

研究性核反应堆的现状、应用和发展*

钟洁 陈伟 杨军 王道华 陈达

(西北核技术研究所 西安 710024)

摘要 回顾了世界过去 50 多年研究堆的发展历程,分析了世界研究堆的现状以及未来的应用发展趋势,同时结合我国脉冲堆的实际情况,对其应用发展前景进行了初步展望。

关键词 研究堆,应用,脉冲堆

THE STATUS AND FUTURE APPLICATIONS OF NUCLEAR RESEARCH REACTORS

ZHONG Jie CHEN Wei YANG Jun WANG Dao Hua CHEN Da

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract We review the development of research reactors throughout the world over the past fifty years, and analyze their current status and future development. The application prospects of pulsed reactors are discussed with particular reference to those in China.

Key words research reactors, utilization, pulsed reactors

1 引言

研究堆作为一种提供中子或 γ 射线来进行科学研究的多学科应用的设施,用途非常广泛,涉及原子核物理、生命科学、材料科学、探测化学、生物学、食品制造技术、农业、刑事侦破、材料辐射改性、核天文学、核考古学、核医学和同位素生产等诸多方面的试验研究。由于研究堆的重要地位,在各种类型的研究性反应堆中,研究类的堆占了绝大多数(见图 1)。

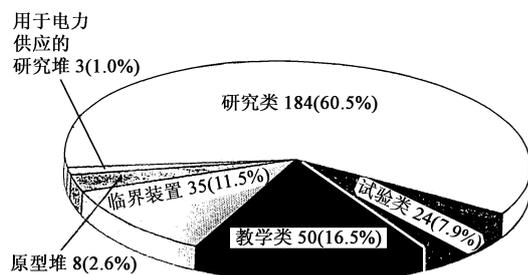


图 1 在役研究性反应堆的分类与设施数量(304 座)^[1]

我国从 50 年代开始建造研究堆,到目前为止,已建有各种试验研究堆 12 座,这些研究堆对我国的核科学技术、军工科研生产和国民经济许多领域的发展都作出过重要贡献。目前世界研究堆的数量呈

下降趋势,抑制了研究堆的应用、发展,针对这种情况,探索研究堆未来的发展方向,挖掘研究堆未来的应用潜力,就成为决定研究堆今后能否继续生存的重要条件。

本文对研究堆的应用、发展情况作了一个总体介绍,在回顾研究堆辉煌过去的同时,对其今后的应用前景和发展方向进行了一定的探索,以图拓宽研究堆的应用领域,使其能更好地为国民经济发展服务。

2 研究堆发展概况

世界研究堆已经历了 50 多年的发展历程。从 1945 年美国 CPI 装置达到临界,开创研究堆的新纪元以来,最初仅在美国得到发展,没过几年,加拿大、前苏联、英国、法国等国家相继加入进来。1956 年到 1975 年间研究堆得到了快速发展,一些发展中国家也开始建造研究堆,此后,随着越来越多的堆因完成了它们的使命或因运行无经济效益而关闭,使得研究堆的总数呈下降趋势。目前全世界共有研究堆 509 座,这些研究堆型式各异,稳态功率从 100 mW 至 250 MW 不等^[1],当前世界研究堆发展现状见表 1(根

* 2000 - 10 - 08 收到初稿,2000 - 12 - 11 修回

据1999年研究堆统计结果得出),当前世界研究堆地区分布状况见表2,我国研究堆发展现状见表3.

表1 当前世界研究堆状况统计^[1]

研究堆类别	总计/座
在役研究堆	281
正在筹建的研究堆	8
已订购/计划建造的研究堆	2
永久关闭/在退役中的研究堆	171
取消的研究堆	2
延迟/无限期推迟的研究堆	3
退役研究堆	42
总计	509
中国在役研究堆	12

由图2可以看出,世界研究堆经历了一个数量剧增到逐渐减少的过程,起初世界在役研究堆的数量急剧增加,这主要是由于发达国家不断兴建研究堆造成的.到1975年,在役研究堆数量达到巅峰,有374座,以后就逐渐减少,到目前只有302座.发达国家在役研究堆数量的发展趋势与世界在役研究堆数量的发展趋势相当,都经历了一个快速增长然后下降的过程,目前仍呈下降趋势,但发展中国家在役研究堆的数量一直以缓慢的速度增加,目前仍在不断增加.

世界在役研究堆数量呈下降趋势是由目前研究堆所面临的诸多问题造成的^[4].

表2 当前世界研究堆地区分布状况^[2]

地区	北美	西欧	东欧	太平洋区	亚洲	拉丁美洲	非洲(中东)
研究堆类别							
现役研究堆	92	81	43	21	35	19	11
施工中的研究堆	2	0	3	3	1	0	4
计划中的研究堆	1	0	2	1	1	3	4
退役的研究堆	153	81	12	3	7	3	3
资料不全的研究堆	0	0	1	0	0	0	1

表3 我国研究堆发展现状^[3]

序号	堆名	功率(kW)	历史状况	用途	运行单位
1	HFETR	125000	在役	测试	中国核动力研究设计院
2	HFETR critical	0	在役	临界安装	中国核动力研究设计院
3	HWR- II	15000	在役	研究	中国原子能科学研究院
4	LTHR(NHR-5)	5000	在役	原型供热堆	中国核能技术研究院
5	MNSR IAE	27	在役	研究	中国原子能科学研究院
6	MNSR-SD	27	在役	研究	山东地质局
7	MNSR- SZ	27	在役	研究	深圳大学
8	PPP Pulsing	1000	在役	研究	中国核动力研究设计院
9	SPR	3500	在役	研究	中国原子能科学研究院
10	SPRR-300	3000	在役	研究	中国工程物理研究院
11	Tsinghua Pool	2800	在役	研究	中国核能技术研究院
12	Zero power fast reactor	0	在役	研究	中国核动力研究设计院
13	HTR-10	10000	筹建	研究	中国核能技术研究院

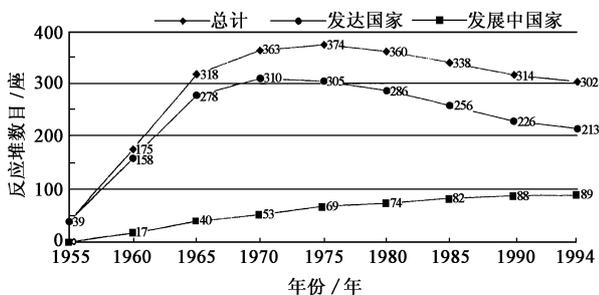


图2 1955—1994年在役研究堆在发达国家及发展中国家的数量分布^[1]

第一,经济方面的原因.世界经济衰退造成包括

科研计划预算在内的预算缩减,而研究堆的运行价格较高,在很多发达国家,研究和计划集中在能源和短期规划上,鼓励应用课题服务于商业就是为了弥补预算缩减带来的影响,达到能够继续维持反应堆运行的目的,这样就导致了裁员,不再强调基础研究,相应地也就减少了研究的利用率,在某些情况下索性就关闭了一些研究堆.

第二,为公众认可和接受的问题.原子能对环境的影响使得公众对反应堆的注意力增加,1979年美国三哩岛事故和1986年前苏联切尔诺贝利核电站事故使得众多国家增强了反核观念,研究堆的安全

问题受到各种质疑。

第三,对研究堆安全性、可靠性要求的提高。过去5年间,大多数研究堆并没有制定专门的核标准,核电站的事故引起了公众对研究堆安全问题的注意,反应堆操作者必须完成安全分析才能更新他们的反应堆运行许可证,另外,反应堆保护系统需要增加附加测量装置来确保反应堆的安全性、可靠性,这也大大增加了反应堆的运行费用。

第四,研究堆转向使用低富集度铀燃料元件以及放射性核废料的处理问题。早期,大多数研究堆使用高浓铀(HEU)燃料,为了减少HEU的扩散危险,提出了研究堆使用低浓铀(LEU)计划。现在许多研究堆已经在使用LEU燃料,但LEU燃料较HEU燃料昂贵,且在大多数情况下会对堆的性能产生不利影响。为了弥补缺陷,相应地又会造成堆运行费用的增加。另外,由于美国中止了接收乏燃料再生、贮存的政策,欧洲的反应堆正面临着燃料储量增加的问题,缺乏足够的燃料储存能力,就有可能导致一些反应堆的关闭。

第五,技术竞争。过去的10—20年间,大量的非核技术作为与放射性有关的反应堆交叉学科得到发展,其中包括同位素应用、放射性分析化学、中子束研究等,然而相对于这些技术的新堆却很少,这样也导致了研究堆应用的减少。

另外,由于早期堆建设得比较多,性能也相对落后,经过这几十年的运行,大部分已老化而退役,这也是导致研究堆数量呈下降趋势的一个原因。

由图2还可看出,虽然研究堆面临着诸多问题,在发展中国家,研究堆的数量仍然呈稳步增长的态势,研究堆的应用前景还是相当乐观的。

3 研究堆的未来发展趋势

根据研究堆历史发展的趋势,结合我国的国情,今后建造的新研究堆必须要考虑使其具备一些先进的技术,且应用广泛^[5]。

首先,新堆应以某些功能为主,做到一堆多用。当前研究堆都朝着提高堆的性能,扩大堆的使用范围和功能,尽量减少堆运行费用的方向发展。虽然我国研究经费较少,但科学技术发展的速度却不断加快,因此就更需要多功能、多用途的新堆型出现。但若用途过多将没有主次,会带来一些难以解决的问题,因此最好能做到以某些功能为主,一堆多用。

其次,新堆应使用高通量紧凑堆芯。进入20世

纪80年代,美国、原联邦德国、日本等国相继开展降低研究堆燃料富集度的研究工作,为了补偿²³⁵U富集度的降低,必须大幅度提高燃料的铀密度,使相同体积的堆芯包含更多的²³⁵U。计算表明,对于紧凑堆芯,²³⁵U富集度由93%(高富)降到45%(中富),就需要把铀的密度从2.8g/cm³增加到6.5g/cm³^[6]。随着燃料制造工艺的逐步发展,出现了新型燃料U_xSi_x-Al,为降低铀富集度创造了条件,使研究堆的发展进入了一个新的水平,并左右了世界上高通量研究堆发展的趋势,即发展中子束流堆,倒中子陷阱堆逐渐成为主流,并出现了高通量紧凑堆芯。

最后,新堆应提高安全性。第一,研究堆运行状态变化多,并且运行人员要较多地接近堆芯和实验设备,人为因素是影响研究堆安全的特别重要的因素,因此应适当提高新堆的自动化水平以尽量减少对运行人员的依赖;第二,新堆应尽量具备两套独立的停堆系统,把“未能停堆事故”的概率降至最低;第三,设计时应使反应堆具有较高的内在安全性和较大的负反应性温度系数,使反应堆具有较强的自保护能力;第四,尽量采用非能动安全系统和可靠的余热排出系统,一般来说,在研究堆上应用非能动技术有着得天独厚的条件,因为研究堆的大水池就是一个很好的热阱。

4 铀氢锆脉冲堆的发展

铀氢锆脉冲堆是美国通用动力公司通用原子部(GA)在20世纪50年代发展起来的一种小型均匀研究堆,采用氢化锆与铀均匀弥散混合作为固体燃料-慢化剂元件,是一种池式反应堆,称简TRIGA(training, research, isotopes, general atomics)堆。

TRIGA堆是所有核反应堆中惟一具有真正“固有安全”而非“机械安全”的反应堆。1956年夏天,美国加州的圣迭亚戈,一群科学家聚集在这里开展一项名为“红色小校舍”的研究计划,在这里Dr. Edward Teller首次提出“安全反应堆”的构想。这群杰出的科学家在他的领导下,旨在设计一种安全反应堆,从停堆状态开始启堆,堆的所有控制棒全部瞬时抽出,该反应堆还能回到稳定状态,并且任何一根燃料元件都不会熔化。换句话说,采用机械手段操纵反应堆的控制和安全系统来预防灾难性事故发生是不够的,要设计一种由自然法则保证的具有“固有安全”的反应堆,即使在反应堆的机械性能失效、控制棒被快速提起的情况下也能保证反应堆的安全。

为了设计这种具有固有安全性的反应堆,首先提出了“热中子原则”的概念.在水冷反应堆中,突然抽走控制棒通常会导致灾难性的事故,造成燃料元件熔化,而 TRIGA 堆却不会发生这种情况,这是因为 TRIGA 堆使用的 UZrH 燃料的瞬发负温度反应性系数大,具有固有安全性. UZrH 燃料是一种均匀合金,氢原子往往束缚在与它最邻近的几个锆原子多面体的中心,中子与氢碰撞时,快中子以 $h\nu = 0.137\text{eV}$ 的整数倍损失能量而热化,能量低于 $h\nu$ 的中子难于在氢化锆中热化,只能在元件周围的水中进一步热化.中子在氢化锆中还可能在一次或几次散射中,从受激的爱因斯坦原子中得到一份或几份以 0.137eV 为单位的能量.当反应堆功率升高,燃料温度增加时,一方面处于较高激发态的氢原子份额增加,另一方面热中子获得能量的几率也增大,慢化性能减退,中子能谱变硬,使得反应性和堆功率下降.既然燃料是一种氢慢化剂占较多份额的均匀合金,那么裂变碎片沉积的能量就会立即表现为慢化剂分子平均速度的增加.在 UZrH 芯内,分子速度增加表现为平均热中子速度的增加,它使中子谱发生瞬时的变化,也改变了裂变、吸收和泄漏之间的平衡,使得中子逃脱俘获的几率增大.由于铀与氢化锆共存,引入正反应性后,二者的升温过程几乎是同时进行的,因此负温度反应性效应是即刻起作用的.

20 世纪 50 年代,GA 的冶金工作者实现了用铀锆合金来制造含高浓度氢的燃料,最终得到的合金其韧度、抗腐蚀性都与不锈钢相同.不管反应堆的功率水平如何,铀氢锆燃料都具有防止核事故的高安全系数.与其他研究堆中使用的燃料相比,TRIGA 堆中使用的铀氢锆燃料具有以下四个显著优点:

(1) 利用热中子理论的铀氢锆燃料使反应堆具有“瞬发负温度反应性系数”,而使用铝包壳平板状燃料的其他研究堆具有的是缓发系数.这个特性使 TRIGA 反应堆能安全承受那些足以毁坏平板状燃料反应堆堆芯的事件.

(2) UZrH 化学性质稳定, $1200\text{ }^\circ\text{C}$ 时也能在水中安全淬火,而铝包壳平板状燃料在 $650\text{ }^\circ\text{C}$ 时就会与水发生破坏性的不安全的过热反应.

(3) UZrH 燃料包壳材料是不锈钢或 800 号合金,它的高温强度、韧性可以保证包壳在 $950\text{ }^\circ\text{C}$ 的高温下也保持完好.而平板状燃料使用的铝包壳在大约 $650\text{ }^\circ\text{C}$ 时就会熔化.

(4) 与铝包壳平板状燃料相比, UZrH 燃料具有极强的包容放射性裂变产物的能力.平板状燃料在

$650\text{ }^\circ\text{C}$ 左右将会熔化,释放出燃料中几乎所有的挥发性裂变产物.相同温度下,即使所有的包壳都被移走, UZrH 燃料仍能保留 99% 以上的裂变产物.

TRIGA 最初的设计是为了满足教育计划、运行培训和核研究计划的需要,现在已经扩展到大规模医药生产和工业用途中,包括放射性同位素的生产、纯硅的生产、中子治癌和实时无损检验等.在美国、日本、罗马尼亚, TRIGA 堆还被用来开发和测试动力堆燃料.

正是因为 TRIGA 堆独特的安全性,现今它已成为世界上应用最广泛的研究堆,自 1958 年世界上第一座 TRIGA 堆建成以来,如今五大洲的 24 个国家里共建有 65 座 TRIGA 堆,其中美国就有 35 座.1997 年,GA 公司获得了在泰国修建一大型核研究中心的合同,其中最重要的部分就是建造一座稳态功率为 10 MW 的 TRIGA 堆,计划 2001 年投入运行.哥伦比亚和印度尼西亚也正在建造 TRIGA 堆,摩洛哥也与 GA 公司签订了建造一座中等功率 TRIGA 堆的合同.经过十年努力,我国第一座铀氢锆脉冲堆于 1990 年由中国核动力研究设计院设计研制建成.

5 研究堆的应用

早期研究堆的应用主要集中于工业用途,如采用中子照相法探查残余的堆芯材料,探明金属中是否有裂缝、空穴或其他物质,确定含氢物质、环氧树脂、中子毒物(如硼、镉等)的分布情况,检查激光通道中是否有阻塞物,装配是否有误,航天飞机上的设备是否已被腐蚀,爆炸装料情况以及齿轮箱或轴承中润滑油膜是否存在等等.现在它在基础和应用研究、商用服务中的应用明显增加,如核医学、材料辐射改性、中子照相、同位素生产等领域的应用前景就十分广阔.

现在建造新堆时就很注重其将来的应用,争取做到“一堆多用”,即使原来建造的老堆,也在进行技术改造,以提高其性能,扩展应用范围.

5.1 基础和应用研究

基础和应用研究计划包括物理学、化学、生物学、医学、地质学、环境科学、考古学、刑事科学以及核与反应堆工程等.采用的技术一般有中子散射、中子活化分析和中子照相.

中子散射是直接利用中子束和各种物质发生相互作用这一特性进行研究的.通过观测被靶物质散射后的中子能量与方向的变化,获得凝聚态物

质基本构造性质的各种信息,诸如聚合物、超导、半导体、生物物质和化合物等。发达国家高性能高功率反应堆以及发展中国家大学里的低功率设备都在进行中子散射方面的研究工作,如美国的 RINSC 研究堆、捷克 Nuclear Research Institute 下属的两座研究堆和斯洛文尼亚 Jozef Stefan Institute 下属的 TRIGA 堆等。

中子活化分析(NAA)是把样品置于堆内辐照,使得样品的组分产生放射性的一门技术。移出辐照过的样品,测定其 γ 能谱,可以鉴定出某元素是否存在。NAA方法对自然界存在的元素种类中的80%极其灵敏,分析痕量元素非常有效。经典的NAA方法是非破坏性的,适用于仪器分析和考古学样品分析。世界上大多数研究堆都开展了中子活化分析研究,如美国的OSTR研究堆、Pulstar研究堆、OSURR研究堆等。美国UML研究堆现在就与UMASS医药中心合作开发一种使用中子活化分析技术测量细胞内钙含量的方法,用来确定钙在标本中所起的作用。

反应堆中子照相技术提供了一种重要的研究工具来检查组件、物件或有机物的内部结构。虽然这已是一项成熟的技术,但在改善分辨率、灵敏度和三维图像等方面仍有许多可研究之处。美国的ARRR研究堆、加拿大的MNR研究堆和斯洛文尼亚Jozef Stefan Institute下属的TRIGA堆现都从事着该领域的研究。

此外,研究堆在核科学及相关科学方面也发挥着重要作用,它为核动力、辐射探测、核安全、核材料制造等学科提供了教育和训练的场所。

5.2 商业服务

在研究堆及其附属实验室里所获得的科学和技术信息可以用于商业目的,服务于社会。这些服务包括:辐射服务、生物医学服务、放射性同位素与辐射源的制备等。

辐射服务是反应堆的一项基本服务。当物质受到电磁、电子、离子、X射线或中子辐照时,其物理性质会发生变化。研究堆就是中子和 γ 辐射源,通常的商业辐射服务项目包括中子嬗变掺杂单晶硅、材料辐照改性、宝石辐照加工和化妆品、药物的去污处理等。美国UML研究堆正在开展一项对动力堆中使用的仪器电缆进行辐射以改善其性能的研究,目前的实验数据表明,经Co-60照射后电缆性能可达3.2GR,经UML研究堆照射后电缆性能可达10.5GR,从而使电缆的使用寿命超过了反应堆的寿期,在整个反应堆运行期间都无需更换电缆。

研究堆用于生物医学服务有其独特的重要性。反应堆可以生产放射性核素并制备相应的标记化合物应用于各种诊断和治疗中。应用于这方面的放射性核素甚多,如I-125,并且随着研究的不断深入,新的应用必将逐步发现。美国的NSCR研究堆和UI研究堆正在进行保健物理学、核医学领域的研究,瑞典Studsvik Nuclear下属的R-20研究堆目前正在开发一种用少量的放射性物质去跟踪过程的新方法,这种新方法使得有可能在不同的化学环境中确定腐蚀性质,有望在不久的将来获得重要应用。

反应堆生产的放射性同位素和密封的放射源广泛应用于轻工业、农业、水文、气象和矿业等部门。密封放射源可以应用在各种 γ 射线继电器和仪器分析中,不同化学形态的非密封放射源可以用于水文、非破坏检验、化学处理中。美国的Reed Reactor Facility研究堆的工作主要就是为工业界提供中子源,用于工业废水的环境监测以及制造业和电子业中的质量检查和纯度测试。

5.3 我国脉冲堆的应用前景

虽然全世界研究堆的发展呈下降趋势,但国内原子能科学研究院、清华大学等几家单位正相继计划筹建几座新研究堆,脉冲反应堆是以铀氢锆为燃料的水池式研究反应堆,具有很高的固有安全性,不但能进行稳态运行,而且还能以脉冲和方波方式运行。其上可设置中央垂直孔道、垂直偏心腔、跑兔辐照系统、单晶硅辐照装置、水平径向孔道、中子照相孔道、水平切向孔道、辐照腔以及热柱等多种辐照实验装置,用以提供不同方式的辐照实验条件。脉冲堆上可建造的同位素生产线有钼铈同位素生产线和通用同位素生产线两种,进行钼铈医用同位素和其他放射性同位素的生产研究工作。在堆上亦可开展基础科学研究、人员培训,用途还是比较广泛和多样的。

我国脉冲堆的应用主要有以下七个方面:

- (1) 同位素生产;
- (2) 中子照相;
- (3) 硼中子俘获治癌;
- (4) 中子活化分析;
- (5) 单晶硅辐照掺杂技术;
- (6) 宝石辐照着色、改进研究;
- (7) 人员培训。

6 结束语

虽然目前世界研究堆数量呈下降趋势,但发展中国家的研究堆数量始终不断增加,这说明研究堆的应用前景还是相当广阔的。我国目前筹建的新堆较多,借鉴国外研究堆发展应用的经验,拓宽我国研

究堆的应用领域,将会对我国核科学研究与技术的发展产生重要影响,起到促进我国科学技术、经济发展的重大作用。

参 考 文 献

- [1] Nuclear Engineering International, 1999, 257—263
- [2] Akhtar K M. Research Reactors—status and Prospects. Workshop on Nuclear Reactors—Physics, Design and Safety, 11 April—13 May 1994. IAEA ICTP H4. SMR/757—28
- [3] 屠柱国, 陈志奇, 许献洪等. 研究堆运行监督管理. 见: 第四届全国研究堆运行安全管理经验交流会论文集. 1998. 1—7 [Tu Z G, Chen Z Q, Xu X H *et al.* Operation, inspection and management of research reactors. In: Proc. of 4th National Meeting on Operation and Safety Management of Research Reactors. 1998. 1—7 (in Chinese)]
- [4] Akhtar K M. Nuclear research reactors—status and prospects. Workshop on Nuclear Reactors—Physics, Design and Safety, 11 April—13 May 1994. IAEA ICTP H4. SMR/757—27
- [5] 王家英, 董铎. 清华大学学报, 1998, 38(4): 117 [Wang J Y, Dong D. Journal of Tsinghua University, 1998, 38(4): 117 (in Chinese)]
- [6] 张禄庆. 核动力工程, 1988, 9(2): 35 [Zhang L Q. Nuclear Power Engineering, 1988, 9(2): 35 (in Chinese)]
- [7] 陈达. 试验与研究, 1998, 21(2): 1 [Chen D. Experiment and Study, 1998, 21(2): 1 (in Chinese)]

• 前沿和动态 •

纸状显示器

常见的显示器有阴极射线管和液晶显示器,它们已分别应用在示波器、电视机、计算机、计算器、通信设备(雷达、呼机、手机等)等方面。此外,还有等离子体显示器,用这种显示器做成的电视机,整机厚度只有大约 3—4 cm。最近,日本佳能公司的工程技术人员研制出了纸状显示器。所谓纸状显示器就是一种薄如纸、柔性大的反射式显示器,它所显示的图像在没有电源输入时仍能存在。这种显示器的显示机制,依据的是电泳现象。研究人员想把常规的显示器(液晶显示器、阴极射线管)的优点和这种纸状显示器的优点结合起来。这类显示器已有人提出过并进行了研究,但是,这里介绍的显示器是世界上第一个可以通过电学控制基面上着色颗粒的面内分布而使图像改变的显示器。这种方法称为面内电泳法。这种显示器的结构和原理简述如下。

为了使显示器具有柔性,显示器的底面是用聚乙烯对酞酸盐(polyethylene terephthalate, PET)做成的。在这底面上布放一个铝次级驱动电极。在电极上放置白色散射层。初级驱动电极装在条型模中,并用洁净的绝缘物把它盖上。然后把它们放在白色散射层上。再用洁净的塑料层把它们都盖起来,但其间留有间隙。最后把含有带正电的黑色颗粒的洁净绝缘液注入间隙内。黑色颗粒在液体中散开。这种多层结构的厚度大约 300 μm 。

当初级驱动电极的电位相对于次级驱动电极为正时,黑色颗粒移向没有电极的区域,因为初级驱动

电极着的是黑色,所以整个显示器吸收光而呈黑色。反之,当初级驱动电极的电位取负值时,黑色颗粒便在电极顶部移动,于是白色散射层显露出来,图像受影响的区域便是明亮的。纵然,示屏处于白色状态,但它看起来并不十分白,因为初级驱动电极的顶部吸收光。在实验条件下,白和黑反差达到 8:1 以上。驱动电压为 40—100 V 时,响应时间变化范围为 30—15 ms,随电压而变。把显示器弯曲时,显示器仍能显示图像。把输入电流的导线去掉后,图像仍显示在那里,甚至可以稳定地显示一个星期,且不受弯曲或挤压的影响。

原型显示器由 46 个直接驱动矩阵元组成,矩阵元用电线与像元相接。简单矩阵元驱动型显示器也在进行研制。可以预料,如果增加精密的控制电极,并附加一些限制颗粒运动的障碍物,则最后便能自由地控制颗粒的运动。试验用的像元尺寸为 4 mm \times 4 mm。每个像元是由分布在纵向和横向的多个驱动电极控制的。研究人员相信,每 120 μm 电极间距可以有一个像元,因而,相应的分辨率为 200 dpi。通过调节驱动电压,可以实现多层次显示。如在多层结构中置放蓝绿色、深红色和黄色的颗粒,则可制成全色纸状显示器。佳能公司预料,至少在 2007 年前,不会有大的商品化的举措,但是,公司希望最早明年,试销较为稳定的显示器。

(李银安摘自 Laser Focus World, 2001, 37(3): 59)