

现代金属检测技术与寿命管理

西南电管局试验研究所

目 录

发展电力设备诊断技术提高经济效益	李常喜.....1
关于延长锅炉机组寿命和加强诊断技术的探讨	韩小山.....5
声发射技术在电站压力容器监测中的应用研究	阎鸿勋.....9
温度对涡流探伤的影响	郝祥林 译 蔡可沛 校...17
用超声波传感器快速鉴别凝汽器管泄漏	杨白薇 摘译 蔡可沛 校...19
利用扩音器早期预报炉管泄漏	李祖培.....20
电厂锅炉钢管寿命诊断与管理	刘坤才 译.....23
	刘宝华 郝祥林 校
汽轮机寿命的诊断	刘坤才 译.....30
	刘宝华 郝祥林 校
火力发电厂锅炉管的音响泄漏检测法	李 光 译.....35
	刘坤才 蔡可沛 校
国产锅炉机组调峰技术的若干问题分析	王忠渠.....45
调峰机组热应力及疲劳寿命	张宝衡.....51
P ₂ M转子钢的低周疲劳特性	林祯立.....64
过热蒸汽管位移原因、影响、后果	苏允唐 摘译 朱 经 校...71
30万千瓦再热式机组过热器弯管的寿命	郝祥林 译 吴小冬校...78
论汽包锅炉过热器启动时的损坏问题	李蕴嘉 译 刘诗词 校...82
主蒸汽管保温工作的改进	廖静安.....87
发电厂设备构件在蠕变应力作用下残余寿命的判断	罗辉宇 摘译 吴曙笛校...89
延长动力设备金属寿命的途径	郝祥林 编译 蔡可沛 校...95
疲劳损坏时弯管寿命的确定	吴小冬 译 郝祥林 校...96
《中间负荷锅炉的寿命》	杨凡平 郝祥林 校.....102
长气使用后的锅炉主要厚壁耐压钢材的残余寿命	杨凡平译 刘坤才 校.....111
主蒸汽管道监督和寿命预测	华 琼.....119
湖北省高温高压火力发电机组主蒸汽管弯管及导汽管调查报告	
超期运行的主蒸汽管道寿命判废标准及提高其薄弱环节寿命措施的探讨	袁 重.....124
	吴非文.....135

发展电力设备诊断技术提高经济效益

李常禧

回顾近年来的电力设备诊断技术工作，经历过从不认识到认识的宣传启蒙阶段，如今正受到各方面的重视，并逐渐成为运行与维修工作的重要手段。从设备维修的历史看，大体上经过了两个阶段。自十八世纪工业革命以来，针对机器故障实行事后维修制；在二次世界大战前后由于航空及军工的需要，才逐步转向按计划周期进行预防性维修制，在我国则是从五十年代初期，开始推行苏联的mnp。至今它还是我们主要的维修体制。但由于设备日益大型化、连续化、流程化。任何故障都有可能使故障扩大，甚至造成毁灭性的灾害，因此欧美和日本等国家的一些行业已经开始研究和推行以先进技术手段为基础，监测设备状态的预知维修制。根据设备运行的时间，和设备的实际状况确定维修项目。也就是从静态管理发展到动态管理。维修体制的不断改革是工业发展的必然规律。

据文献资料介绍，应用诊断技术实行预知维修可减少事故率75%，降低设备维修费用25~50%。目前我国国营的工交企业有40余万个，总固定资产约值7000亿元，每年用于设备大修、小修与处理故障的费用一般都占固定资产原值的3~5%，采用诊断技术改善设备维修的方式和方法后，一年取得的经济效益可达数百亿元。电力工业是装备型与资金密集型企业，而且是大型流程化生产，因此，必须加快设备诊断技术的开发与应用，使我国电力工业逐渐由预防性维修过渡到预知维修。

设备诊断技术，简称CDT。它的工作对象是设备和由设备群体组成的系统；它的任务是应用科学技术手段检查和监测设备的工作状态量，结合设备的历史状况及运行条件，检查并分析设备的性能及可靠性，如有异常或故障，则应查明原因并预报它的发展和影响，从中找出对策，用一句最普通的话说，就是“设备医学”。

设备诊断技术来源悠久，可以说是从人类学会利用机器设备进行生产的时候开始，就有了用手摸、耳听以及使用一般仪器仪表测试的简易诊断手段。随生产技术的不断进步，诊断技术也在进步，电力生产的四项监督就是由此技术发展起来的，到了本世纪六十年代末，由于电子技术及微机的迅速发展，所以诊断技术也就从原来的简易阶段进入到现代的科学阶段，到七十年代以后基本形成科学诊断的体系，出现了一个划时代的变化。诊断技术和医学一样，都是应用现代科学技术成就，为社会服务的综合性学科。在临床诊断中同样会存在既有传统的简易手段，同时也采用新的科学诊断手段，二者长期并用的状况。科学设备诊断不同于简易诊断之处，除了应用新手段而外，还在于它具有完整的工作步骤和程序。即包括：状态量监测；信号处理；识别和判断；预测及措施等四个重要组成部分。

一、设备运行状态量的检查与监测

一般设备在运行中，都会发出各自特有的信号。这些信号大致可以归纳为：机械信号

(声、光、热、振动、位移)、电磁信号和化学信号,好象人体的脉搏、体温和血压一样。掌握信号量变化规律,无须解体检查就可能判明机器设备内部的状态。而机器一旦停运,这些必要的信号也就无从测试。所以运行中监测诊断,有时比停机解体检查更能早期发现潜伏性的故障。

状态量监测的重点有三个方面:

1、故障征候量的监测

机器设备部件的故障,都有一个从发生、发展到构成故障的过程。在发展阶段,常常伴有各种信号的变化,这就是故障征候。掌握住故障征候就可以预测故障的性质、部位和危险程度。

2、应力的监测

设备部件经常是在机械力、高电压、化学腐蚀等多种应力的复杂作用下工作,而一般设备部件在设计制造中都考虑了承受上述应力的能力。如果应力超过允许值及允许的时间就预示故障的必然来临。监测这些应力的变化,即可预知机器的寿命和故障来临的时刻。

3、设备运行性能的监测或生产过程的状态监测

例如通过对各部位汽温、汽压、汽水流量和发电量的监测、分析与比较、常会发现生产过程或设备性能的异常。

伴随科学技术的不断进步,状态量的检查、监测方法也在不断的发展。以温度监测为例,除了原有的金属膨胀型温度计、热电偶及电阻温度计外,红外测温技术也在普及。红外辐射热象仪的应用,不需要靠近高压带电体,既简易又安全地,检测高压配电联接部分的温度提供了大面积远方测温条件。特别是对跨越山区的输电线路的航空巡视,已经在华北、东北和河南电力系统开始试测。红外热象仪按结构原理可分为光机扫描热象仪,简称红外热成象仪和热释电摄像管热象仪简称热电视,前者精度较高,温度分辨能力可达 $0.1 \sim 0.3^{\circ}\text{C}$,但需要液态冷却。热电视温度分辨率为 1°C ,虽然性能差,但具有价格便宜,使用方便的优点。以上两种诊断仪器现在国内都已生产。

对于高速回转机械,监测其润滑油中含有的金属磨屑含量,判别轴承等部位的磨损趋势是诊断回转机械故障的有效方法,用光谱分析法能在30秒左右的时间内分析出油中16种元素的含量,和铁谱仪可以快速测定铁系磨屑的粒径分布。在航空工业已有多年的应用经验,电力工业尚待加强这一方面的工作。

在电气绝缘监测方面,电力工业多年来通过绝缘保安试验,检出大量的设备隐患,积累了比较多的经验。当前,一方面要努力掌握高电压、大容量电气设备的监测技术,与此同时,还须对运行中电气设备有针对性地开展在线连续监测工作。其监测方法包括连续分析绝缘油中含有的可燃性气体量,找出故障征候,以及连续监测泄漏电流或介质损失角以判明绝缘状态。

声发射技术是一种新发展起来的监测手段。它可以在受压容器水压试验时,检测出由于金属内部缺陷释放出来的应变能。如果在规定压力下有大量的声发射信号,则说明某种危险

缺陷的存在，应立即检修。还可根据多个监测探头接收到的信号强弱不同，初步判断出缺陷的部位。

二、信号处理技术

在故障征候信号中，常常是规律的信号和随机的信号合成，如果不经加工处理就会给分析判断工作带来极大的困难。也可能导致错误的结论。

信号处理技术，包括最基本的算术平均，加权平均以及均方根等方法，把随机信号的影响，减小到必要的程度。借助于微机进行信号采样，A/D变换与快速付里叶转换(Fast Fourier Transform)的计算方法对振动和声音等较复杂的信号，多采用频谱分析和波形分析。把以时间为横坐标的信号量变为以频率为坐标的函数曲线。由于FFT转换需要大量数学计算，非常复杂，所以很多部门都是采用信号分析仪。目前国内已使用的信号分析仪有SD-375型、本特利的3582A型和亚特兰大的M-6000仪器等。

三、识别和判断

监测到的信号，虽经过加工处理，但仍然只是一个信号，它本身对生产活动不能直接提供指导性的意见，重要的是必须经过识别和判断的过程。才能揭示出机器设备的内部状态。识别和判断技术大体上有两类方法：一种是理论方法。从机器设备部件的结构原理，材质强度与故障征候的相互关系中进行理论推算。另一种是经验方法，从积累过去出现过的故障征候与实际故障状态的关系进行识别判断。就好象中医看病一样，不同的医生有不同的经验，很可能得到不同的结论。现代技术已可借助微机把许多有经验的专家经验加以总结，输入计算机储存，构成知识库，组成专家系统。这种系统应具备学习功能。可以方便地增加、修改和删除知识库的知识。这种系统还能高度仿真各个专家辩证施治的思维方法，使诊断水平不断提高。因为国际和有关部门的技术规定，也都是来自三大革命的实践，所以是进行分析和判断的有力依据。

四、预测及处理技术

所谓预测，就是能对被诊断出来的故障，在不采取任何措施的情况下，预测继续运行下去会产生什么样的后果。以及可以继续运行多长时间。

处理技术应当包括临时护理方案、加强监视的方案，以及通过大修彻底修复的措施。

以上四个步骤是一个循环，一个复杂的故障征候不是通过一个循环就能正确找到症结的。往往需要多次诊断的反复循环。逐步加深认识的深度。

1976年4月，美国海军研究室主持召开了机械故障预防小组MFPG成立大会。标志着诊断技术开始应用于设备领域。日本曾在1971年就提出“诊断技术”这一名词术语，从概念上明确了诊断技术的含意。总之在世界上诊断技术也不过只有二十余年的历史，还处于开始阶段，今后的任务还很艰巨。

诊断技术大体上是在七十年才开始传入中国，最初，在科研部门和大专院校中传播，一直到1983年日本和瑞典专家来华讲学和中国派代表团出国考察才逐渐被更多人所认识为

宣传和开发，应用诊断技术的专业协会也相继成立。1984年在水电设协领导下成立了电力设备诊断技术专业协会，去年8月华北电管局成立华北电力设备诊断技术协会。协会的任务是：通过技术合作和信息交流，加速诊断技术在我国电力工业的开发和应用，使发供电设备发挥最大经济效益，防止由于事故给国民经济造成重大损失。协会的主要宗旨是面向基层，联合各发供电企业和有关部门共同致力于诊断技术的开发和应用。协会计划在交流设备诊断技术信息工作中将陆续出刊一些有关诊断技术的文章，报导国内设备诊断技术的新发展，介绍基层企业应用设备诊断技术的文章，报导国内设备诊断技术的新发展，介绍基层企业应用设备诊断技术的实践经验，还准备搜集一些设备故障的诊断案例，供有志于设备诊断技术的同志们参考。

关于延长锅炉机组寿命和 加强诊断技术的探讨

韩小山

我国电力工业正以前所未有的建设速度大量新建高参数大容量机组，以满足四化建设的需要。由于装机容量仍然不能满足用电的增长，电力供应在目前以及今后一段时间仍将处于紧张状态。从华北电网的情况看，运行已达30~40年的中低压小容量机组仍然在运行。这些机组由于已接近或超过一般通称的设计使用寿命，以及由于这些老机组当时的设计和工艺水平低，材料的冶金工艺差等原因，被迫停机率增加，同时由于这些老机组的参数低，能源消耗高，每年要多耗费大量的宝贵燃料。

另一方面随着用电构成的变化，电网负荷的高峰低谷差不断增长，国内几个主要电网都采取将原来按基本负荷设计机组改为带中间负荷或两班制运行。目前弄清这些机组的寿命消耗和残余寿命是这些老机组承担调峰任务和延长这些老机组使用寿命的重要课题。为利用包括10~20万千瓦的老机组调峰和发电，必须对这些老机组进行必要的更新改造、寿命管理和诊断技术的研究，以适应电力工业生产的需要。

本文拟就这些问题进行初步的探讨。

一、国内外对延长老机组寿命的研究简况

近年来，美、日、英、西德等国家在新建发电设备的同时，都非常重视对老机组的更新改造，强调现有设备的安全可靠性，计划把已往使用30~40年的老机组延长到50~60年，按照他们的估算延长老机组使用寿命与新建电厂相比，投资可减少约一半，建设周期可减少三分之二。当然对于运行多年的老机组来说，总的趋势仍然是随着运行时间延续，寿命被消耗或其他原因而退役。

以美国电力研究协会（EPRI）为代表的一些单位，在研究延长老机组使用寿命的工作中，近年来以单独或共同合作的方式，开展主要承压部件的诊断技术的研究，并已取得了很大的进展，有些诊断技术已达到了应用的阶段。有些国家的公司已看到了中国在这个领域的潜在市场，开始与我网进行火电厂老机组的更新改造以延长使用寿命的接触。

我国在延长老机组使用寿命和开展诊断技术的研究方面也做了大量工作。在我国尚未制定统一的园筒形受压部件低周疲劳寿命计算标准的情况下，电力部门的一些研究单位和发电厂，制造部门的研究单位和制造厂和高等学校等单位，也进行大量的研究工作，提出了调峰机组锅炉汽鼓低周疲劳的计算方法等论文。在延长主蒸汽管道寿命和诊断承压部件的寿命方面，经过多年的选点试验和实际的试验研究，已经可以把原设计寿命为10万小时以上；近年来也开始了主蒸汽管道的弯头、三通的试验研究；经过分析研究对于10CrMn-910薄壁管道作出了使用寿命的具体规定，并且在判断主蒸汽管道、弯管、联箱等设备的残余寿命和损坏机理的分析方面取得了卓有成效的研究成果。

二、老锅炉机组的构成和面临的问题

在现装的发电设备中，建国前安装的锅炉大部分已封存或拆除，就华北电网而言，目前

在装锅炉设备大体上可以分为三个时期，三种类型的机组，即

一种为建国前安装的机组，这些机组容量绝大部分在1.5万千瓦以下，目前除仍有少数在运行外，有些未并网运行这些仍在运行的机组除陆续退役或拆除外，已不再是更新改造的对象。

一种为建国后至70年以前安装的机组，这些中压和高压机组，其容量从1.2万千瓦到10万千瓦，这些机组数量多，占电网容量的62%左右，它们既是发电的主力，又是调峰的主力。因此它们是开展延长机组寿命的研究对象，也是诊断技术应用的重点。

一种为70年以后安装的机组，这种机组包括10~32万千瓦的机组，20千瓦以上皆为中间再热机组，包括引进的20万、25万、和32万千瓦机组。这些机组也都是按基本负荷设计的，它们的绝大多数都没有必要的诊断手段，只有少数引进机组厂家提供了寿命消耗曲线，这一类型的机组，目前也有一些机组参与调峰，所以也是开展寿命管理和诊断技术研究的重点之一。

对于运行已超过25~30年的老锅炉，特别是其中容量较大的2.5~10万千瓦的机组，虽然这些锅炉设备陈旧，热效率较之新装中间再热大型机组低，但它们在目前和今后比较长的时间内，仍是发电和调峰的主力机组。

目前对这些运行多年的老锅炉尚未实际开展寿命管理的应用，因此寿命消耗底数不清，而且由于诊断技术还比较落后，承压部件不断在运行中或检修中暴露出不少问题。锅炉事故与国外报导的锅炉事故占发电事故的比例虽低，但其中承压部件破漏事故锅炉全部事故的比例则较高。实际承压部件的损坏要比构成事故的统计数大得多。损坏主要发生在过热器、省煤器、联箱、焊缝、三通、伐门、主汽管和下降管、导汽管弯头、汽鼓等处。据82年全国大电厂的统计，共有42台锅炉的汽鼓存在钢板裂纹、焊缝裂纹和未焊透等严重缺陷，缺陷地点包括集中下降管角焊缝、入孔加强圈、纵、环焊缝及其热影响区，以及预埋件焊缝等部位。

由上述情况可知，加强对这些老锅炉的寿命管理，改进和加强诊断技术，特别是对厚壁部件的管理和诊断是一个必须引起重视的紧迫问题。

三、进一步开展延长老锅炉使用寿命和加强诊断技术的研究

锅炉的实际使用寿命差别是很大的，即使是同一设计，用一型式的锅炉也存在着差别。目前锅炉承压部件设计所选用的持久强度是对应于10万小时寿命的，实际上按10万小时设计的承压部件都有足够的裕量。

实际上一台锅炉是由众多独立的承压部件、支撑件组成的，它们的实际使用寿命，也是不同的。如果采取不断地更换部件，锅炉可允许的使用寿命将是无限的。实际上，由于社会的进步，科学技术的发展和经济上的比较等因素，一台锅炉的使用寿命将是有限的。

锅炉承压部件可以分为厚壁部件和薄壁部件，厚壁部件如汽鼓、联箱、主蒸汽管道；薄壁部件如水冷壁，过热器、再热器、省煤器等。开展锅炉寿命的研究重点应放在厚壁部件上，这主要是由于厚壁部件本身壁厚、壁上有开孔存在应力集中，热应力大，这些厚壁部件一旦在运行中损坏，危险性大，而且修复时间长，经济损失大。对于需要承担调峰任务的5万千瓦以上高压炉，由于原设计是按带基本负荷设计的，这些锅炉又都是自然循环或低倍率强制循环锅炉，改为带中间负荷或两班制运行后，负荷变化大，变化速度快，变化又频繁，由于厚壁部件周期性的应力波动加剧，使内壁孔边极易产生低周疲劳。因此对这些锅炉进行低周疲

劳核算是不可少的一个环节，通过计算，得出残余寿命值，并制订出合理的启停和运行控之参数。国内一些单位的工作为我们进一步开展寿命管理，延长老锅炉的使用寿命创造了条件。

关于主蒸汽管道的寿命管理工作，虽然理论分析和实践都证明，主蒸汽管道的薄弱环节并不在直管段上，弯管和其他部件的寿命要比直管段短。近年来已开始注意到这个问题并着手工作，发现和处理了不少裂纹缺陷，保证了整个管系的安全。

我们在进行厚壁部件的诊断技术的应用上还比较落后，以主蒸汽管道来讲，要切割监视段，要进行持久强度等一系列试验，有的管壁要反复进行大面积的多次打磨，使本来已处于薄弱状态的部位管壁更薄，这种方法取样复杂、检修工作量大、周期长、人力财力都是很大的浪费。此外，在最终估计其残余寿命时，由于某些不定的因素而难于结论。因此，应采取新的更简单的诊断技术来确定残寿命。

关于厚壁件的诊断技术，近年来国外的研究工作有了较大进展。一般说来，通过计算虽然可以计算出已消耗的寿命和残余寿命，即利用通称的寿命百分率规则，这就是承压部件已消耗的百分率加上残余寿命百分率等于1。但实际有很多未知因素和试验数据，准确性限制，计算的准确性总有一定的误差。因此必须通过诊断技术来保证安全、预测损坏的部位。美国、西德、英国等一些国家，估计承压部件的残余寿命，已研究出无损检验技术。这种技术不仅可以判断残余寿命，而且当把它与热应力的历史数据结合起来，在检修时可以对承压部件进行损坏前的判断。这对于保证老机组的安全十分重要，也可以做到有计划地检修更换。这种诊断技术的基本理论是：当金属受到高温高压及其他应力时，早期的应变损坏开始是在晶粒边界处出现微空穴，随着应变的增加，微空穴沿晶粒边界发展，最终发展成微裂纹，这种微裂粒则成为完全断裂前的最终阶段。我们要尽快掌握这一技术并应用于实践。

关于锅炉薄壁部件的寿命管理问题：由于这些部件处于炉膛内或对流烟道中，外壁受热烟气的冲刷、侵蚀，内壁受汽水介质中某些物质的腐蚀、结垢、工作条件苛刻。此外，薄壁部件数量大，焊缝多，而且一根管子损坏即需停炉更换一个管子本身的费用不多，但由于需要停炉，损失很大。以一台410吨/时锅炉来说，更换一根管子，包括启停炉时间在内，当无其他备用容量，需对外限电时，电厂直接经济损失约为80万元。关于薄壁部件的寿命管理和诊断技术，主要应该是通过检查及更换有缺陷的管子，甚至是有计划地批量或大批量更换。方法是对这些管子进行外表面和内表面的检查，外表面主要检查侵蚀、磨损、裂纹、鼓包和焊缝的缺陷；内表面检查主要检查腐蚀、结垢、油和其他污物，实践经验表明，最可靠、最简单的方法是肉眼检查，它在这一范畴中比无损检验更可靠、更经济。当然，肉眼检查需要经验，但对一个现检修工人来说，只要经过几年的实践经验积累，完全可以胜任。对于焊缝的缺陷和损坏要予以足够的重视，特别是不同金属的焊接，这种焊缝处于不同金属的热膨胀不同，蠕变和热疲劳应力集中在焊缝影响区而造成损坏。美国曾报导过对54个电站调查中，有二分之一以上的电站发生过这种焊缝的损坏。

此外，对于运行多年的老锅炉更应注意运行参数的控制，特别要控制超温，以减少残余寿命的加速损耗。按照拉森——米勒参数法很容易计算部件超温后寿命损耗的程度，即温度每升高10℃几乎会使残余寿命降低一半。

最后应该指出，制造厂的设计和制造工艺以及所选用的材料，对机组的使用寿命有很重要的影响，或者说关键的因素，从国产锅炉来说，在设计上留有足够的壁厚余度，所耗

钢材不太多，而所有能换取的使用寿命价值将大大超过初投资所花费用；再如，重视厚壁部件特别是汽鼓的制造工艺极为重要，近年来电力部门所发现的汽鼓缺陷或损坏，属于制造工艺的占绝大部分，例如本文前述的42台汽鼓严重缺陷，给电力生产带来很大损失，有一些汽鼓不得不长时间停止运行进行修理；有的是设计时不考虑多年运行后的修理或更换的条件，如30万千瓦机组的670吨/时锅炉减温联箱不仅更换极为困难，甚至减温套管、喷咀都无法检查。以上所举的典型事例还有不少，今后电力生产单位在与制造厂签订技术协议时，对类似问题要给予足够的注意，同时也希望制造厂积极配合。

总之，运行多年的老锅炉延长寿命是客观上的需要，也是可能的。加强寿命管理，加强诊断技术的研究，保证锅炉安全运行，延长锅炉寿命涉及到众多专业，如锅炉运行、检修、金属、化学、热工等专业，过去这些专业在研究这一涉及面比较广，又十分重要的工作方面结合的不够。近一二年来各方面已注意到这一问题，并通过合作取得了一些成效。

确信通过我们生产、制造、科研部门的共同努力，必将在这一重要的工作中做出更大的成绩。

声发射技术在电站压力容器 监测中的应用研究

阎鸿勋

一、前言

声发射技术作为一种研究材料破坏过程的有力工具,引起国内外科学研究机构和工程技术界的广泛兴趣。这项五十年代中期才在国外兴起的新技术,由于能对压力容器实行有效的监控并作出可靠的安全性评价而赢得了材料科学、焊接和无损检测以及断裂力学等多个领域研究工作者的注目。声发射第一次成功地应用是1964年美国对北极星导弹弹舱的检测。从此美国投入相当的研究力量开展声发射的实际应用研究,而且迅速地把这些研究从组织机构和工程标准两方面加以巩固。例如在美国机械工程学会(ASME)和材料试验学会(ASTM)之下都专设了声发射委员会的机构,甚至在1975年初已经公布了锅炉和压力容器声发射检测标准。此后,于72年欧洲成立了十四国参加的声发射工作者的组织。日本于69年得到声发射工作的报告后,立即组成全日本声发射委员会,并于当年末即开始活动,紧接着于70年代初两次向美国派出人数甚多的声发射调查团进行设备与检测技术业务学习和考查,已经几次出面组织大型的国际声发射技术座谈会,研究进展极为迅速。苏联从60年代初就成功地以声发射预测矿井塌方和瓦斯爆炸,而且较早地用声发射研究焊接裂峰和监听压力容器的安全运行。

二、声发射的基本原理及主要特点

1、声发射现象的本质

顾名思义,声发射就是声信号的发射,(Acoustic emission)。从已有的研究结果可知,声发射只是固体材料所特有的现象。固体在变形和破坏时,会发射出一定的声频信号。

当固体在外加载荷的作用下,由于其内部组织结构的不均匀性或者潜在缺陷的存在,导致局部的应力集中,使得应力分布处于一种不稳定状态,当这种应力不平衡状态所积聚的应变能达到一定的程度时,终将发生应力的重新分布而力图回复到稳定状态。这种应力的再分布是通过材料的塑性变形、微观错位或形成裂缝等形式而实现的,因而这是一种应变能释放的过程。这些释放的应变能中的一部分以弹性波的形式发射出来。如果在固体表面配置适宜的传感器以“检出”这种表现为声频的信号,这就是所谓的声发射信号。所以,就其本质而言,声发射现象即指固体材料在受到外力后,引起塑性变形、产生裂缝甚至断裂时,以弹性应力波的形式而释放能量的一种物理现象。因而,声发射有被称为“应力波发射”、“声幅射”等。通过检测声发射信号而对材料进行力学研究、材质评价、无损检测以及结构完整性的评价等方面的科学研究或技术工作,便形成了一门新兴的声发射检测技术。

声发射的微观机理目前尚无明确的解释,但仅就金属材料而论,可以认为,金属的塑性变形是通过位错的运行而运行的。而位错约以 $10^2 \sim 6 \times 10^6$ 毫米/秒的速度移动。是否可以提出这样的声发射模型:“当金属材料受力后,因变形导致的微裂纹产生位错移动,当这种位错运动在某处聚集到一定的临界程度,即突发出脉冲状的弹性应力波的信号,从而形成一个声源”。由此可知,声发射信号所携带的是固体材料的微观和亚微观过程的信息。因此,

当裂缝刚刚萌发或稍有扩展可灵敏地反映出来。大量的实验观察也证实了这个推论，声发射监测仪器上反映出来的信号主要与材料在变形过程积聚而形成的微观开裂或微观扩展所放出弹性能有关，因为对于未造成开裂的变形，即使肉眼已见塑变，仍无声发射信号。

2. 声发射的频率范围

声发射的频率范围相当广阔，尽管因材而异，但一般认为除声频区域（20~2万HZ）、机械噪声和振动等以外，频率范围还可到几万赫甚至几百万赫。在实际应用研究中，接收声发射装置所选频率“窗口”多在5~50万的频带范围。早期的声发射检测装置只采用声频频率即60KHZ以下。而这是机械噪声所处的频带，这样的装置很难应用于实际的工业检测中去。六十年代后，检测声发射信号的实验系统采用100KHZ至2MHZ的频率，才使声发射技术向实际应用跨出了一大步。我国最初的声发射仪只有12.5KHZ，74年建成80KHZ的声发射实验装置。近年来少量生产的声射仪器所用的中心频率，多在100~300KHZ之间，可以较好地排除外来噪音的影响。

3. 声发射检测的特点

声发射的最突出的特点在于它是一种“动态方式”的检测，即只有当材料受到外部载荷之后才可以实行检测。这个特点带来一利一弊。其利在于，由于声发射的检测方法是随着材料变形的发生和发展有形变过程本身提供信息，所以材料是在受载条件下，“主诉”其内部微观“伤情”的活动情况，这就使被测对象能动地参与到检测过程中来了。因为在声发射检测时，外部载荷使材料内部的结构状态或“潜在缺陷”能从“相对静止状态”而达到；显著的变动状态“，诱使材料主动发射声信号。通过对声信号的分析，就可推知发声地点及其缺陷活动强烈程度，深刻揭露材料内部的实际情况，这样，不但可以了解材料当前的“伤情”，而且可预知在实际使用条件下的发展趋势。这一特点的“弊”在于，声发射检测需要有外载条件，这就不如其他无损检测方法那样方便。此外“动态检测”的特点也说明了与超声波等“静态检测”方法的区别，超声波信号是超声换能器发出的，而不是被检测对象主动地释放内部变信息。如在脉冲法超声探伤中，探伤仪发出的超声脉冲信号遇到缺陷便“被动”地反射回来，这就只能从反射回来的“伤波”的幅度与位置，间接地推知超声波所能波及范围内的缺陷情况。

其次，声发射的第二个特点，也是它的主要优点，即只要在物体中有声发射事件时，在任何位置上都能探测到。这是因为它不同于超声波检测的“发出”与“接收”方式，而且，声发射的传播方式是在材料内部空间各个方向辐射的。这一特点对于大型焊接结构及压力容器检测十分便利。只要将传感器固定在容器体的合适部位即可。而如果用超声波的方法，为了检测较大的范围，则需逐段移动并旋转探头。

第三、声发射现象最重要的特性莫过于所谓凯塞尔（Kaiser effect）效应，即材料受到一定的外力作用后，当卸载后再重新加载时，不论前一次加载过程是否出现过声发射信号，当重新加载所产生的应力在未达到第一次的应力值之前，不会有声发射现象。这种声发射与作用应力之间的关系以及声发射现象的不同再现性质也被确切地称之为“不可逆效应”。这

对实际应用极为重要。这一特点同样利弊并存。巧妙地利用“Kaiser效应”可以用来可靠地查知疲劳裂缝增大的速率，从而预测构件或材料的寿命，还可以用来辨别前次加载中出现的信号是噪音信号还是声发射信号，这是“Kaiser效应”所带来的方便之处”。它所引起的弊端则不言自明，因为检测前要预知被检测物体的受载历史，而且每次检测都抬高了所加外载的水平。

声发射现象的第四个特点在于它在固体中普遍存在。除了金属材料以外，在复合材料、石墨以及各种非金属材料，诸如塑料、陶瓷、混凝土、土壤、木材、岩石、冰等固体中都已观测到声发射现象。以上仅是声发射的一些最重要的特点。作为一种检测手段，声发射必然有其固有的局限性。这些限制与缺点归纳起来有：第一、声发射作为一种动态现象，只在实际受力变形时才发生，所以它不能提供任何静态缺陷的情况。第二、由于每种材料声发射性质不同，所以必须事先知其发声条件以及频率范围。第三、必须了解材料或结构的受载历史。第四、声发射本征信号发射过程往往伴随大量噪音信号，而且不易排除与分辨。第五、检测设备仍处于研试阶段的水平，尚不能万无一失地捕捉所有声发射信号并加以“分辨”。而且所得到的不是伤情的实际形象，只是由声发射信息转变而来的不甚直观电信号，尤其是特殊条件的探测传感器的设计与制备，急待提高。现在的声发射检测装置价格又十分昂贵，这也是声发射检测不易推广的缘由之一。第六、检测技术方面，对于已经得到的声发射信号分析并确定其发射源位置相当困难，说明这些信息的性质亦确非易事。

然而事物又总是在发展变化中，现代科学技术的发展必将为声发射技术提供装备，解决疑难，为它更大的发展开拓道路。加之声发射现象所独具的优点，特别是对焊接研究和压力容器监测方面已经取得成功已为声发射技术的推广应用展示了宽广的前景。

三、声发射在电站压力容器监测方面的试验研究

对电站设备安全性的评价，目的在于了解设备内部缺陷在外载作用下发生与发展的规律，得预先估计其缺陷危险性，防止突然事故发生，因此这方面的研究工作对于电力系统的电力生产单位保证设备安全运行、电力建设企业能及早排除伤情而提高安装质量、电力修造企业能合理地决定修补方式而不留后患，都将是极其需要的。

任何设备材料，特别焊制压力容器、管道及其附件，不可能完美无缺，总会有不同程度及数量的缺陷。然而其中有些缺陷并不一定是危险的，相反，有一些居于高度不稳定状态的微观裂缝，如不及早发现却会酿成很大的事故，因此，通过声发射评价设备的安全性有重大意义。本文将我们在高球形三通爆破试验和电厂汽包水压试验这两次具体应用声发射的监测试验，分述如下：

1、高压球形三通爆破试验

1、试验条件与方法

本试验是某厂生产的热拔球形三通强度评定中的一部分。爆破试验可以全面而可靠地评价压力容器的综合强度。但过去的试验方法是一直压至爆破，只得到爆破压力。因为在爆破

前焊接结构已发生了变形, 微观缺陷扩展等等过程, 所以应该监测试件体从裂缝形成—扩展—爆破的每个发展阶段, 以便考查和研究压力容器在压力试验中表现的力学特征。这次试验主要目的在于摸索声发射技术用于爆破试验时的测试规律, 取得使用经验并找出开裂压力, 预告低应力脆断。

该三通球体部分为 $\phi 640 \times 40$ 的20#钢板压成半球后, 再热拔三个支管座口, 两半球环缝对焊, 然后将 $\phi 325 \times 25$ 的三支管对焊在体上的三个支管座上。最后在支管另一端焊上堵头, 其内注满水。再按图一所示的系统连接各设备。其中一支管口与高压泵连通管相接, 以机油为工作介质打内压。

考虑到两 45° 支管间的“桥区”是高应力区, 在内壁转角处有很大的应力集中, 所以将传感器用黄油耦合在此处。整个球三通置于爆破坑内。

2、试验结果的分析讨论:

从开泵升压、即从记录仪上看到很大的背景噪音信号。开泵两分钟后, 升压迅速。

从开泵升压算起, 当试验进行到9分钟时, 出现一个很大的声发射“事件计数率”信号, 此时对应的压力值为 315 kg/cm^2 , 表征着球三通的整体屈服或某处局部的缺陷扩展所造成的声发射事件。在没有声发射监测时是不可能仔细地推知被试容器在各不同压力值下的行为的。在试验进行到开泵后的54分钟前后, 声发射频繁, 说明容器在缺陷处已达到不稳定的状态, 其实这正是将要低压爆破的征兆。8分钟后, 在开泵62分钟顷刻发生爆破, 爆破压力 595 kg/cm^2 。这次试验完全证实了声发射在监测焊制压力容器开裂以及“潜在缺陷”扩展方面, 具有很高的灵敏度和令人满意的可信程度。

实际的爆破压力仅达到计算值的63.3%、爆破断口分析完全证实了声发射预告的低应力脆断。断口形貌揭示该球形三通的焊接质量极差: 两半球的环缝对接口有8mm以上的错口, 并存在着严重的单边未焊透, 在焊口断面上, 有 $\phi 2 - \phi 5$ 不等的几个夹渣性缺陷, 而且其间由裂缝贯通。这些裂缝导致了整个容器的低应力的爆破, 全部断口上, 典型的人字纹花样, 清楚地指示出是裂源之所在。

2、电厂锅炉汽包水压试验的声发射监测

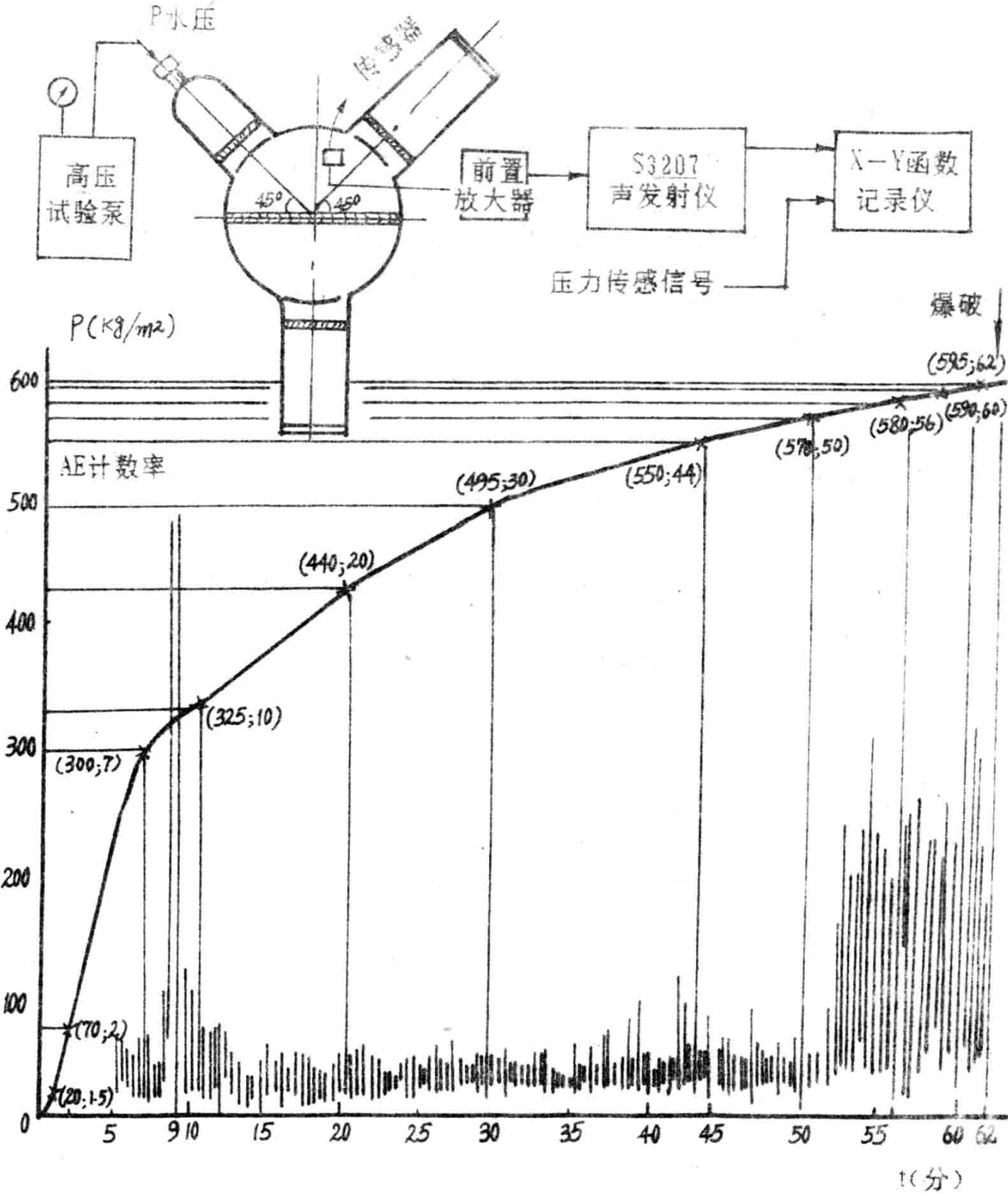
1、汽包的有关情况:

该汽包为HG-100-4型单汽包自然循环煤粉锅炉的最重要的部件, 尺寸为 $\phi 1780 / 1600 \times 90$, 全长1247mm; 工作压力 110 kg/cm^2 , 材料为19Mn5其下部有四个 $\phi 477 \times 75$ 的20#钢集中下降管。是1972年哈钢的产品, 73年安全装于微水电厂#7炉投入运行, 81年大修时发现汽包四个下降管的管座角焊缝以及筒体纵环缝均有严重缺陷。于81年第三季度内哈锅补焊修复。修复后以及焊后热处理以后都经磁粉和超声波检查合格。

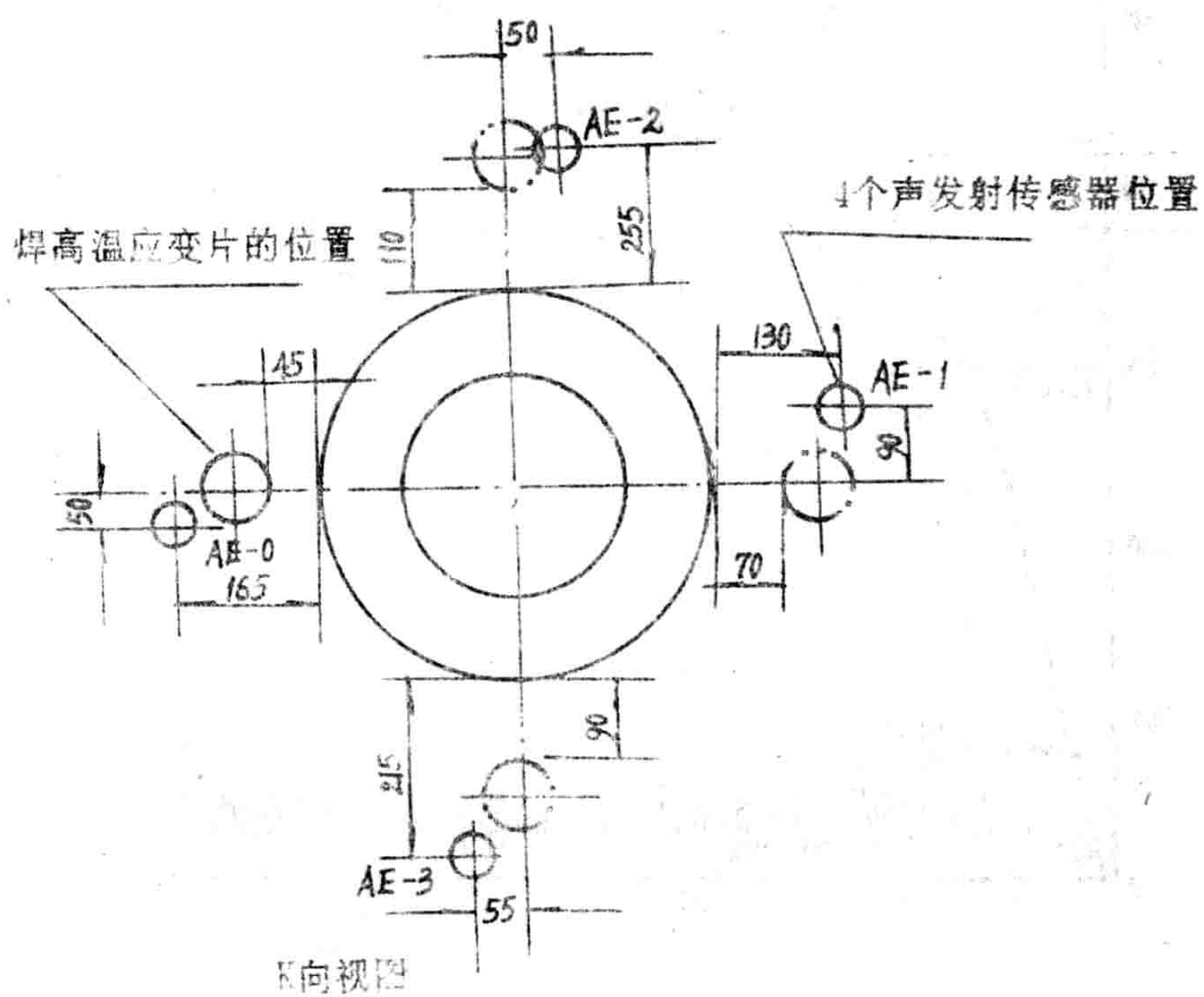
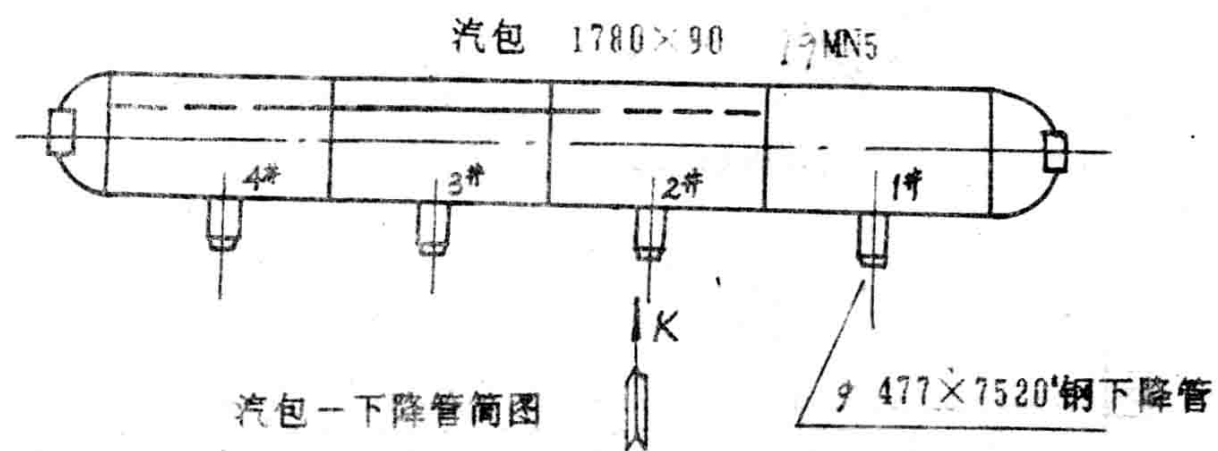
2、检测方式及有关数据记录:

这次汽包水压试验的监测, 使用沈阳电子研究所生产的SFS-4型四通道声发射仪。为了更好地发挥该机定区监测的功能。选定以四个传感器对称布置的方式。由于通道数的限制, 只能选取其中一个下降管口作监测对象。经对探伤结果的分析, #2下降管在补焊结束探伤时,

发现数个小气孔及 $\phi 4.6$ 当量的夹渣性缺陷，虽处于合格标准之内，但这是四个下降管中残：缺陷较为严重的一条管座焊缝。因此，布置在#2下降管的四周，其具体位置见图二所示。



图一、高压三通的爆破试验系统与声发射曲线

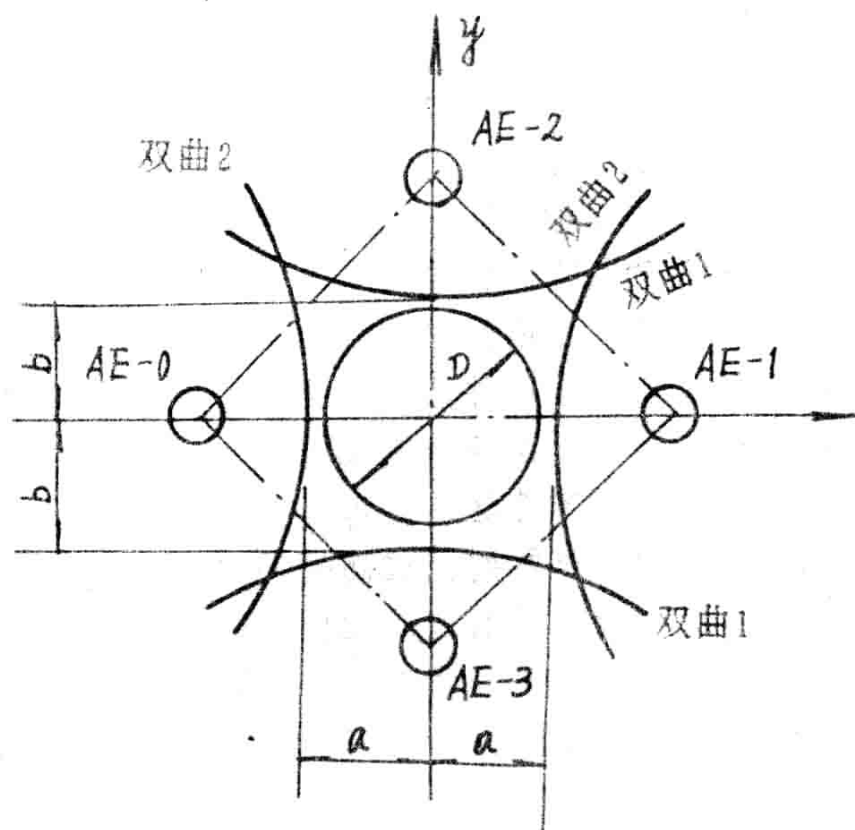


图二、汽包水压监测传感器的布置

为了有效地监测#2下降管管座焊缝在水压过程中的声发射行为,排除其他各种干扰我们决定采取“符合鉴别”的方式定区监测。其原理示于图三。

由图三可知,这种鉴别方式所依据数学原理是双曲线方程。定区监测是平面问题,因此对一个可以二维展开的监测对象,各探头的时差关系可以按二次曲线的函数关系来处理。

传感器安装方式:用剪成音叉形的0.25mm的不锈钢箔,贴于其上,由微型储能焊机点焊固定,点焊时要保持不锈钢箔对传感器一定的压紧力,传感器与包外壁间用工业凡士林耦合。安放传感器之处要打磨平整并显露金属光泽,布置方式见图二。



图三、符合鉴别方式定区监测的原理

3、试验结果分析

由试验结果看出出现的几个声发射讯号,并不是由焊缝缺陷扩展或开裂所形成的声发射讯号。其理由是:第一,这一组信号极其孤立,前后均无伴生信号,凡属开裂或扩展讯号总持续相当的过程。第二,随后压力逐增,如是开裂或扩展,不会在较大载荷下反而再也不出现任何缺陷发展所必需的声发射反响,这是不可能的。第三,#2下降管在检测范围内,但该下降管长度方向的任何信号也都可以通过鉴别,当进行水压时在各平台处均有观察水压过程情况的人员,他们随时触碰#2下降管都可能产生信号。因试验前未考虑到这一因素,未能采取相应的措施。第四,在焊道沟槽内未除净的渣皮崩裂,会形成少量孤立的声发射信号。

根据以上分析,试验结论为:声发射监测汽包水压试验达到了预期的目的。试验结果证明,汽包#2下降管焊缝质量合格,在正常载荷下不致使其内缺陷扩展,可以安全投运。