

# 冷装与热装加热对 GCr15 轴承钢晶粒度影响的热模拟试验

刘亚丽<sup>1</sup> 段晓鹤<sup>2</sup> 张君平<sup>1</sup> 陈良<sup>1</sup>

(1 山钢股份莱芜分公司特钢事业部, 莱芜 271105; 2 北京科技大学工程技术研究院, 北京 100083)

**摘要** 对轴承钢的冷装和热装加热进行实验室热模拟, 对不同热装温度加热后的铸坯晶粒度级别进行分析, 对比冷装条件下晶粒度, 找到合理的热装温度。试验结果表明, 当热装温度超过 700 °C, 其铸坯组织的晶粒和冷装相比明显变得粗大, 晶粒度级别在 1~2 级; 根据生产现场连铸坯相变前的平均冷却速度为 0.41 °C/s, GCr15 轴承钢连铸坯的热装温度应控制在 670 °C 以下。

**关键词** 轴承钢连铸坯 冷装 热装 晶粒度

## Thermal Simulation Testing on Effect of Cold Charging and Hot Charging Heating on the Grain Size of Bearing Steel GCr15

Liu Yali<sup>1</sup>, Duan Xiaoge<sup>2</sup>, Zhang Junping<sup>1</sup> and Chen Liang<sup>1</sup>

(1 The Special Steel Plant of Laiwu Breach Company, Shandong Iron and Steel Co. Ltd., Laiwu 271105; 2 Institute of Engineering and Technology, University of Science and Technology, Beijing 100083)

**Abstract** For bearing steel in the cold and hot charging heating for laboratory thermal simulation, analyzed the level of casting billet grain size of hot charging by different heating temperature, and compared the grain size under the condition of cold charging, find the reasonable hot charging heating temperature. The results show that; when the hot charging temperature over 700 °C, compared with cold charging, its casting billet organization of grain become bulky, grain size level between grade 1 ~ 2; According to the work site, the before phase change cooling rate of casting billet as an average of 0.41 °C/s, the hot charging temperature of GCr15 bearing steel casting bille should be controlled less than 670 °C.

**Material Index** Bearing Steel Casting Billet, Cold Charging, Hot Charging, Grain Size

山钢股份莱芜分公司特钢事业部 GCr15 轴承钢棒材生产工艺为: 连铸坯准备(冷坯)-加热-Φ550 粗轧-Φ450×6 中轧-Φ350×6 精轧-冷却-标识入库, 采用断面为 180 mm×220 mm 连铸坯生产 Φ30~Φ50 mm 规格轴承钢。目前, 为保证产品质量, 国内生产轴承钢大多采用冷坯装炉<sup>[1]</sup>。此实验对轴承钢的冷装和热装加热进行实验室模拟, 通过实验确定冷装加热后的轧前晶粒度级别, 作为热装加热的晶粒度级别的衡量和对比标准, 同时对不同热装温度加热后的连铸坯晶粒度级别进行分析, 找到合理的热装加热制度, 指导实际生产。

### 1 实验内容

采用 Gleeble-1500 热模拟分析技术, 模拟 GCr15 轴承钢的冷装加热和不同的热装加热工艺, 对模拟后的试样进行组织分析。

#### 1.1 试样准备

试样化学成分见表 1。在连铸坯上边长 1/4 处, 车削出 Φ10 mm×120 mm 圆柱形试样。

#### 1.2 实验仪器

Gleeble-1500 热模拟试验机; 金相显微镜。

### 2 轴承钢冷装加热实验研究

#### 2.1 实验方案

实验工艺如图 1 所示, 将试样加热到半融状态(1350~1400 °C), 保温 2 min, 然后以 5 °C/s 的速(1350~1400 °C), 保温 2 min, 然后以 5 °C/s 的速

表 1 GCr15 轴承钢化学成分/%

Table 1 Chemical compositions of bearing steel GCr15 / %

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	Alt
0.97	0.23	0.29	0.017	0.006	1.46	0.02	0.03	0.08	0.040

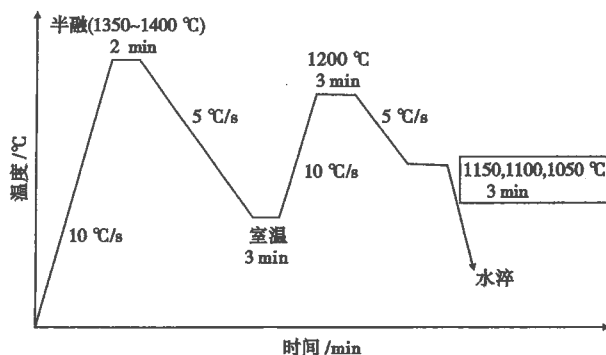


图 1 冷装模拟实验工艺曲线

Fig. 1 Curve of cold charging simulation experiment process

度将试样分别冷却到室温,保温 3 min(消除温度梯度),再以 10 °C/s 的速度将试样加热到 1 200 °C,保温 3 min,再以 5 °C/s 的速度将试样分别冷却到 1 150、1 100、1 050 °C,保温 3 min(消除温度梯度),水淬。为防止高温氧化,整个试验过程在氩气保护气氛中进行。

此实验工艺的说明:(1)将试样加热到半融状态(1 350~1 400 °C),保温 2 min,然后以 5 °C/s 的速度将试样分别冷却到室温。这是和后面热装工艺对比的需要,冷装和热装实验的试样全部加热到半融状态,并以相同的冷速冷却,这样可保证冷装和热装实验前的组织状态相同。(2)将试样加热温度确定为 1 200 °C,是为了保证碳化物液析完全溶解,同时根据生产现场的实际工艺确定<sup>[2]</sup>。

## 2.2 实验结果分析

试样经在 Gleeble 上热模拟后,对试样进行线切割,经研磨、过饱和苦味酸腐蚀,在金相显微镜下观察晶粒,并按国家标准《金属平均晶粒度测定方法》GB/T6394-2002,对晶粒度进行测量、计算,计算公式为:
$$G = \left[ -6.643\ 856 \times \lg\left(\frac{1}{p}\right) \right] - 3.288 \quad (1)$$

式中:G- 平均晶粒度级别数;p- 试样检验面上每毫米内的平均截点数。

测量计算结果见表 2。金相图片见图 2。

由表 2 和图 2 可以看出,轧前奥氏体晶粒度在 3.2~3.3 级,晶粒比较粗大。

在高碳铬轴承钢的加热过程中,未溶的、处于晶界上高度弥散的碳化物和氮化铝质点对奥氏体晶粒长大起着机械阻碍作用。高碳铬轴承钢的奥氏体晶粒长大过程大致可以分为两个阶段。

(1)主要受碳化物溶解过程所控制阶段。900~925 °C 以前,钢中碳化物部分固溶,但还有不少未溶的碳化物质点,这些质点阻碍奥氏体晶界的迁移,阻

表 2 冷装模拟不同轧前温度下的连铸坯晶粒度  
Table 2 Casting billet grain size rating with different before rolling temperature by cold charging simulation

轧前温度/°C	截点数					晶粒度级别
1 050	9	13	9	9.5	9	3.3
1 100	9	9	10	9	12	3.3
1 150	13	10	9	9	7	3.2

止晶粒长大。氮化铝质点的影响并不突出<sup>[3]</sup>。

(2)受氮化铝的溶解过程所控制阶段。925 °C 以上,钢中碳化物已基本溶解,甚至完全溶解,碳化物质点对晶粒长大的机械阻碍作用逐渐消失,此时阻碍晶粒长大的因素是未溶的氮化铝质点。随着加热温度的继续提高,氮化铝溶解,奥氏体晶粒变得越来越大。但是为消除碳化物液析,需要加热到 1 200 °C 左右,所以造成奥氏体晶粒比较粗大<sup>[3]</sup>。

由表 2 和图 2 还可以看出,开轧温度在 1 050~1 150 °C 时,晶粒度级别变化不大,因为此温度范围还在奥氏体区,无相变发生,所以,晶粒尺寸变化不大。

## 3 轴承钢热装加热实验研究

### 3.1 实验方法

实验工艺如图 3 所示,将试样加热到半融状态(1 350~1 400 °C),保温 2 min,然后以 5 °C/s 的速度冷却,将试样分别冷却到 1 000、950、900、850、800、750、700、650、600 °C,保温 3 min(消除温度梯度),再以 10 °C/s 的速度将试样加热到 1 200 °C,保温 3 min,再以 5 °C/s 的速度将试样分别冷却到 1 150、1 100 °C,保温 3 min(消除温度梯度),水淬。为防止高温氧化,整个试验过程在氩气保护气氛中进行。

### 3.2 实验结果分析

试样经在 Gleeble 上热模拟试验后,对试样进行线切割,经研磨、过饱和苦味酸腐蚀,在金相显微镜

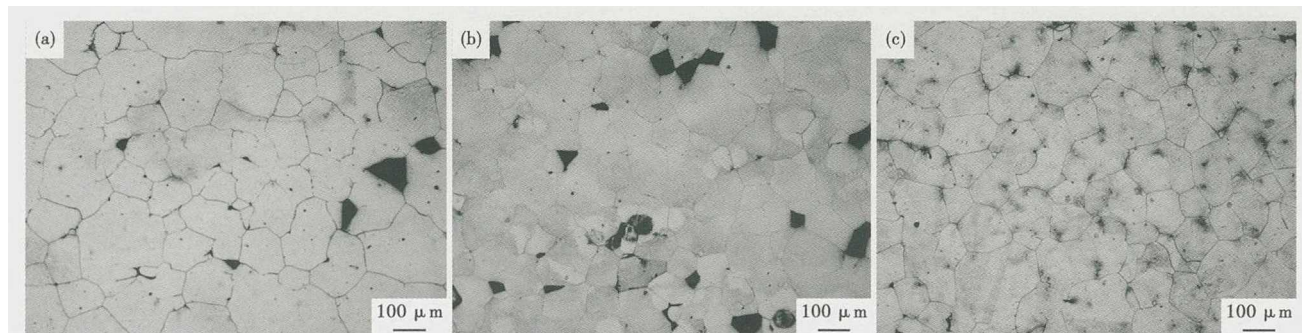


图 2 冷装模拟不同轧前温度下 GCr15 钢的晶粒度;轧前温度/晶粒度:(a)1 050 °C/3.3 级;(b)1 100 °C/3.3 级;(c)1 150 °C/3.2 级  
Fig.2 Steel GCr15 grain size with different before rolling temperature by cold charging simulation; temperature before rolling/grain size: (a)1 050 °C/rating 3.3; (b)1 100 °C/rating 3.3; (c)1 150 °C/rating 3.2

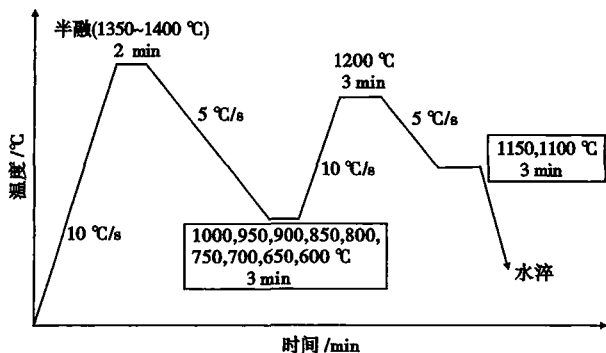


图 3 热装模拟实验工艺曲线

Fig. 3 Hot charging simulation experiment process curve

表 3 热装模拟不同工艺条件下的连铸坯晶粒度级别, 轧前温度 1 150 °C

Table 3 Casting billet grain size rating at difference process by hot charging simulation with before rolling temperature 1 150 °C

试样热装温度/°C	截点数								晶粒度级别
600	8	7	14.5	11	8	13	12	12.5	3.6
650	7.5	8	7	13.5	10	9.5	12.5	12	3.4
700	7	4	7	6	8.5	5	4	5	1.8
750	5	6	6	6	5	6	3	3	1.4
800	7	5	8.5	5	4	6	5	4	1.7
850	3	9	7.5	6	8	7	6	5	2.1
900	4	5	5.5	6	7	6	4	4	1.5
950	4	5	3	5	5	5	4.5	3.5	1.0

表 4 热装模拟不同工艺条件下的连铸坯晶粒度级别, 轧前温度 1 100 °C

Table 4 Casting billet grain size rating at difference process by hot charging simulation with before rolling temperature 1 100 °C

试样热装温度/°C	截点数								晶粒度级别
600	9	12	9	15	9.5	7	12	15	3.6
650	8	8	7	13	10	9	12	11	3.3
700	9	7	8	11	10	9	10	8	3.1
750	4	3	6	7	6	7	5	3	1.4
800	5	4	5	5	5	4	7	5	1.4
850	4	5	6	5	4	7	5	6	1.5
900	5	7	6	6	6	5	4	5	1.6
950	4	6	6	7	3	3	4	5	1.2

下观察晶粒, 并按国家标准《金属平均晶粒度测定方法》GB/T6394-2002, 对晶粒度进行测量、计算。测量计算结果见表 3 和表 4。

由表 3 和表 4 的测量结果可知: 钢坯热装温度在 650 °C 以下时, 晶粒明显细小, 晶粒级别在 3.5 级左右; 当钢坯热装温度超过 700 °C, 晶粒明显变得粗大, 晶粒级别在 1~2 级。

结合 CCT 曲线可知, 在以 5 °C/s 的冷却速度进行冷却时, 组织转变的开始温度为 644 °C, 结束温度为 557 °C。所以, 当在钢坯温度 700 °C 以上热装时,

没有经过  $\gamma \rightarrow \alpha \rightarrow \gamma$  相变再结晶过程, 仍保留铸态粗大的奥氏体晶粒<sup>[4]</sup>。当在钢坯温度 650 °C 以下热装时, 有相变过程发生, 晶粒会细化。

另外, 轧前温度 1 150 °C 和 1 100 °C 比较, 晶粒级别变化不大。也是由于此温度范围还在奥氏体区, 无相变发生<sup>[5]</sup>。

#### 4 结论

(1) 由冷装实验和热装实验结果对比可以看出, 钢坯热装温度在 650 °C 以下时, 其轧前组织的晶粒度级别可以达到冷装的轧前晶粒度级别, 晶粒度级别在 3.0~3.5 级。当钢坯热装温度超过 700 °C, 其轧前组织的晶粒和冷装相比明显变得粗大, 晶粒度级别在 1~2 级。

(2) 钢坯温度在 600 °C 和 650 °C 热装时, 没有避开以 5 °C/s 冷却的两相区, 所以有混晶现象, 在此冷却速度下, 热装温度应低于 550 °C。

(3) 实际生产中, GCr15 轴承钢的热装温度, 应根据连铸坯相变前的平均冷却速度, 控制到相变温度以下, 这样可保证组织晶粒达到冷装加热轧制的水平, 在相变温度或以上进行热装, 则易出现组织晶粒混晶或粗化。

(4) 现场实测, 山钢股份莱芜分公司特钢事业部 180 mm × 220 mm 连铸坯相变前的平均冷却速度为 0.41 °C/s, 结合 CCT 曲线可知, 在以 0.3 °C/s 的冷却速度进行冷却时, 组织转变的开始温度为 696 °C, 结束温度为 675 °C, 在以 0.5 °C/s 的冷却速度进行冷却时, 组织转变的开始温度为 685 °C, 结束温度为 663 °C。据此可推测, 现场 GCr15 轴承钢连铸坯的热装温度应控制在 670 °C 以下。

#### 参考文献

[1] 宋志敏, 张 虹. 我国轴承钢生产及质量现状[J]. 钢铁研究学报, 2000, 12(4): 59-63.  
 [2] 石秋英, 逯登尧. 轴承钢 GCr15 热轧材内部质量的影响因素分析及对策[J]. 山东冶金, 2014, 36(4): 29-34.  
 [3] 李振兴, 李长生, 马永强, 等. 变形终止温度对 GCr15 轴承钢显微组织的影响[J]. 材料工程, 2015, 43(10): 28-34.  
 [4] 刘 靖, 张 艳. 热轧工艺参数对 GCr15 轴承钢晶粒度的影响[J]. 特殊钢, 2008, 29(6): 15-16.  
 [5] 刘建培. 大断面轴承钢连铸坯加热温度连续测试[J]. 河北冶金, 2017, 261(9): 23-26.

刘亚丽(1984-), 女, 工程师, 2006 年西安建筑科技大学(本科)毕业, 特殊钢产品的轧钢工艺研发。

E-mail: 187248356@qq.com

收稿日期: 2018-02-28