

Gangding he duanjian
chaoshengbo tanshang quexian fenxi

钢锭和锻件 超声波探伤缺陷分析

陈昌华 等 编著 范 弘 主审



合肥工业大学出版社
HEFEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

钢锭和锻件超声波探伤缺陷分析

陈昌华 等 编著

范 弘 主 审

合肥工业大学出版社

内 容 简 介

本书是作者结合自己多年生产实际经验和理论研究成果编写而成。本书主要介绍了超声波检测技术及其应用、钢锭缺陷及其探伤分析案例、锻件缺陷及其探伤分析案例、热处理缺陷及其探伤分析案例、探伤缺陷的宏观检验及其分析案例、探伤缺陷的金相检验及其分析案例、探伤缺陷的扫描电镜检验及其分析案例、锻件探伤典型缺陷失效分析案例。本书开辟了对钢锭和钢锻件进行超声波探伤的系统性研究的先例;将超声波探伤与宏观检验、金相检验、扫描电镜检验相结合,并将它们的检验图谱进行对比展示和分析,突出了超声波探伤缺陷图谱在缺陷定性方面的应用;将超声波探伤与失效分析相结合,使失效分析结果更准确、更可靠。

本书是从事钢锭和锻件超声波检测、金属原材料超声波检测等检测工作的工程技术人员难得的一本参考用书,可为炼钢厂、锻造厂和热处理厂等相关企业带来直接的经济效益,对有关科研人员和高等学校相关专业的师生也具有一定的借鉴作用。

图书在版编目(CIP)数据

钢锭和锻件超声波探伤缺陷分析/陈昌华等编著. —合肥:合肥工业大学出版社,2015.6

ISBN 978-7-5650-2292-0

I. ①钢… II. ①陈… III. ①钢锭—缺陷检测—超声检验②锻件—缺陷检测—超声检验 IV. ①TF771.2
②TG316.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 134160 号

钢锭和锻件超声波探伤缺陷分析

陈昌华 等 编著

责任编辑 汤礼广

出 版 合肥工业大学出版社
地 址 合肥市屯溪路 193 号
邮 编 230009
电 话 理工编辑部:0551-62903087
市场营销部:0551-62903198
网 址 www.hfutpress.com.cn
E-mail hfutpress@163.com

版 次 2015 年 6 月第 1 版
印 次 2015 年 7 月第 1 次印刷
开 本 889 毫米×1194 毫米 1/16
印 张 21 彩 插 2.75 印张
字 数 723 千字
印 刷 安徽联众印刷有限公司
发 行 全国新华书店

ISBN 978-7-5650-2292-0

定价:170.00 元

如果有影响阅读的印装质量问题,请与出版社市场营销部联系调换。

编审委员会

主 编：陈昌华

副主编：张 利 钱健清 陈 尧

参 编：（按章节顺序排序）

陈能进	尹述港	汤志贵	魏忠瑞	马建民	曹军利
徐正茂	董 政	陈庆勇	徐加银	张 洪	许 兴
吴 连	徐文龙	吴 旻	钱德桥	宋文达	陈仕春
徐良坤	钱德兴	钱德武	杨 磊	储良华	龚洋道
刘晓磊	Brandon Phay Y. H [新加坡]			史朝刚	赵志海
杨丽珠	李 蓓	陈 琳	浦 红	陈联满	祝宝芹

主 审：范 弘

序 言

锻造生产是提供机械零部件毛坯的主要加工方法之一。锻造不仅可以得到机械零部件的形状,更能改善金属内部组织,提高金属的机械性能和物理性能。如今在机械制造业中,几乎所有受力大、要求高的重要零部件,都需要采用锻造方法生产制造。从某种意义上讲,一个国家的锻件年产量、模锻件在锻件总产量中所占比例以及大型锻造设备拥有量等指标,在一定程度上反映了其工业化水平的高低。

锻件的主要生产工艺过程包括炼钢、锻造和热处理,锻件生产中的每一道工序都对锻件的质量产生重要影响。只有在锻件生产的各个环节中采取严格有效的监控措施,才能生产出高质量的锻件产品。这就要求不仅在锻件锻造后进行质量检验,还要从锻件的原料(如连铸坯、模铸锭和电渣锭等)的质量控制入手,只有确保原材料质量,才能保证锻造质量。

超声波检测是发现锻件缺陷、保证锻造质量的有效手段。然而,长期以来在锻造行业中有关原材料超声波探伤和锻件超声波探伤的专著很少,而包含整个锻件生产过程质量控制的超声波探伤书籍几乎是空白,这不能不说是一种缺憾,陈昌华等几位同志在总结多年钢锭和锻件超声波探伤经验基础上编写的《钢锭和锻件超声波探伤缺陷分析》一书,弥补了这一缺憾。该书收集和整理了大量探伤缺陷图谱,并与采用低倍、金相和扫描电镜等手段获得的检验图谱相结合,对锻件缺陷进行了全方位的描述,并结合锻件失效分析,对缺陷的形成、发展、危害进行了详细介绍。这种综合分析方法在锻件质量控制方面的应用是一次创新探索,具有广泛的借鉴意义。

我很高兴将本书推荐给从事锻件超声波检测、金属原材料超声波检测或相关工作的同行或工程技术人员,相信它会对您的工作带来很大的帮助和启发。

中国金属学会冶金无损检测人员资格鉴定与认证委员会

秘书长: 

2015年5月6日

前言

锻件在现代社会的发展中起着举足轻重的作用,它涉及航空航天、造船、兵器、石油化工、汽车、采矿和核电等领域,而且其使用范围、需求量还在不断增大。锻件的质量直接影响重大装备的运行水平、可靠性和安全性,因此,对锻件的质量要求日益严格。

锻件生产的各项环节,如炼钢、钢锭浇注、锻造、热处理等均可能使锻件产生缺陷。因此在每道生产工序均要对工件进行检测,及时发现微小缺陷,并采取适当措施,避免缺陷的扩大。

锻造生产中通常采用无损检测技术对锻件进行质量检验。该技术的运用在一定程度上反映了一个国家的工业发展水平,其重要性已得到公认。超声波检测与其他常规无损检测技术相比,具有检测对象广泛、检测深度大、缺陷定位准、灵敏度高、速度快、对人体无危害以及现场使用方便等特点。超声波检测与宏观检验、金相检验、扫描电镜检验等检测技术相结合,形成了锻件生产过程中一整套科学的检测手段,极大地减少、避免了缺陷的产生,并可对已经产生的缺陷进行原因分析,及时地对生产过程进行反馈、优化生产工艺。常规的五大无损检测技术分别是超声波检测(UT)、磁粉检测(MT)、射线检测(RT)、渗透检测(PT)、涡流检测(ET)。经过多年的发展,超声波检测已成为国内外应用最广泛、使用频率最高、发展速度最快的一种无损检测技术。

为了让从事炼钢、锻造工作的人员及锻件检测者熟悉锻件的生产过程,了解锻件产生缺陷的原因,便于进行工艺优化,作者总结了自己多年炼钢和锻造的生产与检测经验,还参阅了国内外众多的生产检测案例,特编撰此书。

本书共分八章,主要内容有超声波检测技术及其应用、钢锭缺陷及其探伤分析案例、锻件缺陷及其探伤分析案例、热处理缺陷及其探伤分析案例、探伤缺陷的宏观检验及其分析案例、探伤缺陷的金相检验及其分析案例、探伤缺陷的扫描电镜检验及其分析案例、锻件探伤典型缺陷失效分析案例等。

本书特色之一:详细阐述了各种超声波检测技术的发展历史及其应用,将超声C扫描、相控阵和超声波显微镜技术应用到锻件的实际生产中。

本书特色之二:对连铸坯、模铸锭、电渣重熔锭进行大量超声波探伤试验,验证和总结出钢锭质量与其碳当量的对应关系。利用这一关系可快速预判钢锭质量,这为炼钢及浇注的生产过程提供了质量反馈;同时引入钢锭质量等级的探伤分级概念,对三种钢锭的生产及后续锻造过程起到指导作用。

本书特色之三:利用超声波探伤判断锻件内部缺陷性质。通过大量的案例,将锻件缺陷性质与其探伤波形或图形特征进行对比研究,形成了锻件内部缺陷的超声波A扫描特征图谱、C扫描特征图谱、相控阵特征图谱、截面图图谱等。利用这些图谱,对锻件缺陷进行定性判断,可进一步研究缺陷的形成原因,从而对锻造原材料生产方式进行选择、对锻造比等锻造参数进行改进或优化、消除了万能锻造工艺卡。

本书特色之四:将超声波探伤与宏观检验、金相检验、扫描电镜检验相结合,通过超声波探伤结果与这三种技术对缺陷的检验结果的对比展示与分析,验证了超声波探伤结果的正确性,同时形成了缺陷的超声波探伤与低倍检验、金相检验、扫描电镜检验的对应图谱,促进了超声波探伤缺陷图谱在缺陷定性方面的应用。同时为各种检验技术的交流和互相补充作出贡献。

本书特色之五:利用超声波探伤,进行了大量锻件缺陷的失效分析,研究了锻件缺陷产生的原因(即是由炼钢的原材料引起的,还是由锻造或热处理不当等因素引起的)。用失效分析的理念对超声波探伤缺陷进行剖析,有目的地促进了超声波探伤人员水平的提高。

本书由陈昌华担任主编,具体编写工作分工如下:本书第一章中的1.1~1.3节由陈能进编写,1.4~1.5

节由尹述港编写,1.6~1.7节由汤志贵编写,1.8节由魏忠瑞、马建民编写,1.9节由曹军利编写,1.10节由徐正茂编写,1.11节由董政编写,1.12节由陈庆勇编写,1.13节由陈昌华编写;第二章中的2.1节由徐加银编写,2.2节由张洪编写,2.3节由许兴编写,2.4节由吴连、徐文龙编写,2.5节由吴旻、钱德桥编写;第三章中的3.1节由张利编写,3.2节由钱健清编写,3.3节由宋文达、陈仕春、徐良坤编写,3.4节由陈尧、钱德兴、钱德武编写,3.5节由杨磊、储良华编写;第四章中的4.1~4.2节由龚洋道编写,4.3~4.4节由刘晓磊编写,4.5~4.6节由Brandon Phay Y. H编写,4.7节由陈昌华、陈尧编写;第五章中的5.1节由史朝刚编写,5.2节由赵志海编写;第六章中的6.1~6.2节由杨丽珠编写,6.3~6.4节由李蓓编写,6.5节由陈琳编写;第七章由浦红编写,第八章由陈联满、陈昌华编写。本书附录一由许兴整理校对,附录二由吴连整理校对,附录三由吴旻整理校对,附录四由杨磊整理校对,附录五由陈昌华、陈尧、宋文达整理校对,附录六由赵志海整理校对,附录七由史朝刚整理校对,附录八由陈琳整理校对,附录九由杨丽珠整理校对,附录十由浦红整理校对,附录十一、附录十二由陈昌华整理校对,附录十三由宋文达、陈尧整理校对,附录十四由赵志海整理校对,附录十五、十六由陈昌华整理校对,附录十七由陈尧整理校对,附录十八由宋文达整理校对,附录十九、二十由祝宝芹整理校对。全书由陈昌华统稿,由陈尧协助整理。绘图工作由宋文达完成。另外,陈昌华还负责本书编写的技术指导及编写人员的协调工作。

在编写本书的过程中,作者参考和引用了某些著作和文献中的部分内容,在此谨向这些著作和文献的作者表示真诚的谢意。

本书所有试验的标准试块、对比试块(东岳牌),均由山东瑞祥模具有限公司(山东济宁模具厂)的魏忠瑞提供;所有试验的超声波仪器,均由上海汕超仪器设备有限公司顾雪松提供;所有试验的超声波探头(蝙蝠牌),均由常州超声电子有限公司潘振新提供,借此对上述企业及个人表示感谢。

由于经验和水平有限,加之时间仓促,本书中的错误和不妥之处在所难免,希望有关专家、同行和广大读者批评指正。

陈昌华

2015年4月15日

目 录

第一章 超声波检测技术及其应用	(001)
1.1 无损检测技术介绍	(001)
1.2 A 型超声波探伤扫描技术及其应用	(001)
1.2.1 基本介绍	(001)
1.2.2 工作原理	(001)
1.2.3 仪器及缺陷示例	(003)
1.2.4 应用案例	(004)
1.2.5 优缺点及发展前景	(005)
1.3 B 型超声波探伤扫描技术及其应用	(006)
1.3.1 基本介绍	(006)
1.3.2 工作原理	(007)
1.3.3 仪器及缺陷示例	(007)
1.3.4 应用案例	(008)
1.3.5 优缺点及发展前景	(008)
1.4 C 型超声波探伤扫描技术及其应用	(009)
1.4.1 基本介绍	(009)
1.4.2 工作原理	(009)
1.4.3 仪器及缺陷示例	(009)
1.4.4 应用案例	(012)
1.4.5 优缺点及发展前景	(015)
1.5 D 型超声波探伤扫描技术及其应用	(015)
1.5.1 基本介绍	(015)
1.5.2 工作原理	(015)
1.5.3 仪器及缺陷示例	(015)
1.5.4 应用案例	(016)
1.5.5 优缺点及发展前景	(016)
1.6 3D 型超声波探伤扫描技术及其应用	(016)
1.6.1 基本介绍	(016)
1.6.2 工作原理	(016)
1.6.3 仪器及缺陷示例	(016)
1.6.4 应用案例	(016)
1.6.5 优缺点及发展前景	(017)
1.7 TOFD 超声波探伤扫描技术及其应用	(018)
1.7.1 基本介绍	(018)
1.7.2 工作原理	(018)

1.7.3	仪器及缺陷示例	(020)
1.7.4	应用案例	(021)
1.7.5	优缺点及发展前景	(023)
1.8	相控阵超声波探伤扫描技术及其应用	(023)
1.8.1	基本介绍	(023)
1.8.2	工作原理	(024)
1.8.3	仪器及缺陷示例	(025)
1.8.4	应用案例	(027)
1.8.5	优缺点及发展前景	(029)
1.9	超声导波技术及其应用	(030)
1.9.1	基本介绍	(030)
1.9.2	工作原理	(030)
1.9.3	仪器及缺陷示例	(031)
1.9.4	应用案例	(032)
1.9.5	优缺点及发展前景	(032)
1.10	多通道超声波探伤扫描技术及其应用	(033)
1.10.1	基本介绍	(033)
1.10.2	工作原理	(033)
1.10.3	仪器及缺陷示例	(035)
1.10.4	应用案例	(035)
1.10.5	优缺点及发展前景	(036)
1.11	激励脉冲技术及其应用	(036)
1.11.1	发射电路功率	(036)
1.11.2	激励脉冲频率	(037)
1.11.3	激励脉冲振幅	(037)
1.11.4	激励脉冲宽度	(038)
1.11.5	发射电路和激励脉冲对超声波探伤的影响	(040)
1.12	超声波显微镜技术及其应用	(040)
1.12.1	超声波扫描显微镜的基本原理	(040)
1.12.2	超声波扫描显微镜的特点	(041)
1.12.3	X-Ray 与 C-SAM 成像原理	(042)
1.12.4	超声波扫描显微镜的应用	(042)
1.13	粗晶材料的超声检测技术及其应用	(045)
1.13.1	常见的粗晶材料	(045)
1.13.2	晶粒度对超声检测的影响	(046)
1.13.3	粗晶材料的现有检测手段	(047)
第二章	钢锭缺陷及其探伤分析案例	(048)
2.1	钢的凝固和收缩	(048)
2.1.1	钢的凝固	(048)
2.1.2	钢的凝固对质量的影响	(049)
2.1.3	钢的收缩	(049)

2.1.4	钢的收缩对质量的影响	(051)
2.2	影响钢锭内在质量的主要因素	(052)
2.2.1	钢的结晶温度范围	(055)
2.2.2	钢的熔点	(060)
2.2.3	钢的导热能力	(063)
2.2.4	锻造原材料生产方式	(065)
2.3	连铸锭缺陷及其探伤分析案例	(071)
2.3.1	连铸工艺与设备	(071)
2.3.2	连铸锭缺陷	(073)
2.3.3	连铸锭缺陷探伤波形	(075)
2.3.4	连铸锭探伤分析案例	(075)
2.3.5	连铸坯探伤意义	(075)
2.4	模铸锭缺陷及其探伤分析案例	(076)
2.4.1	模铸工艺与设备	(076)
2.4.2	模铸锭缺陷	(083)
2.4.3	模铸锭缺陷探伤波形	(085)
2.4.4	模铸锭探伤分析案例	(087)
2.5	电渣重熔锭缺陷及其探伤分析案例	(087)
2.5.1	电渣重熔工艺与设备	(087)
2.5.2	电渣重熔锭缺陷	(092)
2.5.3	电渣重熔锭缺陷探伤波形	(094)
2.5.4	电渣重熔锭探伤分析案例	(094)
第三章	锻件缺陷及其探伤分析案例	(096)
3.1	锻造过程需要注意的几点问题	(096)
3.1.1	钢锭缺陷对锻造质量的影响	(096)
3.1.2	锻造方式选择	(096)
3.1.3	钢的过热过烧	(098)
3.1.4	锻造热力学参数	(099)
3.2	锻件探伤方法	(105)
3.2.1	锻件的手工探伤	(105)
3.2.2	锻件的自动化探伤	(116)
3.3	探伤缺陷的性质分类及其波形	(116)
3.3.1	缩孔	(116)
3.3.2	疏松	(116)
3.3.3	裂纹	(117)
3.3.4	白点	(118)
3.3.5	夹杂物	(118)
3.3.6	偏析	(118)
3.3.7	晶粒粗大	(118)
3.4	按工件形状的探伤方法及其波形	(119)
3.4.1	圆棒类锻件探伤	(119)

3.4.2	饼类锻件探伤	(123)
3.4.3	空心类锻件探伤	(125)
3.4.4	其他类型锻件探伤	(126)
3.5	锻件探伤分析案例	(126)
3.5.1	轴类锻件探伤分析案例	(126)
3.5.2	饼类锻件探伤分析案例	(127)
3.5.3	筒形锻件探伤分析案例	(129)
第四章	热处理缺陷及其探伤分析案例	(131)
4.1	热处理基础知识	(131)
4.1.1	退火和正火	(131)
4.1.2	淬火	(132)
4.1.3	回火	(133)
4.2	热处理应力	(133)
4.2.1	热应力	(133)
4.2.2	组织应力	(133)
4.2.3	附加应力	(133)
4.2.4	残余应力	(133)
4.3	淬火裂纹	(134)
4.3.1	淬火裂纹的特征	(134)
4.3.2	淬火裂纹的分类	(134)
4.3.3	淬火裂纹的产生原因	(135)
4.4	回火裂纹	(138)
4.4.1	回火脆性	(138)
4.4.2	回火裂纹的产生原因	(138)
4.5	时效裂纹	(139)
4.6	淬后加工裂纹	(139)
4.6.1	冷处理裂纹	(139)
4.6.2	机械加工裂纹	(139)
4.6.3	化学加工裂纹	(140)
4.7	热处理缺陷探伤分析案例	(140)
4.7.1	热处理裂纹探伤分析案例	(140)
4.7.2	热处理过热缺陷探伤分析案例	(144)
4.7.3	热处理混晶缺陷探伤分析案例	(147)
4.7.4	热处理退火缺陷探伤分析案例	(152)
第五章	探伤缺陷的宏观检验及其分析案例	(156)
5.1	低倍检验及其分析	(156)
5.1.1	低倍检验方法	(156)
5.1.2	连铸锭低倍缺陷及其分析案例	(158)
5.1.3	模铸锭低倍缺陷及其分析案例	(165)
5.1.4	电渣重熔锭低倍缺陷及其分析案例	(171)

5.1.5 锻件低倍缺陷及其分析案例	(173)
5.2 断口检验及其分析	(175)
5.2.1 断口检验方法	(175)
5.2.2 断口组织与评定	(175)
5.2.3 断口检验案例	(177)
第六章 探伤缺陷的金相检验及其分析案例	(181)
6.1 金相检验的发展	(181)
6.2 试样的截取	(181)
6.3 试样的制备	(182)
6.4 试样显微组织的观察	(184)
6.5 锻件的金相检验及其分析案例	(185)
6.5.1 非金属夹杂物检验	(185)
6.5.2 纯净度检验	(187)
6.5.3 晶粒度检验	(187)
6.5.4 金相组织检验	(189)
6.5.5 探伤样品的检验	(189)
第七章 探伤缺陷的扫描电镜检验及其分析案例	(197)
7.1 扫描电子显微镜	(197)
7.1.1 发展情况	(197)
7.1.2 工作原理	(197)
7.1.3 工作方式	(197)
7.1.4 组成结构	(198)
7.1.5 优点	(198)
7.2 能谱仪	(198)
7.2.1 简介	(198)
7.2.2 X射线能谱分析	(198)
7.2.3 能谱分析的特点	(199)
7.3 扫描电镜试样的制备	(199)
7.4 探伤缺陷的扫描电镜分析案例	(199)
7.4.1 过热、过烧	(199)
7.4.2 铜脆	(203)
7.4.3 层状断口	(205)
7.4.4 锻造折叠	(207)
7.4.5 缩孔	(208)
7.4.6 白点	(209)
第八章 锻件探伤典型缺陷失效分析案例	(214)
8.1 失效分析概况	(214)
8.1.1 失效分析定义和目的	(214)
8.1.2 失效分析的发展史	(214)

8.1.3 锻件失效分析	(215)
8.2 锻件探伤缺陷分析案例	(216)
8.2.1 裂纹缺陷探伤分析案例	(216)
8.2.2 白点缺陷探伤分析案例	(219)
8.2.3 针孔、气泡缺陷探伤分析案例	(222)
8.2.4 皮下缺陷探伤分析案例	(224)
8.2.5 中心偏析、疏松缺陷探伤分析案例	(227)
8.2.6 带状偏析缺陷探伤分析案例	(229)
8.2.7 锭型偏析缺陷探伤分析案例	(232)
8.2.8 锻件内部夹渣缺陷探伤分析案例	(235)
8.2.9 氮化物夹杂缺陷探伤分析案例	(239)
8.2.10 组织缺陷探伤分析案例	(243)
8.2.11 热处理缺陷探伤分析案例	(247)
参考文献	(252)
附 录	(255)
附录 1 连铸锭超声波探伤缺陷 A 型特征图谱	(255)
附录 2 模铸锭超声波探伤缺陷 A 型特征图谱	(257)
附录 3 电渣重熔锭超声波探伤缺陷 A 型特征图谱	(259)
附录 4 锻件超声波探伤缺陷 A 型特征图谱	(261)
附录 5 实心轴锻件内部缺陷的超声波截面图识别方法	(269)
附录 6 连铸锭超声波探伤低倍图谱	(272)
附录 7 锻件超声波探伤低倍图谱	(280)
附录 8 锻件超声波探伤金相图谱	(282)
附录 9 锻件非金属夹杂物的金相检验	(285)
附录 10 锻件超声波探伤扫描电镜图谱	(288)
附录 11 锻件超声波探伤对比试块制作	(296)
附录 12 各类锻件超声波探伤工艺卡	(306)
附录 13 相控阵 A、B 型试块测试方法	(311)
附录 14 锻件断口检验图谱	(321)
附录 15 超声波相控阵探伤缺陷的 B、C、D、S 特征图描述	(325)
附录 16 连铸锭超声波探伤缺陷 B+C+D+S 型特征图谱	(328)
附录 17 模铸锭超声波探伤缺陷 B+C+D+S 型特征图谱	(335)
附录 18 电渣重熔锭超声波探伤缺陷 B+C+D+S 型特征图谱	(342)
附录 19 锻件超声波探伤缺陷 S 型特征图谱	(349)
附录 20 锻件超声波探伤缺陷 C 型特征图谱	(353)

第一章 超声波检测技术及其应用

1.1 无损检测技术介绍

无损检测是指不破坏和不损伤受检物体,对其有无缺陷进行检测的一种技术。超声波检测是常用的无损检测技术之一。超声波是指频率大于 20kHz,并且能在连续介质中传播的机械波。

超声波无损检测技术始于 20 世纪 30 年代。早在 1929 年苏联萨哈诺夫提出利用穿透法检查固体内部结构,之后利用连续超声波在实验室研究成功。第二次世界大战期间,以声脉冲反射为基础的声呐设备在法国问世,并成功地用于水下潜艇检测。在声呐技术的基础上,美、英两国分别于 1944 年和 1964 年成功研制脉冲反射式超声波探伤仪,并逐步用于锻钢件和厚钢板的检测。发展到 20 世纪 60 年代,超声检测技术已经成为一种有效可靠的无损检测手段,并在工业探伤领域得到了广泛应用。20 世纪 70 年代计算机技术的发展及介入,不仅提高了设备的抗干扰能力,而且利用计算机的运算功能,实现了对缺陷信号的自动读数、自动识别、自动补偿、定量和报警。20 世纪 80 年代,大规模集成电路和微机技术的快速发展带动了数字化超声波探伤仪的发展,使得检测数据更加形象具体。

超声波探伤是国内外应用最广泛、使用频率最高且发展较快的一种无损检测技术。超声检测与其他常规技术相比,具有被测对象范围广、检测深度大、缺陷定位准确、检测灵敏度高、成本低、使用方便、速度快、对人体无害及便于现场检测等优点。几十年来,超声无损检测已得到了巨大发展和广泛应用,几乎应用到所有工业领域,如作为基础工业的钢铁工业、机器制造工业、锅炉压力容器有关工业领域、石油化工工业、铁路运输工业、造船工业、航空航天工业、高速发展中的新技术产业如集成电路工业、核电工业等重要工业领域;目前大量应用于金属材料和构件,包括产品质量在线监控和设备在役检查,应用频度和领域日益增多。

随着工业自动化的发展,超声无损检测技术已经可以运用在生产的每一过程中,能够实现在线自动检测。人工智能、人工神经网络、机器人技术、自适应技术等科学的逐步成熟,促进了超声无损检测技术的应用发展。

1.2 A 型超声波探伤扫描技术及其应用

1.2.1 基本介绍

A 型显示超声波探伤因其回波显示采用幅度调制(Amplitude modulation)而得名。A 型显示超声波探伤仪是目前工业超声检测领域中应用最广泛的设备之一,它结构简单、体积小、重量轻、操作简便、价格便宜,特别适用于现场检测。在检测方面,它具有缺陷定位精度高、能确定缺陷的当量尺寸、灵敏度高、只需手工操作工件、适用于各种工件检测等优点。

用 A 型显示超声波探伤检测仪,由回波所在的位置可测得工件的厚度、缺陷在工件中的深度以及缺陷的当量大小,根据回波的其他一些特征,如波幅和波形密度等,还可以在在一定程度上对缺陷进行定性分析。然而由于其综合了声学、材料、传感器等多方面的知识,对操作人员的素质和经验提出了较高的要求。

1.2.2 工作原理

(1)模拟式 A 型脉冲反射超声波探伤仪

模拟式 A 型脉冲反射超声波探伤仪主要由同步、发射、扫描、接收放大、显示电路以及报警、电源七大部分组成。电路框图如图 1-1 所示。

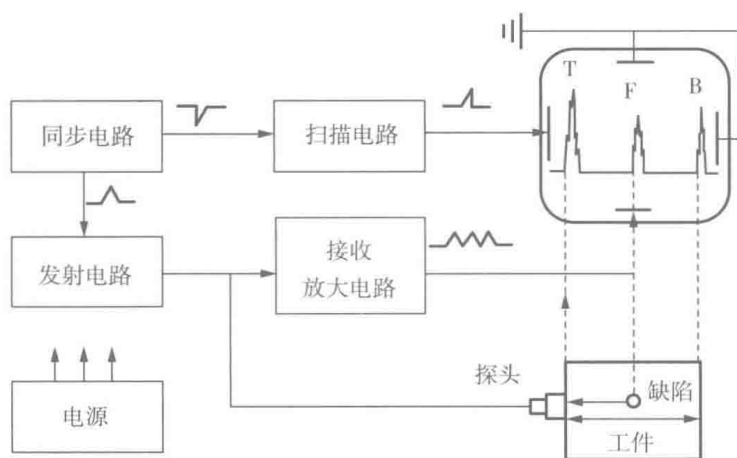


图 1-1 模拟式 A 型超声波探伤仪电路框图

① 同步电路

同步电路又称触发电路，它每秒钟产生数十至数千个脉冲，用来触发探伤仪的扫描电路、发射电路等，使之步调一致，有条不紊地工作。因此，同步电路是整个仪器的“中枢”，同步电路出了故障，整个仪器便无法工作。

② 发射电路

在同步脉冲信号的触发下，发射电路产生大幅度的高频电脉冲输送给超声探头，激励探头发具有相同中心频率的脉冲超声波入射到被测材料中去。发射脉冲的幅度（脉冲电压）和持续时间（脉冲宽度）的大小决定着发射功率的大小。目前商品化超声波探伤仪的发射脉冲幅度多在 400~500V 范围，有些大功率的超声波探伤仪器发射脉冲幅度能高达 900V。在实际超声波检测中，可以根据具体需要调整仪器的发射功率的大小。

③ 扫描电路

扫描电路又称时基电路，用来产生锯齿波电压，电压与时间成正比，加在示波管水平偏转板上，使示波管显示屏上的光点沿水平方向做等速移动，产生一条水平扫描基线。扫描电路中锯齿波电压直接影响水平线性好坏，即影响定位的准确性。

④ 接收放大电路

接收电路由衰减器、射频放大器、检波器和视频放大器等组成。它把由缺陷回波引起压电晶片产生的射频电压的电信号进行放大、检波、最后加至示波管的垂直偏转板上，并在显示屏上显示。由于接收的电信号非常微弱，通常只有数百微伏到数千微伏，而示波管全调制所需电压要几百伏，所以接收电路必须有约 10^5 倍(100dB)的放大能力。接收电路的性能对探伤仪性能影响极大，它直接影响到探伤仪的垂直线性、动态范围、检测灵敏度、分辨力等重要技术指标。

⑤ 显示电路

显示电路主要由示波管及外围电路组成。显示屏上纵坐标所显示脉冲波的高度与探头所接收的超声波能量成比例。缺陷波的高度与缺陷的大小、性质、位置有关。通过缺陷波在显示屏上横坐标的位置，可以对缺陷定位；通过缺陷波在显示屏上纵坐标的高度，可以估计缺陷的大小。

⑥ 电源电路

电源的作用是给探伤仪各部分电路提供适当的电能，使整机电路工作。标准探伤仪一般用 220V 交流电，探伤仪内部有供各部分电路使用的变压、整流及稳压电路。携带式探伤仪多用蓄电池供电。

⑦ 辅助电路

除上述基本组成部分之外，探伤仪还有各种辅助电路，如延迟电路、闸门电路、报警电路等。

参照图 1-1 将模拟式 A 型脉冲反射式超声波探伤仪的工作过程简要说明如下：

同步电路产生的触发脉冲同时加至扫描电路和发射电路,扫描电路受触发开始工作,产生锯齿波扫描电压,加至示波管水平偏转板,使电子束发生水平偏转,在显示屏上产生一条水平扫描线。与此同时,发射电路触发产生调频窄脉冲,加至探头,激励压电晶片振动,在工件中产生超声波。超声波在工件中传播,遇缺陷或底面发生反射,返回探头时,又被压电晶片转变为电信号,经接收电路放大和检波,加至示波管垂直偏转板上,使电子束发生垂直偏转,在水平扫描相应位置上产生缺陷波和底波,根据缺陷波的位置可以确定缺陷的埋藏深度,根据缺陷波的幅度可以估算缺陷当量的大小。

(2) 数字式 A 型脉冲反射超声波探伤仪

① 一般工作原理

所谓数字式超声探伤仪主要是指发射、接收电路的参数控制和接收信号的处理、显示均采用数字化方式的仪器。数字式超声探伤仪是计算机技术和超声探伤仪技术相结合的产物。它是在传统的超声探伤仪的基础上,采用计算机技术实现仪器功能的精确和自动控制、信号获取和处理的数字化和自动化、检测结果的可记录性和可再现性。因此,它具有传统的超声探伤仪的基本功能,同时又增加了数字化带来的数据测量、显示、存储与输出功能。近年来,数字式仪器发展很快,有逐步替代模拟式仪器的趋势。

② 数字式仪器与模拟式仪器的异同

图 1-2 是典型数字式 A 型脉冲反射超声波探伤仪的电路框图。数字式仪器与模拟式仪器的发射电路、接收放大电路的前半部分相同,但信号经放大到一定程度后,数字式仪器由模/数转换器将模拟信号变为数字信号,由微处理器进行处理,在显示屏上显示出来。数字式仪器的显示是二维点阵式的,不像模拟式仪器由单行扫描线经幅度调节显示波形,而是由微处理器通过程序来控制显示器实现逐行逐点扫描。数字式仪器不再需要同步电路,而是由微处理器通过程序来协调各部分的工作。

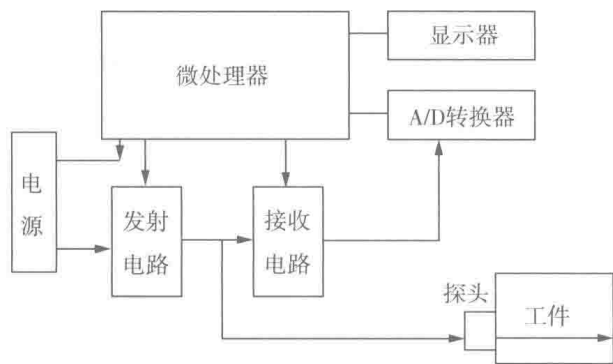


图 1-2 典型数字式 A 型脉冲反射超声波探伤仪电路框图

1.2.3 仪器及缺陷示例

(1) 仪器

图 1-3 为模拟式 A 型超声波探伤仪器,图 1-4 为数字式 A 型超声波探伤仪器。

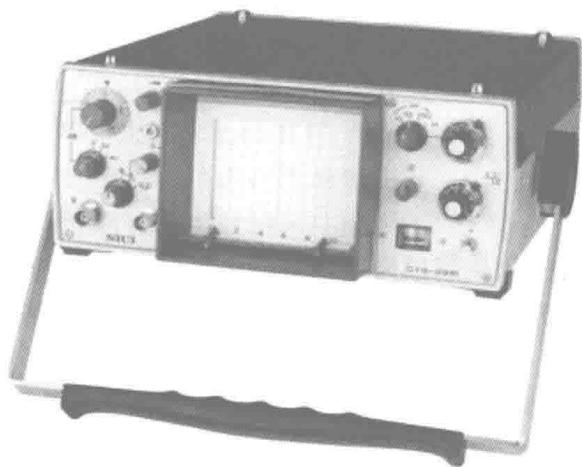


图 1-3 模拟式 A 型超声波探伤仪



图 1-4 数字式 A 型超声波探伤仪

(2) 缺陷波形

典型的 A 型超声波探伤缺陷波形如图 1-5 所示。

1.2.4 应用案例

(1) 工件概况

圆棒锻件材料为 AISI 4140, 冶炼方式为偏心炉底出钢电炉 (EBT)、钢包精炼炉 (LF)、真空脱气炉 (VD), 热处理状态为正火 (N)、淬火 (Q)、回火 (T)。圆棒锻件尺寸如图 1-6 所示。

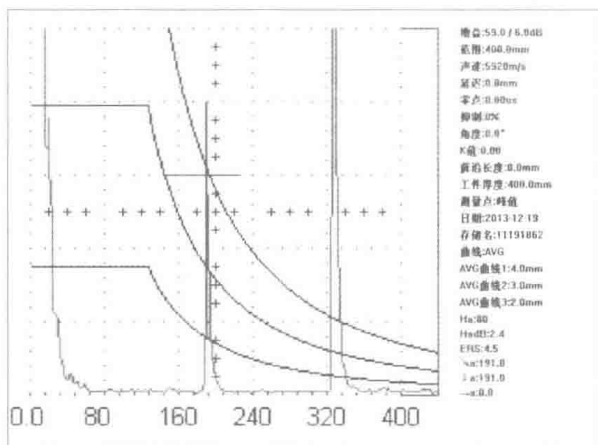


图 1-5 典型 A 型超声波探伤缺陷波形

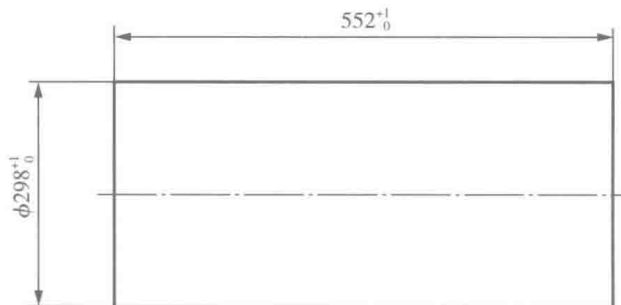


图 1-6 圆棒锻件

(2) A 型超声波检测

从外圆径向对圆棒进行 A 型超声波检测, 发现工件内部有断续性缺陷显示, 缺陷位于工件的中心区域, 区域范围 50mm 左右。探伤特征波形如图 1-7 所示。

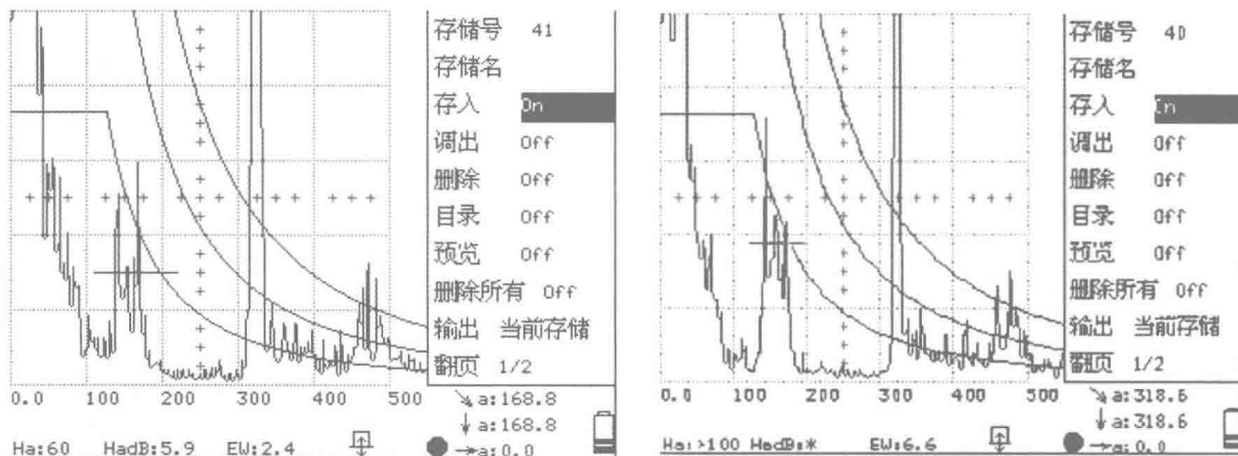


图 1-7 超声波探伤波形

(3) 相控阵超声波检测

采用相控阵检测仪对圆棒锻件进行检测, 采用 1×32 阵子相控阵探头做圆断面全覆盖扫描, 360° 扫查后由仪器自动做出的截面图如图 1-8 所示。由图可知锻件内部存在圆环状缺陷, 疑似为偏析状的缺陷。

(4) 低倍检验

对圆棒锻件进行取样解剖分析, 低倍试样经 1:1 工业盐酸水溶液热浸蚀, 低倍酸洗面未见疏松、孔洞和裂纹等冶金宏观缺陷显示, 按 ASTM E381 标准评级, 表面条件为 S-1, 随机情况为 R-3, 中心分离物为 C-2, 存在锭型偏析, 位于距外表面 50mm 左右的同心圆上, 工件边缘无低倍缺陷。低倍组织的整体形貌见图 1-9 所示。

(5) 结论

超声波探伤反映材料存在缺陷, 经低倍检验验证, 可知工件确实存在偏析的冶金缺陷。