

Comprehensive Magnetic Powder and Penetration Testing for Surface Defects in Civil Air Defense Equipment

Yuchen Yang

Inner Mongolia Product Quality Inspection Institute, Hohhot, Inner Mongolia, 010070, China

Abstract

Civil air defense equipment serves as critical components for wartime air defense and peacetime disaster prevention. Surface defects in these devices can significantly compromise protective effectiveness, while single-method testing has inherent limitations. This study proposes an optimized integrated testing protocol through four dimensions: improving detection accuracy and efficiency, streamlining application processes, enhancing operator training, and refining quality control standards. The paper first outlines the functions, requirements, types, and application fields of civil air defense equipment, then analyzes the fundamental principles of magnetic powder and penetrant testing. Practical case studies validate the feasibility of the proposed strategy. This research provides practical references for improving surface defect detection quality and ensuring stable equipment operation, while offering significant practical value for standardizing industry testing practices.

Keywords

civil air defense engineering protective equipment; surface defects; magnetic powder testing; penetrant testing; comprehensive testing process; optimization strategy

人防工程防护设备表面缺陷的磁粉与渗透综合检测工艺

杨宇晨

内蒙古自治区产品质量检验研究院, 中国 · 内蒙古 呼和浩特 010070

摘要

人防工程防护设备是保障战时防空与平时防灾的关键构件, 其表面缺陷易导致防护效能下降, 单一检测方法存在局限性, 亟需优化综合检测方案。本文先概述了人防工程防护设备的功能、要求、类型及应用领域, 再分析了磁粉检测与渗透检测的基本原理, 最后从检测准确性与效率提升、应用流程优化、操作人员培训、标准与质控体系完善四个维度, 探讨了磁粉与渗透综合检测工艺的优化策略, 并结合实际案例验证了策略的可行性。该研究为提升人防工程防护设备表面缺陷检测质量、保障设备安全稳定运行提供了实用参考, 对规范行业检测行为具有重要现实价值。

关键词

人防工程防护设备; 表面缺陷; 磁粉检测; 渗透检测; 综合检测工艺; 优化策略

1 引言

人防工程防护设备是战时防空、平时防灾的核心保障, 其表面缺陷易导致防护效能衰减甚至失效, 单一检测方法难以实现缺陷全面检出。本文基于磁粉与渗透检测原理, 结合防护设备特性, 探讨综合检测工艺优化策略, 为提升检测质量、保障工程安全稳定运行提供有力支撑。

2 人防工程防护设备概述

2.1 人防工程防护设备的功能与要求

人防工程防护设备作为保证工程防护效果的关键部件,

其主要功能着重于战时抵御核武器、常规武器产生的冲击波及生化武器的侵害, 同时平时满足应对洪水、地震等突发性灾害的应急防护需要, 为工程内部人员和设施打造安全屏障, 其技术要求涉及从结构设计到投入使用的整个周期, 具体而言, 结构强度需在承受极端载荷时具备抵抗变形和断裂的能力以保证受冲击时防护完整性不丧失, 密封性能必须达到严格密闭程度以彻底阻断有毒介质、放射性物质及水体的渗入途径, 耐久性要适应长时间储存条件、温湿度变化、腐蚀等复杂环境以始终保持性能稳定。

2.2 常见的防护设备类型及应用领域

人防工程防护设备依据其功能定位和安装场景形成多种类别, 防护门作为工程出入口关键防线, 有钢筋混凝土、钢结构等不同材质以匹配不同防护等级要求, 密闭门主要功能为密封隔断, 用于划分工程内部防护分区以防止有害介质扩散, 防爆波活门安装在通风、排烟口, 遭冲击波作用时能

【作者简介】杨宇晨 (1989-), 男, 中国内蒙古呼和浩特人, 硕士, 工程师, 从事建材产品, 人民防空工程结构和人民防空工程防护设备的检验检测研究。

自动关闭以保护内部通风系统安全，封堵板用于临时封闭预留孔洞或破损部位以确保工程防护连贯性，此外还包括防爆波阀门、过滤吸收器等辅助设备，共同为通风、给排水系统防护性能提供配套保障。

3 磁粉检测法与渗透检测法的概述

3.1 磁粉检测原理

磁粉检测是一种针对铁磁性材料、主要探查其表面、接近表面区域缺陷的无损检测手段，关键原理是利用铁磁性材料磁化后产生的磁阻变化，实施检测操作时借助专门磁化设备让工件内部产生均匀分布磁场，若工件内部出现裂纹或气孔等问题，缺陷区域磁阻明显增大，磁力线变形并从表面逸出形成漏磁场，此时将干式磁粉或湿式磁悬液施加在工件表面，磁粉在漏磁场吸引力作用下向特定方向吸附聚集形成能清晰呈现缺陷形态的磁痕，检测人员通过直接肉眼观察或借助辅助成像设备识别这些磁痕以准确判断缺陷位置、形状、延伸走向，需注意这种检测方法依赖材料铁磁性特点，对开口及浅表层缺陷检测灵敏度较高。

3.2 渗透检测原理

渗透检测是依靠液体毛细作用对材料表面开口缺陷进行检测、不受材料磁性、导电性能影响的检测方式，具体检测流程为，先对工件表面进行前期处理，预处理后在工件表面涂抹高渗透性渗透剂，渗透剂靠毛细作用进入各种表面开口缺陷，渗透结束后清洗掉工件表面多余渗透剂，接着涂抹显影剂，显影剂凭借毛细吸附作用将缺陷内部渗透剂引导到工件表面形成能清晰显示缺陷的痕迹，最后检测人员通过肉眼观察或借助荧光检测仪器清楚识别缺陷各项具体特征，该检测方法适合金属及非金属等多种材质材料，重点在于精确找出材料表面开口缺陷。

4 人防工程防护设备表面缺陷检测磁粉与渗透综合检测工艺的优化策略

4.1 提高表面缺陷检测的准确性和效率

若要提高表面缺陷检测工作的精准程度与效率水平以达成系统性优化目标，需从检测全流程关键环节入手，其中开始检测前对物体表面展开预处理是极其重要的基础性工作，应依据防护设备表面实际情形选择机械打磨、化学清洗或超声波除污等手段彻底清除油污、锈蚀、涂层、氧化皮等各类杂质，目的是确保缺陷表面与检测介质全面接触，避免杂质遮蔽缺陷或干扰介质渗透能力及磁粉吸附效果，同时把表面粗糙度控制在合理范畴内，既保证检测介质与缺陷有效相互作用，又防止过度处理损伤设备本身；检测参数的精确配置是整个检测工作核心要点，要结合防护设备材质特性、构造特点及对可能出现的缺陷类型的预先判断，有针对性地调整磁粉检测的磁化方式与强度、渗透检测的渗透剂类型、渗透时间、清洗时间、显影时间等参数；对于应力集中部位的微小裂纹，可采用荧光渗透剂与磁粉检测相互交叉验证方

式，借助两种方法相互补充特性降低漏判风险；此外，引入数字化辅助技术能进一步提升检测效能，通过运用磁粉检测图像采集系统、荧光渗透检测观测仪等相关设备对检测痕迹量化分析并保存，减少肉眼判断产生的主观误差，同时达成检测结果可追溯及规范化管理目的。

某人防工程检测机构在对一批钢结构防护门进行表面缺陷检测时，因预处理不彻底致3处微小裂纹未检出，优化后检测团队先利用角磨机对防护门焊缝、门轴等关键部位机械打磨，再用无水乙醇洗净表面残留杂质，确保表面粗糙度达 $Ra1.6 \mu m$ 以下，依钢结构材质特性，将磁粉检测磁化电流调至300A，选红磁粉磁悬液，渗透检测用荧光渗透剂并延长渗透时间至15分钟，同时引入数字化成像设备，对磁痕与渗透痕迹进行图像采集及对比分析。

4.2 优化磁粉与渗透检测的综合应用流程

为使磁粉检测与渗透检测在综合运用流程上得以优化，需依据这两种检测方法各自的技术特点及防护设备实际检测时的具体需求，搭建一套科学合理的检测逻辑，明确检测顺序对防护设备极为关键：针对铁磁性材质的防护设备应遵照“先磁粉、后渗透”准则，即先借助磁粉检测排查防护设备表面及接近表面处的各种缺陷，再运用渗透检测对磁粉检测可能遗漏的开口缺陷做补充检测，以达成缺陷检测全面覆盖；对于非铁磁性材质或复合材质的设备，则以渗透检测为主并结合超声检测等其他办法辅助验证。将检测区域差异化划分是提高检测效率的重要途径，需依照防护设备的受力状况及功能重要程度把设备划分为关键区域和非关键区域：门轴、锁闭机构、焊缝等应力集中部位作为关键区域采用“磁粉+渗透”双重检测模式，非关键区域依据材质特性选取单一检测方法以避免过度检测造成资源浪费。检测后的处理流程规范化同样不可轻视，检测结束后要及时用专门清洗剂清除设备表面残留的磁粉和渗透剂，防止残留介质长时间附着导致设备腐蚀，同时详细记录检测过程中设备的相关参数、操作具体步骤、缺陷位置、形态等各类信息，为后续维修整改及质量追溯提供完整依据。

以某地下交通枢纽人防段的防爆波活门检测项目为例，原检测流程未明确检测顺序与区域划分，采用“全面双重检测”模式，不但检测效率不高，还因流程混乱致使1处焊缝开口裂纹未能被判断出来；优化后，检测团队首先明确检测顺序，因防爆波活门主体是铁磁性钢结构，先开展磁粉检测再进行渗透检测，同时划分检测区域，将活门叶片焊缝、铰链连接部位等关键区域列为双重检测对象，把叶片非受力区域等非关键部位列为磁粉单一检测对象，检测完成后，先用专门磁粉清洗剂去除表面磁粉，接着用清水冲洗渗透剂残留，最后用干燥的布擦干设备表面。

4.3 加强操作人员的培训与技术指导

强化操作人员培训及技术指引作为综合检测工艺切实落实的重要人力保障，打造一套完整且系统的培训体系是基

础工作，其中理论培训涵盖人防工程防护设备的结构特点、材料特性、常见缺陷类别及其形成原因，磁粉与渗透检测的基本原理、技术特性、适用范围及操作风险，同时深度阐释国家有关检测标准和规范，实操培训聚焦检测设备正确使用方式、检测参数调整手段、表面预处理实际操作技巧、缺陷痕迹辨别与判定等关键技能，以保证操作人员兼具理论知识与实际操作能力，将有针对性的实操训练与常态化技术指导相结合为提升技能要点，通过挑选具备典型缺陷的防护设备试件开展模拟检测，使操作人员在类似实战场景锻炼识别缺陷、调整参数、处理异常状况的能力，运用建立“老带新”传承办法、邀请行业内专家举办现场指导与技术讲座、定期组织技能交流研讨会议等途径协助操作人员解决实际工作难题，此外建立严格考核与上岗制度，定期对操作人员理论知识、实操技能及职业素养进行综合考核，仅考核达标人员可上岗工作并将考核结果与岗位绩效相联系以激发其学习积极性和责任意识。

某省级人防工程质量检测中心曾因操作人员技能水平不一致检测结果一致性不理想且多次出现缺陷判断失误，为解决此问题构建系统培训体系，理论培训开设《人防工程防护设备基础知识》《磁粉与渗透检测原理及应用》《检测标准规范解读》等课程，采用线上学习与线下授课结合形式确保操作人员全面了解理论知识，实操培训挑选含裂纹、气孔、夹渣等典型缺陷的钢结构防护门试件让操作人员分组进行全流程模拟检测，由经验丰富的高级技师现场指导重点纠正参数调整不合理、痕迹识别不正确等问题，同时建立“老带新”机制给每位新员工配备一名资深技师作导师进行为期6个月全程跟踪指导，每月邀请行业专家举办1次技术讲座，每季度组织1次技能考核。

4.4 完善相关检测标准和质量控制体系

通过完善相关检测标准及质量控制体系，构建起具备“标准细致化、质控形成闭环、追溯能够实现”特点，作为规范综合检测行为、保障检测质量的制度性支撑的规范化管理体系；着眼于人防工程防护设备特殊性质，以现有磁粉检

测、渗透检测国家标准为根基，制定出对综合检测适用范围、工艺具体步骤、参数可选区间、缺陷评定分级标准、结果判定相关规则清晰明确，使检测流程与技术要求统一，防止因标准不清晰致检测行为差异的“磁粉+渗透”综合检测专项操作规范；构建覆盖从检测设备、材料采购验收、定期校准维护，到检测前设备调试、试件预处理验证，再到检测中工艺执行监督、参数实时监测把控，直至检测结果双人交叉复核、检测报告三级审核签发整个检测链条，每个环节设立清晰明确质量控制要点及验收标准，形成“事先预防、事中把控、事后追溯”质量控制闭环的全流程质量控制体系；通过建立电子检测档案详尽记录检测设备详细信息、操作人员具体情况、检测时间、检测涉及参数、缺陷相关数据、整改实际情况等内容确保整个检测过程可追溯，每隔半年针对检测数据展开统计分析，归纳总结缺陷产生规律、检测工艺问题及质控体系薄弱环节，再有针对性地优化检测标准与工艺流程，推动检测质量不断提升，实现质量追溯与持续改进机制常态化运行。

5 结语

人防工程防护设备的安全运行依赖精准高效的表面缺陷检测，磁粉与渗透综合检测模式有效弥补了单一方法的局限性。本文提出的检测精度提升、流程优化、人员赋能及标准完善等策略，为行业实践提供了可行路径。该研究对规范检测行为、保障工程防护效能具有重要现实意义，未来可进一步探索智能化技术与综合检测的深度融合，持续迭代检测技术水平。

参考文献

- [1] 任斌向,郭卫萍.人防工程地下室大面积渗漏原因分析与修补施工[J].城市建设理论研究:电子版,2012,000(033):1-4.
- [2] 叶中豹,吕琳,孙晓旺,等.一种用于人防工程新型空壳颗粒复合防护材料:CN201610145506.0[P].CN107188612A[2025-11-08].
- [3] 靳学峰,龚贵福,张亮,等.一种人防门框垂直度调节装置:CN202222017955.0[P].CN217734925U[2025-11-08].