

驱动微型节流制冷机的压缩机

曹海山, 李俊明

(清华大学, 北京 100084)

(Tel: 010-62793559, Email: haishancao@tsinghua.edu.cn)

摘要: MEMS技术为节流制冷机的微型化开辟了新的方向, 但现阶段, 微型节流制冷机还主要依靠体积相对庞大的气瓶来提供高压气源。这样的开式制冷系统整体体积庞大, 在很大程度上限制了微型节流制冷机的应用潜力。若要减小制冷系统整体体积, 需要与微型节流制冷机相匹配的微型压缩机来为其提供高压气源, 从而实现紧凑的闭式制冷系统。本文介绍了可用于驱动微型节流制冷机的吸附式压缩机的工作原理、研究现状和发展趋势。

关键词: 节流, 微型制冷机, 吸附, 压缩机

COMPRESSORS FOR MICROMACHINED JOULE-THOMSON CRYOCOOLERS

Cao Haishan Li Junming

(Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua Jiaotong University, Beijing 100084)

Abstract MEMS technology paves up a new method for the miniaturization of Joule-Thomson (JT) cryocoolers. However, JT microcoolers are mainly driven by using relatively large high-pressure gas cylinders at present. This type of open-loop cryogenic systems have large volume, which inherently restricts the potential applications of microcoolers. To reduce the system volume, it is required to have miniature compressors that match JT microcoolers to provide high-pressure gases, closing the cryogenic systems. This paper introduces the working principle, research status and future development of sorption compressors for driving JT microcoolers.

Keywords Joule-Thomson Microcooler Sorption Compressor

0 前言

低温制冷技术为很多前沿科学的发展提供了可能性。一方面, 在科学实验工程(如超导高能加速器和超导磁约束聚变装置等)、空间技术、能源等领域的大型应用仍方兴未艾; 另一方面, 在电磁探测(如红外和射电探测等)、科学仪器、医疗设备等领域的微小型应用对低温制冷技术提出了更高的要求。图1给出了部分微小型应用所需要的制冷温度和制冷量的范围, 包括: 用于组装快速数字电路的低/高温超导体电子器件, 用于探测微弱的磁场信号的低/高温超导体量子干涉仪, 用于放大信号的基于砷化镓的电子器件, 用于探测射电频谱的高电子迁移率晶体管, 用于分析材料成分、结构等的X射线探测器, 用于提高互补金属氧化物半导体的运行速度、降低其热噪音, 以及低温物性研究等。需要说明的是, 图1中给出的应用所需要的制冷量和制冷温度不一定固定在图1中所给出的值。对某一应用而言, 其所需要的制冷量有一部分用于器件本身的消耗, 还有一部分用于弥补器件辐射、引线等造成的热损失。要实现这类微小型应用的有效匹配制冷, 就需要研发与其在尺寸和制冷量两方面都相匹配的微小型低温制冷系统。

1 微型节流制冷机

基于MEMS技术的微型节流制冷机具有结构紧凑、无振动、无电磁干扰且可以和被冷却器件完美耦合等优点, 在低温电子器件冷却和低温材料科学研究中受到了广泛关注。这种类型的微型节流制冷机是通过MEMS加工工艺, 在玻璃基片上刻蚀出换热器微通道、节流元件和蒸发器后, 将刻蚀好的基片熔融接合在一起, 再切割而成(见图2)。现已研制出的基于MEMS技术的微型节流制冷机包括: 130-150 K 烃类

作者简介: 曹海山, (1981-), 男, 副研究员, 从事制冷与低温领域的研究工作。

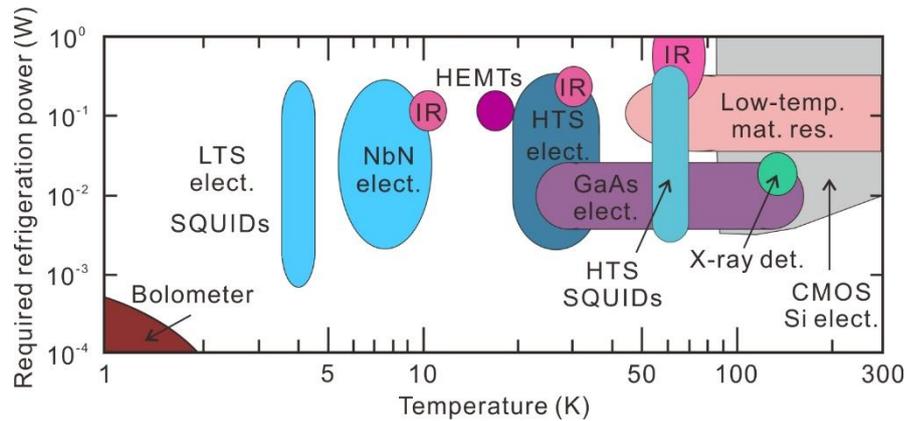


图1 部分微型低温制冷技术应用所需要的制冷温度和制冷量^[1] (Bolometer: 辐射热测量计、CMOS Si elect.: 互补金属氧化物半导体、GaAs elect.: 砷化镓电子器、HEMTs: 高电子迁移率晶体管、L-HTS elet./SQUIDs: 低-高温超导体电子器件/超导体量子干涉仪、Low-temp. mat. res.: 低温物性研究、NbN elect.: 氮化铌电子器件和 X-ray det.: X 射线探测)

混合工质微型制冷机^[2]、135 K 甲烷工质微型制冷机^[3]、70-100 K 氮气工质微型制冷机^[4-7]、70 K 氮气-烃类混合工质微型制冷机^[8]以及 30-35 K 氮气和氢气 (或氦气) 工质两级微型制冷机^[9-11]。现阶段, 微型节流制冷机还主要依靠体积相对庞大的气瓶来提供高压气源。这样的开式制冷系统整体体积庞大, 在很大程度上限制了微型节流制冷机大规模应用。若要减小制冷系统整体体积, 需要与微型节流制冷机相匹配的微型压缩机来为其提供高压气源, 从而实现紧凑的闭式制冷系统。

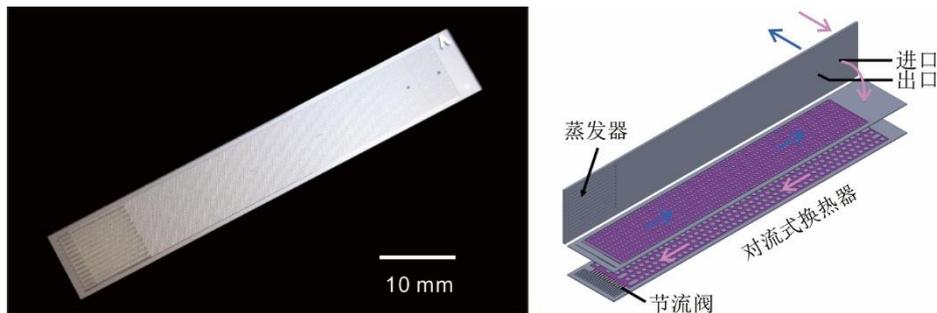


图2 Twente 大学基于 MEMS 技术的微型节流制冷机^[12]。左图: 实物图, 右图: 剖面图 (箭头指示流体的流动方向)

2 压缩机

用于驱动微型节流制冷机的压缩机包括机械式压缩机和吸附式压缩机两种。目前, 机械式压缩机已被用于驱动多元混合工质制冷机^[13-16], 但存在的问题有: 1. 机械式压缩机的运动部件所引起的振动问题^[17]; 2. 机械式压缩机通过交流电驱动, 会对其冷却的电子器件产生电磁干扰^[18]; 3. 机械式压缩机中的润滑油与混合工质的选择性溶解造成的制冷机运行时混合工质的浓度变化, 从而影响制冷机的运行效果^[19]; 4. 低温条件下润滑油的凝固会造成节流阀阻塞, 缩短制冷机的运行时间^[13]。因润滑油的不利影响, 国际上也开展了对无油机械式压缩机的研究^[20-23]。无油机械式压缩机虽然解决了润滑油在制冷系统中造成的问题, 但其最大压比低, 还不足以驱动纯工质微型节流制冷机, 且仍存在振动、电磁干扰的缺点。

与机械式压缩机相比, 吸附式压缩机具有无油、无振动、无电磁干扰、可靠性高的优势, 其应用潜力也越来越受到关注。吸附式压缩机是利用多孔吸附材料在不同温度、压力条件下对气体吸附特性的差异, 实现低压进气、高压出气。吸附式压缩机单元示意图如图 3 所示, 压缩机腔体中心的加热管用于加热吸附剂, 气隙式热开关用于控制压缩机腔体与冷却热沉的换热。加热过程中, 气隙式热开关被抽真空, 以减少压缩机腔体和冷却热沉之间的热传递。冷却过程中, 气隙式热开关被充满气体, 以增加压缩机腔体和冷却热沉之间的热传递。热开关控制器内有吸附材料 (吸附材料的选择取决于气隙式热开关内充注的气体), 通过气体吸附和解吸实现气隙式热开关的抽真空和充气体的控制。

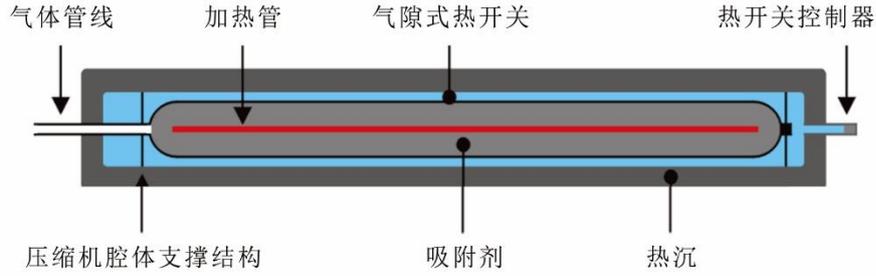


图 3 吸附式压缩机单元示意图

图 4 显示了吸附等温线图中压缩机循环示意图以及循环过程中压缩机腔体内温度、压力以及加热器和单向阀状态随时间的变化。在初始状态 A 点时，压缩机腔体被加热，当压力增加至状态点 B，高压侧单向阀打开，气体从吸附材料上被解吸，流出腔体；当温度升高至状态点 C 时，压缩机腔体开始被冷却，当压力降低至状态点 D 时，低压侧单向阀打开，气体流回腔体，并被吸附到吸附材料上，完成一次循环。

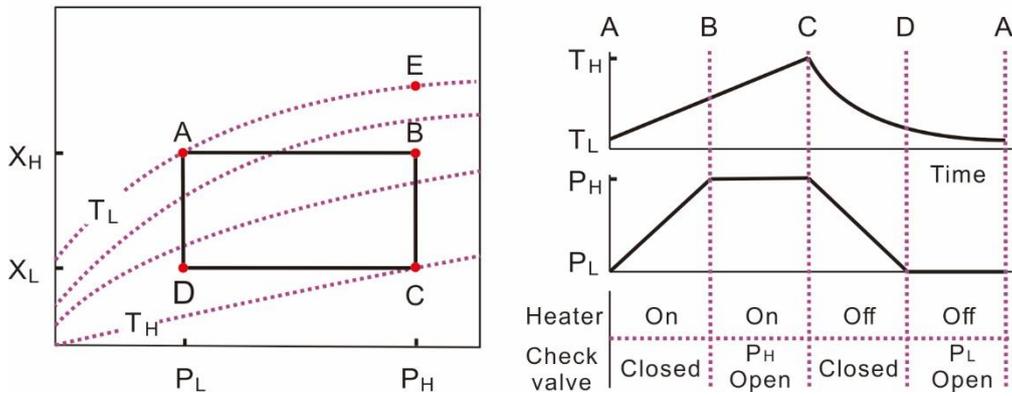


图 4 左图：吸附等温线图中压缩机循环示意图 A→B→C→D→A（X：吸附浓度，被吸附工质与吸附材料的质量比；T：温度；P：压力；下角标 L, H 分别表示低，高）， $X_E - X_A$ 表示同一等温线上压力引起的吸附浓度差；右图：压缩机循环过程中腔体内温度，压力以及加热器和单向阀状态随时间的变化

吸附式节流制冷系统的性能系数 COP 和吸附材料和工质物性的关系如下：

$$COP = \Delta X \Delta h / Q_{input} \quad (1)$$

其中， ΔX 和 Δh 分别表示吸附浓度差(kg/kg)和比焓差(J/kg)， $\Delta X = X_H - X_L$ ， $\Delta h = h(T_0, P_L) - h(T_0, P_H)$ ， T_0 表示流入制冷机的工质温度， Q_{input} 表示单位质量吸附材料一次循环所需输入功 (J/kg)，主要是吸附材料热容 C_s (J/kg K)，和温差 $T_H - T_L$ 的函数：

$$Q_{input} \approx C_s (T_H - T_L) \quad (2)$$

吸附式节流制冷系统的制冷量是工质的质量流量 \dot{m} 和比焓差 Δh 的乘积：

$$\dot{Q}_c = \dot{m} \Delta h \quad (3)$$

工质的质量流量 \dot{m} 取决于吸附材料质量 m_s (kg)，吸附浓度差 ΔX (kg/kg)，循环时间 t_{cycle} (s) 的函数：

$$\dot{m} = m_s \Delta X / t_{cycle} \quad (4)$$

循环时间 t_{cycle} 取决于吸附材料加热后温度 T_H ，冷却后温度 T_L ，冷却热沉温度 T_{HS} ，吸附材料热容 C_s 和吸附材料和冷却热沉之间的热阻 R_s ：

$$t_{cycle} = 2 \ln \left(\frac{T_H - T_{HS}}{T_L - T_{HS}} \right) R_s C_s \quad (5)$$

吸附材料和冷却热沉之间的热阻 R_s 包括界面热阻和吸附材料导热热阻, 其中, 吸附材料导热热阻和材料热导率成反比。通过 Eqs. 1-2 可知, 减小吸附材料的比热容有利于提高吸附式节流制冷系统的性能; 通过 Eqs. 3-5 可知, 减小吸附材料的比热容和增加吸附材料的热导率, 有利于提高吸附式节流制冷系统的制冷量。因此, 适用于吸附压缩机的材料不仅应具有良好的吸附性能, 还应具有比热容小、热导率高的热物性。

吸附式压缩机根据吸附机理的不同可分为物理式吸附与化学式吸附两种。在物理吸附中被吸附工质与吸附材料之间的靠范德华力相互作用, 而在化学吸附中被吸附工质与吸附材料发生电子的转移、交换或共有, 形成化学键。关于吸附式压缩机的研究开始于 1963 年, 当年美国 JPL 实验室申请了利用硅胶为吸附剂, 二氧化硫为工质, 用以实现航天器部件温度控制的专利^[24]。1978 年, Hartwig 利用沸石为吸附剂, 一氧化二氮为工质, 实现了压比 2.1:0.1 MPa, 制冷温度 185 K, 制冷量 3 W 的吸附式制冷系统^[25]。由于基于硅胶、沸石的吸附式压缩机效率低, 此后关于吸附式压缩机的研究几近停滞。直到 1986 年美国 JPL 实验室 S. Bard 利用活性炭为吸附剂, 氮气为工质, 活性炭在 400 K 和 250 K 之间循环加热冷却, 实现了压比 5.39:2.26 MPa, 制冷温度 118 K, 制冷量 500 mW, 输入功率 155 W 的吸附式制冷系统^[26]。1986 年后, 物理吸附式压缩机的研究多是基于活性炭。1992 年美国 AEROJET 公司 L.Wade et al. 利用活性炭为吸附剂, 甲烷为工质, 活性炭在 450 K 和 245 K 之间循环加热冷却, 实现了压比 1.0:0.55 MPa 的吸附式压缩机。通过将甲烷预冷至 158 K, 实现了制冷温度 137 K, 制冷量 1.97 W, 输入功率 151 W 的吸附式制冷系统^[27]。2002 年荷兰 Twente 大学 J.F.Burger et al. 利用活性炭为吸附剂, 乙烯为工质, 活性炭在 473 K 和 293 K 左右室温之间循环加热冷却, 实现了压比 1.5:0.2 MPa 的吸附式压缩机。通过将乙烯预冷至 238 K, 实现了制冷温度 169 K, 制冷量 122-155 mW 的小型吸附式制冷系统^[28]。联合欧洲航天局, 2007 年 J.F.Burger et al. 利用活性炭为吸附剂, 氦气为工质, 活性炭分别在 121-52 K, 82-49 K 之间循环加热冷却, 实现了压比 1.65:0.4 MPa 和 0.4:0.13 MPa 的两级吸附式压缩机。通过将氦气预冷至 14.5 K, 实现了制冷温度 4.5 K, 制冷量 5 mW, 重 8.3 kg 的吸附式制冷系统^[29]。2013 年荷兰 Twente 大学 Wu et al. 比较分析了以活性炭为吸附材料, 氮气、甲烷、一氧化碳、氦气为工质, 制冷温度区间 65-160 K 以及氦气、氢气为工质, 制冷温度区间 16-38 K 的吸附式节流制冷系统的性能。研究发现, 因活性炭在室温下 (293 K) 对上述 6 种工质的吸附量过低, 活性炭需要预冷到室温以下以获得可观的吸附量^[30]。相比较物理吸附, 化学吸附在室温或更高温度下的吸附量要大得多。1976 年荷兰 Philips 公司 H.H. Van 和 A. Mijnheer 利用镧镍合金 (LaNi_5) 为吸附剂, 氢气为工质, LaNi_5 在 410 K 和 290 K 之间循环加热冷却, 实现了压比 4.5:0.4 MPa 的吸附式压缩机。通过将氢气预冷至 80 K, 实现了制冷温度 26 K, 制冷量 1 W, 输入功率 450 W 的吸附式制冷系统^[31]。1983 年美国 JPL 实验室 J.A. Jones 同样采用 LaNi_5 和 H_2 作为吸附剂和工质, 利用 LaNi_5 在 373 K 和 294 K 之间循环加热冷却, 实现了压比 4.0:0.6 MPa, 制冷温度 29 K, 制冷量 650 mW, 输入功率 250 W 的吸附式制冷系统^[32]。1988 年美国 JPL 实验室 S.Bard et al. 采用镧铈氧化物 (PCO) 和氧气作为吸附剂和工质, 利用 PCO 在 923K 和 600K 之间循环加热冷却, 实现了压比为 2.8:0.03 MPa 的吸附式压缩机。利用 250 K 热电预冷器、200 K 热点预冷器以及 140 K 氮气节流制冷机逐级冷却, 实现了制冷温度 80 K, 制冷量 340 mW^[33], 输入功率 344 W 的吸附式制冷系统。系统中氮气节流制冷机是由以活性炭为吸附剂的吸附式压缩机驱动, 该压缩机是通过利用活性炭在 600 K 和 280 K 之间循环加热冷却, 实现了压比为 4.4:0.4 MPa 的压比。

综上所述, 物理吸附式压缩机早期的研究主要以硅胶和沸石作为吸附材料, 但是由于这两种材料的吸附性能有限。目前物理吸附式压缩机主要是以活性炭作为吸附材料, 乙烯, 甲烷, 氦气, 氮气, 氢气, 氦气等为工质。但研究发现, 因活性炭在室温下 (293 K) 对除乙烯以外的多种工质的吸附量过低, 活性炭需要预冷到室温以下以获得可观的吸附量, 而这种利用预冷增加吸附量的方式势必会增加压缩机的复杂性, 不利于压缩机的微型化。用于化学吸附的材料有镧镍合金和镧铈氧化物, 两者分别是针对氢气和氧气的吸附。化学吸附材料吸附量大, 并且在近室温或室温, 与高于室温的范围内循环。然而, 化学吸附仅适用于特定的工质和吸附材料组合, 应用范围窄。

3 结论

相比较基于 MEMS 技术的微型制冷机的发展, 微型压缩机的发展相对滞后。吸附式压缩机的研究主要针对纯工质, 作者还未见有关混合工质吸附式压缩机的报道。吸附材料的研究以活性炭为主, 高效吸附材料紧缺已成为制约吸附式压缩机微型化的瓶颈。要实现吸附式压缩机的微型化, 一方面可探索现有吸附材料对混合工质吸附性的研究, 混合工质所要求的压力比低, 相对容易实现, 然而混合工质的采用也带来了新的问题, 比如混合工质物性、多相流动及传热等; 另一方面需要探索高效、适用于不同纯工质, 能够

满足不同制冷温度需求的吸附材料，高性能吸附材料的开发需要综合考虑吸附材料的吸附性、热物性及稳定性等，研究涉及工程热物理、材料、化学等多个学科，是多学科交叉问题。

参考文献

- [1] Burger. J. Cryogenic microcooling: A micromachined cold stage operating with a sorption compressor in a vapor compression cycle: University of Twente; 2001.
- [2] Derking JH, Vermeer CH, Tirolien T, Crook MR, ter Brake HJM. A mixed-gas miniature Joule-Thomson cooling system. *Cryogenics*, 2013, 57:26-30.
- [3] Derking JH, Holland HJ, Lerou PPPM, Tirolien T, ter Brake HJM. Micromachined Joule-Thomson cold stages operating in the temperature range 80-250 K. *Int. J. Refrig.*, 2012, 35:1200-7.
- [4] Garvey S, Logan S, Rowe R, Little WA. Performance characteristics of a low-flow rate 25 mW, LN₂ Joule-Thomson refrigerator fabricated by photolithographic means. *Appl. Phys. Lett.*, 1983, 42:1048-50.
- [5] Little WA. Microminiature refrigeration. *Adv. Cryog. Eng.*, 2008, 53:597-605.
- [6] Lerou PPPM, Ter Brake HJM, Burger JF, Holland HJ, Rogalla H. Characterization of micromachined cryogenic coolers. *J. Micromech. Microeng.*, 2007, 17:1956-60.
- [7] Cao HS, Vanapalli S, Holland HJ, Vermeer CH, ter Brake HJM. A micromachined Joule-Thomson cryogenic cooler with parallel two-stage expansion. *Int. J. Refrig.*, 2016, 69:223-31.
- [8] Little WA, Paugh RL. Development of fast cool-down, Joule-Thomson microminiature refrigerator and vacuum package for operation of infrared focal plane arrays at 70 K. *Cryocoolers 1990*, 6:161-9.
- [9] Little WA, Yaron R, C.Fuentes. Design and operation of a 30 K two-stage nitrogen neon JT cooler. *Cryocoolers*, 1993, 7:971-7.
- [10] Cao HS, Mudaliar AV, Derking JH, Lerou P, Holland HJ, Zalewski DR, et al. Design and optimization of a two-stage 28 K Joule-Thomson microcooler. *Cryogenics*, 2012, 52:51-7.
- [11] Cao HS, Holland HJ, Vermeer CH, Vanapalli S, Lerou PPPM, Blom M, et al. Characterization of a two-stage 30 K Joule-Thomson microcooler. *J. Micromech. Microeng.*, 2013, 23:065022.
- [12] Cao HS, Vanapalli S, Holland HJ, Vermeer CH, ter Brake HJM, Lerou PPPM, et al. Joule-Thomson microcooling developments at University of Twente. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, 171:012064.
- [13] Little WA, Sapozhnikov I. Low Cost Cryocoolers for Cryoelectronics. *Cryocoolers*, 1997, 9:509-13.
- [14] Lin MH, Bradley PE, Huber ML, Lewis R, Radebaugh R, Lee YC. Mixed refrigerants for a glass capillary micro cryogenic cooler. *Cryogenics*, 2010, 50:439-42.
- [15] 闫彪, 公茂琼, 吴剑峰. 微型压缩机驱动的微型混合工质 J-T 制冷器实验研究. *制冷学报*, 2013, 34(04):14-7.
- [16] Gong MQ, Wu JF, Yan B, Zou X, Zhuang XR, Hu QG. Study on a Miniature Mixed-gases Joule-Thomson Cooler Driven by an Oil-lubricated Mini-compressor for 120 K Temperature Ranges. *Physics Procedia*, 2015, 67:405-10.
- [17] Mon GR, Smedley GT, Johnson DL, Ross RG. Vibration Characteristics of Stirling Cycle Cryocoolers for Space Application. *Cryocoolers 1995*, 8:197-208.
- [18] Johnson DL, Smedley GT, Mon GR, Ross RG, Narvaez P. Cryocooler Electromagnetic Compatibility. *Cryocoolers 1995*, 8:209-20.
- [19] Gong M, Zhou W, Wu J. Composition Shift due to the Different Solubility in the Lubricant Oil for Multicomponent Mixtures. *Cryocoolers*, 2007, 14:459-67.
- [20] Yoon JS, Choi JW, Kim MS. Computational and experimental investigation on the performance characteristics of the micro gas compressor. *Microelectron. Eng.*, 2009, 86(10):1975-82.
- [21] Yoon JS, Choi JW, Kim MS, Yoo YE, Choi DS. Studies on the performance characteristics and improvements of the piezoelectrically-driven micro gas compressors. *Microelectron. Eng.*, 2009, 86(11):2297-304.
- [22] Sobol S, Tzabar N, Grossman G. Miniature Piezoelectric Compressor for Joule-Thomson Cryocoolers. *Physics Procedia*, 2015, 67:423-7.
- [23] Champagne P, Olson JR, Nast T, Roth E, Collaco A, Kaldas G, et al. Development of a J-T Micro Compressor. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2015, 101:012009.
- [24] Webb JE. Intermittent type silica gel adsorption refrigerator, US3270512A, 1966.
- [25] Hartwig WH. Cryogenic Refrigeration Concepts Utilizing Adsorption Pumping in Zeolites. *Adv. Cryog. Eng.*, 1978, 23:438-47.
- [26] Bard S. Development of an 80-120 K charcoal-nitrogen adsorption cryocooler. *Cryocoolers*, 1986, 4:43-56.
- [27] Wade L, Ryba E, Weston C, Alvarez J. Test performance of a 2 W, 137 K sorption refrigerator. *Cryogenics*, 1992, 32:122-6.
- [28] Burger JF, Holland HJ, Seppenwoolde JH, Berenschot E, ter Brake HJM, Gardeniers JGE, et al. 165 K Microcooler Operating with a Sorption Compressor and a Micromachined Cold Stage, *Cryocoolers*, 2002, 11: 551-60.
- [29] Burger JF, ter Brake HJM, Holland HJ, Meijer RJ, Veenstra TT, Venhorst GCF, et al. Long-life vibration-free 4.5 K sorption cooler for space applications. *Rev. Sci. Instrum.*, 2007, 78: 065102.
- [30] Wu Y, Zalewski DR, Vermeer CH, ter Brake HJM. Optimization of the working fluid for a sorption-based Joule-Thomson

cooler. *Cryogenics*, 2013, 58:5-13.

[31] van Mai HH, Mijnheer A. Hydrogen refrigerator for the 20 K region with a LaNi_5 hydride thermal absorption compressor for hydrogen. *Proceedings of the fourth International Cryogenic Engineering Conference*, 1972, p. 122-5.

[32] Jones JA. LaNi_5 hydride cryogenic refrigerator test results. *NASA Goddard Space Flight Center Refrig for for Cryogenic Sensors* 1983. p. 357-73.

[33] Bard S, A. Jones J, R. Schember H. A two-stage 80 K/140 K sorption cryocooler *Proceedings of the 12th International Cryogenic Engineering Conference*, 1988, p. 626-30.