

# 大规格轴承钢棒材近表面夹杂物超声检测与形成机理研究

范龙

江阴兴澄特种钢铁有限公司, 江苏 江阴 214400

**[摘要]**大规格轴承钢棒材(直径 $\geq 50\text{mm}$ )通常在重载机械、高端装备等领域中得到了广泛的应用,其近表面夹杂物作为应力集中源,容易导致疲劳裂纹扩展。文中系统研究大规格轴承钢棒材近表面夹杂物的超声检测规律,优化检测参数以提升近表面夹杂物的检出率和定量精度;同时,对近表面夹杂物的尺寸、分布特征类型进行系统性的分析,揭示其形成机理。研究结果表明:运用50MHz高频液浸直探头结合回折扫查能有效检出尺寸 $\geq 5\mu\text{m}$ 近表面夹杂物,检出率比常规超声检测提升;大规格轴承钢棒材近表面夹杂物分三类,尺寸多在 $5\sim 30\mu\text{m}$ ,TiN危害最大;其形成与冶炼等多环节相关,为了可以降低近表面夹杂物的含量,通过优化精炼渣碱度和RH真空脱气工艺可实现。

**[关键词]**大规格轴承钢棒材;近表面夹杂物;超声检测;形成机理;高频水浸超声

DOI: 10.33142/ect.v4i2.19194

中图分类号: TG142.13

文献标识码: A

## Ultrasonic Detection and Formation Mechanism of Near Surface Inclusions in Large-sized Bearing Steel bars

FAN Long

Jiangyin Xingcheng Special Steel Works Co., Ltd., Jiangyin, Jiangsu, 214400, China

**Abstract:** Large sized bearing steel bars (diameter  $\geq 50\text{mm}$ ) have been widely used in heavy-duty machinery, high-end equipment and other fields. Their near surface inclusions act as stress concentration sources, which can easily lead to fatigue crack propagation. The article systematically studies the ultrasonic detection law of near surface inclusions in large-sized bearing steel bars, optimizes detection parameters to improve the detection rate and quantitative accuracy of near surface inclusions; At the same time, a systematic analysis of the size and distribution characteristics of near surface inclusions is conducted to reveal their formation mechanism. The research results indicate that the use of a 50MHz high-frequency liquid immersion probe combined with folded scanning can effectively detect near surface inclusions with a size of  $\geq 5\mu\text{m}$ , with a higher detection rate than conventional ultrasonic testing; There are three types of inclusions near the surface of large-sized bearing steel bars, with sizes mostly ranging from  $5\sim 30\mu\text{m}$ , and TiN is the most harmful; Its formation is related to multiple stages such as smelting, and in order to reduce the content of near surface inclusions, it can be achieved by optimizing the alkalinity of refining slag and RH vacuum degassing process.

**Keywords:** large specification bearing steel bars; near surface inclusions; ultrasonic testing; formation mechanism; high frequency water immersion ultrasound

### 引言

在高端机械装备中,轴承钢作为一种核心的结构材料,其内部的洁净程度对轴承的疲劳寿命以及可靠性有着直接的影响。其中近表面夹杂物造成的危害较大,在大规格轴承钢棒材(直径 $\geq 50\text{mm}$ )的生产与应用中体现得尤为凸显。主要由于大规格轴承钢棒材的截面尺寸较大,因此,在后续的冷却过程中,因不同部位的冷却速度存在明显的差异,从而使得近表面区域易形成各类非金属夹杂物,这些夹杂物在轴承刚承受交并负载等复杂应力作用时会破坏材料基体的连续性,形成微小的裂纹源,随着载荷的持续作用裂纹也会不断的延伸扩展,从而导致轴承出现早期失效,甚至会严重影响设备的正常运行,造成巨大的经济损失。目前超声检测法、金相法等在胶杂物的检测中得到了广泛的应用,金相法作为一种传统的检测方法,虽然检测方法较为简便,仅通过磨制、抛光等工序之后就可

在显微镜下观察杂物的分布情况形态,但是这种检测方法,需要对钢材进行取样,对钢材的整体性造成破坏。而超声检测法具有灵敏度高,检测范围广泛等优势,可以避免金相法破坏式一样的弊端,能够检测出钢材内部不同尺寸、不同深度的夹杂物。然而,超声检测法面对大规格轴承钢棒材近表面区域的杂物检测中存在一定的局限性,如超声反射信号干扰大、检测盲区等,检测精度和检出率难以满足实际生产需求。为了解决大规格轴承钢棒材近表面夹杂物检测难题,需要优化超声检测参数,减少信号干扰和检测盲区,并揭示夹杂物形成的核心机制,从而有针对性地采取控制措施,提升大规格轴承钢棒材质量,延长轴承服役寿命。

### 1 实验材料与方法

#### 1.1 实验材料

实验用大规格轴承钢棒材为GCr15钢,有50mm、

80mm、100mm 三种直径,长 1000mm,经电弧炉冶炼等多工艺制备,给出主要化学成分。每种规格选 3 根,在头、中、尾部截取  $\Phi D \times 50\text{mm}$  试样,表面打磨抛光至  $Ra \leq 2.0\mu\text{m}$ 。

## 1.2 超声检测实验

### 1.2.1 检测设备与参数

实验采用高频水浸超声检测系统,由超声检测仪(具备实时 A 扫、C 扫成像及深度补偿功能,符合 GB/T 27664.1)、高频直探头(晶片直径 6.3mm,多标称频率,6dB 带宽 5~7MHz,符合 GB/T 27664.2)、水槽、扫查装置(计算机控制,可回折/螺旋扫查,速度 50~200mm/s,脉冲重复频率 1000~2000Hz)及数据处理软件组成。检测介质为  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  去离子水,水层厚 10~15mm。50mm、80mm 棒材螺旋扫查,步距 0.5mm;100mm 棒材回折扫查,闸门设置避开表面和底面信号,聚焦近表面 2~10mm 区域。

### 1.2.2 检测参数优化实验

以夹杂物检出率、定量误差为评价指标,采用单因素实验法优化超声检测参数,探头频率:固定扫查速度 100mm/s、脉冲重复频率 1500Hz,用 20MHz~70MHz 探头检测,统计不同频率下尺寸  $\geq 5\mu\text{m}$  夹杂物的相关数据;固定探头频率 50MHz、脉冲重复频率 1500Hz,用 50~200mm/s 扫查速度检测并统计效果;固定探头频率 50MHz、扫查速度 100mm/s,用 1000~2000Hz 脉冲重复频率检测并统计效果。

## 1.3 夹杂物表征与分析

对超声检出的近表面夹杂物,用线切割在对应位置取横截面金相试样,标准检验区  $30\text{mm}^2$ ,每规格选 24 个,符合 ASTM E2283 标准。用 ASPEX 自动扫描电镜精准检测夹杂物形貌、尺寸和成分,通过软件分析计算质心及尺寸参数。同时,用电解萃取法验证二维检测结果,用能谱分析仪确定夹杂物类型,用图像分析软件统计尺寸分布与数量密度,分析近表面夹杂物分布规律。

## 2 近表面夹杂物超声检测结果与分析

### 2.1 超声检测参数优化结果

探头频率是影响超声检测灵敏度和分辨率的关键,频率越高,对微小夹杂物检出能力越强,但超声能量衰减快、检测深度浅。随频率升高,夹杂物检出率提升、定量误差降低,不过频率过高,如到 70MHz 时,因高频超声在轴承钢中衰减过大,近表面深处夹杂物超声信号减弱,影响检测,检出率下降、定量误差上升。所以,最优探头频率为 50MHz,可兼顾高检出率和低定量误差。

扫查速度影响超声检测的效率与精度,速度过快,探头与试样耦合时间不足、信号采集不充分,易漏检夹杂物;速度过慢,检测效率低,难满足实际生产。在一定范围内提升扫查速度,检出率下降幅度小,检测效率提升明显;但速度过高,检出率显著下降,虽效率提升也难满足精度

要求。所以,最优扫查速度为 100mm/s,可平衡检测精度与效率。

脉冲重复频率影响超声信号采集密度与干扰抑制效果,频率过低,信号采集密度不够易漏检;频率过高,易产生幻影回波干扰检测。在一定范围内,低于最优值时检出率随频率降低而下降,干扰信号数量变化不大;高于最优值时检出率随频率升高而下降,干扰信号数量显著增多,这是因过高频率产生幻影回波干扰了夹杂物超声反射信号。所以,最优脉冲重复频率为 1500Hz。

综合单因素实验,大规格轴承钢棒材近表面夹杂物超声检测最优参数确定为:探头频率 50MHz、扫查速度 100mm/s、脉冲重复频率 1500Hz、水层厚度 12mm,扫查方式依棒材直径选(小直径螺旋扫查,大直径回折扫查)。此参数可满足大规格轴承钢棒材近表面夹杂物精准检测需求。

### 2.2 近表面夹杂物超声检测特征

采用最优超声参数检测不同规格大规格轴承钢棒材近表面夹杂物,亮点区域是夹杂物超声反射信号,亮度与夹杂物尺寸、形貌相关。不同规格、深度近表面夹杂物超声反射信号差异明显: $\Phi 50\text{mm}$  棒材近表面 2~5mm 区域夹杂物分布均匀,信号强度中等; $\Phi 80\text{mm}$  棒材近表面 5~8mm 区域夹杂物增多、有聚集,信号亮度高; $\Phi 100\text{mm}$  棒材近表面 2-5mm 区域夹杂物尺寸小、信号弱,8~10mm 区域尺寸增大、信号亮度提升。这是因大规格棒材截面大、冷却不均,近表面不同深度凝固速度和应力状态有别所致。

### 2.3 近表面夹杂物表征结果

经 ASPEX 自动扫描电镜和 EDS 能谱分析,大规格轴承钢棒材近表面夹杂物主要分三类:低熔点钙铝酸盐夹杂物呈点状或长条状、颜色浅,成分含 CaO 等,部分析出  $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  相;高熔点  $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂物呈块状或粒状、颜色深,成分是 MgO 和  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,硬度高;TiN 夹杂物呈立方状或块状,成分是 Ti 和 N,尺寸大、硬度高,为脆性夹杂物,对材料疲劳性能危害最大。

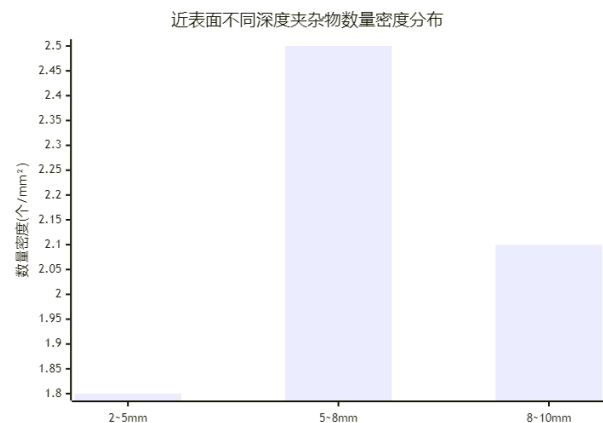


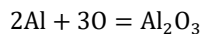
图1 不同深度近表面(2~5mm、5~8mm、8~10mm)夹杂物的数量密度

由图 1 可知,对不同规格大规格轴承钢棒材近表面夹杂物尺寸分布统计发现,其尺寸主要在 5~30 $\mu\text{m}$  之间,小尺寸夹杂物数量占比高,大尺寸占比逐渐降低。不同规格棒材的夹杂物尺寸分布有差异:  $\Phi 50\text{mm}$  棒材以小尺寸夹杂物为主;  $\Phi 80\text{mm}$  棒材中较大尺寸夹杂物占比较高;  $\Phi 100\text{mm}$  棒材大尺寸夹杂物占比最高,这和大规格棒材冷却慢、夹杂物易长大有关。不同深度近表面(2~5mm、5~8mm、8~10mm)夹杂物数量密度,发现 5~8mm 区域最高,8~10mm 次之,2-5mm 最低。原因是 2~5mm 区域冷却快,夹杂物难长大聚集; 5~8mm 区域冷却适中,夹杂物有足够时间长大迁移; 8~10mm 区域接近内部,冷却慢,夹杂物易长大但迁移能力弱。

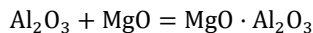
### 3 大规格轴承钢棒材近表面夹杂物形成机理

#### 3.1 冶炼过程脱氧反应与夹杂物形成

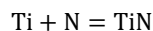
冶炼过程中大规格轴承钢采用铝脱氧工艺,铝与钢液中的氧发生反应生成  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂物,反应方程式如下:



铝脱氧生成的高熔点  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (熔点约 2050 $^\circ\text{C}$ ) 在钢液中难熔化,若脱氧不充分,残留氧会与 Mg、Ca、Ti 等反应生成复合夹杂物。当钢液中 Mg 含量较高时发生反应,反应方程式如下:



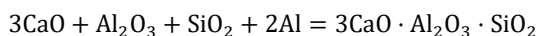
$\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  为高熔点脆性夹杂物(熔点约 1840 $^\circ\text{C}$ ),其形成取决于钢液中 Mg 含量及脱氧程度。此外,钢液中的 Ti 与 N 反应生成 TiN 夹杂物,反应方程式如下:



TiN 夹杂物熔点约 2950 $^\circ\text{C}$ ,硬度高、脆性大,其形成与钢液中 Ti、N 含量相关,含量过高会致其大量生成且尺寸长大。冶炼时,脱氧剂加入量、方式及钢液搅拌速度影响脱氧充分性,加入不均、搅拌不充分会使氧含量分布不均,近表面氧含量高、脱氧剧烈,易形成大量夹杂物。

#### 3.2 精炼过程精炼渣卷渣与夹杂物形成

LF 精炼和 RH 真空脱气是大规格轴承钢精炼关键环节,精炼中精炼渣成分、碱度及钢渣界面张力影响夹杂物形成与去除,精炼渣卷渣是近表面低熔点钙铝酸盐夹杂物形成主因。大规格轴承钢精炼渣以  $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{MgO}$  体系为主,钢渣界面张力低时,精炼渣易卷入钢液成夹渣,与钢液中 Al 反应,使渣中 CaO 和  $\text{SiO}_2$  含量降低,形成低熔点钙铝酸盐夹杂物,反应方程式如下:



精炼渣碱度 ( $\text{CaO}/\text{SiO}_2$ ) 对卷渣影响大,碱度越高,钢渣反应性越强、界面张力越低,越易卷渣,近表面夹杂物增多。实验表明,碱度控制在 1.8~2.2 时,钢渣界面张力高,卷渣受抑制,低熔点钙铝酸盐夹杂物减少。此外,RH 真空脱气时间影响夹杂物去除效果,控制在 30~35min,去除率超 85%,时间不足则夹杂物易在近表面聚集。

#### 3.3 连铸过程水口结瘤与夹杂物形成

连铸时,水口结瘤物脱落是近表面高熔点夹杂物 ( $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 、TiN) 形成的主因。大规格轴承钢连铸,钢液经水口入结晶器,其中  $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  等夹杂物在水口内壁沉积长大成结瘤物,达一定厚度后脱落,未及时上浮会被钢液包裹,凝固后形成近表面夹杂物。表征分析表明,水口结瘤物成分与近表面高熔点夹杂物高度一致,证实其来源。水口结瘤程度与钢液夹杂物成分、水口材质及连铸速度有关,  $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  含量高、水口材质差、连铸速度快,均会增加近表面夹杂物数量。

#### 3.4 轧制过程二次氧化与夹杂物形成

轧制是大规格轴承钢棒材成型关键环节,此过程二次氧化会使近表面夹杂物增多。铸坯加热时表面与空气接触氧化,生成  $\text{FeO}$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  等,轧制时被压入钢坯内部成近表面夹杂物;钢坯表面氧化皮未及时清除,轧制压力下与钢基体结合也会形成夹杂物。同时,轧制温度、压力及变形量影响夹杂物形态与分布:近表面变形量大,夹杂物被拉长成条状;轧制温度过高,夹杂物软化长大;轧制压力不均,夹杂物在近表面聚集成密集区。此外,钢坯近表面与有缺陷或杂质的轧辊接触,杂质会被压入表面形成近表面夹杂物。

#### 3.5 近表面夹杂物形成机理总结

大规格轴承钢棒材近表面夹杂物是冶金、连铸、轧制全流程多因素共同作用形成的。冶炼时铝脱氧生成  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,与 Mg、Ti、N 等反应生成复合夹杂物奠定基础;精炼中精炼渣卷渣产生低熔点钙铝酸盐夹杂物,真空脱气不充分难除夹杂物;连铸时水口结瘤物脱落形成高熔点夹杂物进入近表面;轧制时二次氧化、轧辊污染使近表面夹杂物增多,轧制变形改变其形态与分布。近表面 5-8mm 深度区域因冷却速度和应力状态适宜,成为夹杂物主要聚集区,尺寸和数量高于其他区域。

## 4 结论与展望

### 4.1 结论

(1) 大规格轴承钢棒材近表面夹杂物超声检测探头频率 50MHz,扫查速度 100mm/s,脉冲重复频率 1500Hz,水层厚度 12mm,  $\Phi 50\text{mm}$ 、 $\Phi 80\text{mm}$  棒材采用螺旋扫查,  $\Phi 100\text{mm}$  棒材采用回折扫查,检测效果良好,尺寸  $\geq 5\mu\text{m}$  的近表面夹杂物检出率高,定量误差小。

(2) 大规格轴承钢棒材近表面夹杂物主要有低熔点钙铝酸盐 ( $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ )、高熔点  $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  及 TiN 三类, TiN 对材料疲劳性能危害最大;近表面 5~8mm 深度区域夹杂物数量密度最高 (2.5 个/ $\text{mm}^2$ ),为主要聚集区;夹杂物尺寸多在 5~30 $\mu\text{m}$ , 5~10 $\mu\text{m}$  的占比最高 (42.5%)。

(3) 大规格轴承钢棒材近表面夹杂物的形成与冶金、连铸、轧制全流程密切相关。

## 4.2 展望

本文系统性的分析了大规格轴承钢棒材近表面夹杂物的超声检测以及形成机理,但在未来研究中,可从以下方面进行深入的探究,以便为大规格轴承钢棒材的质量评价提供更全面的指标:优化超声检测信号处理算法,结合深度学习技术优化超声检测信号处理算法,探讨真空脱气时间、精炼渣成分对近表面渣物形成的影响,为夹杂物的精准控制提供更可靠的理论依据。

### [参考文献]

- [1] 王博,姜周华,龚伟,等.GCr15 轴承钢夹杂物及全氧含量控制工艺分析[J].材料与冶金学报,2004,3(2):90-94.  
[2] 于平,陈伟庆,冯军,等.高碱度渣精炼的轴承钢中夹杂物研究[J].钢铁,2004,39(7):20-23.  
[3] 顾凤义,刘莹,闫文凯,等.大样电解法分析连铸板坯大颗

粒非金属夹杂物来源[J].理化检验(物理分册),2022,58(6):29-33.

[4] 齐江华,吴杰,索进平,等.钢中细小夹杂物的研究方法探讨[J].冶金分析,2010,31(10):1-5.

[5] 赵婧鑫,冯婷,张颖.连铸坯中非金属夹杂物表征方法综述[J].连铸,2025(1):20-29.

[6] 张佳朗,刘强,张佳正,等.30MnSi 棒材中非金属夹杂物的多维表征[J].中国冶金,2025,35(12):120-128.

[7] 张家骏.超声检测的现状与发展趋势—参加第 12 届世界无损检测会议有感[J].无损检测,1990(5):54-57.

作者简介:范龙(1986.6—),毕业院校:江苏科技大学,所学专业:应用物理学,当前就职单位:江阴兴澄特种钢铁有限公司,职务:二级专家,职称级别:工程师。