

现代压力容器 制造技术的发展及其动向

国家劳动总局 ~~锅炉压力容器~~ 安全监察局

北 京·1981.5.

目 录

A 现代压力容器技术发展的几个主要特点

A-1 压力容器安全性和可靠性的提高。压力容器事故率的显著下降

A-101 锅炉和压力容器灾难性事故统计数字

A-102 现代锅炉和压力容器的科学管理体制

A-103 压力容器设计方法的改进

A-104 制造和检测技术的发展

A-105 图论技术—事故树分析法 (FTA) 在压力容器上的应用

A-2 压力容器服务重心的转移。压力容器应用领域的扩大

A-201 压力容器服务重心向能源工业的转移

A-202 今后能源工业中压力容器设计参数预测

A-203 压力容器其它应用领域

A-3 压力容器制造能力的大幅提高

A-301 现代超重型压力容器工厂制造能力

A-302 整体出厂的重型压力容器实例

A-303 现代压力容器工厂主要装备比较

A-304 优质超厚板和大锻件的供应能力

A-305 压力容器筒体结构型式的多样化

A-306 压力容器零部件向大型化发展

B 压力容器用材料的开发

B-1 低合金高强钢的开发

B-101 冷裂低敏感性高强钢

B-102 层状撕裂低敏感性高强钢

B-103 厚板大输入热单面焊用新钢种

B-2 低温用钢性能的改善及铁素体系焊接材料的开发

B-201 Si-Mn 钢

- B-202 铝镇静钢
- B-203 3.5% Ni 钢
- B-204 7% Ni 钢
- B-205 9% Ni 钢
- B-3 高温抗氢用钢性能的改善

C 压力容器制造技术的最新发展动向

- C-1 窄间隙焊接工艺在石油化工和核反应堆厚壁压力容器中的应用
- C-2 电子束焊接技术在厚壁压力容器中的应用
- C-3 埋弧焊技术在压力容器和管道上应用的前景
- C-4 焊接自动化发展的动向
- C-5 管板加工技术
- C-6 耐蚀层堆焊技术
 - C-601 丝极堆焊法
 - C-602 带极堆焊法
 - C-603 特殊堆焊法
- C-7 现场消除应力退火技术
- C-8 管—管板连接技术
 - C-801 管—管板新型胀接技术
 - C-802 管—管板新型焊接技术
- C-9 新型探伤技术
- C-10 非钢压力容器制造技术
 - C-1001 预应力钢筋混凝土结构压力容器
 - C-1002 大型铝合金压力容器

D 展 望

参考文献

现代压力容器制造技术的发展及其动向

A 现代压力容器技术发展的几个主要特点

A-1 压力容器安全性和可靠性的提高，压力容器事故率的显著下降

A-101 锅炉和压力容器灾难性事故的统计数字

以美国为例。从1880到1990年这20年间，锅炉爆炸事故是逐年上升的。但到1900年后，便逐年下降。进入七十年代以后，锅炉爆炸事故基本上近于消灭（图A-101），但在这七十年间锅炉的压力却从不到 $30\text{Kg}/\text{cm}^2$ ，猛增到 $340\text{Kg}/\text{cm}^2$ 以上〔1〕。另据美国锅炉和压力容器检验师总部（National Board of Boiler & Pressure Vessel Inspectors，简称NB）1973年发布的数字〔2〕，美国锅炉和压力容器共有411,617台。其中

锅 炉	40,441 台
压力容器	367,048 台
核 容 器	429 台
核辅助容器	3699 台

根据以上数字和图A-101粗略地估计，1973年美国锅炉的灾难性事故率约不到万分之二。

图A-101见下页

又据Nichols教授报告中的数据〔3〕，在英国属于一级压力容器的灾难性事故率是百分之1.5台年，而原子能容器的灾难性事故率则更低，约为十万分之4.7台年。今后目标是再降为 10^{-6} 台年。

A-102 现代锅炉和压力容器的科学管理体制

在工业发达国家，锅炉和压力容器事故率的逐年降低有多方面的因素，其中主要的一条是建立了锅炉和压力容器的科学管理体制。这种科学管理体制的建立，是经过血的教训，付出过很大代价的。以美国为例，1905年3月20日美国麻萨诸塞州发生一起锅炉大爆炸事故，死58人，伤117人，此后，各州才相继建立锅炉法，但很不统一。1911年美国锅炉制造者和用户联名向ASME提出编

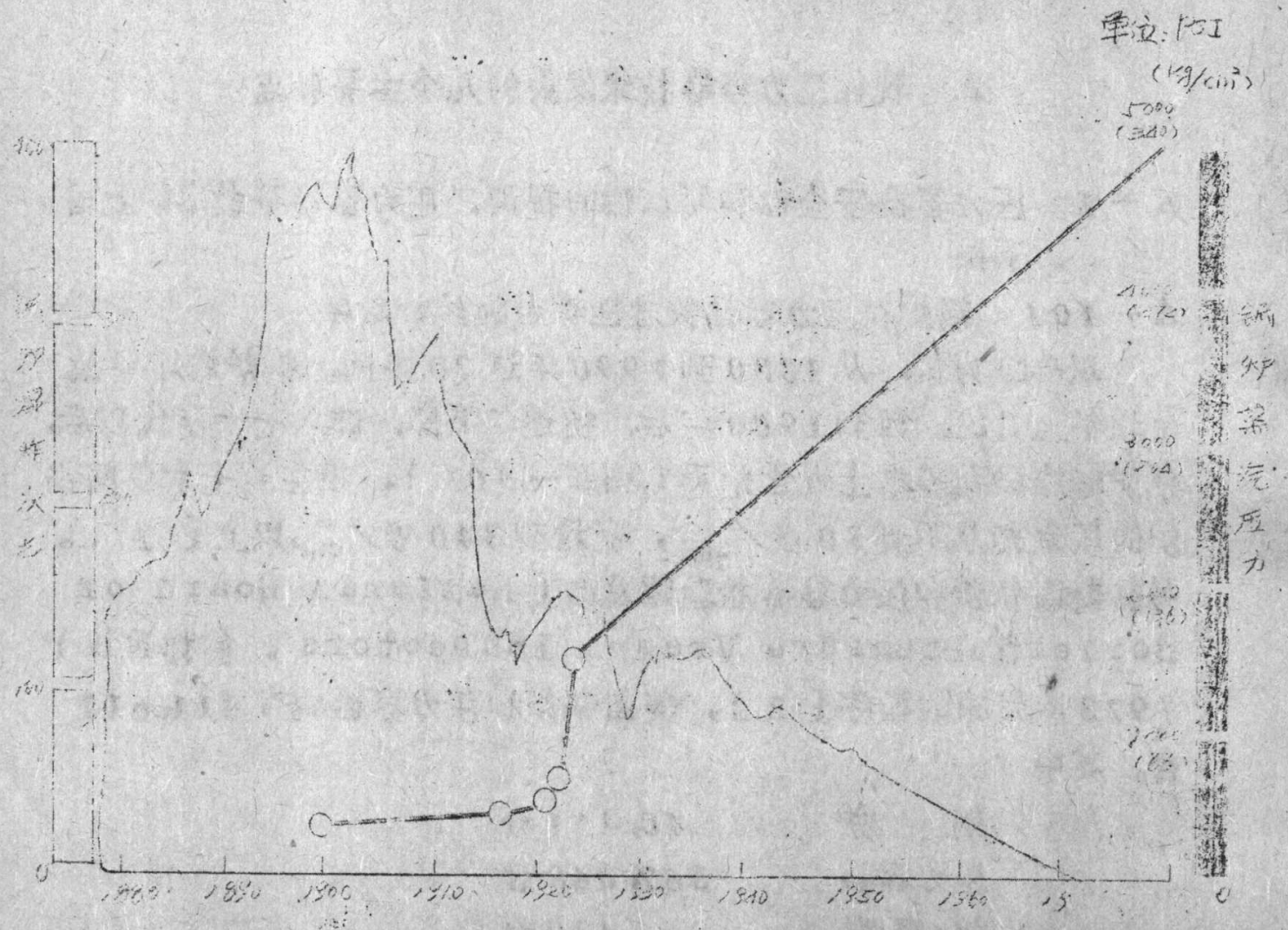


图 A-101 1880—1977 年美国锅炉爆炸次数

制全国统一的锅炉法规的建议。为此，ASME 组织了由 7 名专家成立了 ASME 规范编委会，于 1913 年提出草案，1915 年春天正式出版第一版（即 1914 版）的锅炉规范。后于 1925 年正式出版第一版的压力容器规范，即第八卷。

由于锅炉和压力容器的发展很快，1914~1977 年间锅炉和压力容器的工作压力和温度变动很大（表 A-102）〔4〕，故 ASME 规范在广泛科研的基础上也相应地不断修订，以保持它的先进性。（一般是三年出一新版，在二版之间又出六次“增补”）目前美国五十个州，外加 4 个准州（哥伦比亚特区、关岛、巴拿马运

河区、波多黎各)，共 54 个行政区划，其中大部分州把 ASME 规

表 A-102 美国 1914~1977 年锅炉和压力容器工作参数

	锅 炉		压 力 容 器	
	1914	1977	1914	1977
工作温度, °C	316° max	593° max	—	— 212 °C ~ 538 °
工作压力, Kg/cm²	19 max	340 max	—	~ 380 以 上

范中与锅炉和压力容器有关的第 I (动力锅炉)、II (核容器)、IV (采暖锅炉)、VIII (压力容器)、X (玻璃钢容器) 和 XI (核容器在役检查) 卷作为州的法律，强制执行。例如，把第 I 卷作为法令的有 47 个州，占 87%；把第 VIII 卷作为法令的有 38 个州，占 70% (加拿大的情况与美国类似)。故压力容器在设计、材料、制造和检验上有了法律上的约束，因此，它的可靠性便有所保证。规范变成法令，对法令的执行和监督还需有政策和体制上的措施。ASME 规范的特点不仅是技术性的，还兼有政策性的内容。ASME 的政策是实行对锅炉和压力容器制造厂颁发“制造执照” (Certification of Authorization) 和“规范标志钢印” (Code Symbol Stamp) 的制度。凡领有“执照”的工厂才有权生产符合规范要求的锅炉和压力容器。而在锅炉和压力容器成品上打上“规范标志钢印”后，产品便可称为“规范容器” (Code Vessel)。因此，“执照”和“钢印”是锅炉和压力容器工厂信誉的基础，也是对用户安全的保证。这一政策，大大促进了压力容器制造工厂质量的提高。据报导 [5]，到 1979 年 5 月止，ASME 颁发的执照已有 1567 件，其中：

锅炉和压力容器	1309 件。
核 容 器	211 件。
材 料 制 造	47 件。

到 1978 年 5 月止，颁发的钢印已有 20 种，6438 件 [5] (图 A-102.1)。

在体制上，ASME 规范强调由第三者 (The third party) 进行检验的原则。根据这一原则，建立了如图 A-102.2 所示的体制。

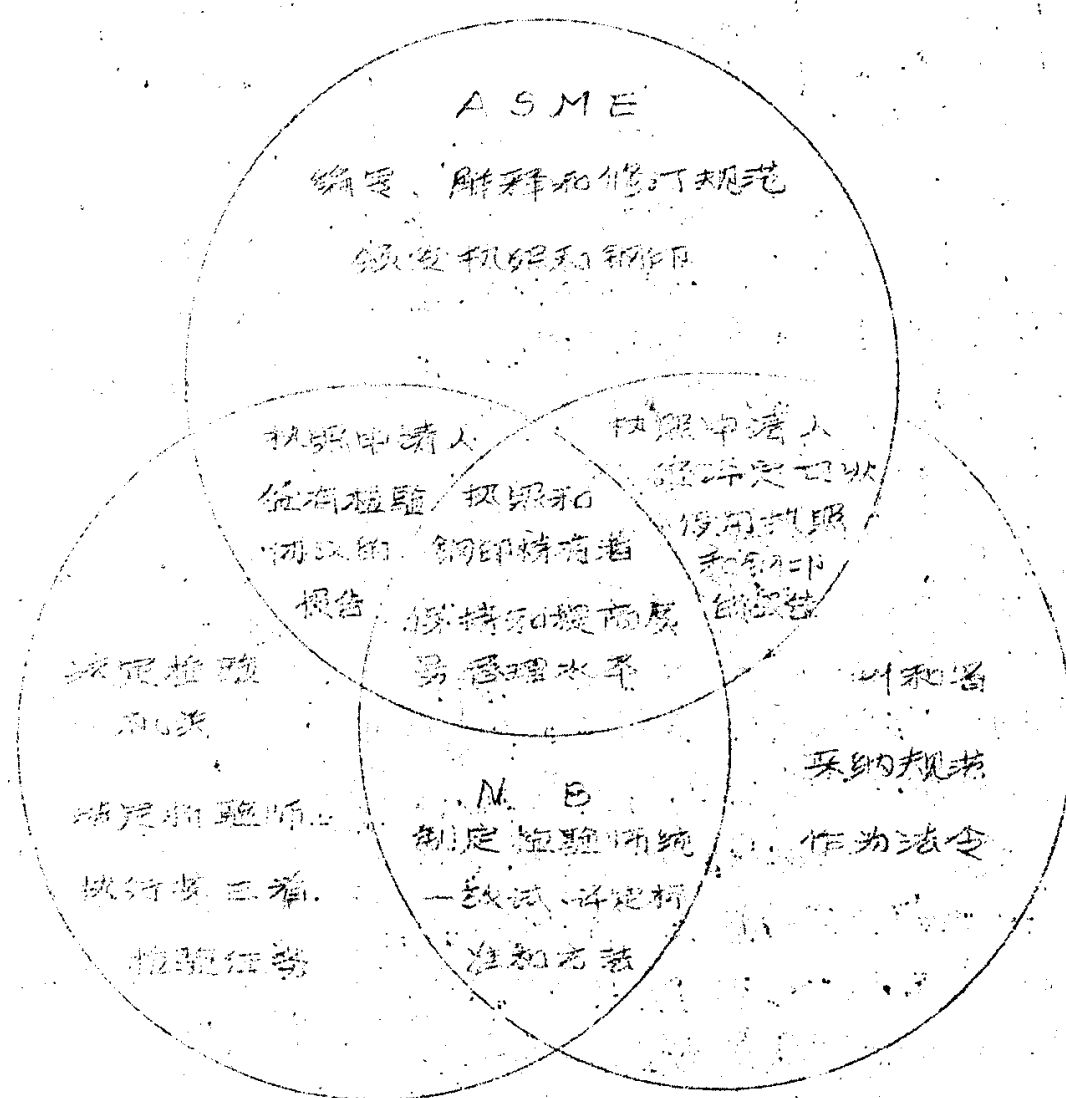
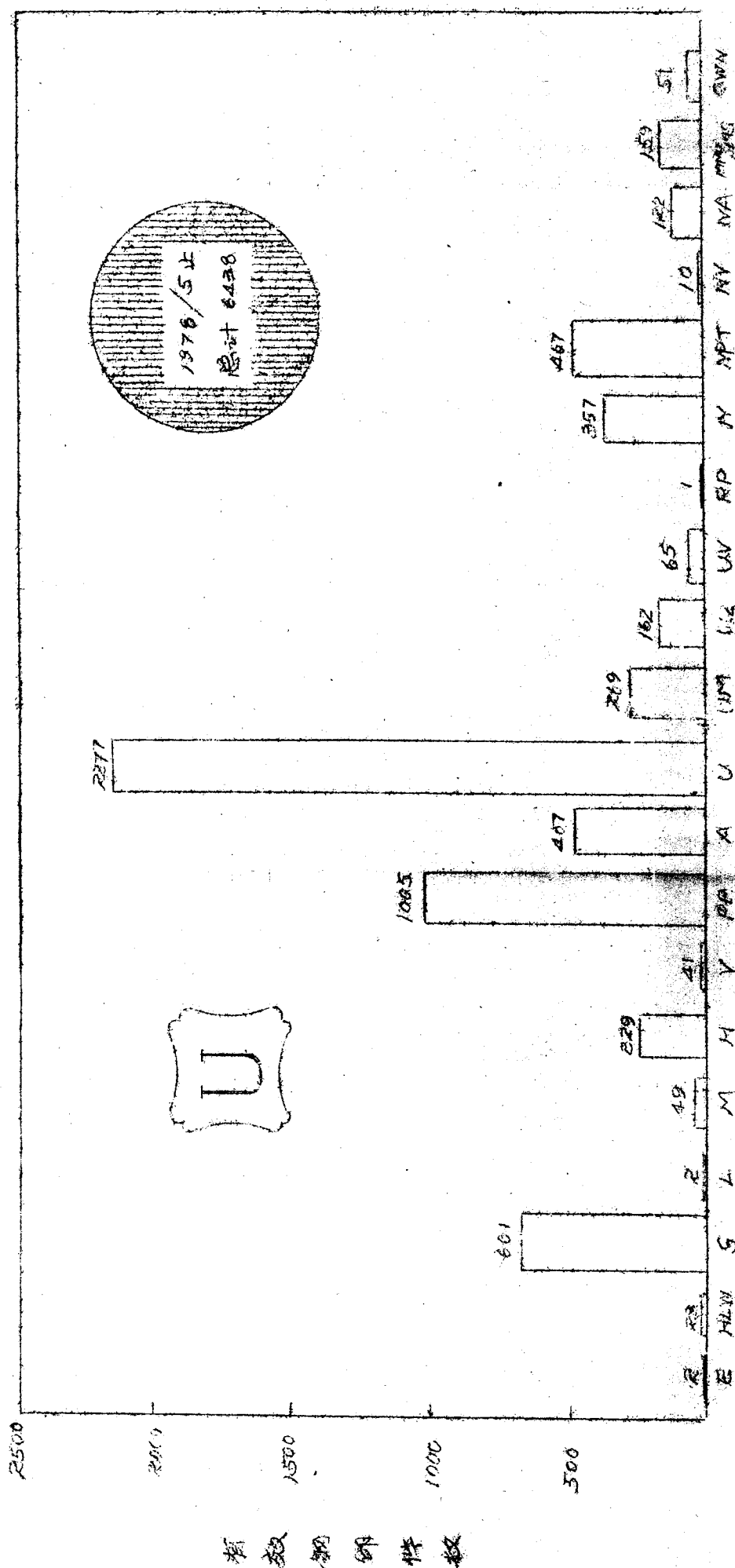


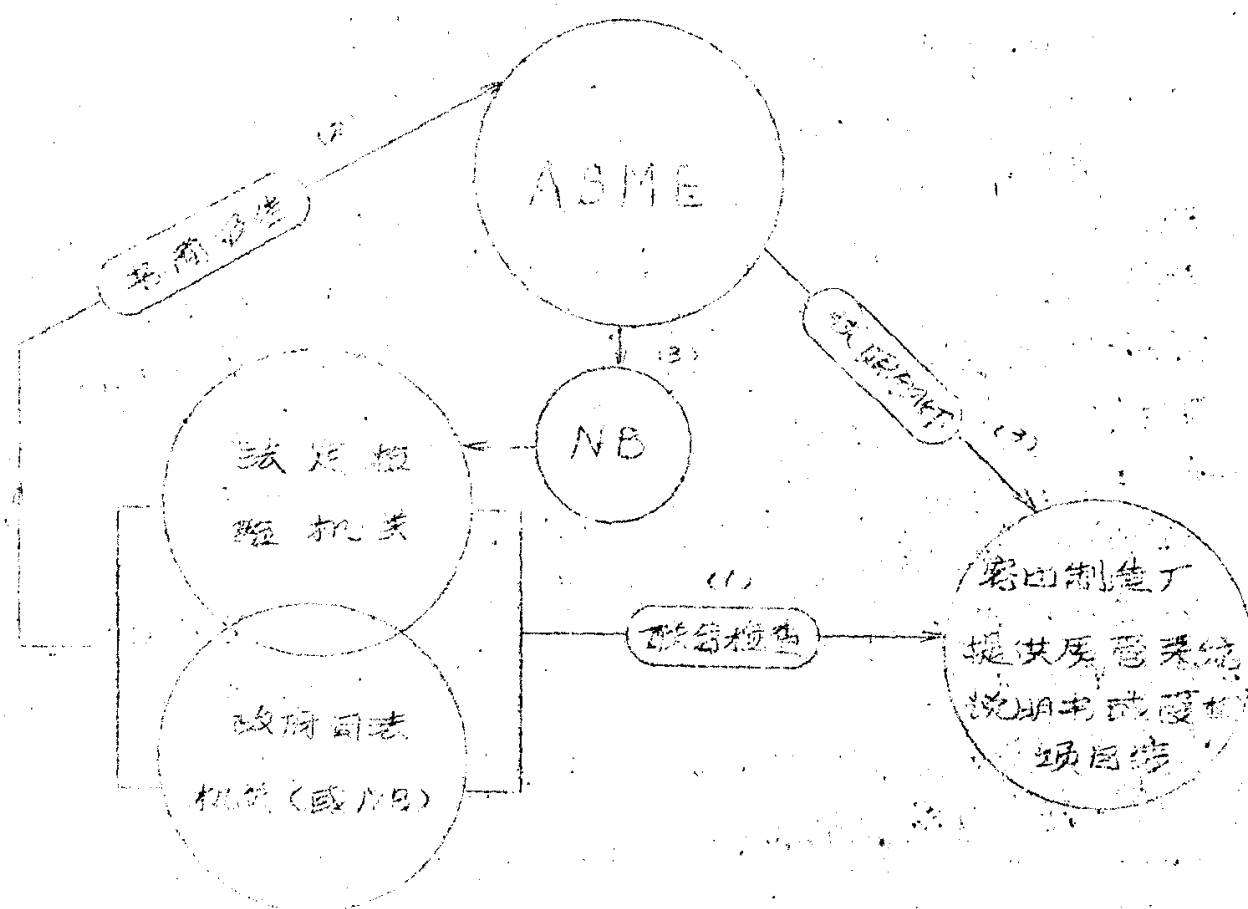
图 A-102.2 美国锅炉和压力容器检验体制



A	动力锅炉	E	工业锅炉	U	工业锅炉	RP	工业锅炉	工业锅炉	工业锅炉
L	蒸汽机炉	V	工业锅炉	UV	工业锅炉	UV	工业锅炉	工业锅炉	工业锅炉
M	小型锅炉	H	工业锅炉	UV	工业锅炉	UV	工业锅炉	工业锅炉	工业锅炉
PP	工业锅炉	HIM	工业锅炉	UV	工业锅炉	UV	工业锅炉	工业锅炉	工业锅炉

图 A-102.1 ASME 规范标志钢印颁发情况

容器制造厂向ASME申请或更换执照和钢印的程序如下〔6〕：首先，容器制造厂应与法定检验机关签订协议，然后按图A-102.3所示(1)→(2)→(3)顺序完成领取执照手续。从以上两图可以看出：



图A-102.3 执照和钢印颁发程序

①压力容器的立法、司法和执法三方的责任很明确。②NB起着特殊的作用，在没有政府司法机关的州，NB代行司法作用。ASME是编制规范的权威，也是立法的权威，而NB则是最高检验权威。NB是1919年成立的，会员是格是各个州的首席检验师〔Chief Inspector〕或首席锅炉检验师〔Chief Boiler Inspector〕〔注〕。

〔注〕首席检验师是在有锅炉和压力容器法令的州任命的，首席锅炉检验师是在只有锅炉法令的州任命的。二者所在城市人口都必须超过100万，否则不予设立。

1979年第48届年会期间,正式会员52名。NB的任务有五〔5〕

(1)促进锅炉和压力容器的法令、规章和规程的统一管理和实施。

(2)促进制订锅炉、压力容器及其零配件的检验标准,保证锅炉和压力容器的安全运转。

(3)促进在所有按规范建造的锅炉和压力容器上打印统一的规范标志钢印。

(4)促进对检验师实行统一的考试和评定标准。

(5)收集各种信息和统计数字,对有关人员分发。(会员、检验师、对锅炉和压力容器技术感兴趣的人们。)

目前,美国各州的锅炉和压力容器司法机关尚未完全建立,已经建立的,例如德克萨斯州(1979年人口1300万),机关名称为劳动和标准部(Department of labor & standards),该部有工作人员156名,下设4个地区管理局和27个选区的分局。负责监督28种法令的执行情况。这个部有一个锅炉处,根据1977年锅炉法,它负责以下三项工作〔5〕:

(1)负责德克萨斯州72000台锅炉〔注〕的检查和正常运转工作。

(2)负责德克萨斯州600多家锅炉和压力容器工厂的质量管理系统的验收和批准工作。

(3)负责核电站的核元件(容器、阀门……等)的检验工作。

美国持有规范钢印和执照的工厂分布情况列于图A-102·4。

A-103 压力容器设计方法的改进

七十年代压力容器的科研有很大发展。压力容器的设计方法走向精细化,逐步向分析设计(Design by Analysis)发展。采用有限元和电子计算机辅助设计,对设计的构件通过图象显示人机对话进行优选,达到结构的最佳化,从而可避免不合理的结构,保证了安全。例如日本神戸制钢公司开发的KOMOSS后处理程序〔7〕。

〔注〕这个数字与文献〔2〕公布的数字有矛盾,可能包括压力容器在内。



便是这一类型的例子。

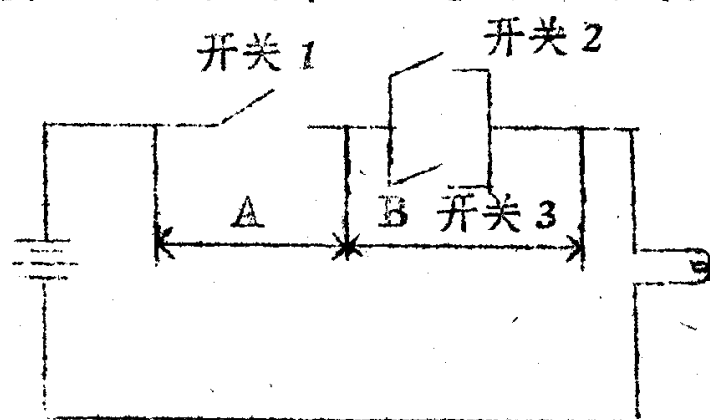
A-104 制造和检测技术的发展。

制造和检测技术的发展，特别是材料制造技术、焊接技术和超声探伤技术的发展，对保证压力容器的质量起很大作用。七十年代，利用发射技术对压力容器进行连续监听，亦即在役检查 (In-Service Inspection, 简称 ISI)，可

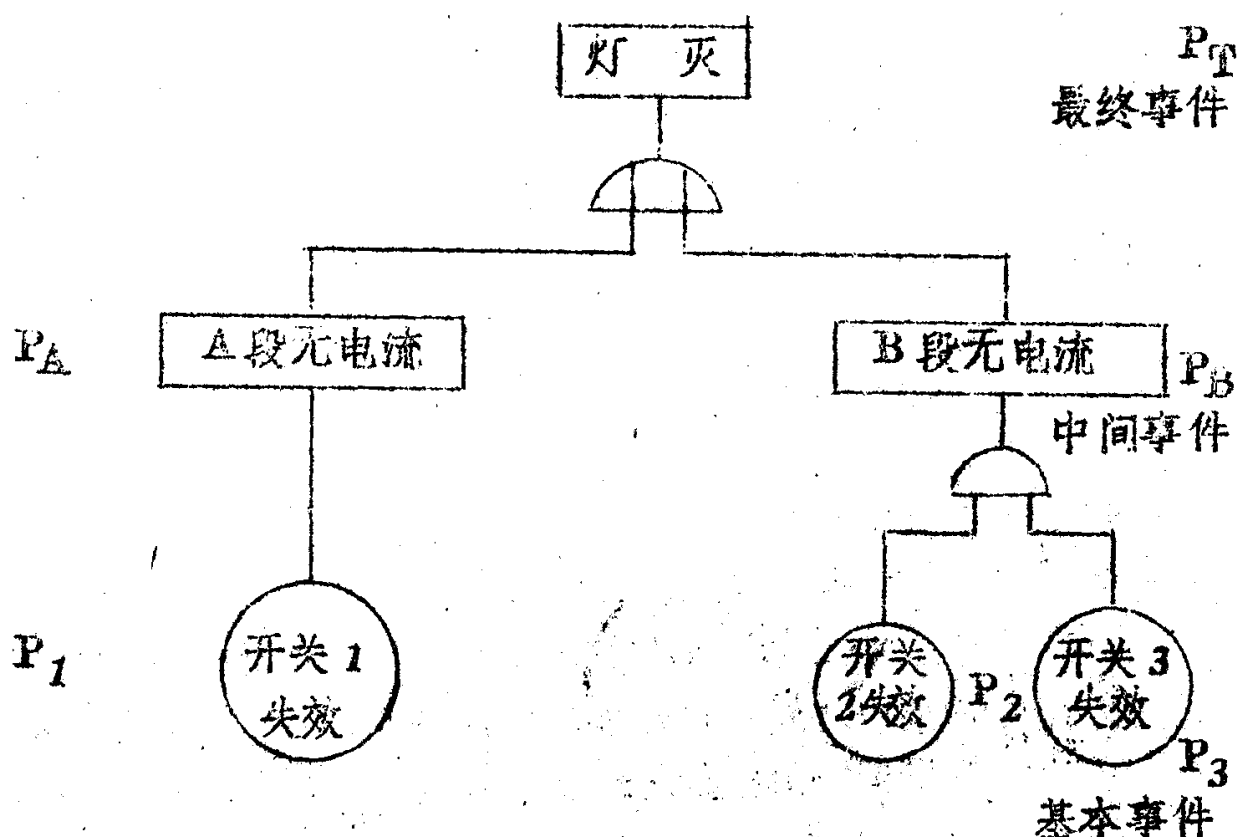
以随时发现裂纹的发生和监听裂纹的发展。对压力容器的安全运行起到很大的作用。此外，尚发展了一些新的探伤技术，将在0-9节给予论述。

A-105 图论 (Theory of Graphy) 技术——事故树分析法 (Fault Tree Analysis--FTA) 对预防压力容器事故所起的作用 [8、9]。

这一技术是七十年代发展起来的。在压力容器和焊接构件上的应用目前正处于发展阶段。它是采用布尔代数方法，以作图法表示容器或焊接构件的失效逻辑，从而找出影响容器失效的关键因素和预防方法。其原理如图A-105·1和A-105·2所示。



图A-105·1 简单系统



图A-105·2 A-105·1的事故树

图A-105.2是用定性方法说明灯灭事故的三个基本原因,但灯灭事故的几率(P_T)也可以定量地计算:

$$P_T = 1 - (1 - P_A) \times (1 - P_B) = 1 - (1 - P_1) \times (1 - P_2 \times P_3)$$

以下举二例说明其应用。

〔例1〕 对接焊缝冷裂纹的事故树分析

简化假设:(1)手工电弧焊。(2)焊条直径固定

(3)焊条烘干直接使用,(4)不采用特殊的焊后热处理

符号说明:



不形成裂纹的事故



“过度符号”或“连接符号”

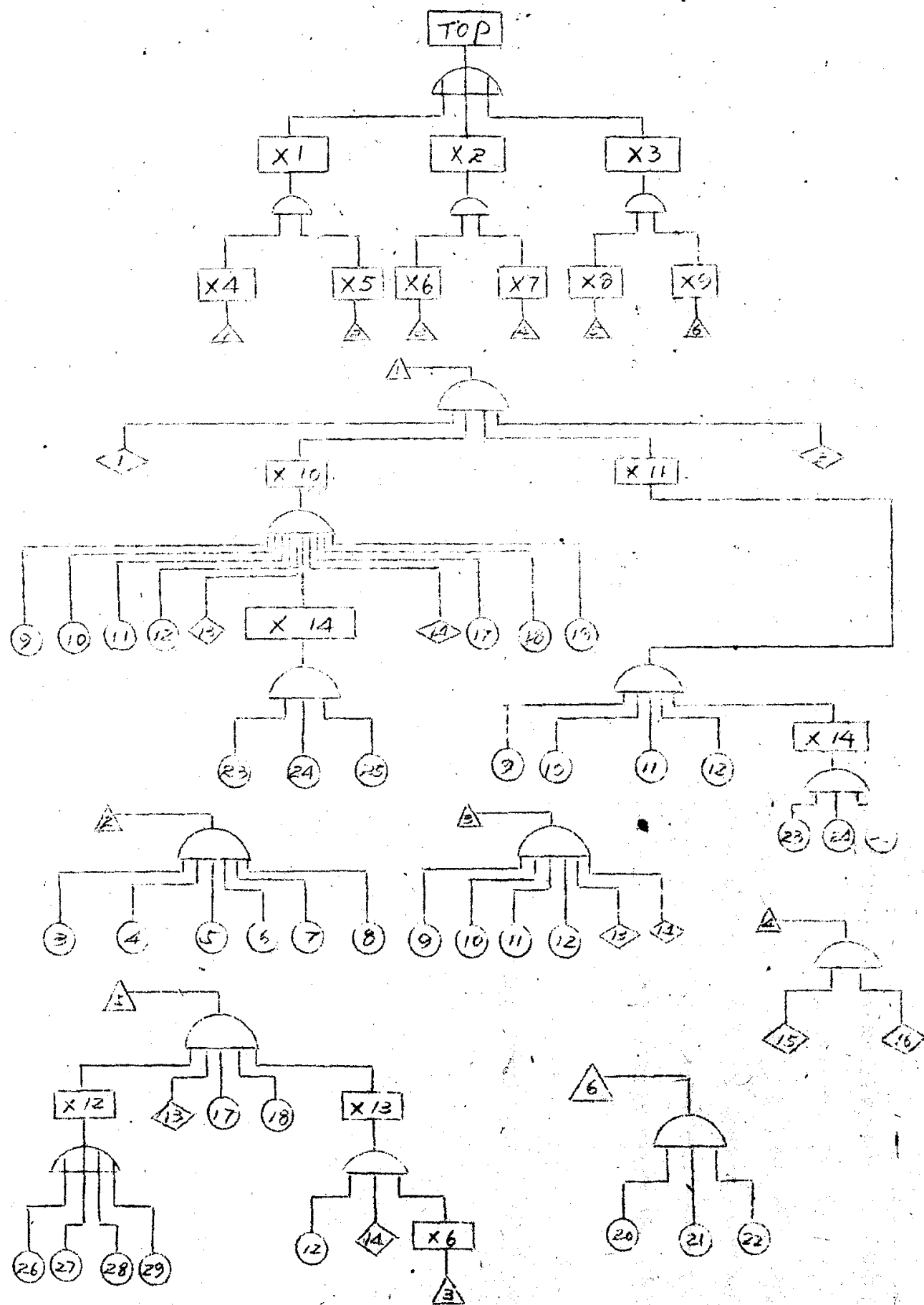


图 A — 105.3 对接焊缝冷裂纹事故树分析

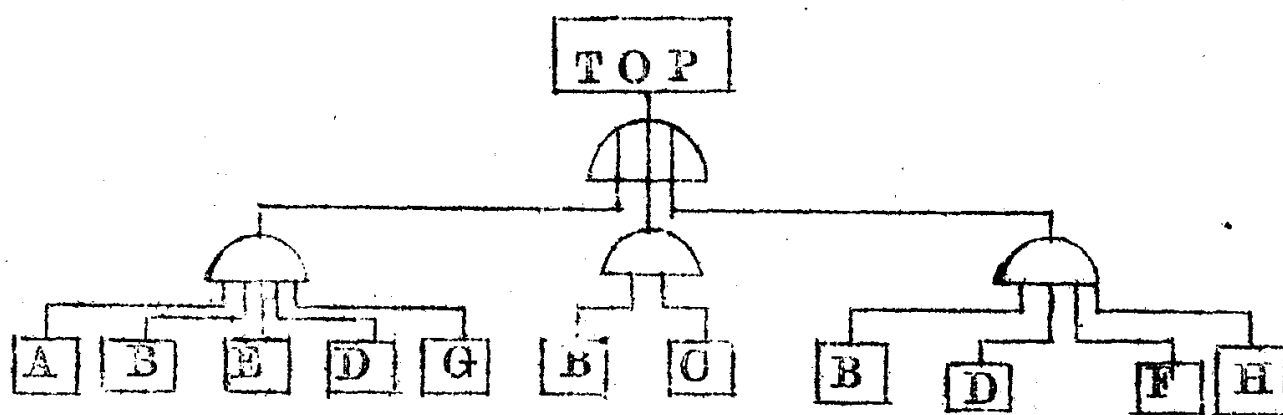
表 A-105·1 最终事件和基本事件

编号	名 称	编 号	名 称
1	峰值温度停留时间	17	预热
2	加热速率	18	钢板初始温度
3	C	19	表面热辐射
4	Mn	20	环境温度
5	Ni	21	焊条型号 (低氢型 或否)
6	Cr	22	焊条烘干
7	Mg	23	比热
8	其它淬硬元素	24	导热率
9	焊接速度	25	密度
10	焊接电流	26	结构不连续处
11	焊接电压	27	晶界
12	厚度	28	非金属夹杂
13	焊条运条方式	29	晶格缺陷
14	坡口型式	TOP	对接焊缝试件中 发生冷裂纹
15	使用夹具		
16	板的尺寸 (不包括厚度)		

表 A-105·2 中间事件

编号	名 称
× 1	热影响区的硬化
× 2	拘束强度
× 3	氢
× 4	焊接热循环
× 5	材料的淬透性
× 6	内部拘束
× 7	外部拘束
× 8	焊接区的氢扩散
× 9	焊接区中的氢含量
× 10	冷却速率
× 11	峰值温度
× 12	缺陷
× 13	局部应力
× 14	材料的热力学性能

根据图 A-105·3 可列出布尔当量事故树 (图 A-105·4) :



$A = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8\}$

$E = \{19\}$

$B = \{9, 10, 11, 12, 13, 14\}$

$F = \{20, 21, 22, \}$

$C = \{15, 16\}$

$G = \{23, 24, 25\}$

$D = \{17, 18\}$

$H = \{26, 27, 28, 29\}$

图 A-104·4 布尔当量事故树

A~H 的重要性比值, 经计算 $A : B : C : D : E : F : G : H$

$= 3 : 67 : 53 : 11 : 3 : 9 : 3 : 4$

所以, 对冷裂影响最大的因素是 B 和 C, 其次是 D 和 F (8)。

〔例 2〕溶解乙炔瓶爆破事故 FTA (图 A-105·5)