

高温声学检测技术的发展、应用与挑战*

卢超, 郭伟, 石文泽, 陈振华, 胡博, 陈巍巍, 李秋锋,
陈尧, 刘远, 郭双林, 朱颖, 张萍
(南昌航空大学无损检测技术教育部重点实验室 南昌, 330063)

摘要 以我国航空航天、钢铁冶金、特种设备等领域的高温声学无损检测技术研究与应用为主线,分析了高温声学检测技术在促进先进高温材料制备与研发、钢铁冶金行业绿色低碳生产和产业升级、高温压力管道安全运行与维护等方面的巨大需求。介绍了国内外在高温声学检测的技术方法和仪器研制等方面取得的进展,分析了压电超声、电磁超声、激光超声、激光电磁超声等技术在高温无损检测应用方面存在的优缺点和应用场景,总结了高温声学检测技术面临的机遇与挑战。

关键词 声学检测;高温无损检测;压电超声;电磁超声;激光超声
中图分类号 TH878;G353.11;TB559

引言

近年来,高温无损检测技术受到广泛关注,在工业制造与设备维护方面占据重要地位,但也面临亟待解决的难题。例如,连铸技术是国内外先进制造业的核心技术,在高温连铸过程中,若液芯厚度和内部温度梯度控制不当,将导致中心偏析、松散、枝晶发达等质量问题。另外,在核能、太阳能和石油工业中,许多关键部件如高温管道、压力容器和储罐等,在高温条件下极易遭受蠕变、热机械疲劳或热腐蚀^[1-2]等损伤。在航空航天领域中,航空发动机、固体火箭尾喷管等在高温条件下易产生高温腐蚀、疲劳以及局部减薄^[3-5]等问题。由此可见,大力发展高温无损检测技术是促进高科技产业升级、提高经济效益、增强先进制造核心竞争力、保障政治声誉和国防安全的需要。

超声检测是利用超声波的传播特性,对试样的不连续性进行评价。利用超声波进行无损检测始于20世纪30年代^[6],随着计算机与电子技术的发展,超声检测结果更加形象、准确^[7],超声波检测新技术也得到迅速发展,例如使用空气作为耦合剂的空气耦合超声,具有非接触特点的电磁超声、激光超声和激光电磁超声等^[8-10]。但是,能够应用于高温检测的

超声换能器必须满足基本条件:耐高温或者非接触。其中,压电超声换能器因为高温压电材料的广泛应用已经能够进行高温检测,而空气耦合超声、激光超声、电磁超声以及激光电磁超声等技术因为无需耦合、非接触的优点在高温检测领域应用潜力巨大。

笔者分析了当前高温无损检测的迫切需求,指出了高温检测应用时压电超声、空耦超声、激光超声、电磁超声以及激光电磁超声等技术的优势与不足、研究与应用现状,重点介绍了高温电磁超声和高温激光电磁超声技术,并对未来高温声学检测技术的机遇与挑战进行了展望。

1 高温无损检测技术应用需求

大型铸锻件广泛应用于核电、军工等领域,是现代国家工业的基石,我国已经成为钢铁生产大国。核电、航空、船舶等领域的高温大型铸锻件实物如图1所示。由于耐高温传感与检测技术的缺失,高温锻造在线无损检测也是钢铁制造业的“卡脖子”技术。此外,我国钢铁行业的发展造成雾霾、水污染、土壤重金属超标等环保问题与实施钢铁行业超低排放和技术升级改造、绿色制造和环保制造的迫切要求相违背。因此,将高温声学无损检测技术用于解决高温连铸与锻造生产线中的检测难题,有利于加

* 国家自然科学基金资助项目(52065049, 12064001);江西省杰出青年基金资助项目(20212ACB214010);江西省主要学科学术和技术带头人培养计划资助项目(20204BCJL22039, 20225BCJ23023);江西省重点研发计划资助项目(20212BBE51006, 20223BBE51034);南昌航空大学研究生创新专项资金资助项目(YC2021-081)

收稿日期:2023-07-10;修回日期:2023-09-01

快技术转型升级,推进节能减排,是钢铁行业去产能的重要方法。

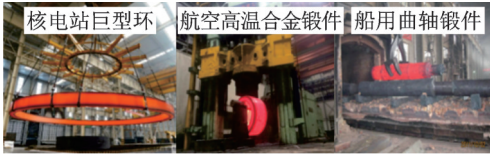


图1 高温大型铸锻件实物

Fig.1 High-temperature large forgings

高温承压设备应用广泛,图2为核电、火电、化工、钢铁领域中应用的高温高压管道。蒸汽管道规模大、布局复杂,检测可达性较差,多采用人工手动检测,检测效率低,检测任务重。因此,急需高温无损检测与监测技术来实时监测蒸汽管道关键部位结构完整性信息(局部冲蚀减薄和焊缝裂纹扩展),以评估管道剩余寿命,并对管道爆管进行危险预警。

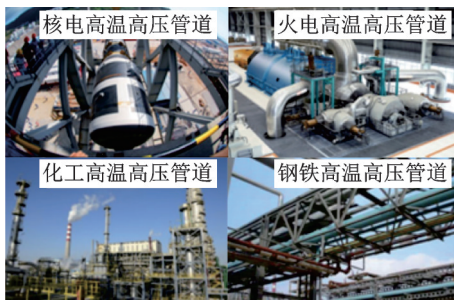


图2 高温高压管道

Fig.2 High-temperature and high-pressure pipeline

航空发动机是构成国家工业实力基础和军事力量的核心技术之一。图3为航空发动机零件实物图,包括航空发动机压气机、涡轮叶片、燃烧室和涡轮盘。在线检测技术是支撑新型高温合金试验的关键技术。由于耐高温无损检测技术的缺失,导致无法准确把握超高温环境下金属材料性能退化机理与失效模型,缺乏实验数据用于指导超高温环境下高服役性能的高温合金材料的开发和制备。因此,将

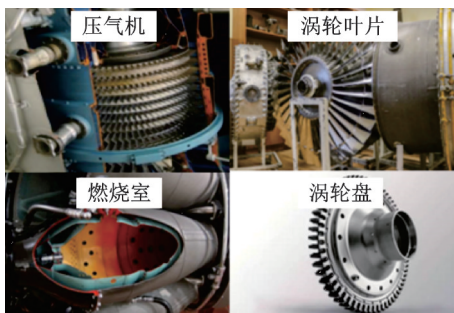


图3 航空发动机零件

Fig.3 Components of aviation engine

高温声学无损检测技术应用于超高温环境下高温合金材料在线无损检测与评价具有重大的工程应用价值。

2 高温压电超声技术发展与应用

目前,在健康监测和无损检测中,压电超声换能器主要采用锆钛酸铅(lead zirconate titanate,简称PZT)压电陶瓷作为超声波激励和接收的压电元件^[11]。常用的压电体如表1所示。

表1 常用压电体

Tab.1 Commonly used piezoelectric materials

压电材料	温度/℃
PZT-5H	210
钛酸铋	685
铌酸锂	1 000
氮化铝	1 150
钛酸锶	>1 550
钛酸镧	1 461
钛酸钕	1 482
铌酸锶	1 327
铌酸钙	>1 525

由表1可知,PZT-5H压电材料的居里-维斯温度将其使用温度限制在210℃左右。单晶铌酸锂晶片的高温性能更高,可以在1 000℃左右检测到稳定的超声回波^[12]。氮化铝晶体熔点为2 100℃,在1 150℃条件下依然有压电效应^[13],但在较高的温度下仅能获取略低的超声回波幅值^[14]。钛酸铋厚膜换能器性能良好,工作温度高达600℃^[15]。此外,常用的压电陶瓷材料如钛酸锶、钛酸镧和钛酸钕等工作温度都在1 300℃以上。压电换能器技术的先驱^[16-17]将粉末添加到溶胶凝胶中,使用旋涂方法形成厚度超过1~2 μm的压电薄膜。Bhadwal等^[18]研究了超声换能器的各部件耦合方法,高温条件下的超声波信号与常温相当。Kim等^[19]开发了一种用于检查反应堆燃料棒的超声波换能器,选择高灵敏度复合钙钛矿单晶作为有源压电元件,可以产生比常规PZT压电超声换能器更强的超声波,适用于反应堆内高温、高辐射、高衰减的环境。Saillant等^[20]研究了在200℃高温液体钠中进行检查的液钠检测超声换能器,图4为其示意图。压电圆盘由PZT陶瓷制成;背衬材料由高衰减高温弹性体和大尺寸颗粒的混合物制成,作用是形成压电圆盘的阻尼振动,并衰减向后传播的声能;匹配层由低衰减高温热固性树脂制成,作用是优化向前传播的声能;用于在钠中

润湿的前层由弹性体制成;电缆为定制全氟烷氧基同轴电缆;K型热电偶用于监测换能器的内部温度。

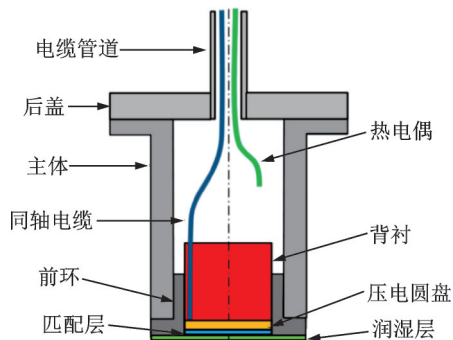


图4 液钠检测超声换能器示意图

Fig.4 Schematic diagram of ultrasonore pour sous sodium transducer

Cegla等^[21]研制了一套高温持续监测裂纹的实验系统,使用波导阵列在待测工件表面激发剪切水平波。波导杆由导热性差的不锈钢制成,可以承受较大的温度梯度。波导杆的一端使用传统的压电换能器来激励超声波,另一端与600℃高温环境中的待监测部件相接触。使用矩形横截面的细长波导杆能够在短距离内保持较大的温度梯度,可实现高温管道长期在线监测^[22]。

接触式压电超声已经成功应用于多种高温检测场合,但压电超声并不能做到与被测试样分离,这会导致检测时探头移动困难,存在贴合不紧密造成超声波能量损失,故对于异形构件或者弯曲复杂界面,需要设计专用探头或工装。

3 高温空气耦合超声技术发展与应用

空气耦合超声以空气为耦合介质,与常规的压电超声技术相比,其在声学传播特性等方面没有本质区别^[23]。常用的空气耦合超声检测方法有穿透法、回波法、同侧法、异侧非同轴和异侧同轴等^[24]。图5为穿透式空气耦合超声检测原理图。

空气耦合超声由于空气介质与超声换能材料之间的声阻抗严重不匹配,将导致接收到的超声波信号幅值低和信噪比差^[25]。空气耦合超声针对航空航天用特种复合材料具有较大的应用前景^[26]。另外,空气耦合超声也适用于高温检测、原位检测和耦合剂难以清理的场合。Lionetto等^[27]采用空气耦合超声监测热固性树脂的固化状态。陈亚男^[28]使用空气耦合超声在20~300℃条件下对单晶硅和304不锈钢等截面矩形微悬臂梁进行模式测试。

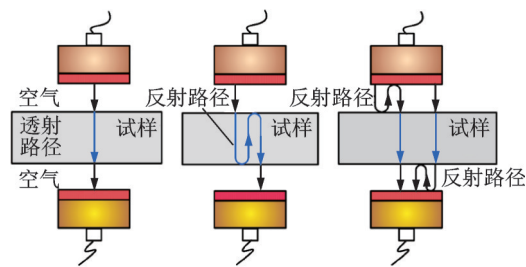


图5 穿透式空气耦合超声检测原理图

Fig.5 Schematic diagram of transmitted air-coupled ultrasonic testing

4 高温激光超声技术发展与应用

激光超声技术作为一种完全非接触式无损检测技术,可以在高温、高压、辐射等环境中对复杂结构件进行无损检测与监测^[29]。激光超声技术兼具光学与超声检测的优势,具有无损、非接触、宽频带、高精度及高效率等特点,可获取材料和构件的力学性能参数与损伤缺陷等信息^[30]。激光器由于激发出的激光能量在空气中衰减很小,因此在远距离高温检测方面具有很大优势^[31]。

目前,学者们使用激光超声实现了对高温试样的缺陷检测^[32]、厚度测量^[33]、残余应力测试^[34]、弹性模量和剪切模量测定^[35-36]等,可用于测定高达1000℃耐火材料的弹性模量和泊松比,也可用于评估耐火材料的损伤^[37],还可使用激光和氮化铝压电传感器在高温(约800℃)下定位缺陷^[38]。Kruger等^[39]采用图6所示的激光超声检测装置实现了1250℃下钢铁厚度测量。

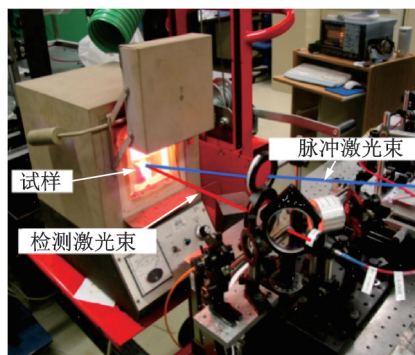


图6 激光超声检测装置

Fig.6 Laser ultrasonic testing device

Fuse等^[40]使用激光超声测量冷钢和热钢厚度,测量精度分别在2%和4%以内,并在热轧生产线上安装了测试系统,对测量精度、安全对策和耐高温、耐灰尘等方面进行验证。图7为激光激发的超声波在热钢中的传播示意图。

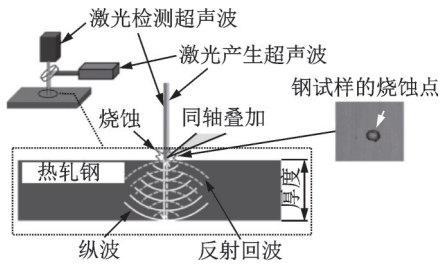


图7 激光激发的超声波在热钢中的传播示意图

Fig.7 Schematic diagram of laser-induced ultrasound propagation in hot steel

Yang等^[41]开发了用于核电站管道监测的抗高温、抗辐射的激光超声系统,对暴露在 $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 125 kGy 辐射剂量的不锈钢管进行测试。Lee等^[42]开发了一种光纤引导激光超声系统和无基线损伤检测方法,实现了核电站高温环境下管道结构健康监测。Kosugi等^[43]提出使用激光超声方法来监测厚壁空心圆柱体的温度分布。Croxford等^[44]研究了高温环境中激光产生的超声波形,认为温度对波形的影响显著。

激光超声不用考虑接触式超声检测方法中耦合剂耐热性能差、声能衰减等问题,具有高温应用前景。然而,脉冲激光器和激光干涉仪价格昂贵,且高温时试样表面的涂层、污渍、氧化层和振动状态等会影响超声波的激发与接收。

5 高温电磁超声技术发展与应用

电磁超声作为非接触式超声检测技术因其设备简单、成本低廉、激励波形多样、对试样表面形貌要求较低等优点^[45]备受青睐。电磁超声换能器(electromagnetic acoustic transducer, 简称EMAT)通常由提供偏置磁场的永磁体或脉冲电磁铁、激励/接收超声波的线圈和待测金属试样3部分组成。

采用不同的线圈与永磁体配置形式的EMAT可以激励多种模式超声波^[46]。未来,EMAT发展趋势主要为:与相控阵算法相结合形成相控阵EMAT,实现声束的聚焦与偏转^[47];与激光超声相结合,形成激光-电磁超声技术^[48];与涡流检测技术结合形成电磁-涡流声换能器;与漏磁检测技术结合,同时实现表面缺陷和内部缺陷检测;适用于狭小检测区域的小型EMAT^[49]。

5.1 高温永磁体式EMAT

EMAT应用于高温检测的关键在于避免永磁体在高温下的退磁和消磁^[50],可采用耐高温线圈和

永磁体,或采用冷却方法使永磁体和线圈保持较低温度以达到高温检测的目的。

Lunn等^[51]设计了一款高温EMAT,采用高剩余磁感应强度、高居里点的永磁体,可在较高温度下抵抗永久消磁,虽然在高温时表现出较小的磁感应强度,但实验获取的超声回波仍具有较高的幅值。螺旋线圈封装在陶瓷层之间,永磁体下方的铜箔可以避免在永磁体内产生超声波。使用陶瓷作为内部绝缘材料的同轴电缆可以承受高温,将EMAT探头连接到仪器设备。对不耐高温的线圈和永磁体进行冷却是实现高温EMAT检测的重要解决方案。Kogita等^[52]开发了一对水冷式EMAT,示意图如图8所示,能够实现在 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高温条件下激发和接收水平剪切(shear horizontal, 简称SH)导波。

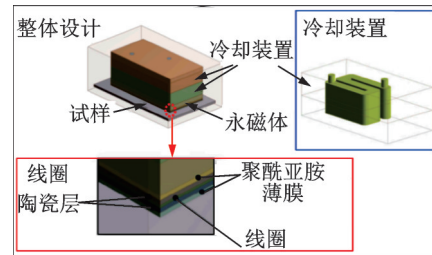


图8 水冷式EMAT示意图

Fig.8 High-temperature EMAT model

国内针对EMAT的研究始于1988年。郭建^[53]设计了可用于冶金行业中热轧钢板测厚的高温EMAT检测样机。在EMAT底部加装了简易隔热材料,并在EMAT内部设置了水循环冷却通道,可对 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的热轧钢板进行厚度测量。水循环冷却式EMAT结构示意图如图9所示。EMAT外壳采用黄铜,探头底部放置刚玉片,刚玉片上方为单层螺旋线圈,线圈上方安装有中心带通孔的圆柱型钕铁硼永磁体,分别设置了进/出水口,用于对探头外壳以及内部线圈和永磁体冷却。石文泽等^[54]针对高温严

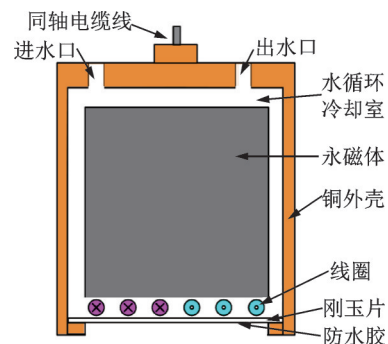


图9 水循环冷却式EMAT结构示意图

Fig.9 Schematic diagram of water-cooled EMAT structure

苛条件下铸锻件内部温度场非接触测量困难的问题,对直入射横波的三角形追踪数学模型进行验证,研究了声束入射角、温度梯度对斜入射横波的传播路径和渡越时间的影响,比较了不同入射角的斜入射横波的温度灵敏度系数。

国内学者通过引入脉冲压缩技术等先进降噪算法,用于解决高温 EMAT 检测回波信噪比和空间分辨率差、检测速度慢等问题。程进杰等^[55]以表面粗糙、晶粒粗大的 190 mm 厚连铸坯为检测对象,开发了水循环式高温 EMAT 探头,在 750 °C 高温下,采用脉冲压缩技术后,与音爆激励相比,检测回波信噪比至少提高了 7.0 dB。He 等^[56]设计了一种斜入射垂直剪切 (shear vertical, 简称 SV) 波 EMAT,并引入巴克码脉冲压缩技术。当待测铝合金试样温度为 500 °C 时,与 16 次同步平均的音爆激励相比,通过巴克码脉冲压缩技术获得的裂纹反射波的信噪比可提高 9.2 dB。

5.2 高温脉冲电磁铁式 EMAT

由于高温永磁体和线圈的 EMAT 换能效率较低、水冷式 EMAT 的水冷系统不方便携带、永磁体式 EMAT 易吸附铁磁性颗粒导致换能效率降低等问题,部分学者提出脉冲电磁铁式 EMAT,通过增加励磁电流提高偏置磁场强度,极大程度地提高换能效率。

张晓辉^[57]设计了空心螺线管结构的脉冲电磁铁式 EMAT,具有工作频率高、磁场强度大等特点,可对铝合金板材进行测厚。Hernandez-Valle 等^[58-59]使用能够承受高温的脉冲电磁铁和陶瓷封装线圈制作 EMAT,可在 250 °C 的温度下对低碳钢试样进行检测。李伟等^[60]搭建了面向高温的脉冲电磁铁式 EMAT 检测系统,证明了优化后脉冲电磁铁式 EMAT 优于永磁体式 EMAT,可实现高温下材料内部缺陷检测及管道厚度测量。

5.3 高温仅线圈式 EMAT

为了进一步解决永磁体式 and 脉冲电磁铁式 EMAT 耐高温持续检测能力有限、易吸附铁磁性颗粒导致换能效率降低、探头体积大难于检测狭小区域等问题,学者们研究仅线圈式 EMAT 配置形式。仅线圈式 EMAT 分单线圈和双线圈 2 种,其在高温持续无损检测及监测方面应用潜力巨大。

Rueter^[61-62]在 EMAT 线圈中通入幅值为 500 A 的高频脉冲大电流,产生峰值达 2 T 脉冲磁场,可激发

频率为 2 MHz 的超声波。Rieger 等^[63-64]根据仅线圈式 EMAT 不需要永磁体、结构简单、体积小和扩展性强的特点,设计了小型单层密集排列的仅线圈式相控阵 EMAT。图 10 为仅线圈式相控阵 EMAT 示意图。EMAT 由 2 个跑道线圈组成。激励超声波采用幅值为 1 kA,持续时间为 100 μs 的类直流,叠加成幅值为 1 kV、频率为 1 MHz 的短脉冲串形成放电电流。超声波接收过程中的偏置磁场由类直流提供。

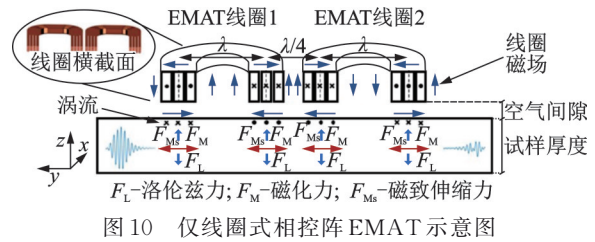


图 10 仅线圈式相控阵 EMAT 示意图

Fig.10 Schematic diagram of coil-only phased array EMAT

Liu 等^[65]提出了一种基于新型柔性纯线圈的导波 EMAT。EMAT 由 2 个平面柔性线圈组成:1 个跑道线圈和 1 个不规则曲折线圈,可以直接包裹不同直径和表面状态的管道进行检测。何健鹏等^[66]提出一种线圈自激励 EMAT 模型,大大降低了换能器质量。Xie 等^[67]提出了具有仅线圈配置的电超声检测系统,用于小型非铁磁管道检测。Zhai 等^[68]采用了双线圈 EMAT 对 450 °C 试样进行检测。图 11 为双线圈 EMAT 原理图。双线圈 EMAT 由励磁线圈和涡流线圈组成,励磁线圈和涡流线圈是同轴的螺旋线圈。低频长脉冲电流为 100 Hz 的半正弦脉冲电流,馈送到励磁线圈,可产生准静态偏置磁场。射频脉冲电流即馈送到涡流线圈,可以在样品表面的趋肤深度内感应出交变涡流。通过调整励磁线圈和 EMAT 涡流线圈之间的配置关系,激发剪切波、纵波和剪切纵波。耐高温双线圈 EMAT 可以获取 450 °C 高温不锈钢试件中多次超声回波信号。

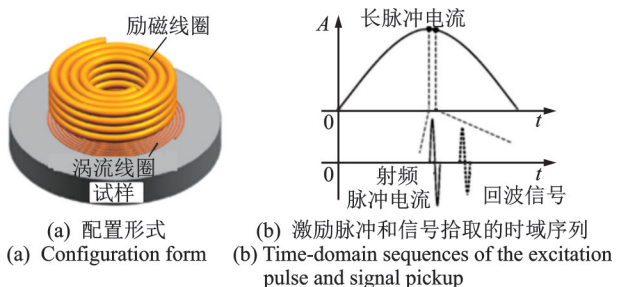


图 11 双线圈 EMAT 原理图

Fig.11 Schematic diagram of double-coil EMAT

石文泽等^[69]围绕高温电磁超声检测技术展开了深入的研究,突破了800℃高温持续电磁超声传感技术难题,研制了仅线圈式电磁超声检测仪器样机,摒弃永磁体和脉冲电磁铁,单个线圈实现了超声波的激励和接收。仅线圈式EMAT检测系统如图12所示。

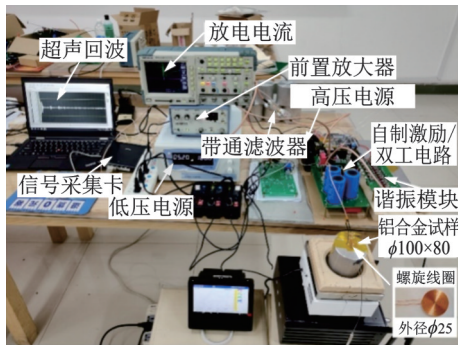


图12 仅线圈式EMAT检测系统

Fig.12 Coil-only EMAT detection system

6 激光电磁超声技术发展与应用

近年来,激光超声与电磁超声结合的激光电磁超声换能器(laser electromagnetic acoustic transducer, 简称Laser-EMAT)技术应用越来越广泛。与激光超声技术相比,Laser-EMAT避免采用价格昂贵的激光干涉超声波接收仪,采用EMAT接收超声波,具有较高的检测灵敏度。与电磁超声技术相比,激光超声可以同时产生横波、纵波和表面波,实现试件表面缺陷和内部缺陷的同时检测,且在高温试样中可实现稳定的超声波激励。

目前,Laser-EMAT应用于常温焊缝检测,其在高温检测应用方面优势更明显^[70]。国外学者已将Laser-EMAT应用于高衰减的粗钢坯无损检测,研制了水冷式EMAT,可检出钢坯内部缺陷^[71]。图13为Burrows等^[72]研制的脉冲反射式Laser-EMAT示意图,激光通过EMAT中心圆孔照射在试样表面激励超声波,可用于900℃不锈钢和铁磁性低碳钢试样上的厚度测量。Baillie等^[73]研制了700℃钢坯表面缺陷的Laser-EMAT自动扫描检测系统。

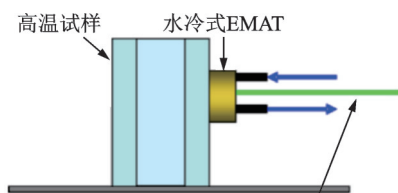


图13 脉冲反射式Laser-EMAT示意图

Fig.13 Schematic diagram of laser-EMAT with pulse-echo mode

国内,Laser-EMAT技术已经应用于连铸坯表面裂纹^[74]和金属试样内裂纹的检测^[75],并研制了用于缺陷检测的高温Laser-EMAT^[76]。Tong等^[77]将表面水膜冷却技术用于100~800℃高温碳钢Laser-EMAT检测,图14为高温铸锻件Laser-EMAT检测系统。采用表面水膜冷却技术可以改善磁致伸缩和洛伦兹力对EMAT接收超声波的贡献比例,极大地提高了超声回波信噪比和最高检测温度。He等^[78]将表面约束机制用于高温铝合金试样表面裂纹的Laser-EMAT检测,在常温和430℃高温铝合金中应用表面约束机制,将表面波幅值提高1.43倍。



图14 高温铸锻件Laser-EMAT检测系统

Fig.14 Laser EMAT inspection system for high temperature castings and forgings

7 高温声学检测技术的机遇和挑战

1) 在压电超声方面,如何设计压电材料组分和制备工艺,提高高温环境中压电材料的压电换能系数和特定超声模式纯度是亟待解决的关键问题,同时设计导热速率慢的波导杆、耐高温时间久的耦合剂也是急需解决的技术难题。

2) 在高温电磁超声方面,温度对含紧固型氧化皮的铁磁性碳钢材料的电磁超声换能机理的影响机制上尚不清晰,导致超声回波的信噪比受温度和待测铁磁性金属的铁磁学特性和磁致伸缩特性影响显著,造成缺陷定量困难,因此如何研究温度对磁致伸缩效应和洛伦兹力对超声波激励和接收的贡献比例是重要的理论难题;如何建立高温铁磁性金属材料的缺陷定量/定位方法是关键技术难题。

3) 在高温激光超声方面,热弹机制、热烧蚀机制和表面约束机制均可以用于激发超声波,但是在高温环境中,脉冲激光源产生的热量与待测金属本体温度相互叠加是否超过金属材料的烧蚀阈值有必要进一步通过实验和仿真进一步进行验证,这也是急需解决的关键理论难题。

4) 高温声学检测技术作为无损检测的重要分支,在钢铁制造业、特种设备和航空航天等领域发挥

不可替代的重要作用。未来,国内外科研院将会围绕着极端高温条件下电-磁-光-声传感机理与调控方法、超高温金属材料中弹性波传播与散射的理论与方法、高温声学检测评价与表征模型、传感器开发及仪器研制等方面展开了深入探索和研究,为高温声学检测技术提供理论基础和技术指导。高温声学技术在未来几十年内将逐步发展成熟,在提高工业生产成品率、维护工业安全生产、保障工业生产稳定运行、降低工业维修成本等方面起到了越来越重要的作用,但如何从实验室迈向成熟的工程应用是无损检测行业所面临的主要挑战和机遇。

参 考 文 献

- [1] STÜWE I, ZACHERL L, GROSSE C U. Ultrasonic and impact-echo testing for the detection of scaling in geothermal pipelines [J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2023, 42(1): 18.
- [2] CHEONG Y M, KIM K M, KIM D J, et al. High-temperature ultrasonic thickness monitoring for pipe thinning in a flow-accelerated corrosion proof test facility [J]. *Nuclear Engineering and Technology*, 2017, 49(7): 1463-1471.
- [3] 孙睿毓,李艳明,李青,等.某航空发动机高压涡轮导向叶片高温失效分析[J].*风机技术*, 2023, 65(1): 87-91.
SUN Ruiyu, LI Yanming, LI Qing, et al. Study on the high temperature failure mechanism of aero-engine high pressure turbine guide blade[J]. *Chinese Journal of Turbomachinery*, 2023, 65(1): 87-91. (in Chinese)
- [4] 张部声,祝济之,史剑,等.某型钛铝合金航空发动机叶片高温高周振动疲劳实验[J].*航空动力学报*, 2020, 35(6): 1169-1175.
ZHANG Busheng, ZHU Jizhi, SHI Jian, et al. Test of vibration fatigue for the TiAl alloy aeroengine blade at high temperature and high cycle [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2020, 35(6): 1169-1175. (in Chinese)
- [5] NAMKUNG M, WINCHESKI B. NDT in the aircraft and space industries[M]. Amsterdam: Elsevier, 2001: 5971-5973.
- [6] 杨琛.超声检测技术研究进展[J].*流体测量与控制*, 2022, 3(3): 8-10.
YANG Chen. Review on research progress of ultrasonic testing technology [J]. *Fluid Measurement & Control*, 2022, 3(3): 8-10. (in Chinese)
- [7] 罗雄彪,陈铁群.超声无损检测的发展趋势[J].*无损探伤*, 2004, 28(3): 1-5.
LUO Xiongbiao, CHEN Tiequn. Development trends of ultrasonic testing [J]. *Nondestructive Testing Technology*, 2004, 28(3): 1-5. (in Chinese)
- [8] 董方旭,周鑫翊,刘发付,等.压电空气耦合超声换能器制备优化及实验验证[J].*压电与声光*, 2022, 44(4): 552-556.
DONG Fangxu, ZHOU Xinyi, LIU Fafu, et al. Preparation optimization and experimental verification of piezoelectric air-coupled ultrasonic transducer [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2022, 44(4): 552-556. (in Chinese)
- [9] 曾伟,杨先明,王海涛,等.激光超声技术及其应用[J].*无损检测*, 2013, 35(12): 49-52.
ZENG Wei, YANG Xianming, WANG Haitao, et al. Laser ultrasonic technology and its applications [J]. *Nondestructive Testing*, 2013, 35(12): 49-52. (in Chinese)
- [10] 王淑娟,康磊,赵再新,等.电磁超声换能器的研究进展综述[J].*仪表技术与传感器*, 2006(5): 47-50.
WANG Shujuan, KANG Lei, ZHAO Zaixin, et al. Overview of research advances in electromagnetic acoustic transducer [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2006(5): 47-50. (in Chinese)
- [11] TITTMANN B R, BATISTA C F G, TRIVEDI Y P, et al. State-of-the-art and practical guide to ultrasonic transducers for harsh environments including temperatures above 2 120 °F (1 000 °C) and neutron flux above 1 013 n/cm²[J]. *Sensors*, 2019, 19(21): 4755.
- [12] BABA A, SEARFASS C T, TITTMANN B R. High temperature ultrasonic transducer up to 1 000 °C using lithium niobate single crystal [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 97(23): 232901.
- [13] 陈丽洁,徐兴烨,雷亚辉,等.新型氮化铝 AlN 晶体高温压电振动传感器[J].*中国电子科学研究院学报*, 2020, 15(12): 1212-1218.
CHEN Lijie, XU Xingye, LEI Yahui, et al. A novel piezoelectric vibration sensor with aluminum nitride crystal at high temperature [J]. *Journal of China Academy of Electronics and Information Technology*, 2020, 15(12): 1212-1218. (in Chinese)
- [14] PARKS D A, TITTMANN B R, KROPF M M. Aluminum nitride as a high temperature transducer [J]. *AIP Conference Proceedings*, 2010, 1211(1): 1029-1034.
- [15] 王胜利,李全禄,赵亚,等.钛酸铋钠无铅压电陶瓷的研究进展[J].*应用声学*, 2011, 30(2): 153-160.
WANG Shengli, LI Quanlu, ZHAO Ya, et al. Research progress in sodium bismuth titanate lead-free piezoelectric ceramics [J]. *Journal of Applied Acoustics*, 2011, 30(2): 153-160. (in Chinese)

- [16] BARROW D A, PETROFF T E, SAYER M. Technology C. Thick ceramic coatings using a sol gel based ceramic-ceramic 0-3 composite [J]. *Surface and Coatings Technology*, 1995(76/77): 113-118.
- [17] BARROW D A, PETROFF T E, TANDON R P, et al. Characterization of thick lead zirconate titanate films fabricated using a new sol gel based process [J]. *Journal of Applied Physics*, 1997, 81(2): 876-881.
- [18] BHADWAL N, TORABI MILANI M, COYLE T, et al. Dry coupling of ultrasonic transducer components for high temperature applications [J]. *Sensors*, 2019, 19(24): 5383.
- [19] KIM G, CHOIN K, KIM Y I, et al. Pb(Mg₁/3Nb₂/3)-PbTiO₃-based ultrasonic transducer for detecting infiltrated water in pressurized water reactor fuel rods [J]. *Sensors*, 2019, 19(12): 2662.
- [20] SAILLANT J F, MARLIER R, NAVACCHIA F, et al. Ultrasonic transducer for non-destructive testing of structures immersed in liquid sodium at 200°C [J]. *Sensors*, 2019, 19(19): 4156.
- [21] CEGLA F B, JARVIS A J C, DAVIES J O. High temperature ultrasonic crack monitoring using SH waves [J]. *NDT & E International*, 2011, 44(8): 669-679.
- [22] SONG J H, GUO D H, JIA J H, et al. A new on-line ultrasonic thickness monitoring system for high temperature pipes [J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2022, 199: 104691.
- [23] CHIMENTI D E. Review of air-coupled ultrasonic materials characterization [J]. *Ultrasonics*, 2014, 54(7): 1804-1816.
- [24] 常俊杰, 罗文斌, 陈志恒, 等. 基于空气耦合超声对泡沫材料探伤的应用研究 [J]. *传感技术学报*, 2020, 33(11): 1655-1660.
CHANG Junjie, LUO Wenbin, CHEN Zhiheng, et al. Research on the application of air-coupled ultrasound in the flaw detection of foam materials [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2020, 33(11): 1655-1660. (in Chinese)
- [25] 周正干, 魏东, 向上. 空气耦合超声检测中衰减因素的研究 [J]. *中国机械工程*, 2010, 21(19): 2350-2354.
ZHOU Zhenggan, WEI Dong, XIANG Shang. Research on attenuation factor of air-coupled ultrasonic testing [J]. *China Mechanical Engineering*, 2010, 21(19): 2350-2354. (in Chinese)
- [26] JOAS S, ESSIG W, FRÖHLICH F, et al. CFRP pipe inspection by means of air-coupled ultrasound [J]. *AIP Conference Proceedings*, 2019, 2055(1): 120003.
- [27] LIONETTO F, TARZIA A, MAFFEZZOLI A. Air-coupled ultrasound: a novel technique for monitoring the curing of thermosetting matrices [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2007, 54(7): 1437-1444.
- [28] 陈亚男. 基于空耦超声激励的MEMS微结构模态测试方法研究 [D]. 锦州: 渤海大学, 2021.
- [29] 卢明辉, 丁雷, 颜学俊, 等. 激光超声技术在工业检测中的应用与展望 [J]. *振动、测试与诊断*, 2021, 41(4): 631-643.
LU Minghui, DING Lei, YAN Xuejun, et al. Application and prospect of laser ultrasonic nondestructive testing technology in advanced manufacturing [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2021, 41(4): 631-643. (in Chinese)
- [30] 侯伟光. 材料高温力学性能激光超声检测理论与试验研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2022.
- [31] 李苏原. 激光超声非接触式高温金属厚度检测技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
- [32] GUO R P, WANG H T, ZHANG J Y. Non-contact detection of low carbon steel using laser generated ultrasound at high temperature [J]. *Optik*, 2017, 136: 536-542.
- [33] YE H C H, JEYAPRAKASH N, YANG C H. Non-destructive characterization of elastic properties on steel plate using laser ultrasound technique under high-temperature atmosphere [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 108(1): 129-141.
- [34] 潘宗星, 宋俊凯, 高玉魁. 基于激光超声的GH4169高温合金残余应力检测 [J]. *力学季刊*, 2021, 42(1): 98-107.
PAN Zongxing, SONG Junkai, GAO Yukui. Residual stress measurement of GH4169 superalloy based on laser ultrasonic method [J]. *Chinese Quarterly of Mechanics*, 2021, 42(1): 98-107. (in Chinese)
- [35] HURLEY D H, REESE S J, KENNEDY R, et al. Characterization of high temperature mechanical properties using laser ultrasound [J]. *AIP Conference Proceedings*, 2012, 1464(1): 497-503.
- [36] YE H C H, JEYAPRAKASH N, YANG C H. Temperature dependent elastic modulus of HVOF sprayed Ni-5%Al on 304 stainless steel using nondestructive laser ultrasound technique [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2020, 385: 125404.
- [37] KLOSE J, ESCH S, KOHNS P, et al. Assessment of the intrinsic damage to refractory materials at high temperatures using the laser ultrasonic pulse method [J]. *Open Ceramics*, 2022, 9: 100221.
- [38] KIM T, KIM J, JIANG X N. AlN ultrasound sensor for photoacoustic lamb wave detection in a high-temperature environment [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*,

- 2018, 65(8): 1444-1451.
- [39] KRUGER S E, LORD M, MONCHALIN J P. Laser ultrasonic thickness measurements of very thick walls at high temperatures [J]. AIP Conference Proceedings, 2006, 820(1): 240-247.
- [40] FUSE N, KANESHIGE K, WATANABE H. Development of thickness measurement system for hot steel with laser-ultrasonic wave technology [J]. Materials Transactions, 2014, 55(7): 1011-1016.
- [41] YANG J, LEE H, LIM H J, et al. Development of a fiber-guided laser ultrasonic system resilient to high temperature and gamma radiation for nuclear power plant pipe monitoring [J]. Measurement Science and Technology, 2013, 24(8): 085003.
- [42] LEE H, YANG J, SOHN H. Baseline-free pipeline monitoring using optical fiber-guided laser ultrasonics [J]. Structural Health Monitoring, 2012, 11(6): 684-695.
- [43] KOSUGIA, ONO Y, MATSUYA I, et al. Application of laser ultrasound to noncontact temperature profiling of a heated hollow cylinder [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2014, 520(1): 012015.
- [44] CROXFORD A J, MOLL J, WILCOX P D, et al. Efficient temperature compensation strategies for guided wave structural health monitoring [J]. Ultrasonics, 2010, 50(4/5): 517-528.
- [45] MIRKHANI K, CHAGGARES C, MASTERSON C, et al. Optimal design of EMAT transmitters [J]. NDT & E International, 2004, 37(3): 181-193.
- [46] THRING C B, HILL S J, DIXON S, et al. The effect of EMAT coil geometry on the Rayleigh wave frequency behaviour [J]. Ultrasonics, 2019, 99: 105945.
- [47] PARRA-RAAD J, CEGLA F. On the steerability of phased array EMATs: the dipole element [J]. NDT & E International, 2022, 125: 102563.
- [48] SHI W Z, TONG Y S, LU C, et al. Improving laser-EMAT ultrasonic energy conversion efficiency using surface constraint mechanism [J]. Ultrasonics, 2022, 124: 106729.
- [49] TRUSHKEVYCH O, EDWARDS R S. Characterisation of small defects using miniaturised EMAT system [J]. NDT & E International, 2019, 107: 102140.
- [50] XIA W, ZHANG T L, LIU J H, et al. Influence of the final heat treatment temperature on the magnetic property losses of Sm(Co, Fe, Cu, Zr) high temperature magnets [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2021, 528: 167763.
- [51] LUNN N, DIXON S, POTTER M D G. High temperature EMAT design for scanning or fixed point operation on magnetite coated steel [J]. NDT & E International, 2017, 89: 74-80.
- [52] KOGIA M, GAN T H, BALACHANDRAN W, et al. High temperature shear horizontal electromagnetic acoustic transducer for guided wave inspection [J]. Sensors, 2016, 16(4): 582.
- [53] 郭建. 用于高温钢探伤的新型电磁超声测量技术 [J]. 试验技术与试验机, 1989(5): 42-46.
GUO Jian. A new electromagnetic ultrasonic measurement technology for high temperature steel flaw detection [J]. Test Technology and Testing Machine, 1989(5): 42-46. (in Chinese)
- [54] 石文泽, 童艳山, 卢超, 等. 高温铸锻件内部温度场电磁超声重构方法研究 [J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(8): 218-229.
SHI Wenze, TONG Yanshan, LU Chao, et al. An electromagnetic ultrasonic reconstruction method for internal temperature field of high temperature casting and forging [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(8): 218-229. (in Chinese)
- [55] 程进杰, 石文泽, 卢超, 等. 脉冲压缩技术在高温连铸电磁超声测厚应用研究 [J]. 机械工程学报, 2023, 59(8): 20-31.
CHENG Jinjie, SHI Wenze, LU Chao, et al. Application of pulse compression technology in electromagnetic ultrasonic thickness measurement of high-temperature continuous casting [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(8): 20-31. (in Chinese)
- [56] HE M, SHI W Z, LU C, et al. Application of pulse compression technique in high-temperature carbon steel forgings crack detection with angled SV-wave EMATs [J]. Sensors, 2023, 23(5): 2685.
- [57] 张晓辉. 用于电磁超声测厚的脉冲电磁铁研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [58] HERNANDEZ-VALLE F, DIXON S. Pulsed electromagnet EMAT for ultrasonic measurements at elevated temperatures [J]. Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2011, 53(2): 96-99.
- [59] HERNANDEZ-VALLE F, DIXON S. Initial tests for designing a high temperature EMAT with pulsed electromagnet [J]. NDT & E International, 2010, 43(2): 171-175.
- [60] 李伟, 吴运新, 龚海, 等. 面向高温的 PE-EMAT 无损检测系统有限元分析与优化 [J]. 传感器与微系统, 2019, 38(1): 7-11.
LI Wei, WU Yunxin, GONG Hai, et al. Finite element analysis and optimization of PE-EMAT nondestructive testing system for high temperature [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2019, 38(1): 7-11. (in Chinese)
- [61] RUETER D. Experimental demonstration and circuitry for a very compact coil-only pulse echo EMAT [J].

- Sensors, 2017, 17(4): 926.
- [62] RUETER D. Induction coil as a non-contacting ultrasound transmitter and detector: modeling of magnetic fields for improving the performance [J]. Ultrasonics, 2016, 65: 200-210.
- [63] RIEGER K, ERNI D, RUETER D. Noncontact reception of ultrasound from soft magnetic mild steel with zero applied bias field EMATs [J]. NDT & E International, 2022, 125: 102569.
- [64] RIEGER K, ERNI D, RUETER D. Unidirectional emission and detection of Lamb waves based on a powerful and compact coils-only EMAT [J]. NDT & E International, 2021, 122: 102492.
- [65] LIU T H, PEI C X, CAI R, et al. A flexible and noncontact guided-wave transducer based on coils-only EMAT for pipe inspection [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2020, 314: 112213.
- [66] 何健鹏, 徐科, 任威平. 线圈自激励电磁超声换能器设计及特性研究 [J]. 机械工程学报, 2017, 53(16): 134-140.
HE Jianpeng, XU Ke, REN Weiping. EMAT design of self-excitation with coils and its characteristics study [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(16): 134-140. (in Chinese)
- [67] XIE C X, LIU T H, PEI C X, et al. A new longitudinal mode guided-wave EMAT with periodic pulsed electromagnets for non-ferromagnetic pipe [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2021, 331: 112991.
- [68] ZHAI G F, LIANG B, LI X, et al. High-temperature EMAT with double-coil configuration generates shear and longitudinal wave modes in paramagnetic steel [J]. NDT & E International, 2022, 125: 102572.
- [69] 石文泽, 邵纬桑, 卢超, 等. 高温铸锻件仅线圈式电磁超声相控阵检测装置及方法: 中国, CN202211119240.4 [P]. 2022-12-13.
- [70] DIXON S, EDWARDS C, PALMER S B. A laser-EMAT system for ultrasonic weld inspection [J]. Ultrasonics, 1999, 37(4): 273-281.
- [71] JIAN X, BAILLIE I, DIXON S. Steel billet inspection using laser-EMAT system [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2007, 40(5): 1501.
- [72] BURROWS S E, FAN Y, DIXON S. High temperature thickness measurements of stainless steel and low carbon steel using electromagnetic acoustic transducers [J]. NDT & E International, 2014, 68: 73-77.
- [73] BAILLIE I, GRIFFITH P, JIAN X, et al. Implementing an ultrasonic inspection system to find surface and internal defects in hot, moving steel using EMATs [J]. Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2007, 49(2): 87-92.
- [74] ZHAO Y, LIU S, GUO R, et al. Hybrid laser-EMAT system for non-destructive testing continuous casting billet [J]. Chinese Optics Letters, 2013, 11(supp2): S21103.
- [75] 毛赢, 裴翠祥. 基于激光电磁超声的裂纹检测研究 [J]. 中国机械工程, 2014, 25(10): 1337-1340.
MAO Ying, PEI Cuixiang. Inspection of cracks with a laser-ultrasound/EMAT system [J]. China Mechanical Engineering, 2014, 25(10): 1337-1340. (in Chinese)
- [76] 宋江峰, 赵扬, 马健, 等. 应用于激光-EMAT高温探伤的换能器 [J]. 仪表技术与传感器, 2014(10): 25-27.
SONG Jiangfeng, ZHAO Yang, MA Jian, et al. Design of transducers for laser-EMAT high-temperature flaw detection [J]. Instrument Technique and Sensor, 2014(10): 25-27. (in Chinese)
- [77] TONG Y S, SHI W Z, HUANG L, et al. Analysis of influencing factors on the conversion efficiency of laser-EMAT ultrasound detection with high-temperature carbon steel forgings [J]. Journal of Testing and Evaluation, 2023, 51(5): 20220225.
- [78] HE P, SHI W Z, LU C, et al. Optimisation of rayleigh wave laser-EMAT with the application of surface constraint mechanism [J/OL]. Nondestructive Testing and Evaluation: 1-35. <https://doi.org/10.1080/10589759.2023.2177290>.



第一作者简介:卢超,男,1971年10月生,博士、教授。江西省优秀研究生导师、江西省新世纪百万人才工程人选、江西省主要学科学术与技术带头人、“航空发动机制造工程无损检测新技术”江西省优势科技创新团队带头人。现受聘担任中国机械工程学会无损检测分会副主任委员、全国无损检测学会副理事长、中国航空学会无损检测专委会副主任委员,国家重大科学仪器设备开发专项技术专家。主要研究方向为超声检测及仪器。曾发表《Improving laser-EMAT ultrasonic energy conversion efficiency using surface constraint mechanism》(《Ultrasonics》2022, Vol.128)等论文。

通信作者简介:石文泽,男,1986年12月生,博士、副教授。主要研究方向为超声检测技术。

E-mail: 70658@nchu.edu.cn