

美国的制冷机发展概况

赵晓如 摘译

主题词：制冷机、低温装置。

内容提要：近年来美国的各种制冷机都取得了重大的发展。着重讨论了在布雷顿、焦耳—汤姆逊、斯特林、脉管以及磁制冷机方面的一些进展。可靠性已成为新的研究领域的主要推动力。回顾了近几年在改进制冷机可靠性方面的一些探讨，比较了不同循环的优点和弊端，还讨论了每种制冷机的最新改进。

制冷机这一术语普遍用于能使温度达到低于120K的中、小型冷冻机。按照这种定义，这里我们排除了广泛用于商业液化系统的大型冷冻机。最近的十多年来，低温工程在商业和军事应用上的不断增长给制冷机带来了相当大的需求，工作中常缺乏合适的制冷机以致于妨碍了低温工程现象在某些特定应用领域的进一步使用。现在已认识到这个问题，美国及其它国家作出相当大的努力着手改进制冷机的性能及可靠性。

一、应用

1. 红外传感器 目前美国制冷机的最大应用是军事上用来冷却夜视和导弹制导的红外传感器，这些传感器大多利用HgCdTe, InSb或PtS作为探测器材料。它们在大约80K的温度下需要0.1到1.0W的制冷量。几家制造厂提供了这每月需求量达几千台的制冷机市场。十年前，这些战术上的应用或者利用几百小时寿命的闭循环斯特林制冷机，或者利用每次实验后不得重新装入高压气体的开式循环焦耳—汤姆逊制冷机。较高可靠性的要求在最近几年中已经导致了采用寿命2000到3000h的斯特林制冷机。这些装置常常取代老式的开循环焦耳—汤姆逊制冷机。

最近发现，红外技术在民用上逐渐增多，例如警察调查、国境巡逻以及医学诊断上的自动温度扫描。

NASA（美国国家航空局和宇宙航行局）和军队在空间应用红外传感器大大扩展了为这些传感器配置制冷机的需要。冷目标的监视要求更高的灵敏度，这要通过降低温度并用其它传感器而获得。如今，有时需要用两级制冷机才能获得30到40K的温度；在某些场合，需要用单级制冷机在60到70K温度范围内来提供冷量。对于长波Si:As监视传感器通常需要10K的温度及0.2—3W的制冷功率。NASA为红外天文学的需要决定将测辐射热仪冷到0.1K，用什么原料，只要最终产品纸符合镀铝原纸的机械、物理性能要求，都该允许，都是合格纸。近年来，国内新开发的苇木浆纸和草木浆纸，其性能已接近或达到有关标准，可以用做镀铝原纸使用。我国木浆紧张，而草、苇浆资源是十分丰富的。这一成果全部用于工业生产之时，必将为开发我国镀铝纸工业立大功。

（4）加强引导加强保护 去年底实行的经济调整压缩，给扩大镀纸工业带来了不利影响，现在看其发展势头明显减缓。研制高效能镀膜机、试制新纸种和搞其它新产品一样，都需花钱和费力气，工厂的承包商肯否在自己任期内冒这风险十分关键，当此重要关头，有关部门实行有效的引导保护政策是十分必要的，目的在于早日建立起自己的民族工业体系。

这种应用就导致了绝热去磁制冷机的研制, 尽管对 He^3 — He^4 稀释制冷机在失重下的应用研究也在进行中。

对这些用于空间的制冷机, 寿命要求为2到10年, 希望寿命能达到5年以上但从未被实验验证过。由于宇宙飞船上可用的能源有限, 这就需要高效率。最后, 传感器上的振动幅度必须很小以排除信号输出中的振动噪声。另外安装在空间位置上的压缩机所引起的额外振动幅度也必须保持很小以防干扰卫星的精确定点并且防止引起结构上的共振。

2. 低温泵 制冷机的最大商业应用是冷却低温泵, 后者被半导体工业用来获得高密度VLSI电路产品所必须的清洁真空。美国每年大约生产4000到5000台低温泵, 应用于这方面的均是20K的两级G—M制冷机, 在此温度下, 制冷功率的变化范围大约是1—15W。可靠性, 低返修率以及低成本是这种应用的推动力。G—M制冷机的效率比较低, 但这些对地面应用影响不大。

3. 其它应用 制冷机还有许多其它方面的应用, 但为此而制造的制冷机数量与红外和低温泵的应用而制造的制冷机数量相比要少得多。最近几年, 人们用于磁共振成像磁制冷机表现出极大的兴趣。大多数情况下, 一台两级G—M制冷机用作冷却屏, 由此大大降低 LHe 的蒸发率, 某些场合, 一级焦耳—汤姆逊(JT)节流装在下端以获得4.2K温度, 并把磁共振成像恒温器中的蒸发氮再液化。GM/JT制冷机多年来也被用于冷却在高层空间通信卫星上的受激辐射微波放大器, 这种用于通信卫星上的参量放大器由两级GM制冷机冷却到20K。

最近几年, 计算机业正在着手研究冷半导体计算机, 大约在80K的温度下, 会使运行速度成倍增加; 目前仅有犬型计算机考虑到了低温运行, 且在80K温度下, 冷却功率是在千瓦范围; 美国已制造了这种计算机。当高温超导体成为实际可行的时候, 将需要在40—60K温度范围内运行的制冷机以把这些装置冷到大约其临界温度的一半。

二、制冷机的类型

通常将制冷机划分为两类: 逆流换热型和回流换热型。逆流换热型制冷机单用逆流热交换器, 普通的逆流换热型制冷机有Brayton和Joule—Thomson。回流换热型制冷机至少有一个回流热交换器或回热器, 此类制冷机有多种形式, 如有的排出器虽和压缩机活塞同步起动, 但相位却超前 90° 。还有一种回流换热型制冷机, 如脉管制冷机, 它和斯特林循环相似, 但不用排出器, 这种制冷机后面将作为进一步讨论。

1. 不同制冷机的应用范围

不同制冷机的典型工作范围是确定的, 但它们的边界范围并不十分严格, 都互有交叉。有些应用可能利用回热循环, 如斯特林制冷机, 80K时功率可上至千瓦范围, 然而, 在这样大规模应用的情况下, 透平—布雷顿系统尤为适用。因为, 在这种规模下它们较有效, 并且其气体轴承提供了高的可靠性, 随着尺寸的减小, 它们的效率大大下降, 这是由于在制造直径小于几毫米的膨胀透平时存在实际困难, 以及在沿冷透平和热制动机构之间的轴向热损的计算存在问题。

由于回流换热型系统在最冷的回热器中缺少基体热容, 故低温极限大约为10K。现在在回热器中利用磁性材料, 如 GdRh , 可以达到4K温度, 但系统效率仍然很低, 用 He 气作工质的焦耳—汤姆逊制冷机的最后级能达4K, 但是用于这样一个系统的可靠压缩机仍处于研究阶段, 这样, 对10K以下及制冷量只有几瓦的区域, 任何制冷机尚未很好的被运用。到目前为止, 这个区域通常运用底部带焦耳—汤姆逊节流的两级G—M制冷机, 自从发现磁制

冷机在这个区域能代替J—T节以来，就对其进行了广泛的研究。

2. 优点和缺点

表1给出了逆流换热型和回流换热型制冷机在不同范畴下的优点(+)，缺点(-)及中立情况(0)。由于空隙容积不影响逆流换热型系统，所以它们能长距离输送冷量。逆流热交换器比回热器更大更复杂。由于回流换热型制冷机运动部分很少，所以它们有时比逆流换热系统更可靠。

表1 不同种类制冷机的优缺点

	逆 流 换 热	回 热 换 热
可 靠 性	0—	0+
效 率	—	+
振 动	+	—
制冷剂传输	+	—
简单热交换器。	—	+

三、可靠性

市场的高可靠性要求对美国制冷机的研究和开发起了积极的推动作用。空间应用至少需要3—5年寿命。最近的十多年，国防部和NASA为达到此目标，已取得了相当大的进展，表2列出了在提高可靠性方面的不同研究。

表2 用不同机械的制冷机获得的典型寿命

	无支撑系统(小时)	支撑系统(年)
曲柄驱动 (摩擦密封)	100—500(斯特林) 20000(GM)	2—5
直线驱动 (间隙密封)	1000—4000	
透平系统 (气体轴承)		2—5

1. 无支撑系统 所有早期制冷机都利用摩擦密封的曲柄驱动的压缩机和膨胀机。对斯特林制冷机，由于系统采用无油润滑，就更限制了它的寿命。大多数用于冷却红外探测器的80K的小型斯特林制冷机就属这种类型，它们的寿命常常是在100—500h的范围内。但是，为延长它们的寿命，在某些场合已采取了一些特殊的措施。1978年四台斯特林制冷机被送入空间，大约在两年的时间里冷却两台 γ 射线探测器，由于系统中氮气的微漏而导致了它们性能的衰退。

VM(维勒米尔)制冷机用一台热压缩机代替了机械压缩机，结果对压缩机密封垫作用力减小，制造的少数VM制冷机的确比相类似的斯特林制冷机的寿命稍长。事实上，由空军创办的外层空间小组，在密封材料的选择和设计上付出相当大的努力之后成功地制成了六台潜在寿命为3—5年的VM制冷机一台成功地证明了在两倍的标准速度下具有两年半的寿命，这些三级制冷机在10K温度下能提供150mW的制冷量，它们中的三台飞行合格并且是在10K温区仅有的飞行合格的制冷机，它们至今还没有任何计划使命。

G—M制冷机利用能增加寿命的油润滑压缩机，因为膨胀阀前的死体积对性能没有任何

影响,所以除油过滤器能在此安装而只会增加压缩机重量。将GM制冷机在低温泵上进行广泛的操作实践有助于提高它们的可靠性。一家工厂用他们的系统每月在这方面进行操作实践,现已累计150万h。

最近两年,许多厂家研制了用于斯特林制冷机的直线驱动压缩机。因为大部分侧向力被排除,所以寿命被提高到1000至4000h,另外,大多数直线驱动装置用间隙密封代替摩擦密封。因为活塞和排出器没有以任何方式支撑,故零件之间仍有一些摩擦。

2. 支撑系统 为了可靠地获得卫星应用所需的3到5年的寿命,必须设法支撑气缸里的活塞和排出器(膨胀机),透平—布雷顿系统多年来利用气体轴承;另一种布雷顿系统—旋转往复制冷机(R^3),运用一台往复运动压缩机和一台不断提供气体轴承的旋转式膨胀机,对该装置进行广泛的寿命测试尚未开始。运用支撑驱动原理的第一台斯特林制冷机是在1983年为NASA/Goddard制造的磁制冷机,这台单级制冷机温度为65K,输出制冷功率5W,运行几年而未出现任何机械故障。事实上,对磁承泵系统的制冷机而言,限制寿命的元件很可能是在复杂的电子线路内。

一种简单的支撑系统,早在80年代初由牛津大学的G. Davey首次运用于斯特林制冷机,它由弯曲的隔膜弹簧组成,它夹住活塞或排出器,驱动杆严格的在径向上运动。一台1W, 80K的牛津制冷机运行了3年没有出现故障。一台类似的制冷机计划将在1990年部署到NASA外层大气探测卫星上来冷却红外辐射仪。英国空间公司可以提供这些飞行合格的斯特林制冷机。尽管此时美国约有两、三家公司正在积极开发或研究这种牛津制冷机,但他们采用这种新技术已经落后了一步。

四、各种制冷机的改进

1. 焦耳—汤姆逊制冷机 这种制冷机已运用于开式循环系统多年,它由氮或氦高压罐提供输入气体,它们冷却快(2—5s),适用于冷却导弹的红外制导系统,装上散热片的微型管被用作热交换器,大约在10年前,W·A·Little为制造热交换器、膨胀毛细管和液体容器,研制了一种照相平板印刷工艺,用此工艺,在一些薄的平板玻璃基片上研磨蚀刻出气体通道,然后将这些基片放在一起熔化制成层压板结构,它包含一完整制冷机的所有通道,由于玻璃基片的热容问题,此类制冷机一般说来没有带散热片的微型管制冷机冷却快,然而,制造过程对批量生产来说是理想的。这些玻璃制冷机通常在大学和工业R.D实验室用于广泛的实验。对于这些微型JT制冷机,由于缺乏可靠的压缩机而限制了它们在实验室的应用。去年玻璃JT制冷机制造商与日本压缩机制造商协作提供了一种用于此制冷机的无油压缩机,这种压缩机的寿命看来在一年以上。

将氮、烃混合气体用于焦耳—汤姆逊制冷机,在美国国内,最近几年人们表现出异乎寻常的兴趣,尽管这一想法早在1971年就由苏联人Alfeev提出。Alfeev指出:这种混合物中,氮占体积的30%,甲烷占体积的30%,乙烷占20%,丙烷占20%,这种系统比单用氮的系统的效率要提高10倍。几年前,当Little指出加入百分之几的 CF_3Br 就可以使这种混合物不易燃时,大大刺激了美国对这种混合物性能的兴趣。这种混合物能够获得的温度范围是在80—100K。为了获得更低的温度,目前正在研究 N_2-Ne 和 N_2-He 的混合物。

对于压缩机问题的另一可能的解决方法是利用吸附压缩机,它的运行是通过热输入而不是机械功输入,用 H_2 和 $LaNi_5$ 的化学吸附系统几年前由喷气推动实验室所研制,温度为20K。用于使焦耳—汤姆逊制冷机获得其它温区的很有前途的物理和化学吸附系统最近通

过鉴定。锶—铯—氧化物/氧化学吸附系统在80K—90K温区显示出前途，碳/氦或碳/甲烷吸附系统在110—140K温区显示出优越性。为降低输入功率，正在计划研究。从一级上的热泄被用来加热另一级，单级压缩机的不同部位往复被加热和冷却，对一台80K、1W的制冷机，现按此方法，预计输入功率约在40—50W。

2. 布雷顿制冷机 布雷顿循环已被军队选用，为冷却空间上的红外聚焦平面阵提供10K温度及几W的制冷功率，使用寿命预期为5年，为了此方案，为两种制冷机提供了资金，一种是上文讨论的R³系统，另一种是透平布雷顿制冷机。

透平布雷顿循环也由其它的制造商在为NASA/Goddard研制，以提供一台5W、65K的制冷机，由于没有任何往返运动部件，所以振动相当低。

3. 斯特林制冷机 随着牛津分置式斯特林制冷机的发展，英国在此领域中取得了许多新的进展。在美国，NASA和JPL正在认真地考虑这种制冷机在不同卫星上的使用；计划在不久的将来对此制冷机进行广泛的实验，这种制冷机总的电动率输入仅为30W，在80K温度下可提供约0.7W的冷量，功率输入比为43W/W，且相对卡诺效率为6.4%。

在美国，斯特林制冷机的重大发展就是运用了直线马达驱动，间隙密封以及提高寿命并使运用于战术应用的制冷机功率输入得到控制。采用能按要求进行控制的制冷机能快速冷却，但后来功率输入被降低到能维持在一个不依赖于热负载的80K的固定温度上。降低功率输入使装置运行减慢并由此增加工作寿命。最近几年，研制出了一些用来冷却手握小型红外传感器的超微型整体斯特林制冷机。其中最小的仅需3.5W输入功率就可获得80K温度130mW的冷量。这种制冷机最大尺寸为85mm，质量仅0.3kg，这样低的输入功率可由电池提供。

4. 脉管制冷机 早在1986年，国家标准和技术研究所(NIST)指出有可能在单级带阀脉管制冷机上获得60K温度，此后，世界范围内的人们对这种只有一个运动部件的新型制冷机普遍感兴趣，其固有效率介于焦耳—汤姆逊和斯特林循环之间。NIST和其它实验室正在进行这方面的工作，力图使单级和两级装置的制冷功率和效率达到最佳化。最近报道了由Zhou等人研制的两级脉管制冷机温度达到了31K。NIST和洛斯—阿拉莫斯国家实验室共同计划，将一热驱动的热声策动器(TAD)用来为带阀脉管制冷机(OPTR)提供动力。联合的TAD—OPTR提供冷量而无任何运动部件。这种设想此时仅处在设计阶段，需要解决的问题是：谐振管内的粘滞损耗和当OPTR在压力比降到大约1.1的运行。

5. 磁制冷机的发展 已经着手研究在1.8K到4K以及4K到20K温度范围内的磁制冷机。最通用的材料是钆镨石榴石(GGG)，一个由GGG板制成的轮子在静磁场中往复旋转并与流动的氦气在4K或在20K时交换热量。在旋转的GGG和静止的框架之间采用间隙密封以防两股氦气流相互混合，美国现在对4—20K的系统的研究，大部分工作量在John Barclay的指导下进行的。适用此温度范围以及较高温度的新材料正在研究之中。

最近几年，由于低温工程在各个领域中的应用更为广泛，美国研究和发展制冷机的工作量已明显增加。对新的制冷机来说，最重要的要求通常是可靠性的改进。随着可靠性的改善，应用会变得越来越广泛。现在空间站的应用，要求制冷机具有5年的寿命并且要求低振动。美国重要的最新工作是从事布雷顿，焦耳—汤姆逊，斯特林，脉管和磁系统的研究。每一种制冷机在某一特定的应用中都有它们各自独有的优点和弊端。

(译自国际低温和制冷会议，(ICCR)特邀报告，中国杭州，1989年5月22—26日，原文作者R. Radebaugh，孟令华校)