

# 21 世纪制冷的创新热点

(中国科学院理化技术研究所 戴 闻 编译自 Ivan Amato. *Physics*, February 20, 2020)

热效应材料冷却技术具有环境友好特征,有可能取代传统制冷技术,但使其廉价和实用仍是一个重大挑战。

热效应材料制冷的核心工作物质是各种特色固体材料,它们在压力、电场或磁场的往复作用下,可以从制冷对象的冷端吸热,并将这些热量带到热端,进而放出热到环境中。上述固体制冷循环是环境友好的,与我们今天在冰箱和空调中使用的氟利昂类挥发性液体制冷剂不同。现行冰箱和空调,当它们被废弃时,泄漏的氟利昂等对气候变化产生的负面影响,甚至超过二氧化碳。

目前空调等蒸气压缩制冷设备消耗的电力占全球电力的 20%。未来,如果没有制冷技术全球性改造,所有由开发利用太阳能(2018 年

统计数据)创造的新电力供应,都被新增的制冷设备消耗殆尽。

近年来,越来越多的候选热效应材料被发现,包括金属、陶瓷和塑料。热效应材料的温度变化由材料的微观结构熵的变化所决定,工作循环中它们受到磁场、电场或应力场的作用。例如,你可以通过施加外磁场——绝热磁化,令磁分子一致取向,来降低磁热材料中的磁熵。这是一个等熵过程,此过程原子晶格振动的熵增加,补偿磁分子取向之熵减,材料升温。

研究人员热衷于不同类型的热效应材料——电热、磁热或弹热效

图利用 SMA 特性构建一台冷却葡萄酒的商用售货机。

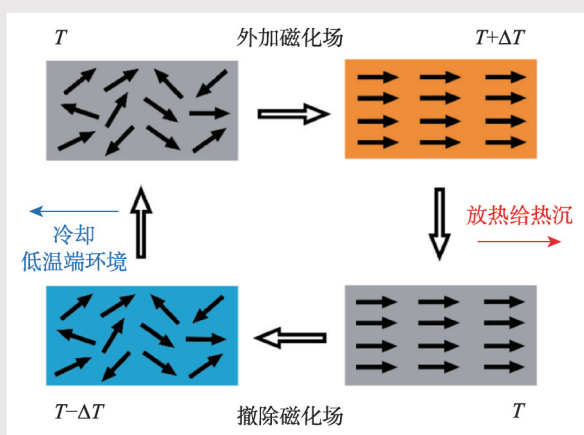
宾夕法尼亚州立大学的 Qi-ming Zhang 长期致力于电热材料的小规模薄结构的应用研究,例如用于冷却电子元器件。Zhang 一直试图将电热陶瓷和聚合物开发成廉价优质高效的冷却材料。2019 年他报告了使用弱电场在聚合物中产生大的电热效应(高达 20 °C)的进展。

美国能源部 Ames 实验室的 Vitalij Pecharsky 等曾经研制了一台基于 Gd 合金工质的磁热制冷机原型。工质部件进出磁场以旋转方式完成循环,制冷机的功效达到了设计要求。现阶段面临磁体成本太高,但研究者对未来抱有信心。

马里兰大学的 Ichiro Takeuchi 现在正关注一类铜基材料,它们属于所谓的形状记忆合金(shape-memory alloy, SMA)家族。制冷工质是一根根铅笔粗细的 SMA 合金管,合金管簇可以通过相对温和的挤压经历弹热温度变化,同时兼顾制冷循环所需的流体热交换。从机理角度研究此类合金,起初目的是地震预报;而 Takeuchi 则试

英国一家初创公司 Barocal, 希望以其专有的压力—热效应材料推进固体制冷技术发展。这些弹热效应材料对静水压力的变化有加热和冷却反应。Barocal 原型设计的核心是所谓的“塑性晶体”,如新戊二醇(neopentyl glycol, NPG)。公司声称,当压力达到 1000 大气压时,Barocal 的最佳材料会经历高达 50 °C 的剧烈温度变化。研究人员指出,他们观察到的新材料压力感应的熵和热变化,与目前标准商用氢氟碳化物制冷剂——挥发性液体制冷剂 R134a——相比,结果相当。

研究人员还在继续寻求新型热效应材料,例如“多铁”材料。这些材料可以同时响应若干个外加作用,如磁场和压力共同作用,而不仅仅是一个。



在磁热循环开始时(见图上部),外加磁场迫使材料中的磁分子取向一致,从而降低其磁熵。绝热磁化总体是等熵过程,作为对磁熵降低的补偿,晶格振动相关的熵增加,于是材料的温度升高,高出热沉 $\Delta T$ ,磁化热放出给高温热沉。随后,借助于热交换流体的帮助,工作物质连同外加磁场降低温度,温度降到与低温热沉一致。经历绝热去磁,撤除施加在工质材料的磁场,使磁分子的排列再度混乱。绝热去磁也是等熵过程,低温端的熵增需要晶格熵降低来补偿,工质降温 $\Delta T$ 。最后工质从低温端环境吸热,使得空调或电冰箱可以源源不断地将热量从低温端输送到高温端