格、高强度的矿用链环需求量也在不断增加。国产矿用高强度链环依然存在力学性能不稳定、疲劳寿命偏低等问题<sup>[1-2]</sup>, 产品质量与进口链环相比有明显差距。由于矿用链环的工作环境恶劣, 在使用过程中不仅要承受冲击载荷, 在链环之间的连接部位还会产生磨损和接触疲劳<sup>[3]</sup>, 这就要求链环具有较高的力学性能。

23MnNiMoCr54 钢是制造高强度矿用链环的主要原材料, 但对其奥氏体晶粒长大规律还缺乏系统性的研究。而奥氏体晶粒尺寸直接决定了贝氏体的晶粒形貌, 晶粒粗大会对链环强度、断裂韧性和韧脆转变温度产生不利影响, 且在后续链环的热处理工艺中伴随着奥氏体的晶粒长大行为, 因此研究奥氏体晶粒长大规律对控制轧材组织和提高链环力学性

能具有重要研究意义<sup>[4]</sup>。本文主要分析加热温度和保温时间对奥氏体晶粒长大的影响, 通过拟合得到 23MnNiMoCr54 钢奥氏体晶粒长大的 Arrhenius 数学模型<sup>[3]</sup>, 为链环轧材组织性能控制研究提供理论依据。

### 1 试验材料与方法

试验材料为钢厂生产的  $\Phi 34$  mm 的 23MnNiMoCr54 钢热轧棒材, 其化学成分为 (%): 0.2 C-0.24 Si-1.22 Mn-0.012 P-0.003 S-0.48 Cr-0.96 Ni-0.54 Mo-0.045 Al。在轧材 1/2 半径处取 10 mm × 10 mm × 15 mm 的长方体试样, 将试样在 800 ~ 1 250 °C 下保温 1 h, 在 950 ~ 1 250 °C 下保温 0.5 ~ 4 h 后水冷至室温。试样经打磨抛光, 在过饱和苦味酸 + 2% 盐酸 + 缓蚀液中浸蚀 3 ~ 5 min 以显示原始奥氏体晶界。利用 Nano Measure 软件按照国标 GB/T 6394-2002 直线截点法测量 23MnNiMoCr54 钢奥氏体平均晶粒尺寸。

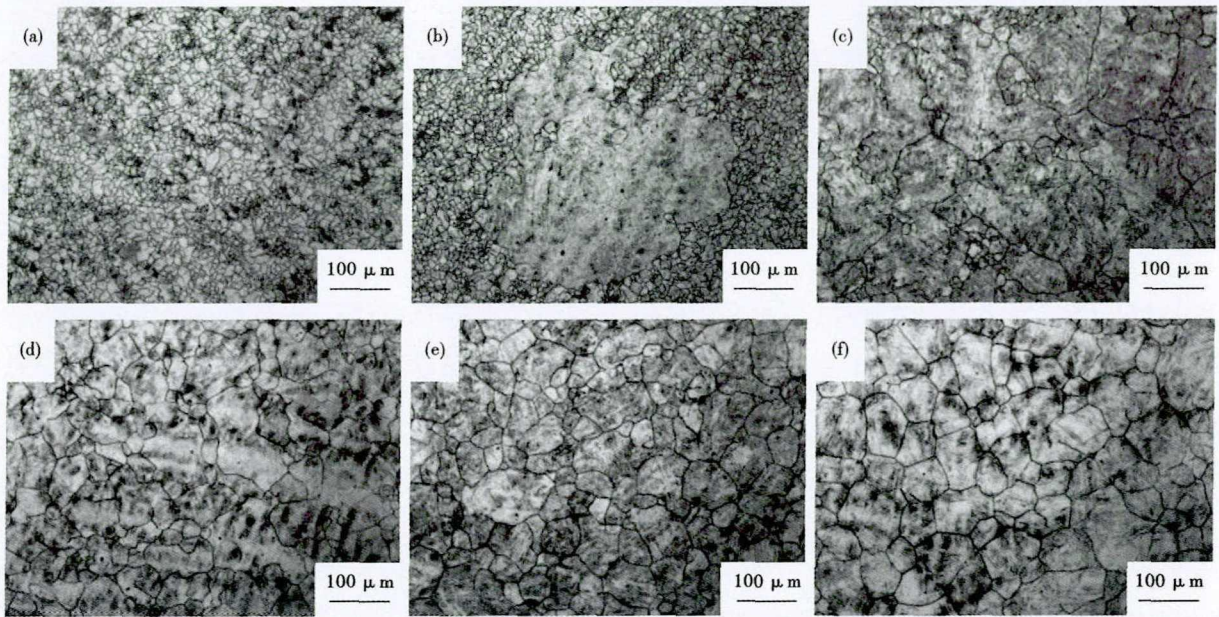


图 1 链环钢 23MnNiMoCr54 经 (a) 850 °C; (b) 900 °C; (c) 950 °C; (d) 1000 °C; (e) 1050 °C; (f) 1150 °C 1 h 加热的奥氏体晶粒形貌

Fig. 1 Morphology of austenite grain of 23MnNiMoCr54 link-chain steel heated at (a) 850 °C; (b) 900 °C; (c) 950 °C; (d) 1000 °C; (e) 1050 °C and (f) 1150 °C for 1 h

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 加热温度对奥氏体晶粒长大的影响

23MnNiMoCr54 钢在 850 ~ 1 100 °C 下保温 1 h 时的奥氏体晶粒形貌如图 1 所示,可以看出当加热温度为 900 °C 以下时,由于钢中弥散分布的析出相相对奥氏体晶界起到了钉扎的作用使得奥氏体晶粒尺寸均匀细小<sup>[5]</sup>。当加热温度升至 900 ~ 950 °C 时,晶粒尺寸开始变得不均匀,部分晶粒异常长大,开始出现“混晶”现象。在此温度区间平均奥氏体晶粒尺寸相对标准偏差高达 0.92 和 0.98,表明在此温度区间奥氏体晶粒不均匀程度最大。当加热温度从 900 °C 升至 1 100 °C 时,钢中弥散分布的析出相逐渐溶解,对奥氏体晶界的钉扎作用减弱致使奥氏体晶粒长大速度较快,平均奥氏体晶粒尺寸从 12.6 μm 增大到 62.6 μm。

保温时间一定的情况下,奥氏体晶粒的长大速率可以用式(1)来表述<sup>[6]</sup>:

$$v = K \exp(-Q/RT) \cdot \frac{a}{d} \quad (1)$$

式中:K- 常数;Q- 晶界迁移的激活能/(J · mol<sup>-1</sup>);R- 气体常数(8.314J/(mol · K));T- 绝对温度/K;d- 奥氏体晶粒(22 均直径(μm));a- 界面能/(J · mol<sup>-1</sup>)。可以看出,奥氏体晶粒的长大速率会随加热温度的提高而呈现指数级的增大,但是奥氏体晶

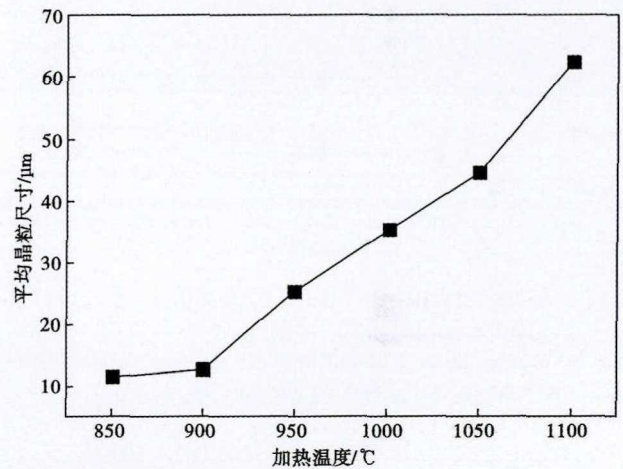


图 2 加热温度(保温 1 h)对 23MnNiMoCr54 钢平均奥氏体晶粒尺寸的影响

Fig. 2 Effect of heat temperature for holding 1 h on average austenite grain size of steel 23MnNiMoCr54

粒平均尺寸的增大又会抑制奥氏体晶粒的长大速率。23MnNiMoCr54 钢平均奥氏体晶粒尺寸与加热温度的关系曲线如图 2 所示,其较好地反映了上述规律。综合上述分析可以得出,23MnNiMoCr54 钢的奥氏体晶粒粗化温度为 900 °C,在一定保温时间下,随着加热温度的升高奥氏体晶粒呈指数关系长大。

### 2.2 保温时间对奥氏体晶粒长大的影响

23MnNiMoCr54 钢在不同加热温度下,平均奥氏体晶粒尺寸与保温时间的关系曲线如图 3 所示,可

以看出当加热温度为 950 ℃,保温时间为 0.5 ~ 4 h 时平均奥氏体晶粒尺寸从 36.9 μm 增大到 61.4 μm,晶粒尺寸极不均匀。加热温度由 1 050 ℃ 升至 1 250 ℃ 时,在各个保温时间段晶粒尺寸都较为均匀,奥氏体晶粒尺寸随保温时间延长长大速度较为缓慢。当加热温度升至 1 250 ℃ 时,随着保温时间的增加,奥氏体晶粒长大速度有所增加,平均奥氏体晶粒尺寸从 105.6 μm 增加到 170.6 μm,晶粒尺寸较为粗大。

在一定温度下,平均奥氏体晶粒尺寸与保温时间的关系可以用 Beck 方程式(2)描述<sup>[7]</sup>:

$$D = Kt^n \tag{2}$$

式中: $D$ -一定温度下平均奥氏体晶粒尺寸/ $\mu\text{m}$ ;

$K$ -晶粒生长速率; $t$ -保温时间/ $\text{s}$ ; $n$ -晶粒长大指数。

将试验数据代入式(2)中进行线性回归处理,得到  $\ln D - \ln t$  的关系曲线如图 4 所示。

可以看出,在一定加热温度下,23MnNiMoCr54 钢奥氏体晶粒的长大规律符合 Beck 方程。图 4 直线的斜率代表对应温度下奥氏体晶粒的生长指数  $n$  依次为 0.233、0.027、0.055、0.236,随着温度的升高  $n$  值先降低后升高。 $n$  值反映奥氏体晶粒长大驱动力的大小, $n$  值越小说明钢中有较多稳定化合物存在,钉扎晶界从而阻碍奥氏体晶粒长大。影响  $n$  值的主要因素有钢中第二相粒子的尺寸及其体积分数,钢中第二相粒子固溶程度越高, $n$  值越趋近于理论值 0.5<sup>[8]</sup>。当加热温度为 1 050 ~ 1 150 ℃ 时, $n$  值均较小且相对而言变化不大,说明在此温度范围内,温度升高并未导致第二相粒子大量固溶;而当温度从 1 150 ℃ 升至 1 250 ℃ 时, $n$  值显著增大到 0.236,表明此时第二相粒子大部分固溶,对晶界的钉扎作用减弱,晶粒长大速度明显加快。

### 2.3 晶粒长大模型

在热加工过程中加热温度和保温时间相互作用,共同影响奥氏体晶粒长大过程。综合考虑这两个因素,利用 Arrhenius 公式<sup>[9]</sup>建立 23MnNiMoCr54 钢的奥氏体晶粒长大模型,如式(3)所示。

$$D = At^n \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \tag{3}$$

式中: $D$ -平均奥氏体晶粒尺寸/ $\mu\text{m}$ ; $t$ -保温时间/ $\text{s}$ ; $Q$ -晶界激活能/ $(\text{J} \cdot \text{mol}^{-1})$ ; $R$ -气体常数 $[8.314\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})]$ ; $T$ -加热温度/ $\text{K}$ ; $A$ 、 $n$ -常数。

将试验数据代入式(3)中进行二元线性拟合<sup>[10]</sup>,

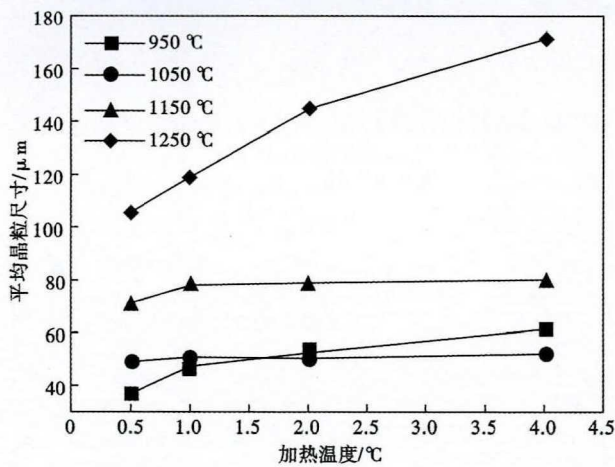


图 3 23MnNiMoCr54 钢平均奥氏体晶粒尺寸与 950 ~ 1 250 ℃ 保温时间的关系曲线

Fig. 3 Curves of steel 23MnNiMoCr54 average austenite grain size with holding time at 950 ~ 1 250 ℃

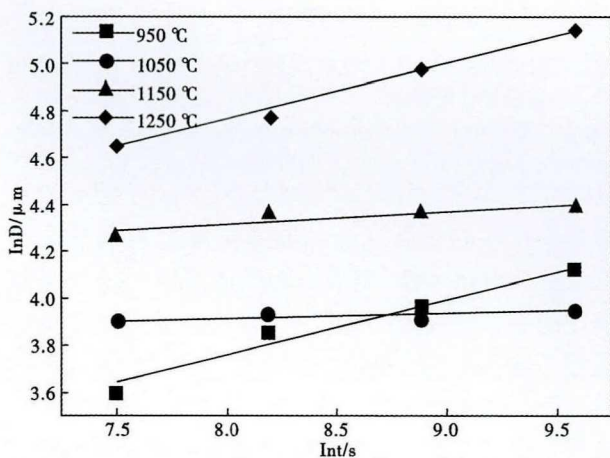


图 4 950 ~ 1 250 ℃ 加热的 23MnNiMoCr54 钢  $\ln D - \ln t$  关系曲线

Fig. 4 Curves of  $\ln D - \ln t$  of steel 23MnNiMoCr54 heating at 950 ~ 1 250 ℃

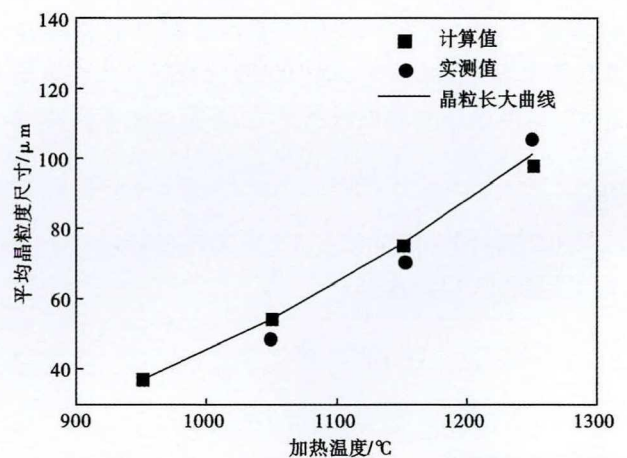


图 5 23MnNiMoCr54 钢 950 ~ 1 250 ℃ 加热时奥氏体晶粒计算值与实测值对比

Fig. 5 Composition of calculated values and measured values of austenite grain of steel 23MnNiMoCr54 heating at 950 ~ 1 250 ℃

得出  $A = 2.105 \times 10^3$ , 标准误差为 0.79,  $n = 0.138$ , 标准误差为 0.06,  $Q = 5.18 \times 10^4$ , 标准误差为  $7.99 \times 10^2$ , 从而推导出 23MnNiMoCr54 钢奥氏体晶粒长大模型, 如式(4)所示。

$$D = 2.105 \times 10^3 t^{0.138} \exp\left(-\frac{5.18 \times 10^4}{RT}\right) \quad (4)$$

利用式(4)计算在不同加热温度下保温30 min后所得的平均奥氏体晶粒尺寸, 将实测值与计算值进行比对, 如图5所示。可以看出实测值基本上分布在式(4)所拟合出的奥氏体晶粒长大曲线附近, 所得 23MnNiMoCr54 钢奥氏体晶粒长大模型可为链环轧材组织性能控制研究提供理论依据。

### 3 结论

(1) 为避免“混晶现象”的发生, 23MnNiMoCr54 钢的最佳奥氏体化温度为 850 °C。在相同保温时间下, 奥氏体晶粒随着加热温度的升高呈指数关系长大。在 900 ~ 950 °C 加热时出现“混晶现象”, 平均奥氏体晶粒尺寸相对标准偏差高达 0.92 和 0.98, 不均匀程度最大。

(2) 在相同加热温度下, 平均奥氏体晶粒尺寸与保温时间的关系符合 Beck 模型, 晶粒长大指数在 1 050 ~ 1 250 °C 内先降低后升高。奥氏体晶粒的粗化时间为 1h, 随着保温时间的延长, 奥氏体晶粒长大的趋势逐渐减缓, 奥氏体化最佳保温时间为 30 min。

(3) 建立了 23MnNiMoCr54 钢在 950 ~ 1 250 °C

内不同保温时间下的奥氏体晶粒长大模型,  $D = 2.105 \times 10^3 t^{0.138} \exp(-5.18 \times 10^4/RT)$ , 选取了保温时间为 0.5 h 的相关数据验证了该公式的准确性, 为链环轧材组织性能控制研究提供理论依据。

中央高校基本科研业务费专项资金资助 (FRF-NP-19-002)

### 参考文献

- [1] 武兴旺, 郭卫, 马瑞勇, 等. 矿用高强度圆环链的磨损特性及延长其使用寿命的方法[J]. 煤矿机械, 2011, 32(12): 220-221.
- [2] 张立文, 杨刚雷. 矿用高强度圆环链断裂分析[J]. 煤矿机械, 2016, 37(5): 161-162.
- [3] 冯文超.  $\Phi 34 \times 126C$  级矿用圆环链用钢开发[D]. 天津: 河北工业大学, 2010.
- [4] Elst R, Humbeek J V, Delaey L. Evaluation of Grain Growth Criteria in Particle-Containing Materials [J]. Acta Metallurgica, 1988, 36(7): 1723-1729.
- [5] 齐亮, 彭凯, 蔡文彩, 等. X120 管线钢奥氏体长大规律研究[J]. 材料导报, 2016, 30(6): 137-140.
- [6] 岳重祥, 张立文, 廖舒纶, 等. GCr15 钢奥氏体晶粒长大规律研究[J]. 材料热处理学报, 2008, 29(1): 94-97.
- [7] 刘建涛, 刘国权, 张义文, 等. FGH96 合金晶粒长大规律的研究[J]. 材料热处理学报, 2004, 25(6): 25-29.
- [8] 毛卫民, 赵新兵. 金属的再结晶与晶粒长大[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1994.
- [9] Zhang S S, Li M Q, Liu Y G, et al. The Growth Behavior of Austenite Grain in the Heating Process of 300M Steel [J]. Materials Science and Engineering A, 2011, 528(15): 4967-4972.
- [10] 金桂香, 王福明, 李克非, 等. 82B 高碳钢奥氏体晶粒长大行为[J]. 材料热处理学报, 2013, 34(7): 41-46.

赵海东(1972-), 男, 高级工程师, 1996 年青海省联合职业大学(本科)毕业, 特殊钢研究。E-mail: 407617326@qq.com

收稿日期: 2020-08-30

## 下期要目

减轻冲刷的单流通道式感应加热中间包结构化数学模拟 .....	曾红波等
形变量和冷却速度对 SCM435 冷锻钢形变诱导铁素体相变的影响 .....	陈继林等
GCr15 轴承钢大方坯凝固过程微观偏析模型及应用研究 .....	安航航等
轧制工艺对 L450M 管线钢组织和性能的影响 .....	杨小龙等
Nb-V-Ti 微合金化低合金钢 SG610E 250 mm × 2 000 mm 连铸尾坯封顶工艺试验与实践 .....	曹磊等
谐波减速器柔轮用特殊钢 RL40 的组织特性 .....	王洋等
固溶处理对热轧 Inconel 601 合金组织与力学性能的影响 .....	李吉东等
热处理工艺对 2% 硼 304B7 不锈钢组织性能的影响 .....	王斌等
调质处理对 22MnCrNiMo 钢闪光焊焊缝组织与力学性能的影响 .....	李仲昱等