# 超大规格 300M 钢棒超声波探伤及缺陷分析

盛　伟[1]　　史丽军[1]　　赵选杰[2]　　刘天琦[1]　　王　瑞[3]

（1　中国航发北京航空材料研究院,北京　100095）

（2　中国二重德阳万航模锻有限责任公司,德阳　618000）

（3　抚顺特殊钢股份有限公司, 抚顺　113001）

**文　摘**　对 $\Phi$450 mm 规格的 300M 钢棒材进行了超声波探伤,采用 2.5 MHz 软膜探头可以保证探伤的灵敏度并降低噪声水平。通过宏观、显微观察和能谱分析等手段对探伤缺陷进行了分析。结果表明:探伤缺陷处存在氧化铝、氧化镁和氧化钙复合夹杂物,单个夹杂物最大尺寸可达 100 μm。该缺陷属于熔炼过程中引入的外来夹杂物,对材料性能有不利的影响。

**关键词**　超声波检测,300M 钢,夹杂物

中图分类号:TG 115.28　　DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2017.01.017

# Ultrasonic Detection and Defects Analysis of Large Size 300M Steel Bars

SHENG Wei[1]　　SHI Lijun[1]　　ZHAO Xuanjie[2]　　LIU Tianqi[1]　　WANG Rui[3]

（1　AECC Beijing Institute of Aeronautic Materials, Beijing　100095）

（2　National Erzhong Group Deyang Wanhang Die Forging Co. Ltd, Deyang　618000）

（3　Fushun Special Steel Group, Fushun　113001）

**Abstract**　The 300M steel bars with diameter of 450 mm were inspected by ultrasonic method. 2.5 MHz soft probe was used to ensure ultrasonic sensitivity and reduce the noise level. Macro- and micro-observations as well as electrical diffraction spectrum analysis were carried out to inspect interior defects of a material. The results showed that inclusions found by ultrasonic detection were consisted of $Al_2O_3$, MgO and CaO. The largest size of the inclusions was over 100 μm. These inclusions were imported by melting process, and they were detrimental to properties of the material.

**Key words**　Ultrasonic detective, 300M steel, Inclusion

## 0　引言

300M 钢是国际上通用的飞机起落架用超高强度钢,具有优良的综合力学性能,在军民用飞机上获得广泛应用[1]。为了满足大型飞机的需求,近年来生产了 $\Phi$400 mm 及以上规格的 300M 钢棒材。由于 300M 钢棒材的重要用途,对其质量的要求非常严格。超声波检验是检测棒材内部质量的主要方法,通过声波在通过缺陷处时声阻抗的变化来对材料内部缺陷进行定位、定量及定性测量,可有效检测钢中的裂纹、偏析、夹杂物等缺陷[2-3]。GB/T 4162—2008 标准[4]仅对规格 $\Phi$250 mm 以下的锻轧钢棒的超声检测方法进行了规定,更大规格棒材的超声检测方法尚无明确的规定。本文通过检测参数的调整,对 $\Phi$450 mm 的 300M 钢棒材进行探伤,并对缺陷进行了分析。

## 1　实验

### 1.1　材料

试验材料为 $\Phi$450 mm 的 300M 钢棒材。生产工艺流程为真空感应熔炼+真空自耗重熔,材料的化学成分见表 1。

**表 1　300M 钢的化学成分**

**Tab.1　Chemical composition of 300M steel　wt%**

| C | Mn | Si | Cr | Ni | Mo | V | Cu | Al |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.40 | 0.61 | 1.66 | 0.86 | 1.80 | 0.42 | 0.08 | 0.10 | <0.10 |

钢锭开坯锻造后经退火热处理,硬度为 255HBW。晶粒度大于 6 级,棒材表面粗糙度≤6.3 μm。

### 1.2　试验方法

采用 Masterscan 380 超声波探伤仪沿圆周方向

收稿日期:2016-07-08

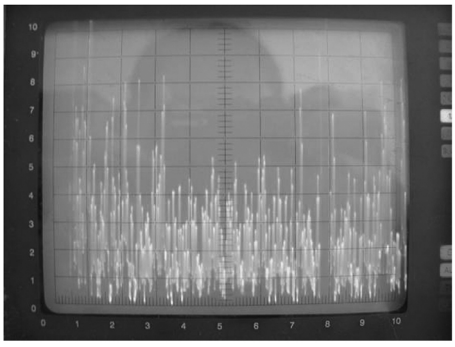
第一作者简介:盛伟,1983 年出生,工程师,硕士,主要从事航空超高强度钢的应用研究工作。E-mail: shengwei9811@163.com

对棒材进行超声波检测。对探伤发现的缺陷位置进行标记,用线切割方法在缺陷位置切取 30 mm×15 mm×25 mm 的试样,用砂纸打磨直至发现缺陷,检验面用砂纸磨平后抛光。对缺陷进行宏观观察并用 Leica DMLM 光学显微镜和 Camscan 3100 扫描电镜进行微观分析,用 Oxford 能谱仪进行成分分析。

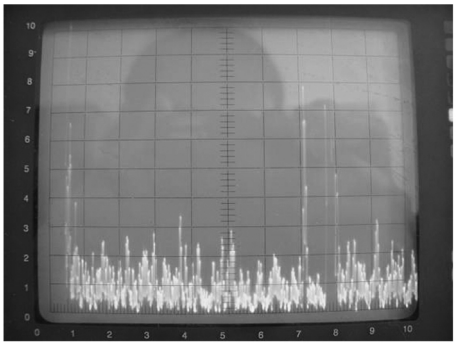
## 2 结果与讨论

### 2.1 超声波探伤

在超声波检测时,由于棒材直径达到 450 mm,可采用底波计算法进行灵敏度的调整。在使用高灵敏度的情况下引起较高的杂波是检测中遇到的主要问题。试验发现,在 5 MHz 频率时,若采用全声程检测,噪声水平达到 60%~80%,无法识别缺陷信号。针对这一情况,对大规格 300M 钢棒材进行全声程和半声程对比试验,测试结果见图 1。在采用半声程检测时,由于声程减小,声能相应增加,噪声水平为 20%左右,信噪比较全声程检测有明显提高。但是半声程检测方法会造成 25~30 mm 的上表面盲区,影响检测的覆盖率。



(a) 全声程



(b) 半声程

图 1 全声程和半声程的噪声水平

Fig.1 Noise level at different sound path

超声波频率对缺陷的探测能力也有影响。探头频率越高,检测灵敏度和缺陷分辨力越高。但是随着频率的提高,超声波的衰减也增加。

公式(1)描述了探伤时波长与频率的关系,

$$\lambda = \frac{v}{f} \tag{1}$$

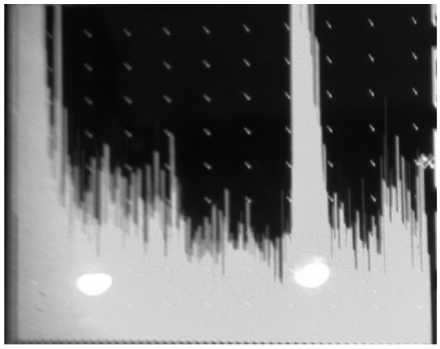
式中,$f$ 为探头频率,$v$ 为钢中纵波声速,$\lambda$ 为钢中纵波波长。

在给定的材料中,频率越高,波长越短,可探测的缺陷越小,通过公式(1)计算:

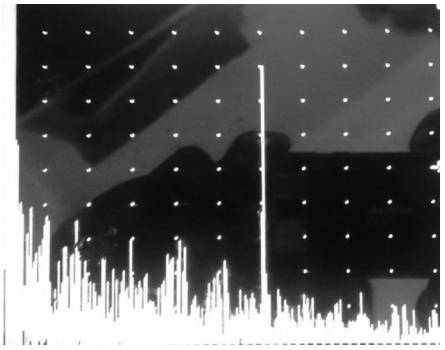
$$\frac{\lambda}{2} = \frac{v}{2f} = \frac{5.8\times10^{3}\,\mathrm{m/s}}{2\times2.5\times10^{6}/\mathrm{s}} = 1.16\times10^{-3}\,\mathrm{m} = 1.16\,\mathrm{mm}$$

即采用 2.5 MHz 探头可满足检测 Φ1.2 mm 缺陷的要求。

图 2 比较了在 5 MHz 和 2.5 MHz 条件下的噪声水平。结果表明,将探头频率由 5 MHz 降到 2.5 MHz,并采用软膜探头以增加耦合效果可以有效降低探伤的噪声水平。用 2.5 MHz 软膜探头在全声程条件下检测,噪声水平降至 30%左右。



(a) 5 MHz



(b) 2.5 MHz

图 2 不同频率下的噪声水平

Fig.2 Noise level at different frequency

采用 2.5 MHz 频率和全声程检测方法,既具有一定的检测灵敏度,又能保证检测的覆盖率。采用此参数对 Φ450 mm 的 300M 钢棒材进行探伤,探伤结果见表 2,共发现 4 处缺陷,最小缺陷当量分别为 Φ1.2 mm。典型缺陷的回波信号如图 3 所示。

**表 2 300M 钢棒材超声波探伤结果**

**Tab.2 Ultrasonic detection results of 300M steel**

| 缺陷 | 缺陷当量/mm | 缺陷埋深/mm | 缺陷 | 缺陷当量/mm | 缺陷埋深/mm |
|---|---|---|---|---|---|
| 1# | Φ1.2 | 288 | 3# | Φ1.5 | 243 |
| 2# | Φ2.3 | 288 | 4# | Φ1.7 | 305 |

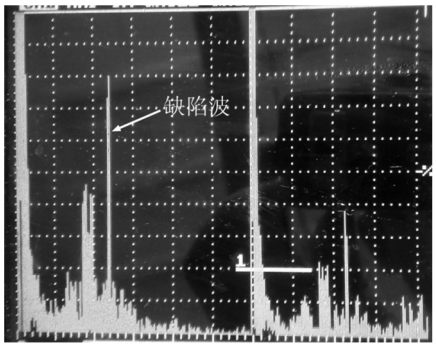
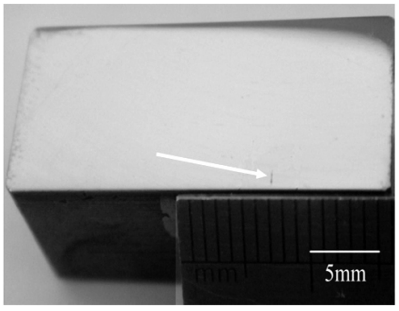



图 3　典型缺陷回波

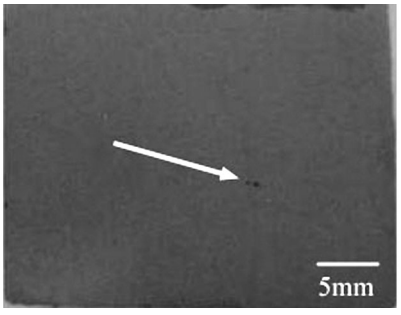
Fig.3　Typical defect signal

## 2.2　缺陷分析

根据超声探伤显示结果对缺陷的定位,对表 2 中的 1#及 2#缺陷进行了解剖分析。两处缺陷的宏观形貌见图 4。1#缺陷为长条形缺陷,长度约 1 mm,方向平行于棒材的轴线。2#缺陷属于聚集形缺陷,缺陷范围约 2 mm×2 mm。




(a)　1#缺陷

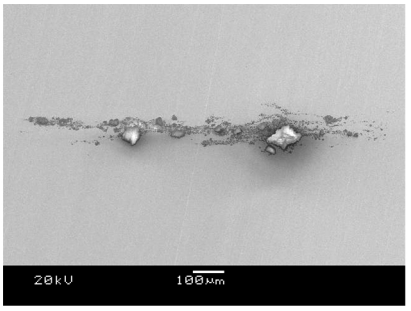



(b)　2#缺陷

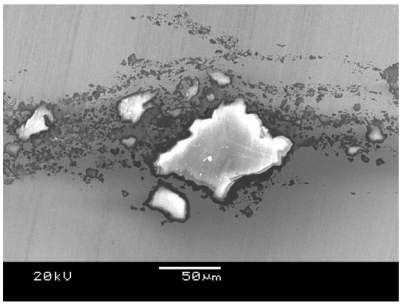
图 4　缺陷的宏观形貌

Fig.4　Macrograph of defects

在扫描电子显微镜下观察,1#缺陷裂纹形貌如图 5(a)所示。裂纹呈细长形,裂纹处镶嵌着不规则的白色块状夹杂物,最大尺寸可达 100 μm。图 5(b)为裂纹的局部放大像。由图 5(b)可知,大块状夹杂物周围分布着小块夹杂,这是由于块状夹杂受力破碎造成的。对块状夹杂物能谱分析结果表明,块状物成分主要为含铝和镁的复合氧化物。能谱分析结果见表 3。




(a)　全貌




(b)局部

图 5　1#缺陷扫描电镜照片

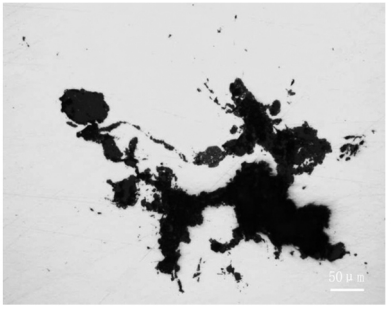
Fig.5　SEM photographs of defect 1#

**表 3　1#缺陷夹杂物的能谱分析结果**

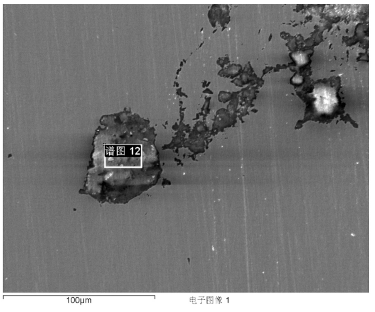
**Tab.3　EDS results of inclusion in defect 1#　wt%**

| O | Al | Mg | Ca | Mn | Fe | Ti |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 46.63 | 36.66 | 14.40 | 0.45 | 0.64 | 1.05 | 0.17 |

2#缺陷的光学显微镜及扫描电镜照片见图 6。在光学显微镜下放大观察,2#试样缺陷由形状不规则的空洞组成,且空洞处嵌有块状夹杂物,尺寸最大达 100 μm 以上。



(a)　光学显微镜照片




(b)　扫描电镜照片

图 6　2#缺陷的微观形貌

Fig.6　Micrographs of defect 2#

对大块的镶嵌物进行能谱分析,结果显示试样缺陷位置镶嵌物为 $Al_2O_3$和 CaO,缺陷其他部位能谱结果显示为基体成分,未发现异常。能谱分析结果见表 4。

**表 4　2#缺陷夹杂物的能谱分析结果**

**Tab.4　EDS results of inclusions in sample 2# wt%**

| O | Al | Mg | Ca | Mn | Fe | Si | Ti |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 42.56 | 39.02 | 1.35 | 10.41 | 1.40 | 4.33 | 0.54 | 0.38 |

## 2.3　分析与讨论

钢中非金属夹杂物按来源可分为内生和外来夹杂物,前者包括在熔化和凝固过程中钢液中各种元素发生物理、化学反应形成的夹杂物;后者包括冶炼和浇注过程中炉渣、耐火材料等与钢液发生机械作用形成的夹杂物。一般外来夹杂物的特征是:夹杂物粒径大、组成复杂、来源广泛、偶然性分布、对产品危害性能最大[5]。

发现的夹杂物为 $Al_2O_3$、MgO、CaO 的复合氧化物,尺寸超过 100 μm,属于外来夹杂物。炼钢系统耐火材料多为 $Al_2O_3$和 MgO 复合材质,是外来夹杂物的主要来源之一。真空感应熔炼时,坩埚材料中的 $Al_2O_3$、MgO 等耐火材料由于受到钢液的冲刷而进入钢中[6-7]。Ca 元素则通过硅钙合金变性处理时带入[8]。$Al_2O_3$属脆性夹杂物,与基体的硬度、弹性模量存在明显差异(表 5)。

**表 5　氧化铝夹杂物与基体的物理性能[9-10]**

**Tab.5　Physical properties of $Al_2O_3$ inclusion and base metal**

| 物质 | 熔点 /℃ | 密度 /g·cm$^{-3}$ | 线胀系数 /10$^{-6}$K$^{-1}$ | 显微硬度 (HV) | 弹性模量 /GPa |
|---|---|---|---|---|---|
| $Al_2O_3$ | 2050 | 3.96 | 8 | 1440 | 375 |
| 300M | 1504 | 7.74 | 11.9 | 570 | 198 |

在外加应力下夹杂物与基体界面上将产生应力集中,在锻造过程中会引起周围应力变大,产生裂纹,并引起自身的破碎。这不仅将降低材料的力学性能,甚至会导致零件的早期疲劳破坏。

## 3　结论

(1)采用 2.5 MHz 软膜探头对 Φ450 mm 的 300M 钢棒材进行超声波探伤,可以降低探伤时的噪声水平,可发现材料内部最小 Φ1.2 mm 当量的缺陷。

(2)钢中发现的缺陷由 $Al_2O_3$、MgO、CaO 的复合氧化物组成,成链状或不规则形状,单个夹杂物最大尺寸可达 100 μm 以上。上述夹杂物属于熔炼过程中引入的外来夹杂物,对材料的性能会产生不利的影响。

## 参考文献


[1] 李志,贺自强,金建军,等.航空超高强度钢的发展[M].北京:国防工业出版社,2012.

[2] 牛俊民,蔡晖. 钢中缺陷的超声波定性探伤[M].北京:冶金工业出版社,2012.

[3] 陈昌华. 钢锭和锻件超声波探伤缺陷分析[M].合肥:合肥工业大学出版社,2015.

[4] GB/T 4162—2008 锻轧钢棒超声检测方法[S]. 北京:中国标准出版社,2008.

[5] 梁旭,周清跃,张银花,等. 钢轨中大尺寸外来夹杂物分析[J]. 钢铁,2015,50(5):54-58.

[6] 梁宝乙,刘继红,张俊彦. 大型碳锰钢轴类锻件密集性缺陷分析[J]. 大型铸锻件,2011(4):20-25.

[7] 李京社,杨树峰,朱立光,等. 钢中镁铝尖晶石夹杂物研究进展[J]. 河南冶金,2009,17(5):1-3.

[8] 张莉萍,葛建国,赵爱军. 浅谈钢中夹杂物的控制对钢质量的影响[J]. 包钢科技,2002,28(4):85-87.

[9] 雍岐龙. 钢铁结构材料中的第二相[M].北京:冶金工业出版社,2006.

[10] 中国航空材料手册编辑委员会. 中国航空材料手册[M]. 北京:中国标准出版社,2002.