

## 轴承钢水浸探伤缺陷分析与改善实践

龙鹄<sup>1,\*</sup>, 苗志奇<sup>2</sup>, 丘文生<sup>1</sup>, 鲁金龙<sup>1</sup>, 余大华<sup>1</sup>, 成国光<sup>2</sup>

1. 广东中南钢铁股份有限公司, 韶关 512123

2. 北京科技大学钢铁冶金新技术国家重点实验室, 北京 100083

### Reduction of the Macroscopic Inclusions Evaluated by Ultrasonic Test

Long Hu<sup>1,\*</sup>, Miao Zhiqi<sup>2</sup>, Qiu Wensheng<sup>1</sup>, Lu Jinlong<sup>1</sup>, Yu Dahua<sup>1</sup>, Cheng Guoguang<sup>2</sup>

1. Guangdong Zhongnan Iron and Steel Co., LTD, Shaoguan, 512123

2. State Key Laboratory of Advanced Metallurgy, University of Science and Technology Beijing, Beijing, 100083, China

**摘要:** 本文以韶钢 BOF-ARS (氩站)-LF-RH-CC 工艺路线生产 GCr15 轴承钢生产为研究背景, 通过轧材超声水浸探伤、定位解剖分析与冶炼全流程取金相样分析相结合的方法, 对钢中宏观夹杂物缺陷的特征及关键影响因素进行分析, 并提出相应改善措施。研究结果表明: 精炼时产生的细小 CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO 类夹杂物, 随着成分中 CaO 含量的增加以及 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量的降低, 与钢液润湿性增强, 较难从钢中上浮去除, 在凝固过程团聚并形成宏观夹杂物的机率增大。冶炼过程酸溶铝变化、LF 精炼时间以及 LF 处理后钢中 Ca 含量与水浸探伤结果显著相关, 当过程酸溶铝损失增大、LF 精炼处理时间不当以及钢中 Ca 含量过高时均会导致水浸探伤合格率大幅降低。改进后将转炉终点碳控制在 0.1% 以上、LF 精炼时间 50-90min、LF 处理后钢中 Ca 含量指数在 5 以内, 钢中液态夹杂物数量大幅降低, 轧材中未检测到毫米级别的宏观大尺寸夹杂物, 钢水纯净度得以有效提升。

**关键词:** 轴承钢; 超声探伤; 宏观夹杂; LF 精炼; 纯净度

**Abstract:** In this paper, the characteristics and main impact factors of macroscopic inclusion defects in steel were analyzed by combining ultrasonic detection, location analysis and metallography sample analysis, based on the production of GCr15 bearing steel produced by BOF-ARS (argon station)-LF-RH-CC process in Shaosteel, and corresponding improvement measures were proposed. The results show that it is difficult to remove the fine CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO inclusions, as the wettability of fine these inclusions generated at the ladle furnace increased with the increase of CaO and decrease of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> content, and the probability of agglomeration and formation of macroscopic inclusions increase during solidification. The change of acid-soluble aluminum in smelting process, the refining time of LF and the content of Ca in LF treated steel are significantly correlated with the results of water immersion test. When the loss of acid-soluble aluminum in smelting process increases, the refining time of LF is inappropriate and the content of Ca in steel is too high, the pass rate of water immersion ultrasonic test will decrease significantly. After the improvement, the amount of liquid inclusions in steel is greatly reduced, and no macro inclusions of millimeter level are detected in rolled steel with the carbon at the end of converter controlled not less than 0.1%, the LF refining time in the range of 50-90min, and the index of Ca content after LF treated less than 5. The purity of molten steel is effectively improved.

**Key words:** bearing steel; Ultrasonic test; Macroscopic inclusion; LF refining; purity

## 1. 前言

夹杂物是影响轴承疲劳寿命的关键因素<sup>[1-3]</sup>。近年来随着冶金工艺技术的不断改进，钢中夹杂物数量显著减少，轴承的寿命得到了飞跃性的提高，但偶尔仍有意外失效发生，经分析这类早期失效常常由尺寸大于 500 微米的宏观夹杂引起<sup>[4,5]</sup>。这类宏观夹杂具有数量少、随机性大的特征，采用传统金相检测方法难以有效检测，查明这类夹杂物的形成机理并进行控制成为研究的热点和难点。

笔者前期通过轧材超声水浸探伤、定位解剖分析与冶炼全流程取金相样分析相结合的方法，对轴承钢中宏观夹杂物缺陷的特征及形成机理进行了研究，分析表明除了卷渣，精炼时产生的尺寸数十微米以内的细小  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$  夹杂物在凝固过程的团聚是导致宏观夹杂物形成的重要原因<sup>[6-8]</sup>。本文在前期研究基础上，进一步结合韶钢轴承钢生产大数据，对形成这类宏观夹杂物的关键影响因素进行分析，并提出相应改善措施，以提升高品质轴承钢的质量稳定性。

## 2. 冶炼工艺与实验方法

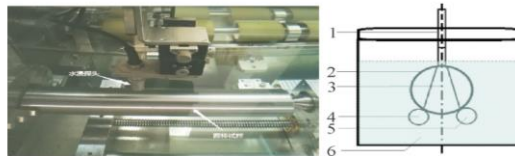
本文研究钢种为高碳铬轴承钢 GCr15，具体成分见表 1。生产工艺流程为：130 吨 BOF→ARS(氩站)→LF→RH→大方坯连铸机→棒材轧制成型。

表 1 GCr15 成分(质量分数, %)

Table 1 Composition of GCr15 steel (mass fraction, %)

C	Si	Mn	Cr	P	S
0.95~1.05	0.15~0.30	0.25~0.45	1.40~1.60	≤0.020	≤0.015

轧材水浸探伤缺陷分析方法：首先取棒材试样，对试样进行球化退火处理，使得组织均匀，晶粒细化后，加工成具备水浸检测要求的标准试样。其次采用如图 1 所示的高频水浸超声探伤法进行缺陷检测定位，获得缺陷的精准位置后对试样进行解剖，制备金相样，然后采用 SEM-EDS，对缺陷处宏观夹杂的成分、形貌等信息进行分析。



1-水浸探头；2-试样；3-缺陷；4-主动滚轮；5-被动滚轮；6-水槽

图 1 水浸超声检测装置示意图

Fig. 1 The water immersion ultrasonic testing device

冶炼过程取样及检测方法：冶炼过程中，依次取 5 个钢样，如图 2 所示，分别命名为“AS（氩站）”、“LF1”、“LF2”、“RH1”、“RH2”。对所有试样磨抛后，利用扫描电子显微镜（SEM）和能谱仪（EDS）对夹杂物的形态和成分等进行分析。

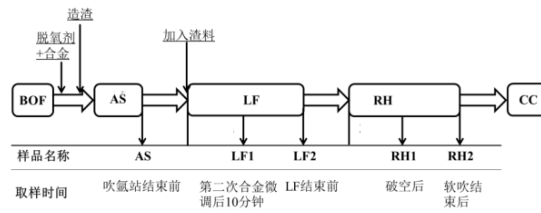


图 2 冶炼过程取样示意图

Fig. 2 The general sampling operation in melting process

### 3. 结果与分析

#### 3.1. 典型水浸探伤缺陷特征

热轧棒材中的水浸探伤缺陷检测结果显示，缺陷位于试样心部，尺寸沿长度方向分别为 4mm，8mm。进一步根据定位解剖试样，在横截面上分析缺陷特征，发现缺陷处主要存在大尺寸宏观夹杂，横截面夹杂物长度分别为 90 $\mu\text{m}$ 、80 $\mu\text{m}$ ，宽度分别为 12 $\mu\text{m}$ 、15 $\mu\text{m}$ ，对其成分进行分析，发现这些大尺寸夹杂物是由小尺寸 CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO 夹杂物（从几微米到几十微米）团聚而成，不同部位 Ca、Mg 分布不均匀。其中 2#夹杂物中的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 与 1#夹杂物相比降低了 6%，而 CaO 含量增加了 9%。分析可知液态 CaO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 与钢液润湿性好，较难从钢中上浮去除，在凝固过程团聚机率增大，长度相对更长。

#### 3.2. 关键影响因素分析

将水浸探伤结果与生产过程工艺参数相关联，发现冶炼过程酸溶铝变化、LF 精炼时间以及 LF 精炼结束前钢中 Ca 含量与水浸探伤结果显著相关。研究结果发现转炉出钢到氩站搅拌以及 RH 真空过程铝损影响较大，不合格炉次的这两个值远高于合格炉次。当 LF 处理时间过长或过短时均不利于水浸探伤合格率的提升。当钢中钙含量增大时，会使钢中细小的氧化铝转变成液态钙铝酸盐，同样会增大凝固过程夹杂物团聚倾向，产生宏观夹杂。

#### 3.3. 工艺改进及效果

根据上述分析结果，开展全流程关键参数精准管控工艺优化研究，将转炉终点碳控制在 0.1%以上、LF 精炼时间 50-90min、LF 处理后钢中 Ca 含量指数在 5 以内，残留在钢中的夹杂物数量得到大幅降低。最终对轧材进行水浸探伤，未检测到毫米级别的宏观大尺寸夹杂物，钢水纯净度得以有效提升。

### 4. 结论

(1) 轴承钢水浸探伤缺陷处主要存在大尺寸宏观夹杂，成分为 CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO。该类夹杂随着 CaO 含量的增加以及 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量的降低，与钢液润湿性增强，较难从钢中上浮去除，在凝固过程团聚并形成宏观夹杂物的机率增大。当纯净度较差时，水浸探伤检测到的最大缺陷长度也会增加。

(2) 冶炼过程酸溶铝变化、LF 精炼时间以及 LF 处理后钢中 Ca 含量与水浸探伤结果显著相关，当过程酸溶铝损失增大、LF 精炼处理时间不当以及钢中 Ca 含量过高时均会导致水浸探伤合格率大幅降低。

### 参考文献

- [1] 刘浏. 洁净钢生产技术的发展与创新[J]. 中国冶金, 2016, 26(10): 18-28.
- [2] Shiozawa K, Lu L. Effect of Non-Metallic Inclusion Size and Residual Stresses on Gigacycle Fatigue Properties in High Strength Steel[J]. Advanced Materials Research, 2008, 44-46: 33-42.
- [3] 田超, 刘剑辉, 董瀚. 高洁净轴承钢夹杂物评价与滚动接触疲劳寿命[J]. 上海金属, 2018, 40(04): 1-5+12.
- [4] 川上潔. 高纯净度鋼における介在物の生成起源[J]. Sanyo Technical Report, 2007, 14(1): 22.
- [5] 王新华, 李金柱, 姜敏, 孙维, 王郢. 高端重要用途特殊钢非金属夹杂物控制技术[J]. 炼钢, 2017, 33(2): 50.
- [6] Miao Z, Cheng G, Li S, et al. Formation Mechanism of Large-size CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO-SiO<sub>2</sub> Inclusions in High Carbon Chromium Bearing Steel[J]. ISIJ International, 2021(7): 61.
- [7] 龙鹤, 成国光, 丘文生, 等. 轴承钢中大尺寸夹杂物的特征、来源及改进工艺[J]. 中国冶金, 2020, 30(9): 7.
- [8] Zhiqi Miao, Hu Long, Guoguang Cheng, Wensheng Qiu, et al. Agglomeration and Clustering of CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO Leading to Super Large-Size Line-Shape Inclusions in High Carbon Chromium Bearing Steel[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2022, 53(B): 512-525.