

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

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 Wei¹ SHI Lijun¹ ZHAO Xuanjie² LIU Tianqi¹ WANG Rui³

(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 $\leq 6.3 \mu\text{m}$ 。

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

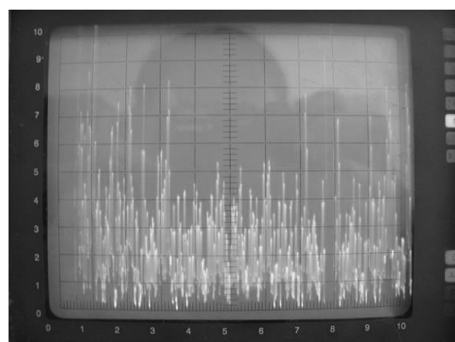
第一作者简介:盛伟,1983 年出生,工程师,硕士,主要从事航空超高强度钢的应用研究工作。E-mail: shengwei9811@163.com

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。

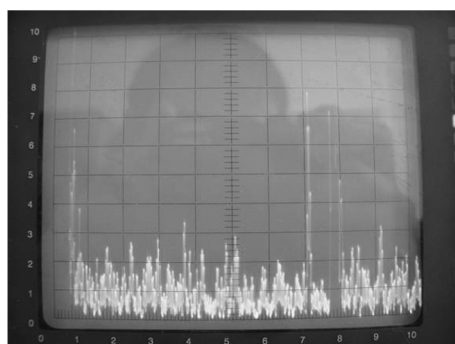
2 结果与讨论

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率越高。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,

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (1)$$

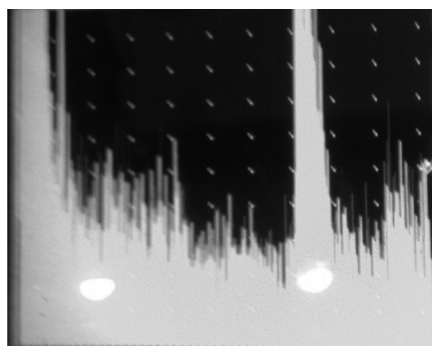
式中, f 为探头频率, v 为钢中纵波声速, λ 为钢中纵波波长。

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:

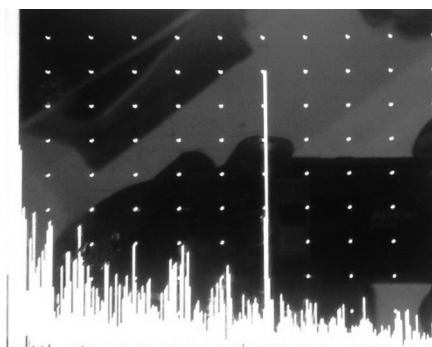
$$\frac{\lambda}{2} = \frac{v}{2f} = \frac{5.8 \times 10^3 \text{ m/s}}{2 \times 2.5 \times 10^6 / \text{s}} = 1.16 \times 10^{-3} \text{ m} = 1.16 \text{ mm}$$

即采用 2.5 MHz 探头可满足检测 $\Phi 1.2$ 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 $\Phi 450$ 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 $\Phi 1.2$ 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#	$\Phi 1.2$	288	3#	$\Phi 1.5$	243
2#	$\Phi 2.3$	288	4#	$\Phi 1.7$	305

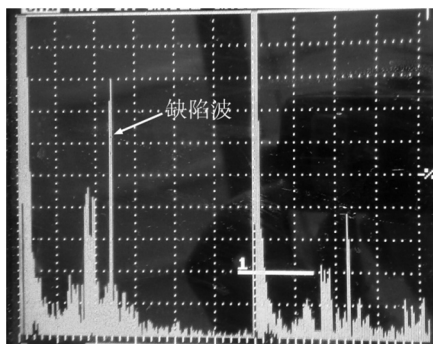
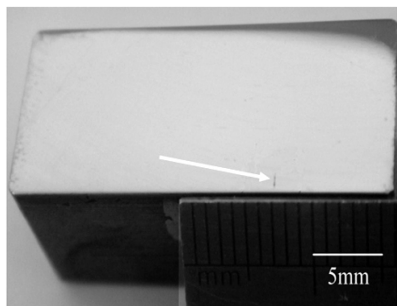


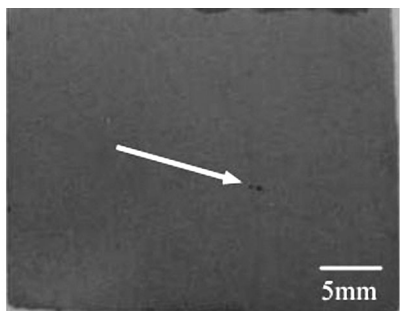
图3 典型缺陷回波
Fig.3 Typical defect signal

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。



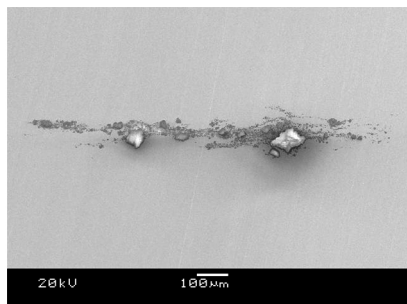
(a) 1#缺陷



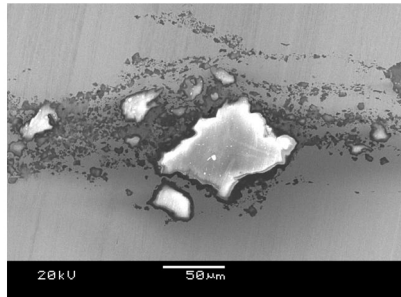
(b) 2#缺陷

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

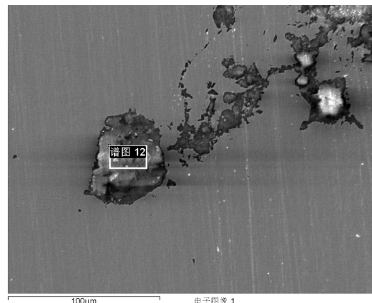
Tab.3 EDS results of inclusion in defect 1# wt%

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 $100\ \mu\text{m}$,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 /°C	密度 / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	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 $\Phi 450\ \text{mm}$ 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 $\Phi 1.2\ \text{mm}$ 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 $100\ \mu\text{m}$ 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.