

真空氦检漏技术在 ITER 项目中的应用

李卫平, 江国焱, 罗 炜, 方仁俊

(东方电气(广州)重型机器有限公司, 广州 510000)

摘 要: 包层屏蔽块是国际热核聚变实验堆(ITER)项目的重要组成部分。每个屏蔽块都需要进行真空热氦检漏, 以确保其密封性能。提出了一种利用真空热氦检漏系统进行高灵敏度检测的方法, 该系统可以使包层屏蔽块去除自身的杂质气体来规避干扰, 并通过提高环境温度和屏蔽块内部和外部之间压力差的方式来提高氦原子的活性以提高检测灵敏度。该方法可在检测环境温度为 250 °C, 环境压力为 1×10^{-5} Pa, 产品内部氦气压力为 4 MPa 的条件下, 实现系统灵敏度为 10^{-11} Pa·m³·s⁻¹ 数量级的氦气泄漏检测。试验结果表明, 该技术具有高自动化和数据可追溯的优点, 可避免产品自身释放的杂质气体带来的影响, 对细微泄漏具有较高的检测灵敏度。

关键词: 国际热核聚变反应堆; 真空; 热氦检漏; 自身放气; 包层屏蔽块

中图分类号: TG115.28 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-6656(2023)06-0001-06

Application of vacuum hot Helium leak testing technology for ITER project

LI Weiping, JIANG Guoyan, LUO Wei, FANG Renjun

(Dongfang Electric(Guangzhou) Heavy Machinery Co., Ltd., Guangzhou 510000, China)

Abstract: The blanket shield blocks is an important part of the International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER). In order to ensure its sealing performance, each shield block needs to be taken a vacuum hot Helium leak testing. A method for high-sensitivity examination using a vacuum thermal helium leak test system was proposed in this paper. The shield blocks can remove its own impurity gas to avoid interference and increase the activity of Helium atoms by increasing the environment temperature. The examination sensitivity was improved by increasing the pressure difference between the inside and outside of the shield block. The sensitivity of this method can realize the helium leak test with the system sensitivity of 10^{-11} Pa·m³·s⁻¹ orders of magnitude under the conditions of examination environment temperature of 250 °C, ambient pressure of 1×10^{-5} Pa, and products internal helium pressure of 4 MPa. The results indicated that the technology had a high degree of automation and data traceability, which can avoid the influence of the product's own outgassing on the examination, and had high sensitivity to the examination of subtle air leakage.

Key words: ITER; vacuum; hot helium leak testing; out gassing; blanket shield block

国际热核聚变实验堆(ITER)是目前全球规模最大、影响最深远的国际科研合作项目之一, 其将建造一个极为复杂的高真空系统^[1]。包层屏蔽块是 ITER 重要的组成部分, 其位于真空室与第一壁板之间, 基本功能是屏蔽中子, 对真空室和外部设备起

保护作用。为保证其真空屏蔽性能, 需对每一个包层屏蔽块进行热态真空高温热氦检漏(以下简称真空热氦检漏)^[2]。

包层屏蔽块实际运行的工况为高温高压高真空状态, 验收漏率高达 2.69×10^{-10} Pa·m³·s⁻¹ (1×10^{-10} Pa·m³·s⁻¹ 对空气漏率), 技术实现难度极大。同时其具有复杂的内部通道, 常规的检漏工艺与设备无法满足此类产品内部管道系统的检验要求。为此, 提出了一种利用真空热氦检漏系统进行高灵敏度检测的方法, 该系统可以使包层屏蔽块去除自身

收稿日期: 2022-11-08

作者简介: 李卫平 (1993—), 男, 本科, 工程师, 主要从事无损检测的相关研究工作

通信作者: 李卫平, 29344081@qq.com

的杂质气体来规避干扰,并通过提高环境温度和屏蔽块内部和外部之间压力差的方式来提高氦原子的活性以提高检测灵敏度。

1 真空热氦检漏系统

包层屏蔽块内部通道结构如图 1 所示,需要对其内部复杂通道进行检漏。真空热氦检漏系统简称 HLTS(结构示意见图 2),主要由以下系统组成:① 真空系统;② 检测系统;③ 电加热系统;④ 控制系统与机械传动机构。

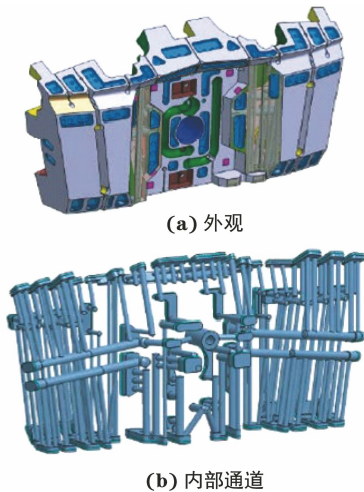


图 1 包层屏蔽块内部通道结构

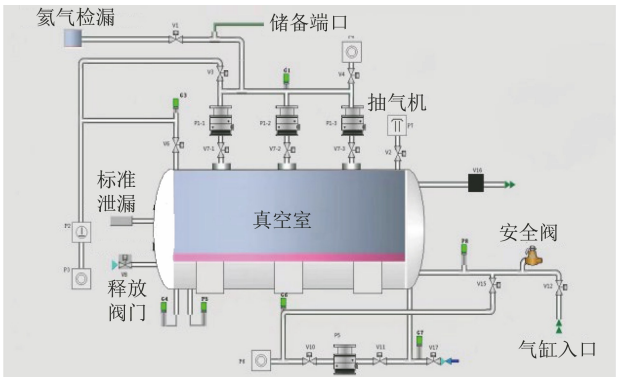


图 2 真空热氦检漏系统结构示意图

1.1 真空系统

真空系统包括真空室、舱门和抽气组件等。真空室的主体材料选用自然解吸现象不明显、放气速率较低的材料^[3],同时材料表面粗糙度 Ra 小于 1.6,以确保整套系统的高真空特性。其次,结构上采用夹层设计,以提高保温性能且能保证设备的耐压能力。

舱门密封同样使用双层耐高温橡胶结构,以隔绝空气对真空室的渗透。

真空室内部可容纳包层屏蔽块中最大尺寸的模

块,且留有足够空间余量确保包层屏蔽块处在真空室均温区内。除此之外,真空室上还设置有热电偶接口、真空计接口、压力传感器接口、标准漏孔接口等,所有接口在常温和高温状态下均能保持良好的密封性能。

抽气组件包括真空室抽气泵组、舱门抽气泵组和包层屏蔽块内部水冷回路抽气泵组。真空室抽气泵组有 2 条抽气通道,一条用于粗抽,另一条用于精抽。舱门抽气泵组包含 1 个前级泵和 1 个分子泵,用于密封槽抽真空。包层屏蔽块水冷回路抽气泵组与舱门抽气泵组使用同一套抽气泵,目的是去除包层屏蔽块水冷回路内部的杂质气体,提高后续充氦时管路内部氦气浓度。

1.2 检测系统

检测系统包括充氦系统、标准漏孔和氦质谱检漏仪等。

充氦系统的作用是在水冷回路内部达到一定真空度的前提下,使氦气通过管路进入包层屏蔽块内部。其升压速率、压力稳定性均有要求,目的是维持整个检测系统的可靠性且不损伤产品的内部结构。在包层屏蔽块存在泄漏的情况下,氦气会通过泄漏通道进入真空室内,最终流入氦质谱仪进行定量分析。氦气的纯度是保证水冷回路中氦分压的重要要素,也是保证检测灵敏度的关键,高纯度的氦气源能最大限度提高检测灵敏度。

标准漏孔是一种在某一温度下具有恒定漏率的装置,是验证整个检测系统能力的参考标准^[4]。根据灵敏度要求,真空热氦检漏使用渗氦型标准漏孔(原理为氦气对石英具有渗透特性),能够达到 $10^{-10} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 数量级的漏率。

当使用检漏仪对标准漏孔进行测量时,其测量值应能代表标称值,这样才能体现检测系统的可靠性。同时,渗氦型标准漏孔的标称漏率随温度变化而存在波动,实际检测中应根据环境温度 T 进行漏率修正^[5]。

氦质谱法是应用最广泛的一种检漏方法,具有灵敏度高、可数字化等优点。质谱检漏法的核心是质谱室,质谱室主要由离子源、分析器、接收器 3 部分组成。氦质谱法检漏基本原理示意如图 3 所示。

质谱室的离子源由灯丝、离化室及离子加速极组成;其作用是使氦气电离,形成一束具有一定能量的氦离子。其分析器能使不同质荷比的离子在磁场中按不同轨迹运动从而彼此分开,仅使氦离子通过挡板上的狭缝而被接收器接收形成氦离子流,并且

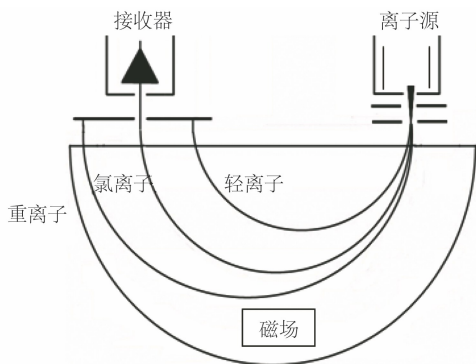


图 3 氦质谱检漏基本原理示意

由测量仪器指示出来。接收器的作用是收集穿过出口电极隙缝的氦离子并通过一个电阻输入到小电流放大器进行放大和测量。

1.3 电加热系统

电加热棒在整个真空室内均匀布置,目的是形成能够完全容纳包层屏蔽块的均温区,实现加热系统在均衡加热和定点加热间的自由切换。

1.4 控制系统与机械传动机构

控制系统采用自动和手动两种模式。控制界面具有较好的可视性和直观性,可在线实时显示检测设备的状态和参数变化;在出现异常时会有声光报警,提醒操作人员及时调整。在使用过程中,工控机全程记录设备的运行数据,可实时记录和调取各类温控、压力数据。

机械传动机构的主要作用是将包层屏蔽块运入和运出真空室,其结构如图 4 所示。工件平台和真空室舱门、外部小车稳定连接,可整体移动。该工件平台具有安装适应性好,平稳可靠,不会翻转或倾倒的特点。充气管直接固定在真空室舱门上,降低了气管频繁移动造成的真空系统不可靠。工件装卸方便快捷,避免了产品被铁素体污染的可能,并且减少了真空室暴露于大气中的时间,保证了检测过程中本底漏率的稳定性。

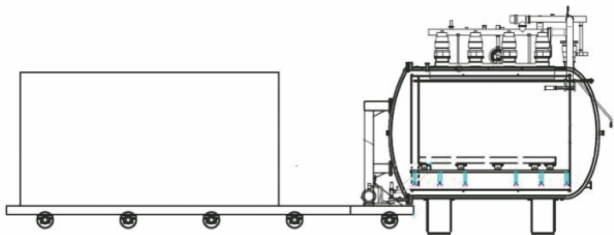


图 4 机械传动机构结构示意图

2 真空技术

真空度的控制是包层屏蔽块热氦检漏工艺的重

要组成部分^[6]。在整个检测过程中,真空室要始终保持低于 10^{-3} Pa 数量级的真空状态。真空度的要求主要体现在以下 3 个方面:① 真空度客观体现了整个检测系统的密封性能;② 如果包层屏蔽块存在泄漏通道,高的真空度能使泄漏出来的氦几乎全部流入氦质谱仪进行定量分析;③ 在高的真空度条件下,处于高温状态时包层屏蔽块受氧化程度将大大降低。

经过综合分析,使用罗茨泵和涡轮分子泵组合的方式可达到抽真空的目的,抽气系统结构如图 5 所示。真空室有 2 条抽气通道,其中一条用于真空室内粗抽,达到前级泵启动条件;另一条包含 1 个用于精抽使真空室内真空度达到分子泵工作压力的前级泵和 3~5 个用于使真空室内真空度达到检测要求的分子泵。

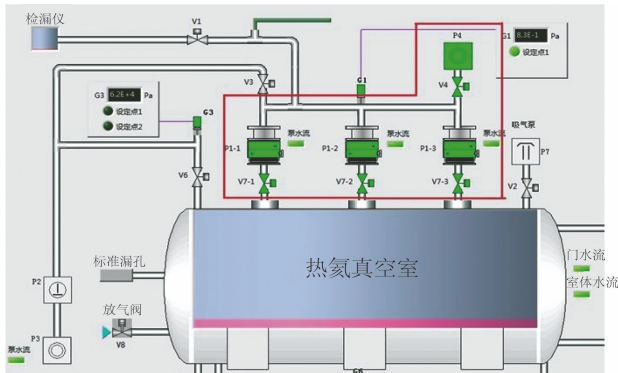


图 5 抽气系统结构示意图

3 本底漏率控制

包层屏蔽块的验收漏率高达 10^{-10} Pa·m³·s⁻¹ 数量级,高验收漏率的一个特点就是要求检测系统本底漏率不能掩盖产品实际漏率。在高温条件下,材料自身放气加剧会导致真空室内其他气体的占比增加,进而影响整个系统的本底漏率值。

气体从材料中自然解析的现象称为放气。对于包层屏蔽块,放气产生的主因是水压试验后残留在材料中的水渍及材料自身在高温高真空环境下离解出金属表层的氢离子。为了减少材料放气对本底漏率的影响,采用以下 2 种技术方案进行解决。

3.1 高温烘烤除气

在开始检测前,包层屏蔽块需要通过高温烘烤进行除气^[7]。烘烤除气分为预烘烤和真空烘烤两个阶段。预烘烤为水压试验后,在检测系统外用加热炉进行烘烤,目的是去除屏蔽块内部管路系统中的残余水。预烘烤过程中同时通入热氮气,将烘烤产

生的污染性气体和杂质排出屏蔽模块,预烘烤操作示意如图 6 所示。

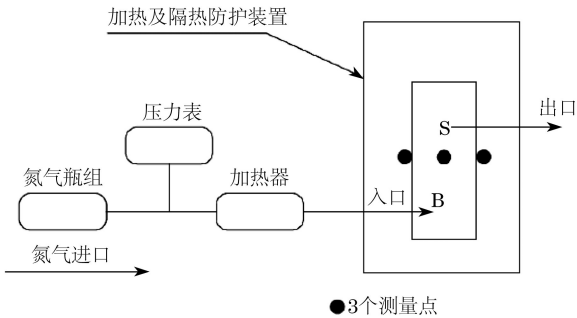


图 6 预烘烤操作示意

预烘烤结束后,将包层屏蔽块放入真空室,进行高温真空烘烤,在真空环境中进一步消除产品表面附着的残余气体。高温真空烘烤工艺具体参数如表 1 所示。

表 1 高温真空烘烤工艺参数

项次名称	温度范围	烘烤要求*
起始温度	室温	—
升温速率	室温~保温温度	部件各测量点最大温差应小于设定值,部件与加热和冷却气体的温度差也应小于设定值
保温温度	320℃≥保温温度≥200℃	—
保温时间	—	大于 24 h

3.2 密封隔离

在舱门的设计中使用双层橡胶密封结构,一方面在夹层中通入循环水对橡胶进行冷却,另一方面在密封槽抽真空,通过中间的真空层隔绝空气的渗透。

4 均温加热技术

热氦检漏试验时,包层屏蔽块部件需经历高温氦气循环和常温氦气循环。如果该模块在试验过程中加热、冷却过快,可能导致温度梯度过大,热应力过高,从而对模块造成疲劳损害,检测时要在检测效率和模块安全性之间取得平衡。因此,根据 ITER 的技术要求,部件各测量点最大温差应小于设定值。

4.1 电加热技术

笔者使用空间分布的电加热棒,实现真空室内的均温加热,保证真空室内的均温区大于包层屏蔽块的最大外形尺寸。均温区内的最大温差不大于 20℃,空载升温到 400℃不超过 1 h。烘烤过程中,

真空室内需保持较高真空度,避免造成产品表面氧化。

4.2 温度监测

通过监测包层屏蔽块在加热或降温过程中最高温度点和最低温度点的温差,并根据温差来调节加热或冷却速率,可有效地防止温差过大导致的变形,降低高温状态下包层屏蔽块的热应力。同时,在包层屏蔽块上布置多个热电偶来监控温度,通过软件模拟加热过程来检测红外辐射分布状态,并以此为参考布置热电偶。温度控制采用 PID 调节(控制系统的一种基本调节方式),控制精度可达±1℃。热电偶分布如图 7 所示。

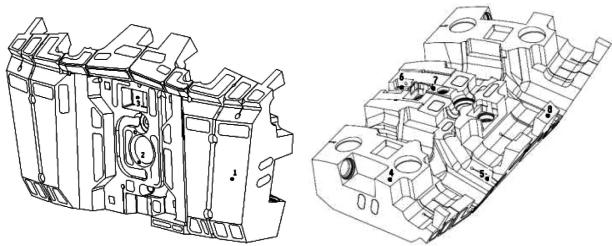


图 7 热电偶分布示意

5 理论推导

5.1 实际漏率的确定

当检测到泄漏信号时,仪器上显示的数值并非包层屏蔽块的真实漏率。这是因为仪器的显示值表示的是从仪器检漏口处测得的泄漏率,实际检测时并不能将包层屏蔽块直接连接至仪器检漏口,而是需要使用波纹管连接到检漏仪。通常,使用对比法经验公式来缩小这种误差,即

$$Q = (I_2 - I_0' / I_1 - I_0) \cdot Q_0 \cdot [1 + \alpha(T_{cold} - T_0)] \tag{1}$$

式中:Q 为实际漏孔的真实漏率;I₂ 为检测过程中检漏仪显示的漏率;I₁ 为标准漏孔的输出指示值;Q₀ 为标准漏孔的标称校正值;I₀ 为系统本底漏率值;I'₀ 为检测时本底漏率;α 为温度系数;T_{cold} 为检测时的室温;T₀ 为标准漏孔标称值测量温度。

5.2 等效漏率理论

计算漏率时,可使用氦等效漏率和空气等效漏率。由于大泄漏率的漏孔很容易检出,所以笔者重点关注的是那些泄漏率很低的漏孔。对于泄漏率很低的漏孔(泄漏率<10⁻⁸Pa·m³·s⁻¹),其气流呈现分子流状态。分子流状态下气体泄漏率与其相对分子质量的平方根成反比。氦等效泄漏率 L_{R氦} 与空气等效泄漏率 L_{R空气} 的转换关系为

$$L_{R\text{氦}}/L_{R\text{空气}}=\sqrt{M_{\text{空气}}}/\sqrt{M_{\text{氦}}}=2.69 \quad (2)$$

式中: $M_{\text{空气}}, M_{\text{氦}}$ 分别为空气、氦的分子质量。

5.3 系统灵敏度的计算

系统灵敏度是指检测系统所能检测出的最小漏率。在包层屏蔽块检测开始前,需要通过标准漏孔来确认检测系统灵敏度是否能满足验收要求。

将标准漏孔(标准漏率为 Q_0)安装在真空室的适当位置,将检漏仪调整在最佳工作状态下,关闭标准漏孔阀,读出检漏仪输出指示的本底噪声 I_n 及本底漏率 I_0 。打开标准漏孔阀,读出检漏仪输出指示的稳定信号值 I 。则系统灵敏度即系统最小可检测信号 Q_{\min} 为

$$Q_{\min}=(I_n/I-I_0)\cdot Q_0\cdot [1+\alpha(T_{\text{cold}}-T_0)] \quad (3)$$

本底噪声是仪器各参数的不稳定性导致的^[8],其反映的是漏率在平衡线上的偏差程度。

6 检测操作与过程

6.1 工件的装载和连接

首先连接真空室与检漏仪,采用喷氦法检测真空室,如有漏点则及时修复。打开真空室闸门,采用尼龙吊带或者带有保护套的钢丝绳吊运包层屏蔽块到真空室台架上,吊运过程中,应注意缓慢匀速。然后,待工件平稳,连接包层屏蔽块进出口管道至真空系统,并在工件表面布置热电偶。最后,使用喷氦法重新检测各接口的密封性能,如有漏点及时修复。

6.2 检测系统校准连接

开启真空系统对真空室抽真空。先开启粗抽泵,抽至极限真空或者分子泵的工作压力时,关闭粗抽泵,开启分子泵组,抽至环境压力为约 10^{-3} Pa 或更低后,接通分子泵组与检漏仪。启动检漏仪,监控检漏仪读数直至其平稳,此时读数可作为本底漏率记录。开启标准漏孔阀门并监测检漏仪直至其读数平稳,记录读数,同时测定反应时间。假设标准漏孔标称漏率为 Q_0 ,则应满足

$$90\% \leq (I_1-I_0)/\{Q_0 \times [1+(T_{\text{cold}}-T_0) \times \alpha]\} \leq 110\%$$

关闭标准漏孔阀门,记录下检漏仪读数恢复至本底水平的时间,该时间为系统的清除时间。

6.3 首次冷氦检漏

系统校准完成后,在常温条件下充氦气对水冷回路加压至 (4 ± 0.2) MPa,并在此压强下保持

15 min。整个过程中,用氦质谱仪分析产品漏率。检漏结束后再次进行系统校准。

6.4 热氦检漏

按照表 1 的要求对包层屏蔽块进行加热,加热完成后进行系统校准,充氦气对水冷回路加压至 (4.0 ± 0.2) MPa,并在此压强下保持 15 min。整个热氦检漏过程执行 3 次压力循环,并用氦质谱仪分析产品漏率。检漏结束后再次进行系统校准,然后通过热辐射的方式将屏蔽块温度降至室温。

6.5 最终冷氦检漏

温度降至室温后,进行系统校准。校准合格后,充氦气对水冷回路加压至 (4 ± 0.2) MPa,并在此压强下保持 15 min。整个热氦检漏过程执行 2 次压力循环,并用氦质谱仪分析产品漏率。检漏结束后再次进行系统校准。

6.6 验收要求

最大验收漏率不应大于 2.69×10^{-10} Pa·m³·s⁻¹等效氦漏率(1×10^{-10} Pa·m³·s⁻¹对空气漏率)。

7 检测数据分析

为验证高温热氦检漏工艺的可行性,现使用编号为 14156, 14161, 14086, 14180, 14181, 14168, 14178 和 14177 的 8 台包层屏蔽块进行验证。每个包层屏蔽块执行两次冷氦检漏和一次热氦检漏,其温度和压强曲线如图 8 所示。

8 台包层屏蔽块检测过程中的系统灵敏度 Q_{\min} 和实际漏率 Q 结果统计如表 2 所示。

8 结论

(1) 8 台设备氦检漏实际漏率 Q 均小于 2.69×10^{-10} Pa·m³·s⁻¹等效氦漏率(1×10^{-10} Pa·m³·s⁻¹对空气漏率)的要求,检测结果均合格,检测工艺和设备可靠。

(2) 部分实际漏率 Q 数值小于 0,并不代表此时漏率为负,仅能代表检测时的本底漏率 I'_0 。高于检测过程中的仪器显示漏率 I_2 ,间接证明此时产品几乎无泄漏,故造成在本底漏率波动过程中出现 $(I_2-I'_0)$ 小于 0 的情况。

(3) 笔者已采用文章所提技术在数十块包层屏蔽块产品上完成检测工作,总体性能稳定,操作便捷。各项重要参数均满足检漏要求,能避免产品自身放气对检测的影响,对包层屏蔽块细微泄漏的检出率极高。

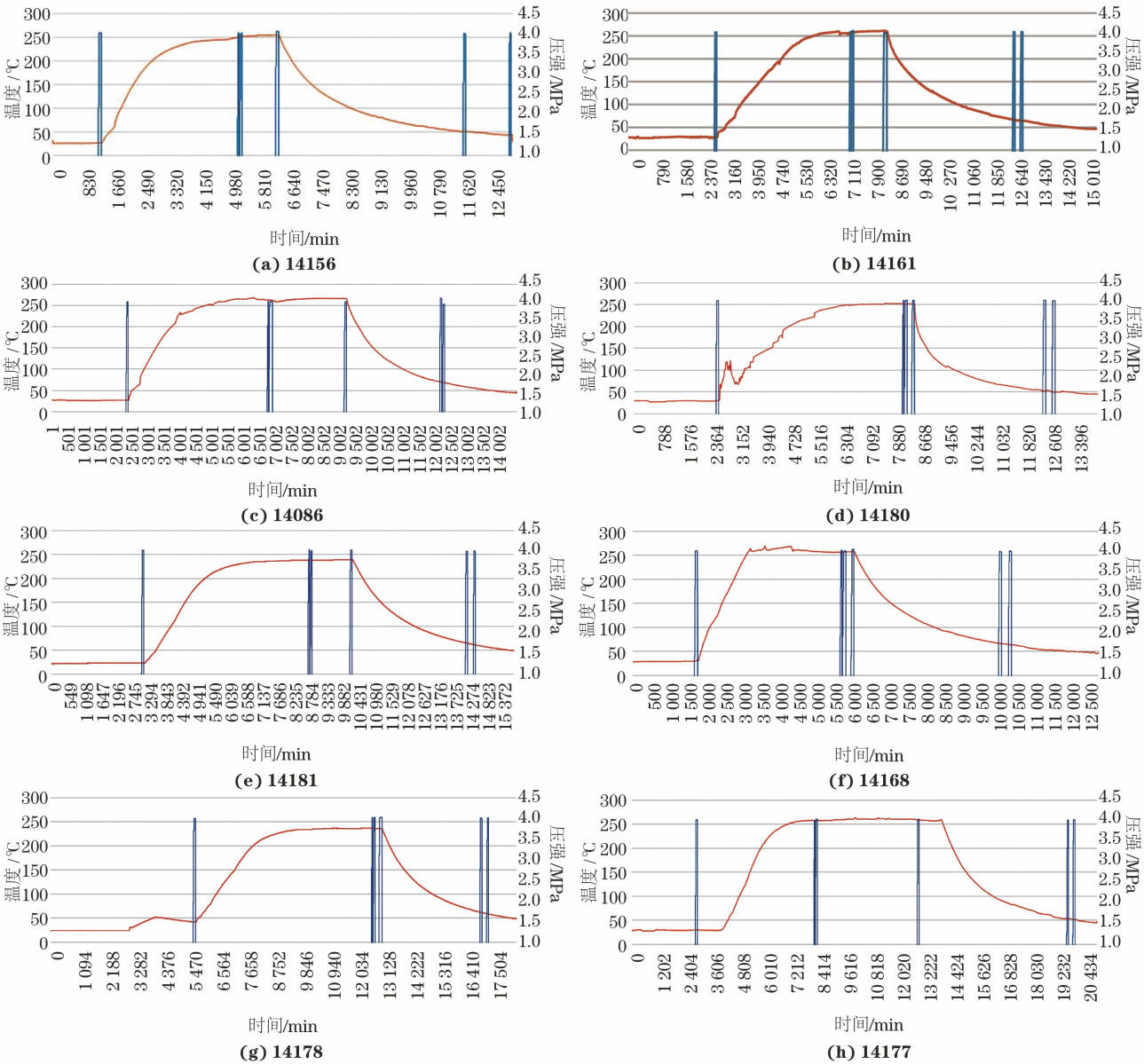


图 8 8 台包层屏蔽块氦检漏的温度和压强曲线

表 2 各包层屏蔽块的检漏数据结果统计

14156			14181		
	Q_{\min}	Q		Q_{\min}	Q
首次冷氦检漏	1.28×10^{-12}	-2.11×10^{-13}	首次冷氦检漏	3.99×10^{-12}	2.00×10^{-12}
热氦检漏	4.82×10^{-11}	-2.01×10^{-11}	热氦检漏	3.92×10^{-11}	-8.81×10^{-11}
最终冷氦检漏	7.10×10^{-13}	6.08×10^{-13}	最终冷氦检漏	2.05×10^{-12}	0
14161			14168		
	Q_{\min}	Q		Q_{\min}	Q
首次冷氦检漏	1.95×10^{-12}	-9.73×10^{-13}	首次冷氦检漏	9.84×10^{-13}	-3.64×10^{-12}
热氦检漏	9.87×10^{-12}	0	热氦检漏	2.07×10^{-12}	6.20×10^{-12}
最终冷氦检漏	2.98×10^{-12}	-7.96×10^{-12}	最终冷氦检漏	1.01×10^{-12}	1.11×10^{-12}
14086			14178		
	Q_{\min}	Q		Q_{\min}	Q
首次冷氦检漏	4.78×10^{-12}	-4.88×10^{-12}	首次冷氦检漏	4.91×10^{-12}	1.58×10^{-10}
热氦检漏	1.39×10^{-11}	-9.90×10^{-11}	热氦检漏	2.93×10^{-11}	1.95×10^{-11}
最终冷氦检漏	3.37×10^{-12}	-5.95×10^{-12}	最终冷氦检漏	3.98×10^{-12}	2.98×10^{-12}
14180			14177		
	Q_{\min}	Q		Q_{\min}	Q
首次冷氦检漏	3.00×10^{-12}	4.30×10^{-12}	首次冷氦检漏	2.84×10^{-12}	-3.79×10^{-11}
热氦检漏	9.85×10^{-13}	2.96×10^{-12}	热氦检漏	3.90×10^{-12}	3.90×10^{-12}
最终冷氦检漏	1.98×10^{-12}	3.66×10^{-12}	最终冷氦检漏	1.98×10^{-12}	1.36×10^{-10}

(下转第 20 页)

无损检测中发现的质量缺陷(见图 6)。

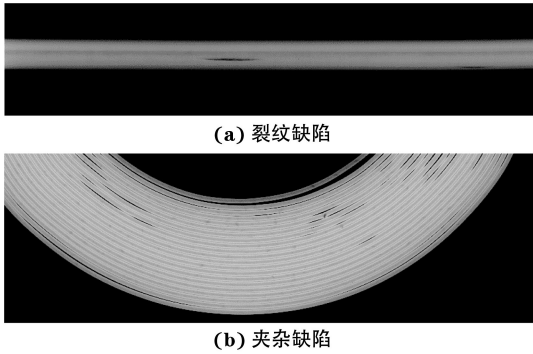


图 6 导爆索 DR 成像检测质量缺陷示例

4.2 原因分析

金属柔性导爆索的制造工艺一般包括金属管装药、金属管拉拔、导爆索成型、导爆索软化、挤塑以及导爆索编织等。首先,在金属管装药工艺中,大多使用压装工艺,即在金属管内填充炸药后再进行多次压装,可能存在装药密度局部不均匀以及金属异物夹杂的问题。其次,在导爆索拉拔工艺中,导爆索容易产生应力集中,而出现裂缝。最后,在自动拉拔工艺过程中的意外停车,也可能造成缩颈等缺陷。

5 结语

针对大长径比索类弯曲半径大,检测空间受限,检测效率低的问题,提出了一种 300 kV 微焦点 DR 数字成像系统结构,利用带状样品移动台和盘状样品旋转台,实现了导爆索的自动透照和图像自动保存,实现了不同放大比下质量缺陷的检测和识别,并对大直径金属柔性导爆索和小直径柔性导爆索的 DR 成像检测进行了试验。结果表明,所提设备检测图像分辨率高,自动化程度高,具备自动牵引装置和偏转机构,大幅提高了检测效率,实现了索类样品多角度的无损检测,为同类产品的无损检测提供了参考思路。

参考文献:

[1] 王华. X 射线数字成像系统及其应用[J]. 计测技术, 2005, 25(6): 5-8.
[2] 刘杰, 曾祥照. X 射线数字成像技术研究[J]. 机电工程技术, 2009, 38(9): 104-106.
[3] 李成钢, 陈大兵, 张建国. X 射线数字成像技术在电力电缆现场检测中的应用[J]. 无损检测, 2015, 37(2): 74-77.

(上接第 6 页)

参考文献:

[1] 冯开明. 可控核聚变与国际热核实验堆(ITER)计划[J]. 中国核电, 2009, 2(3): 212-219.
[2] 湛继明. 全球首台! 中核成功研制人造太阳真空室内部件热氦检漏设备[J]. 中国机电工业, 2018(4): 27.
[3] 董猛, 冯焱, 成永军, 等. 材料在真空环境下放气的测试技术研究[J]. 真空与低温, 2014, 20(1): 46-51.
[4] 李得天, 陈旭, 于红燕, 等. 中国真空计量发展概述

[J]. 真空与低温, 2004, 10(1): 6-16.

[5] 赵澜, 张涤新, 郭美如, 等. 渗氦型真空漏孔漏率的温度修正[J]. 真空与低温, 2007, 13(2): 90-93, 110.
[6] 蔡泽波, 方仁俊, 李选, 等. ITER 屏蔽包层模块热态真空室高温氦检漏[C]//2018 远东无损检测新技术论坛论文集. 厦门: 远东无损检测新技术论坛, 2018.
[7] 颜延风, 田培红, 唐芳群, 等. HL-2A 托卡马克真空烘烤除气性能研究[J]. 真空, 2015, 52(1): 48-52.
[8] 肖立波. 超灵敏检漏系统的性能测试与实时校准[D]. 北京: 清华大学, 2005.

欢迎网上投稿 欢迎订阅 欢迎刊登广告