

无损检测新技术能力实验室认可现状与展望

刘丽东¹,钱承¹,倪培君²,潘锋¹,郭淼¹

(1. 中国合格评定国家认可中心,北京 100062;2. 中国兵器科学研究院宁波分院,宁波 315103)

摘要: 简要分析了我国无损检测新技术能力实验室的认可需求,介绍了国内外无损检测领域实验室的认可现状,指出了中国合格评定国家认可委员会(CNAS)在无损检测新技术能力认可工作中面临的主要问题,提出了一些改进措施,并对无损检测新技术能力认可工作进行了展望。

关键词: 实验室认可;无损检测;新技术;现状;展望

中图分类号: TG115.28 文献标志码: A 文章编号:1000-6656(2021)09-0039-06

Current situation and prospect of laboratory accreditation for nondestructive testing new technology competence

LIU Lidong¹, QIAN Cheng¹, NI Peijun², PAN Feng¹, GUO Miao¹

(1. China National Accreditation Service for Conformity Assessment, Beijing 100062, China;

2. The Ningbo Branch of Ordnance Science Institute of China, Ningbo 315103, China)

Abstract: A brief analysis is made on the laboratory accreditation demand for the competence of NDT new technology in China and the current situation of laboratory accreditation in the field of NDT at home and abroad is introduced. The main problems faced by CNAS in the accreditation of new technology competence in NDT are pointed out, the corresponding measures are proposed, and finally the accreditation of new technology competence in the field of NDT is prospected.

Key words: laboratory accreditation; nondestructive testing; new technology; current situation; prospect

实验室认可是由经过授权的认可机构对实验室的管理能力和技术能力按照约定的标准进行评价,并将评价结果向社会公告以正式承认其能力的活动。经过认可的实验室,其认可领域范围内的检测能力不仅被政府承认,其检测结果还广泛地被社会和贸易双方所使用。

无损检测作为一项保证产品质量与设备运行安全必不可少的重要技术,在各国航空、航天、军工、铁路、核电、冶金、特种设备、汽车制造、石油化工等领域得到了广泛应用。由于无损检测技术能力与检测人员的知识和经验、设备水平、检测方法和工艺、环境条件等紧密相关,而很多情况下检测结果往往决定了构件及产品能否使用,所以无损检测一直是国内外实

验室认可的重要领域,受到了普遍重视^[1-2]。

自 2002 年我国实行统一的实验室国家认可制度以来,中国合格评定国家认可委员会(CNAS)在无损检测领域实验室认可方面开展了卓有成效的工作,累计对超过 530 家有无损检测技术能力的检验检测机构进行了认可,提升了顾客对无损检测机构的信任度,也提高了无损检测机构的技术能力和管理水平。过去无损检测领域的认可主要侧重于常规无损检测方法,包括射线检测(RT)、超声检测(UT)、磁粉检测(MT)、渗透检测(PT)、涡流检测(ET)等。近年来,随着探测技术、计算机技术、信息科学等技术的发展,计算机层析成像(CT)、数字射线成像(DR)、计算机射线照相(CR),超声波衍射时差法(TOFD)、相控阵超声检测(PAUT)等数字化、图像化、智能化的无损检测新技术发展迅猛,并得到了广泛应用,一些非常规的无损检测方法如目视检测(VT)、声发射检测(AT)、漏磁检测(MFL)、泄漏检测(LT)、导波检测(GW)、红外检测(IT)、激光散

收稿日期:2021-07-20

基金项目:中国合格评定国家认可委员会科技项目(2019CNAS07)

作者简介:刘丽东(1962—),女,研究员,主要从事检验检测机构认可技术的研究工作

通信作者:刘丽东,liuld@cnas.org.cn

斑检测(H/S)、应力检测(ST)等也得到了新的发展和应用,这也对无损检测技术能力的认可工作提出了新的需求,而现有的实验室认可制度体系渐渐不能满足其要求,需要适时开展无损检测新技术能力认可研究,完善无损检测技术能力认可评价体系,促进无损检测领域的高质量发展。

1 无损检测新技术能力认可需求

我国是无损检测大国,全国共有无损检测人员30余万,无损检测专业机构约2000家,有无损检测队伍的制造及安装企业超20000家,现有无损检测国家标准200余项,每年和无损检测相关的仪器销售和技术服务总额超过100亿元^[3]。我国无损检测行业近年来的发展有以下几个显著特点。

(1) 应用领域越来越广泛,几乎涵盖了各主要工业部门。除了航空、航天、船舶、兵器、铁路、核电、冶金、石油化工、特种设备、汽车制造、矿山机械等领域外,在海底石油勘探和海洋石油平台、高速铁路、高速公路、特高压输电线路和变压器、核反应堆部件等诸多新领域也有良好的发展势头。

(2) 检测方法更加多样化,以适应不同材料、不同结构、不同部件的检测需求。除了RT、UT、MT、PT、ET等五大常规检测方法外,近年来CT、DR、CR、TOFD、PAUT等技术发展迅速并走向成熟,得到了广泛应用^[4-9]。AT、VT、MFL、LT、GW、IT、H/S、ST等非常规的检测方法也得到了大量应用,并逐步成为新的常规方法。

(3) 技术创新能力不断增强,无损检测技术取得显著进步。近年来,各种无损检测技术研究工作十分活跃,一批具有自主知识产权的新技术、新方法、新仪器不断问世,部分检测领域已经由“跟跑”状态上升为“并跑”甚至“领跑”状态。我国目前已经能自主开发从微焦点射线源到普通射线源再到15 MeV直线加速器的各类工业CT/DR系统;TOFD、PAUT等技术基本能实现自主保障,已经形成具有很强竞争力的生产基地。

为了提高市场竞争力,提升自身的技能力和管理水平,大量的无损检测机构及有无损检测能力的实验室纷纷按照标准ISO/IEC 17025:2017《检测和校准实验室能力认可准则》建立管理体系,申请CNAS认可。截止到2020年6月23日,国内已获CNAS认可的具备UT检测能力的实验室有530家,RT检测实验室有410家,MT检测实验室有398家,PT检测实验室有329家,ET检测实验室有82家。

近年来,随着我国经济和制造业的快速发展,数字化、图像化、智能化的无损检测新技术在工程领域的应用越来越多,工业CT、DR、CR、TOFD、PAUT等无损检测新技术实验室认可需求日益增长。一些非常规无损检测方法也在不断提出新的认可需求。据统计,目前已获CNAS认可的具备TOFD检测能力的实验室有51家,PAUT检测实验室有16家,工业CT检测实验室有11家,DR检测实验室有8家,CR检测实验室有3家,AT检测实验室有30家,MFL检测实验室有20家,IT检测实验室有2家。

与现有2000多家专业无损检测机构相比,我国无损检测领域实验室认可总数不到1/3,与有无损检测能力的20000多家制造企业相比,认可的数量不足1/30,无损检测领域认可需求潜力巨大。目前我国无损检测领域认可的主要技术能力还是常规检测能力,RT、UT、MT、PT占了主导地位,ET、TOFD、AT、MFL也有一定数量,PAUT、CT、DR、CR等技术才刚刚起步。随着无损检测新技术的研究和广泛应用,一些检测机构不断提出无损检测新技术的认可需求,无损检测新技术及非常规无损检测技术在无损检测认可领域中所占份额会越来越大。

无损检测新技术的研究和应用,也推动了无损检测人员资格鉴定与认证、设备校准核查、检测标准制定等工作的开展。2003年,我国在国际上率先开展了工业CT专业I、II、III级人员资格鉴定工作,已累计颁发工业CT检测人员资格证书900余张。近几年,在DR、CR、TOFD、PAUT等领域相继开展了II级人员资格鉴定工作。目前我国已经累计制定了50余项涉及工业CT、DR、CR、TOFD、PAUT等无损检测新技术的国家及行业标准,如标准GB/T 36232—2018《焊缝无损检测 电子束焊接接头工业计算机层析成像(CT)检测方法》、GB/T 35388—2017《无损检测 X射线数字成像检测 检测方法》、GB/T 26642—2011《无损检测 金属材料计算机射线照相检测方法》、GB/T 23902—2009《无损检测 超声检测 超声衍射声时技术检测和评价方法》、GB/T 32563—2016《无损检测 超声检测 相控阵超声检测方法》等。这些工作为无损检测领域新技术能力认可工作的开展奠定了基础。

2 国内外无损检测新技术能力认可现状

2.1 国外情况

从1947年世界上最早的从事实验室认可的专

业综合机构澳大利亚国家认可机构(NATA)成立至今,实验室认可已经历了74年的发展历程。目前国际上已有120多个国家建立了实验室认可体系,其中签署多边互认协议(MAR)的国家有102个。认可的实验室接近60 000家,认可的检验机构超过10 000家。

国外从事实验室认可的典型机构包括澳大利亚国家认可机构(NATA)、新西兰认可委员会(IANZ)、新加坡认可委员会(SAC)、英国皇家认可委员会(UKAS)等。这些认可组织在ISO/IEC 17205:2017认可准则的基础上都有无损检测领域能力认可的相关要求,在检测方法种类、能力范围的表述、技术要求等方面的做法各有特色,如NATA

按照无损检测方法的细分或应用对象的分类进行能力认可,共有17种细分的方法,包括RT(含DR、CR)、UT(含TOFD、PAUT)、MT、PT、ET、AT、LT等。NATA主要从服务、产品、决定因素、技术、程序、限制/范围等方面对认可能力范围进行表述。表1为NATA认可的某无损检测机构部分能力范围。

NATA认可能力范围注重对产品特征的描述,产品划分明确给出材料种类、制造工艺等,如“轧制或锻造铝制品;焊接接头-钛和钛合金”;在检测技术中,尽可能给出了细化的描述,如“胶片射线照像、手动衍射时差法超声检测”。但这些描述未涉及具体检测方法标准。

表1 NATA认可的某无损检测机构部分能力范围

服务	产品	决定因素	技术
无损检测材料性能和内部完整性	包层金属板;铸件-铸铁、钢和合金钢;复合材料;轧制或锻造铝制品;轧制或锻钢产品;焊接接头-铁素体材料;焊接接头-钛和钛合金等	不连续的射线检测和表征	胶片射线照像
	铸件-铸铁、钢和合金钢;铸件-有色金属和合金;复合材料;金属管件-铁磁性材料;管道-非铁磁性材料;轧制或锻制铝制品	不连续的超声检测和表征	A扫描能力;自动衍射时差法(TOFD);手动衍射时差法(TOFD)

IANZ按照无损检测技术的种类及检测产品材料、制造工艺特点给出认可范围,在无损检测领域分类中包含了RT、UT、TOFD、MT、PT、ET、AE、VT和其他特殊检测等19项无损检测技术。认可的能力范围中包含材料和产品、检测方法类型和范围、检测方法标准等描述。

SAC按照无损检测技术、检测的材料/产品、标准方法/技术等几个方面对无损检测能力进行描述,给出了认可的具体检测方法标准,专业范围包括UT、TOFD、PAUT、MT、PT、ET、VT、PMI(材料鉴别)、IT(红外)、其他方法等。表2为SAC认可的某无损检测机构部分能力范围。

表2 SAC认可的某无损检测机构部分能力范围

无损检测技术	检测的材料/产品	标准方法/技术
相控阵超声检测(PAUT)	通用标准所包含的所有材料、产品及焊接件	通用标准 ASME BPVC V-2017 ISO 10893:2011
衍射时差法(TOFD)	通用标准所包含的所有材料、产品及焊接件	通用标准 ASME BPVC V-2017 ISO 10893:2011

UKAS按照机构从事的检测活动提供实验室和检验机构认可服务。认可的实验室分为固定场所和非固定场所,认可的无损检测方法包括RT、UT、

MT、PT、ET、LT等。认可的能力范围中包含材料和产品、检测方法类型和范围、检测方法标准等描述。

除了NATA的能力范围描述没有给出具体检测方法标准外,其他机构给出的能力范围描述很接近,认可的能力范围中有材料和产品、检测方法类型和范围、检测方法标准等描述。但NATA给出的检测对象描述很具体,包括材料、形状、制造工艺等详细信息。各认可机构针对无损检测领域的能力认可都制定了认可的评审规范,对人员资质、设备校准、方法验证、环境控制、不确定评定等都提出了相应要求。

国外认可机构对无损检测技术能力认可评审涉及到的专业包括RT(含DR、CR)、UT(含TOFD、PAUT)、MT、PT、ET、AE、VT、IT、综合无损检测技术等,目前还未见针对工业CT检测能力的认可规定和认可范例。

2.2 国内情况

我国的实验室认可活动可以追溯到1980年,当时原国家标准局和原国家进出口商品检验局共同派员组团参加了当年在法国巴黎召开的国际实验室认可合作会议(ILAC)。20世纪80、90年代,我国多个行业及部门开展了实验室能力认可及评定工作。2002年,我国在原中国实验室国家认可委员会

(CNACL)和中国国家进出口商品检验实验室认可委员(CCIBLAC)的基础上成立了新的中国实验室国家认可委员会(CNAL),标志着我国统一的实验室国家认可制度的建立,2006年CNAL改为中国合格评定国家认可委员会(CNAS)。截止到2020年6月,我国通过CNAS认可的检测实验室有8887家,校准实验室有1355家,检验机构有630家,认可数量全球第一。

我国的实验室能力认可准则也经历了ISO/IEC导则25:1990、ISO/IEC17025:1999、ISO/IEC17025:2005、ISO/IEC17025:2017等多次转换。最新的CNAS认可准则为CNAS-CL01:2018(ISO/IEC17025:2017)。针对无损检测能力认可,CNAS在基本认可准则的基础上,先后发布了CNAS-CL14:2003《实验室能力认可准则在无损检测领域的应用说明》、CNAS-CL14:2006、CNAS-CL14:2010、CNAS-CL01-A006:2018《检测和校准实验室

能力认可准则在无损检测领域的应用说明》等文件,对人员、设备、检测方法和工艺、环境等提出了具体要求,对推动我国实验室认可制度在无损检测领域中的应用发挥了重要作用。目前在CNAS-CL01-A006:2018准则中,涉及到的检测方法包括射线、超声、磁粉、渗透、涡流、声发射等。

根据标准CNAS-AL06:2015《实验室认可领域分类》,无损检测属于14个检测领域中第11个领域,按照产品的种类和应用行业下设10个子领域,包括金属材料、金属制品、特种设备、钢结构船舶、民航器、民用核安全设施、海上石油钻井装置、电力工业设备、兵器航空航天等,包含的检测方法有射线、超声、磁粉、渗透、涡流、声发射、漏磁、目视、泄漏、红外、涂层检测等11种检测方法。检测能力描述按照检测对象、项目/参数、领域代码、检测标准、说明及备注等展开。表3为我国无损检测认可实验室技术能力的典型描述。

表3 无损检测认可实验室技术能力的典型描述

检测对象	项目/参数		领域代码	检测标准(方法)名称及编号(含年号)	说明
	序号	名称			
金属材料	1	射线检测	110101	GB/T 5677—2018《铸件 射线照相检测》	—
	2	超声波检测	110102	GB/T 6402—2008《钢锻件超声检测方法》	—
压力容器	1	磁粉检测	110303	NB/T 47013.4—2015《承压设备无损检测 第4部分:磁粉检测》	只做磁轭法
	2	渗透检测	110304	NB/T 47013.5—2015《承压设备无损检测 第5部分:渗透检测》	不做荧光渗透

2.3 国内外认可机构能力表述及认可要求对比

表4对国内外各认可机构无损检测技术能力认可表述进行了比较。可以看出,除了NATA没有给出具体检测方法标准外,其他机构在能力范围表述方面很接近,从认可的能力范围中可以看到具体的检测对象、检测项目、检测技术及检测标准。但国外几家机构对检测对象的描述更加细化,包括材料种类(钢、铝等)、制造工艺(铸造、锻造、焊接等)等信息,NATA甚至对检测对象的形状结构(板、管等)也有描述。CNAS对认可检测对象描述相对宏观,如金属材料、压力容器等。

表4 各认可机构对无损检测能力认可表述对比

认可机构	检测对象	检测项目	技术	检测标准	能力限制范围	程序	备注
CNAS	√	√	√	√	√	×	√
NATA	√	√	√	×	√	√	×
IANZ	√	√	√	√	√	×	×
SAC	√	√	√	√	√	×	×
UKAS	√	√	√	√	√	×	√

在认可要求方面,国内外认可机构都是在ISO/IEC17025:2017认可准则基础上,针对无损检测领域的特殊性,制定了细化的补充文件,对结构、资源(人员、设施和环境条件、设备等)、过程(检测方法)等给出了具体规定。但从现有的资料看,国内外机构的相关要求主要是针对常规无损检测方法的,没有对工业CT、DR、CR等无损检测新技术提出具体要求。国内外机构在结构方面,强调了岗位设置、技术监督、在非固定场所检测等要求;在人员方面,强调了人员持证资格、发证机构等要求;在设施和环境条件方面,细化了安全防护等要求;在设备方面,强调了校准和核查的要求(含标准试块、对比试件等);在过程方面主要强调了检测工艺规程等。NATA、SAC等机构也给出了无损检测领域测量不确定度评定的具体指导文件,目前CNAS还没有这方面的文件。

3 无损检测新技术认可面临的主要问题及措施建议

3.1 主要问题

随着无损检测新技术的应用和发展,无损检测

新技术能力认可需求越来越多,给认可评审工作提出了新的要求。过去基本上参照常规无损检测应用说明开展了相应的认可工作,有部分认可范例,积累了一定的实践经验。但是与常规无损检测技术相比,无损检测新技术的重要特征是数字化、图像化、智能化,在人员要求、设备配置、检测方法等方面有自身的显著特点,参照常规无损检测方法的认可要求评审无损检测新技术,存在明显局限性。主要问题可以归结为以下几点。

(1) 认可准则应用说明对无损检测专业类别覆盖不全面。

CNAS-CL01-A006:2018 认可准则只涉及 RT、UT、MT、PT、ET、AE 等专业类别,内容没有覆盖工业 CT、DR、CR、TOFD、PAUT 等无损检测新技术,MFL、IT、LT、H/S、GW 等一些非常规的无损检测技术在应用说明中也未涉及。随着无损检测新技术认可需求的快速增长,现行 CNAS-CL01-A006:2018 无损检测应用说明认可文件亟需修订,为评审工作提供依据。

(2) 需要对无损检测新技术认可关键环节识别和表征进行研究。

一是人员方面,目前 CNAS 要求 UT、RT 无损检测授权签字人具有Ⅲ级资格,要求其他方法的授权签字人具有Ⅱ级资格,而工业 CT、DR、CR、TOFD、PAUT 等新技术通常比常规超声检测和胶片照相检测技术更复杂,对检测人员要求更高,如何确定授权签字人的技术资格等级值得探讨。对人员资格要求过高,将导致很多机构达不到要求,影响无损检测新技术领域认可工作的开展;要求过低也会导致 CNAS 认可工作出现风险。解决这个问题一方面要考虑资格证书的可获得性情况,另一方面也要考虑不同人员资格鉴定机构认可资格的等效性、不同等级资格人员的知识结构要求等方面的情况。

二是设备方面,目前工业 CT、DR、CR 等无损检测新技术涉及到的仪器设备校准方法尚未建立,也缺少专门的校准机构,设备性能指标测试的标准试块(标准器件)也不统一,如何对设备进行校准、如何确认设备满足检测方法要求等仍需要研究。另外,新版认可准则对仪器设备的期间核查也提出了新的要求,强调了对设备性能的核查,并要求根据设备的稳定性和使用情况等识别哪些设备需要进行期间核查。

三是检测方法方面,无损检测新技术与常规无

损检测技术相比应用还不够普及,虽然也制定了不少检测标准,但国内外针对无损检测新技术领域的能力验证活动开展得较少,如何确定实验室能力验证和方法确认的有效性需要进行研究。测量不确定度评定过去一直是无损检测机构的薄弱环节,是否有必要对其进行评定也存在一定争议。但从新技术认可角度来看,既要解决评定的必要性问题,也要关注评定结果的有效性问题。如有些机构采用工业 CT 检测零件尺寸,显然,在这种应用场景下,给出测量结果不确定度应该是认可技术能力的基本要求。

(3) 评审员对无损检测新技术的评审尺度把握不一致,存在认可风险。

由于缺少科学、合理、统一的无损检测新技术认可评审指导文件,在无损检测新技术能力评审方面,不同评审员之间的认识会有差异,和实验室专业人员之间的认识也经常出现偏差,评审尺度掌握不一致。另外实验室认可的领域代码中对各类无损检测新技术的体现不够充分,很难从领域代码中识别出技术评审员擅长的专业,熟悉常规检测的技术评审员不一定熟悉非常规的检测技术及无损检测新技术。

3.2 措施建议

针对这些问题,可以考虑采取以下措施。

(1) 大力开展无损检测新技术认可关键技术研究工作,对无损检测新技术能力特点及关键环节进行分析研究。分别对工业 CT、DR、CR、TOFD、PAUT 等无损检测新技术原理、人员要求、环境条件、设备配置及性能指标、对比样件、检测方法、检测工艺过程、结果评定、不确定度评估等开展研究,确定能力特点,把握关键环节,确定核心能力要素。

(2) 对开展无损检测新技术检测的核心能力要素要求进行评价,包括人员资格及能力评价标准、仪器设备性能评价要求、检测方法应用的正确性及不确定度评估的合理性等识别表征、检测辅助器材评价方法、环境要求评价依据等;通过必要的对比试验及现场验证确定评价方法的适宜性、充分性及有效性,为技术能力评价准则建立奠定基础。

(3) 对无损检测领域技术能力评审准则进行修订及完善。以无损检测新技术能力评价为主导,结合常规无损检测技术最新发展,修订 CNAS-CL01-A006:2018 应用说明,制定《无损检测领域认可评审作业指导书》。开展无损检测领域新技术能力评审工作,在典型行业进行评审应用示范。

(4) 基于我国在无损检测专业领域多年来积累

的人员、设备、方法、标准及管理等优势,适时对CNAS实验室认可的领域代码进行修订,补充无损检测新技术相关内容,便于有针对性地开展新技术领域的评审工作,并引领无损检测领域的国际实验室认可工作。

4 结语

无损检测是实验室认可的重要领域,受到了国内外认可机构的普遍重视。随着无损检测新技术的研究和应用,认可需求日趋增多,对CNAS认可提出了新的要求。通过采取有效的应对措施,将有力促进无损检测技术能力认可水平的提高,总体来说具有以下趋势。

(1) 无损检测新技术能力将全面纳入CNAS认可范围,具有新技术能力的认可实验室数量在无损检测实验室中的比重会越来越大。

(2) CNAS在无损检测领域应用说明认可文件将得到进一步完善,为无损检测新技术能力认可提供支撑,推动评审尺度的进一步统一,有效降低认可风险。

(3) CNAS在无损检测新技术领域认可活动将推动无损检测新技术的研究和应用,有效带动无损检测新技术的发展,提高无损检测实验室的市场竞争

力。

参考文献:

- [1] 王聪. 无损检测实验室认可与检测过程的控制要求[J]. 无损检测, 2007, 29(7): 423-426.
- [2] 刘丽东, 管坚. HOKLAS对无损检测实验室认可的特殊要求[J]. 中国质量认证, 2005(12): 39-42.
- [3] 中国机械工程学会无损检测分会. 无损检测发展路线图[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2020.
- [4] 沈功田. 承压设备无损检测与评价技术发展现状[J]. 机械工程学报, 2017, 53(12): 1-12.
- [5] 倪培君, 李旭东, 彭建中. 工业CT技术-第六讲: 工业CT在无损检测中的应用[J]. 无损检测, 1996, 18(6): 173-176.
- [6] 齐子诚, 倪培君, 姜伟, 等. 金属材料内部缺陷精确工业CT测量方法[J]. 强激光与粒子束, 2018, 30(2): 124-130.
- [7] 郑世才, 王晓勇. 数字射线检测技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2019.
- [8] 倪培君, 王俊涛, 闫敏, 等. 数字射线检测技术理论研究进展[J]. 机械工程学报, 2017, 53(12): 13-18.
- [9] 刘松平, 刘菲菲, 李乐刚, 等. 航空复合材料无损检测与评估技术研究进展回顾[J]. 航空制造技术, 2019, 62(14): 14-27.

(上接第27页)

尾管进行检测,并从工作环境、工作准备、工艺流程等方面对这两种检测方法进行了比较。试验结果表明,两种检测方法均能检测出该尾管组件的典型裂纹缺陷,涡流检测对环境要求较低,较为环保,速度较快,但只能单个检测;渗透检测可批量检测,且检测结果直观可视,工程应用时应综合考虑进行选择。

参考文献:

- [1] 高晗,喻星星. 航空导管连接卡箍的荧光渗透检测[J]. 无损检测, 2015, 37(1): 72-74.
- [2] 王树志, 刘广华, 王本志, 等. 表面状态对钛合金铸件荧光渗透检测结果的影响试验研究[J]. 无损检测, 2017,

39(10): 54-58.

- [3] 李林贤, 董璐. 极薄部位贯穿型缺陷的渗透检测[J]. 石油和化工设备, 2017, 20(4): 77-78.
- [4] 杨志伟. 低温环境下渗透检测灵敏度的提高[J]. 无损检测, 2006, 28(8): 423-425, 430.
- [5] 杨宾峰, 罗飞路. 脉冲涡流检测系统影响因素分析[J]. 无损检测, 2008, 30(2): 104-106.
- [6] 张海兵, 袁英民. 某型发动机2级压气机叶片的涡流探伤方法[J]. 无损检测, 2011, 33(2): 24-26.
- [7] KISELEV E K, GOL'DSHEIN A E. Eddy-current system for testing inner diameter of pipes[J]. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2019, 55(3): 210-216.

欢迎网上投稿 欢迎订阅 欢迎刊登广告