

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2017.01.002

# 弹丸结构缺陷电磁超声无损检测技术综述<sup>\*</sup>

崔  平<sup>①②</sup>  范志锋<sup>①②</sup>  徐敬青<sup>①②</sup>  文  健<sup>①②</sup>

①军械工程学院弹药工程系(河北石家庄,050003)

②军械工程学院弹药保障与安全性评估军队重点实验室(河北石家庄,050003)

[摘  要]  介绍了弹丸结构缺陷的主要形式与危害,分析了针对弹丸结构缺陷进行电磁超声无损检测的目的意义,阐述了电磁超声无损检测技术应用于批量生产的弹药装备结构缺陷的快速自动化检测的优势,列举了国内外针对弹丸结构缺陷进行超声无损检测的工程应用实践。最后,针对我国结合电磁超声无损检测技术开展弹药生产质量监督给出了几点建议。

[关键词]  弹丸;缺陷形式;电磁超声无损检测;检测标准

[分类号]  TJ410

## A Review of Electromagnetic Acoustic Non-destructive Testing Technology for Structural Defects of Projectile

CUI Ping<sup>①②</sup>, FAN Zhifeng<sup>①②</sup>, XU Jingqing<sup>①②</sup>, WEN Jian<sup>①②</sup>

① Department of Ammunition Engineering, Ordnance Engineering College (Hebei Shijiazhuang, 050003)

② Military Key Laboratory for Ammunition Support and Safety Evaluation, Ordnance Engineering College (Hebei Shijiazhuang, 050003)

[ABSTRACT]  The main forms and damages of projectile structural defects were presented. The significance of electromagnetic acoustic non-destructive testing for projectile structural defects was analyzed. The technical superiority of EMAT was elaborated which utilizes rapid and automatic testing of batch production of ammunition with structural defects. Such engineering application practices both at home and abroad were also introduced. Some advices about ammunition production quality supervision adopting electromagnetic acoustic non-destructive testing technology were given at last.

[KEYWORDS]  projectile; defect form; electromagnetic acoustic non-destructive testing; inspection standard

### 引言

弹药装备作为武器系统的终端,通常由引信、弹丸、发射装药、药筒和底火等五大元件组成。其中,弹丸内一般装填高能炸药或可以完成其他一些特殊任务(照明、燃烧、干扰、发烟等)的装填物,是完成武器系统毁伤目标或特殊作战任务的核心部件。然而,受弹体毛坯材料缺陷、生产设备、加工成形工艺、企业生产质量管理水平、军事代表检验验收和质量监督水平等综合因素影响,弹丸结构中可能产生不同类型的制造缺陷。北方华安工业集团有限公司在2014年某型榴弹弹丸生产过程中,检验员共发现90

发弹体存在侧壁拉裂和底部裂纹疵病<sup>[1]</sup>。弹药发射过程中,弹丸在火炮膛内通常要承受几十兆帕到几百兆帕不等的高温高压火药燃气压力作用,弹丸结构中的制造缺陷很有可能成为导致弹药发生安全性事故的主要原因。因此,生产过程中针对弹丸结构缺陷进行在线全面检测具有十分重要的经济和军事意义。

### 1  弹丸结构缺陷主要形式与危害

不同类型的弹丸具有不同的成形工艺:中大口径榴弹弹体普遍采用热冲压工艺;多数迫击炮弹弹体采用铸造成形工艺;一些导弹弹体的金属舱段通

<sup>\*</sup> 收稿日期:2016-06-23  
作者简介:崔平(1981-),男,硕士,讲师,主要从事弹药工程与电磁无损检测方面的研究。E-mail:pingjing1981@163.com  
通信作者:范志锋(1978-),男,博士,副教授,主要从事弹药工程方面的研究。E-mail:cctv2004re@163.com

常采用管材强力旋压成形,各舱段之间则采用焊接方法连接;通过高速旋转方式达到飞行稳定的弹药的弹带与弹带槽之间也采用焊接方式连接。原材料、成形工艺、设备及环境条件等都是可能造成弹体结构缺陷的重要因素。目前,弹丸结构缺陷的主要形式包括裂纹和气孔两类。

裂纹是弹体结构断裂破坏的起源,是最危险的缺陷类型。弹体结构在热冲压加工过程中感应加热温度不符合工艺要求、冲压用压型工装尺寸超差或操作过程不符合工艺要求以及毛坯材料本身存在缺陷等是弹体产生裂纹的主要原因。裂纹缺陷具有尖锐的缺口和较长、较窄的长细比特征<sup>[2]</sup>。

弹体表面及内部出现的裂纹缺陷,减少了弹体承载面积,因此,大大降低了弹体金属强度;同时,裂纹细长的形状容易在尖角处产生严重的应力集中,发射过程中在膛内火药燃气压力作用下,当所受应力水平超过裂纹根部的强度极限时,裂纹有可能扩展形成贯穿性裂纹<sup>[3]</sup>,从而引起弹体严重变形甚至碎裂,进而造成膛炸事故。1981 年,配用于美军 M68 坦克炮的 XM774 型 105 mm 钨合金尾翼稳定脱壳穿甲弹在低温试验过程中,弹体中的裂纹缺陷导致侵彻体出炮口后不久从凸耳根部位置解体为两部分<sup>[4]</sup>。弹带是密闭火药燃气压力并通过与膛线接触使弹丸产生高速旋转从而实现飞行稳定的部件。弹带部件出现裂纹,自身强度降低,在弹丸与火炮内膛之间挤压的过程中甚至可能出现部分断裂,因此,无法使弹丸产生正常的旋转角速度,导致一些采用离心力作为解除保险条件的引信不能正常解除离心保险;同时,弹丸飞行稳定性有可能因为旋转角速度达不到要求而降低,影响弹药命中精度;严重情况下,弹带在膛内断裂解体,无法可靠密闭火药燃气,弹丸初速及射程等技术指标都会相应受到影响。

气孔类缺陷主要出现在采用铸造成形工艺的迫弹弹体中以及其他弹体上的一些焊接部位。迫弹弹体一般采用稀土铸铁材料,在铸造成形过程中,由于铸造质量的控制水平所限,容易形成皮下气孔或砂眼等缺陷<sup>[5]</sup>。这类缺陷仅通过肉眼无法从弹体表面识别出来,只有从缺陷位置切开后才能观察到它的具体形状与尺寸。此外,焊接时也有可能因为熔池中的气泡在凝固过程中未及时逸出而残留下来形成气孔。气孔会降低铸造弹体和焊缝的致密性,减少结构的有效工作面积,降低其强度。带尖角的气孔还会在外力作用下引起应力集中演变为裂源。

总之,上述缺陷的存在,影响产品外观质量,降低产品的使用性能,给生产厂家造成严重的经济损

失;若因条件所限,无法及时全面检测出内部缺陷而将问题产品交付部队使用,有可能引起作战训练安全事故,造成装备人员的重大损失及恶劣影响。

## 2 弹丸结构缺陷检测要求

与其他军械装备相比,弹药装备的显著特点之一是批次生产、数量巨大。弹药是消耗性军械物资,战时消耗量大以及平时要求具有一定的储备量等特点,决定了弹药装备比其他军械装备明显庞大的生产规模与数量。虽然不同弹药年生产批次、生产数量会受到弹种特点、现有库存量、作战用途以及军方历年采购需求的变化而不同,但一般来说,弹药年生产批次从几批到几十批不等,单批生产数量从几十、几百发到几千发不等。

由于属于一次性使用产品,弹药装备的另外一个显著特点是具有极高的安全性要求。因此,对于其检验验收往往要求尽可能地覆盖全部产品,对于可能造成安全隐患的严重或致命缺陷,通常会要求在生产线上完成逐发、全数检验<sup>[6]</sup>。

弹药装备的上述特点,决定了针对弹丸结构缺陷而设计开发的在线检测评估系统应该具有自动化程度高、单发检测时间短、检测效率高、检测结果可靠等优点,最好能够实现在线自动判别检测结果,以适应装备生产厂家快速、大批量作业的节奏与要求。

此外,弹药装备种类繁多,不同弹种的弹丸具有不同的口径、弹长、壁厚等结构参数。为适应各弹种检测要求,检测设备应具有一定的功能可扩展性。

## 3 弹丸结构缺陷电磁超声检测技术研究现状及趋势

### 3.1 国外研究现状

20 世纪 60 年代末期出现的电磁超声无损检测技术因具有不需要声耦合而直接在金属中激发与接收声波的标志性特征<sup>[7]</sup>,近些年来一直是超声无损检测领域研究的热点。该技术的非接触性、高效性、灵活性及环保性等特点,使其在工业、军事领域具有强大的生命力<sup>[8]</sup>。在批量生产军工产品在线快速检测方面,电磁超声无损检测技术具有明显的技术优势。美国是开展该项技术研究较早的国家之一,并很快将其研究成果应用于军事领域。公开发表的文献表明,早在 20 世纪 80 年代初,美国就围绕弹丸结构缺陷的电磁超声无损检测进行了探索研究与工

程实践。

Spragins<sup>[9]</sup>认为,弹丸的在线生产速率通常可达每分钟十几发甚至更多,因此,检测效率是评价弹丸结构缺陷无损检测系统的关键指标。来自罗克韦尔国际的团队以美军 M549 型 155 mm 炮弹为检测对象,设计开发了一套弹丸缺陷快速检测定位系统。该系统由微控制器控制多达 40 套电磁超声换能器 (EMAT),发射剪切垂直超声波,沿着与弹体表面法线 35°角方向向弹体内部传播,可以同时检测位于 155 mm 口径弹丸内、外表面上的各类缺陷(图 1)。

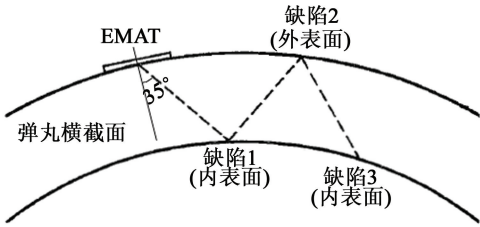
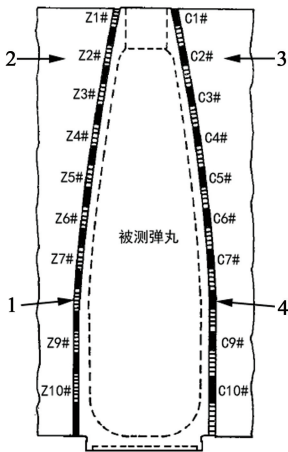


图 1 利用剪切垂直声波检测弹丸内外壁缺陷  
Fig. 1 Inspection of projectile wall by shear-vertical acoustic waves

40套EMAT位于弹丸和磁极之间2.38 mm的间隙中,两两组成一对,检测过程中EMAT和磁极片相对于弹丸的配置关系如图2所示。其中,20套EMAT发射沿弹体圆周方向传播的超声波,另外20套EMAT发射沿弹体纵向传播的超声波。在弹丸转动过程中,这些EMAT每隔200 μs相继被激励,如果有缺陷存在,信号会被处理器记录下来。检测结束后,系统可打印显示所有被测弹丸的缺陷分布图。单发弹丸检测时间不超过1s。系统可检测出



1 - 纵向发射 EMAT; 2 - 磁极片 1;  
3 - 磁极片 2; 4 - 周向发射 EMAT。

图 2 EMAT、磁极片相对于弹丸的配置关系  
Fig. 2 Position of EMAT and pole piece in relation to the projectile

长度 2.5 mm、最大深度 0.8 mm 的模拟缺陷。通过计算收、发信号之间的时间跨度,并结合对来自距离选通开关和轴角编码器的采集信号的处理,系统还可将缺陷定位于 1.27 mm × 1.27 mm 的正方形区域中。因此,完全能够满足弹丸生产线全速率运行条件下的整弹快速检测要求。

1978 年, Fortunko<sup>[10]</sup>以 M107 型 155 mm 炮弹弹丸为对象研制了电磁超声检测系统。与 Spragins 设计思路不同,系统只采用了一发一收 2 个 EMAT,分别利用 1.8 MHz 角剪切波和 2.5 MHz 超声表面波探测弹体内外表面缺陷(图 3)。采用曲折线圈的收发 EMAT 布局如图 4 所示。该系统可对长 5.08 mm、深 0.51 mm 的弹丸裂纹缺陷进行有效检测。

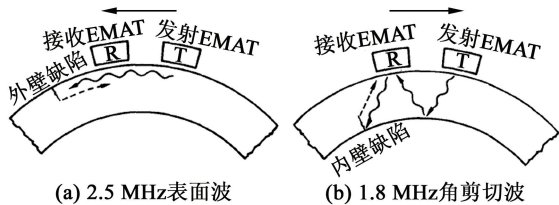
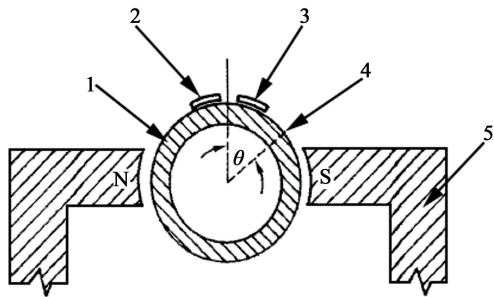


图 3 检测弹丸内外壁缺陷的两种波  
Fig. 3 Two kinds of waves for defects inspection inside and outside of a projectile wall



1 - 弹壁; 2 - 发射 EMAT; 3 - 接收 EMAT;  
4 - 缺陷槽相对于 EMAT 的角度位置; 5 - 电磁体。

图 4 弹丸圆周截面及收发 EMAT 布局  
Fig. 4 Circumferential cross section of a projectile and one possible layout of transmitting and receiving transducers

文献[9-10]虽然都基于电磁超声技术研制了弹丸结构缺陷检测系统,但并未就检测标准问题开展研究。实际操作中,探测到缺陷信号并不难,问题在于如何准确判断接收到的信号是否为缺陷信号,或者说是否满足弹药产品质量检测要求中轻、重、致命任意一级缺陷类型的特征。

建立金属弹体电磁超声无损检测标准的常见方法是利用电火花成形加工 (EDM) 技术在惰性弹体上加工出深度、长度不一的刻槽来模拟实际弹体中可能存在的缺陷。在标准设计初期,必须先完成弹丸发射过程中以及遭遇野蛮操作时的应力分析,



并根据断裂力学理论确定致命缺陷的尺寸和位置。  
Smith<sup>[11]</sup>就如何建立并使用金属弹体电磁超声无损检测标准开展了研究,指出了美军现行标准中存在的一些问题。文献[11]针对美现役 M549 型 155 mm 炮弹弹丸尖拱部、定心部以及弹底中心等特定部位进行了发射阶段应力分析,明确了模拟实际缺陷的刻槽位置、方向、深度、长度以及机械加工特点。图 5 显示了该弹种一套完整的超声检测标准。

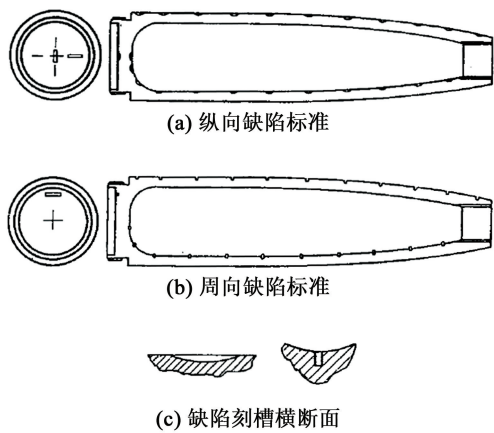


图 5 美 M549 型 155 mm 炮弹电磁超声检测标准  
Fig. 5 Electromagnetic ultrasonic inspection standards for American 155-mm M549 projectile

弹丸电磁超声无损检测标准的关键作用是为检测结果的判断建立起“接收/拒绝”阈值,这为检测系统自动识别缺陷提供了依据。因此,检测标准在决定产品整体拒绝概率中扮演了至关重要的角色。此外,超声设备无论在安装还是定期校准过程中都会用到上述检测标准。

弹丸结构缺陷标准的设计难点在于如何使缺陷模拟刻槽的超声响应与实际缺陷的超声响应之间具有最佳的相关性。由于实际操作中一些模拟缺陷并不能够很好地模拟出真实存在于弹丸上的缺陷,为保守起见,军方通常会选择其中最严苛的标准。而这样做又可能因为过度保守而出现产品拒绝率攀升的现象。除此之外,缺陷标准设计的另外一个问题是现有技术条件下很难加工制作出两套完全相同的缺陷标准弹丸用于实际检测。

为获得弹丸电磁超声检测标准, Ali<sup>[12]</sup>同样对美 M549 型 155 mm 火箭增程高爆弹弹丸进行了应力分析,并将有效应力分解为周向应力和轴向应力两个分量,同时提出了缺陷尺寸设计原则,即基于周向拉伸应力确定致命纵向缺陷尺寸,基于轴向拉伸应力确定致命周向缺陷尺寸。Ali 认为,模拟缺陷槽的位置应当覆盖整个被测弹丸,但同时应将重点放在几个高应力区域。针对过于严苛的检测标准带来

产品拒绝率过高的现象,文献[12]提出了程序增益控制(PGC)和可变拒绝水平控制(VRL)两种解决方法,有效地避免了因为检测灵敏度过高带来的合格产品错误拒绝问题。

Fortunko 等<sup>[13-14]</sup>重点针对 155 mm 弹丸结构缺陷电磁超声检测的自动化设计进行了研究,提出并完成了一种包括升降台、液压缸、驱动电机、旋转检测器等结构在内的弹丸全自动电磁超声检测站,弹丸被自动嵌入并定位、自动实施检测、自动判断结果,缺陷弹丸自动分离,极大地提高了工作效率,实现了与弹丸生产速率完全匹配的在线检测速率。该系统还可以通过软件编程适用于其他弹种的检测。

综上所述,国外(尤其是美国)在电磁超声无损检测技术发展初期就将其与本国军工产品质量检测需求紧密结合,并完成了理论研究与工程应用。

3.2 国内研究现状

相比国外,电磁超声无损检测技术的研究在我国起步较晚;20 世纪 80 年代,我国弹药装备制造业发展刚刚进入一个崭新的时期。在此背景下,电磁超声无损检测技术更多地应用在了民用领域,关于应用电磁超声技术解决军工产品,特别是弹药产品缺陷在线检测方面的研究及报道并不多见。

金永等<sup>[15-18]</sup>针对小口径镁合金火箭弹弹头结构和存在缺陷的类型,采用水浸式超声检测方法,通过水浸式聚焦探头检测出了弹体表面的划伤缺陷和弹头内部存在的夹杂、裂纹缺陷,并从算法角度出发研究了合金弹头水浸超声检测的缺陷定位方法。张刚<sup>[19]</sup>同样利用水浸超声法完成了底凹头螺、圆柱头螺及圆锥头螺等典型弹体结构的缺陷检测。丁学龙<sup>[20]</sup>研究了大口径旋转稳定炮弹弹带在实施铜钢熔敷焊过程中出现的气孔、裂纹、疏松等缺陷模式,并利用水浸超声探头进行了检测。由于水浸超声检测技术需要将探头和被测件浸没于水中,利用水作为超声耦合剂,因此,该方法不适用于无法与水接触的检测工件,同时检测效率也因水的耦合而降低。

田子龙<sup>[21]</sup>、全洪渊<sup>[22]</sup>通过构建基于机器视觉的图像识别系统,利用面阵 CCD 摄像机和图像处理与识别技术实现了对弹体表面缺陷的检测。显然,这种方法对弹体内部结构中的缺陷检测无能为力。邵思杰等<sup>[23]</sup>还尝试了采用工业 CT 技术对弹体铸造质量、弹丸强度、药筒加工质量进行检测;这种方法存在设备复杂、射线辐射危害、后期图像处理工作量 大等缺点。

朴哲镐等<sup>[3]</sup>曾提到利用磁粉探伤技术发现了某型弹体表层裂纹缺陷,然而该方法却对弹体解剖

后才发现的内部孔洞等缺陷缺乏足够的检测能力。磁粉探伤只适用于探测铁磁性材料的表面或近表面缺陷,工件表面油漆等涂覆层可降低检测灵敏度,检测结束后还需要对工件进行退磁,影响了检测效率。

为了开展弹丸腔体内部微细裂纹无损检测试验研究,需要在腔体内部预制微细人工伤。鄢勇等<sup>[24]</sup>以普通电火花加工原理为基础,利用微细脉冲产生的电弧放电热,实现了对弹壁金属材料的微量熔蚀,为加工弹丸结构缺陷标准样品提供了方法与手段。

综上所述,国内针对弹丸结构缺陷陆续开展了水浸超声、光学成像、工业 CT、磁粉探伤等方法研究,模拟真实弹丸微细裂纹的电弧放电加工方法,但未见利用电磁超声技术检测弹丸结构缺陷的文献。

### 3.3 发展趋势

为了提高战斗部的毁伤效能,学者们围绕弹体新材料<sup>[25-26]</sup>、热处理方法<sup>[27-29]</sup>、成形工艺<sup>[30-31]</sup>等进行了研究,虽然这些研究减少了产品加工缺陷,改善了产品力学性能,提高了产品质量,但仍无法完全避免弹丸内部结构缺陷的产生。采用科学有效的技术方法发现、定位、评估这些制造缺陷,对于提高弹丸生产质量依然具有十分重要的军事和经济意义。

与此相对应的,电磁超声无损检测技术自 20 世纪 60 年代出现以来,学者们在近半个世纪的时间里主要围绕着电磁超声换能机理<sup>[32-33]</sup>、换能过程的数学建模<sup>[34-35]</sup>、优化 EMAT 结构设计以提高换能效率<sup>[36-39]</sup>、改进信号处理算法<sup>[40-41]</sup>等方面开展研究。进入 21 世纪以来,主要研究方向已经集中在将电磁超声技术推向包括铸造、石化、汽车制造、航空航天等在内的工程应用阶段,特别表现在高温、高压、高速、在线应用等领域<sup>[42-45]</sup>。同其他无损检测技术的发展路线类似,电磁超声无损检测技术也正在向无损评估方向发展,判断弹丸结构缺陷的位置、大小、形状和性质,进而根据缺陷状态对被测对象的安全性和剩余寿命作出分析、预测和综合评价<sup>[46-47]</sup>。为适应工业生产实时、在线测试的要求,该技术出现了逐步向数字化、自动化、图像化方向发展的趋势,催生并设计出了一些自动检测装置和爬行器,以及与机器人领域的技术融合,这些研究都将使得检测过程更快、检测数据更可靠、检测结果更直观。

## 4 结论与建议

1) 裂纹、气孔等缺陷是影响弹丸结构强度的不利因素。轻微缺陷影响弹丸加工制造质量,致命缺陷影响战技指标,甚至可能造成膛炸等恶劣事故,这

类缺陷必须生产过程中予以检测并剔除。

2) 弹药装备批量生产、种类繁多、一次性使用、安全性要求高的特点,决定了弹丸结构缺陷无损检测的核心要求是快速、在线、可靠与通用。

3) 国内现行的几种弹丸结构缺陷检测方法,缺陷探测能力较低,自动化水平不高,应尽快丰富生产厂家弹丸质量检测手段,研究弹丸结构缺陷电磁超声无损检测的方法与规律,研制与生产速率相匹配的硬件检测设备,提高弹药产品综合质量。

4) 开展弹丸结构缺陷电磁超声检测标准研究。针对我军现有典型弹种结构、材料及内外弹道受力特点,运用失效分析方法,绘制应力剖面图,通过断裂力学分析,确定弹丸不同部位的缺陷尺寸阈值,形成便于自动判断结果的系列检测标准。

5) 电磁超声无损检测技术已从理论研究阶段进入全面深入的工程应用阶段,无损检测与无损评估并重,出现了自动化、图像化发展的趋势,这必将为弹丸结构缺陷的在线检测提供更好的技术支撑。

### 参 考 文 献

- [1] 夏克祥,姜春茂,刘海艳,等. 某炮弹弹体内膛裂纹原因分析[J]. 精密成形工程, 2015, 7(3): 93-96.  
XIA K X, JIANG C M, LIU H Y, et al. Cause analysis of bore cracks in a projectile [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2015, 7(3): 93-96.
- [2] 樊兆宝,安绍孔,王英健,等. 空空导弹弹体典型焊接缺陷及其控制技术[J]. 航空制造技术, 2012(13): 87-90.  
FAN Z B, AN S K, WANG Y J, et al. Typical weld defect on air-to-air missile body and its control technology [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012(13): 87-90.
- [3] 朴哲镐,姚远程,姚建生,等. 弹体表层缺陷原因分析[J]. 失效分析与预防, 2009, 4(2): 108-112.  
PIAO Z H, YAO Y C, YAO J S, et al. Analysis on surface defects of shell bodies [J]. Failure Analysis and Prevention, 2009, 4(2): 108-112.
- [4] PFLEGL G A, UNDERWOOD J H, O'HARA G P. Structural analysis of a kinetic energy projectile during launch [R]. ADA103475, 1981: 1-2.
- [5] 成玉春,周秀贞. 迫弹铸件缺陷的修复技术[J]. 中国铸造装备与技术, 2001(6): 37.
- [6] 杜庆吉. GJB2337—95《榴弹弹丸缺陷分类》简介[J]. 兵工标准化, 1997(1): 46-48.
- [7] 王淑娟,赵再新,翟国富. 基于电磁超声的火车车轮裂纹检测系统[J]. 仪表技术与传感器, 2005(11): 27-29.

- WANG S J, ZHAO Z X, ZHAI G F. Detection system about train-wheels' cracks based on electronic ultrasonic technology [J]. Instrument Technique and Sensor, 2005 (11): 27-29.
- [8] 康磊. 用于铝板检测的电磁超声导波换能器优化设计技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010: 2-3.
- KANG L. Research on optimal design technique of guided wave EMATS for aluminum plate inspection [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010: 2-3.
- [9] SPRAGINS L T. Rapid ultrasonic inspection of army projectiles [C]//Proceedings of the ARPA/AFML Review of Progress in Quantitative NDE. La Jolla, CA, 1980: 581-582.
- [10] FORTUNKO C M. Artillery projectile inspection with EMATs [C]//Proceedings of the ARPA/AFML Review of Progress in Quantitative NDE. Ithaca, NY, 1978: 345-349.
- [11] SMITH J M. Strong need for improved ultrasonic standards for inspection of artillery shell metal bodies [C]//Proceedings of the ARPA/AFML Review of Progress in Quantitative NDE. La Jolla, CA, 1980: 583-585.
- [12] ALI S M. Optimizing ultrasonic signal responses of production nondestructive testing system [M]//Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. Williamsburg, VA: Springer-Verlag, 1986: 871-875.
- [13] FORTUNKO C M, THOMPSON R B. Advanced EMAT inspection systems: projectiles and welds [C]//Proceedings of the ARPA/AFML Review of Progress in Quantitative NDE. La Jolla, CA, 1979: 46-51.
- [14] FORTUNKO C M, THOMPSON R B, MAHONEY M W. Rapid ultrasonic inspection of artillery projectiles; DAAK10-77-2020 [R]. Rockwell International Science Center, 1978: 54-59.
- [15] 金永, 王召巴, 丁战阳, 等. 一种小口径火箭弹弹头超声检测方法[J]. 固体火箭技术, 2010, 33(1): 115-118.
- JIN Y, WANG Z B, DING Z Y, et al. An ultrasonic testing method of minor-caliber rocket shell warhead [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2010, 33(1): 115-118.
- [16] 刘卉芳, 王召巴, 陈友兴. 合金弹头超声检测缺陷定位方法研究[J]. 山西电子技术, 2010(6): 89-91, 93.
- LIU H F, WANG Z B, CHEN Y X. The study of defect location method on ultrasonic testing of metal slug [J]. Shanxi Electronic Technology, 2010(6): 89-91, 93.
- [17] 陈友兴, 吴其洲, 赵建辉, 等. 合金火箭弹弹体缺陷超声自动检测及信号处理[J]. 固体火箭技术, 2013, 36(5): 706-710.
- CHEN Y X, WU Q Z, ZHAO J H, et al. Automatic ultrasonic defect testing and signal processing of the alloy rocket body [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2013, 36(5): 706-710.
- [18] 戚励文, 王召巴, 金永, 等. 合金弹体棒状坯料超声检测方法研究[J]. 弹箭与制导学报, 2009, 29(4): 269-272.
- QI L W, WANG Z B, JIN Y, et al. The study of ultrasonic testing method on claviform feedstock of rocket shell body [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2009, 29(4): 269-272.
- [19] 张刚. 水浸超声扫描检测系统的设计[D]. 太原: 中北大学, 2012: 6-7.
- ZHANG G. Design of water-logging ultrasonic scanning and testing system [D]. Taiyuan: North University of China, 2012: 6-7.
- [20] 丁学龙. 铜钢熔敷焊的超声自动检测[D]. 南京: 南京理工大学, 2007: 7-11.
- [21] 田子龙. 高炮炮弹无损检测系统的设计与实现[D]. 沈阳: 东北大学, 2008: 5-6.
- TIAN Z L. The design and realization of aerogun shell defect detection [D]. Shenyang: Northeastern University, 2008: 5-6.
- [22] 全洪渊. 火炮弹体表面缺陷检测系统的设计与研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2007: 5-8.
- QUAN H Y. The design and research of artillery bomb surface defects detection system [D]. Chongqing: Chongqing University, 2007: 5-8.
- [23] 邵思杰, 曹勇, 王磊. 无损检测技术在弹药质量检测中的应用[J]. 火力与指挥控制, 2006, 31(增刊): 39-41.
- SHAO S J, CAO Y, WANG L. Application of NDT in the detection of the quality of ammunition [J]. Fire Control and Command Control, 2006, 31(Suppl.): 39-41.
- [24] 鄢勇, 严志坚, 张卫民, 等. 一种新型金属材料微细槽孔结构电加工方法[J]. 新技术新工艺, 2013(6): 8-11.
- YAN Y, YAN Z J, ZHANG W M, et al. Analysis of a new machining method for micro hole and slot on metal [J]. New Technology & New Process, 2013(6): 8-11.
- [25] 霍利瑞. 战斗部壳体用  $\beta 20C$  钛合金精细组织调控及性能研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015: 1-10.
- HUO L R. The research of preparation and penetration performance of warhead casing material of new type titanium alloy [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015: 1-10.
- [26] 李德元, 王洋, 万仁毅, 等. 激光加工弹体材料 50SiMnVB 脆性带的对比[J]. 沈阳工业大学学报, 2015, 37(3): 278-282.



- LI D Y, WANG Y, WAN R Y, et al. Comparison in brittleness belt of laser processed shell material 50SiMnVB [J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2015, 37(3): 278-282.
- [27] 赵建政, 杨道明. 空冷贝氏体钢在弹体上的应用浅探[J]. 华北工学院学报, 1998, 19(1): 64-66.
- ZHAO J Z, YANG D M. The primary exploration of air-cooling bainite steel for granade [J]. Journal of North China Institute of Technology, 1998, 19(1): 64-66.
- [28] 李硕, 王志军, 徐永杰, 等. 热处理对弹体材料侵彻能力影响的分析[J]. 兵工学报, 2014, 35(增刊2): 78-82.
- LI S, WANG Z J, XU Y J, et al. The effect of heat treatment on penetration performance of projectile material [J]. Acta Armamentarii, 2014, 35(suppl. 2): 78-82.
- [29] 卢海涛, 李伟兵, 王晓鸣, 等. 热处理对弹体材料组织与性能的影响研究[J]. 机械制造与自动化, 2016, 45(2): 21-24.
- LU H T, LI W B, WANG X M, et al. Research on influence of heat treatment on microstructure and mechanical property [J]. Machine Building & Automation, 2016, 45(2): 21-24.
- [30] 李大旭, 张宝红, 张治民, 等. 弹体温成形技术[J]. 精密成形工程, 2010, 2(3): 6-8.
- LI D X, ZHANG B H, ZHANG Z M, et al. Warm forming of projectile body [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2010, 2(3): 6-8.
- [31] 宋瑞华, 聂兰启, 王洪伟. 堆焊技术在弹体变薄拉伸凹模制造中的应用[J]. 模具制造, 2014(10): 31-32.
- SONG R H, NIE L Q, WANG H W. Application of hardfacing technology in the projectile ironing matrix manufacturing [J]. Die & Mould Manufacture, 2014(10): 31-32.
- [32] DOBBS E R. Electromagnetic generation of ultrasonic waves in metals [J]. Journal of Physics and Chemistry of Solids, 1970, 31(8): 1657-1667.
- [33] OGI H. Field dependence of coupling efficiency between electromagnetic field and ultrasonic bulk waves [J]. Journal of Applied Physics, 1997, 82(8): 3940-3949.
- [34] COAKLEY K J, CLARK A V, HEHMAN C S. Empirical modeling of electromagnetic acoustic transducer data [J]. Measurement Science & Technology, 2000, 11(3): 193-200.
- [35] LUDWIG R, YOU Z, PALANISAMY Z. Numerical simulations of an electromagnetic acoustic transducer-receiver system for NDT applications [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1993, 29(3): 2081-2089.
- [36] MIRKHANI K, CHAGGARES C, MASTERSON C, et al. Optimal design of EMAT transmitters [J]. NDT & E International, 2004, 37(3): 181-193.
- [37] OHTSUKA Y, YOSHIMURA T, UEDA Y. P2E-6 new design of electromagnetic acoustic transducer for precise determination of defect [C]//IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings. New York, 2007: 1609-1612.
- [38] YAMADA H, YANO Y, UDAGAWA T. Development of the phased array system for angle beam testing [J]. Nippon Steel Technical Report, 2004(89): 28-32.
- [39] JIAN X, DIXON S. Enhancement of EMAT and eddy current using a ferrite back-plate [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2007, 136(1): 132-136.
- [40] LEGENDRE S, MASSICOTTE D, GOYETTE J, et al. Wavelet-transform-based method of analysis for lamb-wave ultrasonic NDE signals [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2000, 49(3): 524-530.
- [41] KUBINYI M, KREIBICH O, NEUZIL J, et al. EMAT noise suppression using information fusion in stationary wavelet packets [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2011, 58(5): 1027-1036.
- [42] KAŽYS R, VOLEIŠIS A, VOLEIŠIENE B. High temperature ultrasonic transducers: Review [J]. Ultragarasas (Ultrasound), 2008, 63(2): 7-17.
- [43] HERNANDEZ-VALLE F, DIXON S. Pulsed electro-magnet EMAT for ultrasonic measurements at elevated temperatures [J]. Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2011, 53(2): 96-99.
- [44] HERNANDEZ-VALLE F, DIXON S. Initial tests for designing a high temperature EMAT with pulsed electro-magnet [J]. NDT & E International, 2010, 43(2): 171-175.
- [45] 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]. AIP Conference Proceedings, 2009, 1096: 1711-1718.
- [46] 李明亮, 高广健, 邓明晰. 电磁超声无损检测技术及其应用研究进展 [J]. 声学技术, 2012, 31(4): 363-366.
- LI M L, GAO G J, DENG M X. EMA nondestructive testing technology and its application progress [J]. Technical Acoustics, 2012, 31(4): 363-366.
- [47] 陈鹏, 韩德来, 蔡强富, 等. 电磁超声检测技术的研究进展 [J]. 国外电子测量技术, 2012, 31(10): 18-21, 25.
- CHEN P, HAN D L, CAI Q F, et al. Research progress in electromagnetic acoustic testing [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2012, 31(10): 18-21, 25.