

磁冰箱的原理

郑好望 梁红军 尹涛



2001年12月7日,美国能源部在艾奥瓦州立大学埃姆斯实验室的科研人员制成世界上第一台能在室温下工作的磁冰箱,它利用铁磁性制冷工质进出磁场制冷,其效率比普通冰箱高30%以上,且无污染、无噪音、使用寿命长,是一种极具发展前景的绿色环保制冷技术,我国也已将“磁制冷冰箱项目”列入国家863科技计划。下面简要介绍一下磁制冷冰箱的工作原理。

磁热效应

早在1918年,科学家就发现有些金属在磁化时会变热,去磁后又变冷。人们把绝热过程中铁磁质或顺磁质的温度随磁场强度的改变而变化的现象称为磁热效应,这一效应的数学表示是 $(\partial T/\partial H)_S$,其中 H 是磁场强度、 S 是磁介质的熵、 T 是热力学温度。由热力学理论可知,顺磁质 $(\partial T/\partial H)_S > 0$;可见,绝热地减小磁场时,物质的温度将降低,因此这种现象也叫磁致冷效应。其微观机理是:构成物质的分子或原子所包含的每一个电子都同时参与两种运动,即电子的自旋运动和电子绕原子核的轨道运动,这两种运动都对应一定的磁矩——自旋磁矩和轨道磁矩,整个分子的磁矩是它所包含的所有电子的轨道磁矩和自旋磁矩的矢量和。顺磁性材料的离子或原子磁矩在无外磁场时杂乱无章,加上外磁场后,原子的磁矩沿外磁场取向排列,使磁矩有序化,从而减少了材料的磁熵,因而会向外排出热量;而一旦去掉外磁场,材料系统的磁有序度减小,磁熵增大,因而会从外界吸取热量。如果先在等温情形下加外磁场,物质被磁化,系统放出热量;然后在绝热条件下撤去外磁场,磁矩的熵增加,但由于是绝热去磁,系统的总熵不变,磁矩的熵增加是以点阵振动的熵减少为代价的,这将导致物质的冷却。

绝热去磁是获得低温或超低温(低于1K的温度叫做超低温)的有效方法,1933年W. F. 吉奥克完成了顺磁盐绝热去磁实验,获得了千分之几开的低温;上世纪80年代后期,研究人员用超导磁铁设计出磁冰箱;进入21世纪以来,一些发达国家相继

用永磁铁制造出在室温下工作的磁冰箱。

磁冰箱的原理

磁冰箱是根据磁热效应的原理制成的。稀土元素钆(Gd)是一种具有巨磁热效应的金属,在等温磁化时向外界放出热量,在绝热去磁时温度降低,因而可从外界吸取热量,达到制冷目的。为了完成制冷循环过程,可先在高温环境中对工质施加外磁场,并等温地实现伴随着熵减少而进行的放热过程;然后在低温下撤去外磁场,让工质进行等温吸热,最后在这两个过程之间用适当的过程加以连接,就可完成制冷操作。用不同种类的过程连接上述两个过程可以得到不同的磁制冷循环,如磁卡诺循环、磁斯特林循环、磁埃里克森循环以及磁布雷顿循环等。

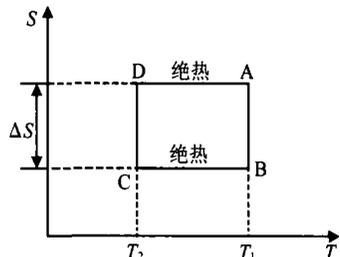


图1 磁卡诺循环

磁卡诺循环是用绝热去磁和绝热磁化过程连接两个等温过程(见图1)。在这个循环中,外部对制冷工质所做的功相当于四边形ABCD的面积。下面以最简单的磁卡诺循环为例对绝热去磁制冷过程进行说明(见图2)。

等温磁化过程(图1中的AB过程)热开关I闭合、II断开,磁场施加于磁工质,使熵减小,通过高温热源与磁工质的热端连接,热量从磁工质传入高温热源。

绝热去磁过程(图1中的BC过程)热开关I断开、II仍断开,逐渐移去磁场,磁工质内自旋系统逐渐无序,在去磁过程中消耗内能,使磁工质温度下降到低温热源温度。

等温去磁过程(图1中的CD过程)II闭合、I仍断开,磁场继续减弱,磁工质从低温热源吸热。

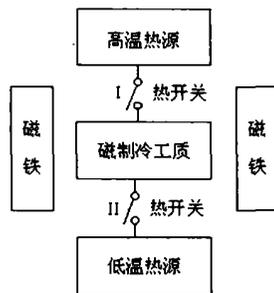


图2 卡诺型磁制冷机工作流程

绝热磁化过程(图 1 中的 DA 过程) 断开 II、I 仍断开,施加一较小磁场,磁工质温度逐渐上升到高温热源温度。

由于室温附近磁性离子系统的热运动大大加强,磁性工质的磁有序度难以形成,在受外磁场作用前后的磁熵变大大减小,同时强磁场的产生也受到许多条件的限制,磁热效应也大大减弱。为了进一步提高室温磁制冷机的效率,通常主要应用磁埃里克森循环制冷机,图 3 是金属钆在 200~300K 条件下的 $T-S$ 图。若按磁卡诺循环制冷(图中 12341),则温降很小。埃里克森循环(图中 12341)由四个过程组成,1 \rightarrow 2 为等温磁化、2 \rightarrow 3 为等磁场过程(温度降低)、3 \rightarrow 4 为等温去磁(吸热制冷)、4 \rightarrow 1 为等磁场过程(温度上升)。

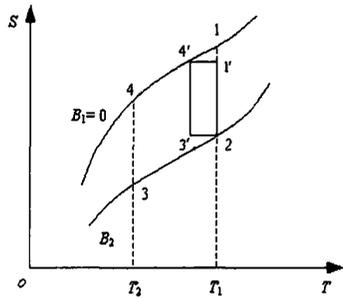


图 3 高温温区磁制冷循环 $T-S$ 图

磁冰箱的核心是一个旋转装置,该装置包括含有金属钆片的转轮和一块高磁场强度稀土永磁铁。工作时,钆轮通过永磁铁缺口进入磁场后出现巨大的磁热效应,由此导致钆轮升温,系统内第一条循环管道的水将钆轮温度升高获得的热量带走,以使钆轮冷却;当钆轮离开磁场后,钆轮温度就会下降到低于它进入磁场前的温度,此时系统内第二条循环管道的水通过钆轮并被钆轮冷却,被冷却的水成为制冷源,可用于制冷;若用凝固点远低于纯水的液体(如水和乙醇的 1:1 混合液)作为制冷源,就可制成有冷冻功能的实用型冰箱。

这一科研成果彻底改变了传统的冰箱制冷系统,工作时只需驱动钆轮转动的发动机、抽水机的电力,从而节约了能源。该系统工作时无声、几乎无振动。如果用近年来新发现的 GdSiGe 系磁致冷材料(在室温附近, Gd₅Si₂Ge₂ 的磁热效应是金属钆的两倍)或新近研究出的铁锰磷砷合金材料替代金属钆片,其制冷效率将更高。

磁冰箱的特点及应用前景

与传统蒸汽压缩式制冷相比,磁制冷冰箱具有

以下优点:磁制冷冰箱不用氟里昂作工作介质,省去了压缩机和涡轮机,工作效率可达 60% 以上,远高于气体压缩式制冷机(小于 40%),且噪音很低;磁冰箱不会产生传统制冷系统排放出的温室气体,对环境保护具有重要意义;磁冰箱自重比同体积的普通电冰箱轻得多,因此箱内容积增大、可以自由搬动,十分方便;磁冰箱运动部件少而简单,且转速缓慢,比普通冰箱更耐用,使用寿命更长。根据美国宇航公司在瑞士召开的国际第一届室温磁制冷会议上的报告,室温磁制冷在制造成本上同样具有与传统蒸汽压缩制冷竞争的实力。专家称,这种利用磁热效应制造的冰箱将取代传统冰箱,具有划时代的意义。

目前,美、英、日、法等国都已研制出磁冰箱,法国决定,停止生产普通电冰箱,以后只生产磁冰箱。我国在室温磁制冷领域也取得了重大进展:2002 年 3 月,南京大学研制成功使用圆柱型磁体的室温磁制冷机,该机使用的是平均 1.5 特斯拉的磁场、往复式气驱动、主动式磁蓄冷循环、以钆为磁制冷工质,获得了 25℃ 温差,并在 12℃ 温差时实现了 24 瓦制冷量的输出;2006 年 9 月,美菱电器与四川大学合作开展“磁制冷冰箱”项目,该项目已列入国家 863 科技计划课题,它的研制成功将引发中国乃至世界冰箱业的重大变革。

我们相信,不久的将来,节能、环保、静音、价廉的磁冰箱将走进千家万户,成为家电领域的新成员。

(陕西省西安通信学院数理教研室 710106)

科苑快讯

实现负折射的纳米带

负折射是目前的一个热点问题,因为它具有奇异的光学用途,比如“超级透镜”及造成“隐形”效果。然而实际的研究工作却只能限制在微波波段,因为所需的小元件实在难以制作。

最近,美国印第安纳州普度大学(Purdue University)的乌代·切迪尔(Uday Chettiar)和同事可能已取得突破性进展。他们报道了对新材料的模拟设计方案,以被绝缘层分隔的金属纳米带模拟负折射材料。这样很容易地就将尺寸减小到 10 纳米。利用这种材料可以在红外,甚至可见光波段,实现负折射现象。

(高凌云译自《欧洲核子中心快报》)