

文章编号: 1672-8785(2024)07-0035-07

制冷工质压力对红外用波纹管 J-T 制冷器 制冷性能的影响研究

张永壮 韩蓬磊 饶启超 苏鹏翼 徐 千

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要: 通过具体实验研究了制冷工质压力对波纹管自调式 J-T 制冷器制冷性能的影响。实验工况内的结论如下: 在一定的压力范围内($11\text{ MPa} \leq P \leq 23\text{ MPa}$), 随着工质压力的增大, 应用该款制冷器的红外系统的启动时间逐步缩短, 但启动加快的速率会随工质压力的增大而减小。当工质压力增大到一定程度($23\text{ MPa} \leq P \leq 27\text{ MPa}$)时, 启动时间将趋于稳定。在一定的压力范围内($11\text{ MPa} \leq P \leq 15\text{ MPa}$), 随着工质压力的增大, 应用该款制冷器的红外系统的蓄冷时间逐步加长; 但工质压力增大到一定程度($15\text{ MPa} \leq P \leq 27\text{ MPa}$)时, 蓄冷时间将趋于稳定。在一定的压力范围内($11\text{ MPa} \leq P \leq 27\text{ MPa}$), 随着工质压力的增大, 制冷器启动时的最大流量呈线性增大趋势, 运行时的稳定流量呈逐步增大趋势。本文实验研究的过程方法和研究结果具有工程借鉴意义。

关键词: 制冷工质压力; 波纹管自调式 J-T 制冷器; 制冷性能; 实验研究

中图分类号: TB651 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2024.07.005

Research on the Influence of Refrigerant Pressure on the Refrigeration Performance of Corrugated Tube J-T Cooler for Infrared Application

ZHANG Yong-zhuang, HAN Peng-lei, RAO Qi-chao, SU Peng-yi, XU Qian

(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

Abstract: The influence of refrigerant pressure on the refrigeration performance of a corrugated tube self-adjusting J-T cooler was studied through specific experiments. The conclusion of the experimental conditions is that within a certain pressure range ($11\text{ MPa} \leq P \leq 23\text{ MPa}$), as the working fluid pressure increases, the start-up time of the infrared system using this refrigeration device gradually shortens, but the rate of accelerated startup will decrease with the increase of working fluid pressure. When the working fluid pressure increases to a certain extent ($23\text{ MPa} \leq P \leq 27\text{ MPa}$), the startup time will tend to stabilize. Within a certain pressure range ($11\text{ MPa} \leq P \leq 15\text{ MPa}$), as the working fluid pressure increases, the storage time of the infrared system using this type of cooler gradually increases. But when the working fluid pressure increases to a certain extent ($15\text{ MPa} \leq P \leq 27\text{ MPa}$), the cold storage time will tend to stabilize. Within a certain pressure range ($11\text{ MPa} \leq P \leq 27\text{ MPa}$), with the increase of working fluid pressure, the maximum flow rate of the refrigerator increases linearly during startup, and the stable flow rate gradually increases during operation. The

收稿日期: 2023-10-16

作者简介: 张永壮(1995-), 男, 河北张家口人, 硕士, 主要从事红外探测技术、制冷与低温技术研究。
E-mail: 1145609512@qq.com

process, methods, and research results of this experimental study have reference significance for engineering practice.

Key words: refrigerant pressure; corrugated tube self-adjusting J-T cooler; refrigeration performance; experimental study

0 引言

红外制导技术是当今制导武器领域的重要应用板块和研发方向。红外制导系统需要在深冷环境下工作,要求降温时间达到几十秒甚至几秒钟,从而使系统快速响应并快速捕捉目标。实现快速降温并为红外系统提供稳定的深冷环境依靠的关键部件就是 J-T 制冷器。

J-T 制冷器除了用在制导武器领域之外,还广泛应用于空间电子设备、雷达探测系统、电子显微系统、低温医学系统、低温电子设备环境温度控制系统等航空航天、军事、医疗领域^[1-4]。

自调式节流制冷器具有结构简单、响应速度快、稳定工作时间长等突出优势,在红外制导领域具有广泛的应用^[5]。但波纹管自调式节流制冷器的正向设计一直是科研生产中的重点和难点。由于波纹管自调式节流制冷器属于开式系统,必须配置高压气瓶。但红外系统有严格的空限制,要求气瓶体积小,而压力过大又会产生安全隐患。因此,研究制冷工质的压力对波纹管自调式 J-T 制冷器制冷性能的影响是非常必要的。研究过程和结果将会为自调式制冷器的正向设计提供实际依据,同时对实际的工程应用做出指导。

本文选取一款波纹管自调式 J-T 制冷器,通过具体的实验研究分析了制冷工质压力对波纹管自调式 J-T 制冷器最大流量和稳定流量的具体影响,同时研究了制冷工质压力对应用波纹管自调式节流制冷器的红外系统的启动时间和蓄冷时间的影响。研究过程和结果具有一定的实践指导意义。

1 理论分析

1.1 制冷器启动理论分析

对于制冷型红外探测系统来说,制冷器的启动是一个非常重要的过程。红外探测器的启动时间是指红外探测器降温至稳定工作温度的时间。J-T 制冷器的启动时间是指将杜瓦组件和制冷器冷区降温至稳定工作温度的时间。启动时间 t 为

$$t = \frac{MC(T_0 - T_C)}{m(\Delta I_t - \Delta I_h) - Q_a} \quad (1)$$

式中, t 是制冷型红外系统的启动时间; M 是制冷器冷区和杜瓦组件的总质量; C 是制冷器冷区和杜瓦组件的平均比热容; T_0 是外界环境温度; T_C 是制冷器的制冷温度; m 是耗气量; ΔI_t 表示等温节流效应; ΔI_h 是制冷器逆流换热不完全引起的热损失; Q_a 是外界环境的总漏热。

以上制冷器启动过程的理论计算中,虽然各物理量的含义清晰且关系明确,但仍属于理想状态下的理论计算,其误差和偏差较大且适用范围有严格限制,想得到准确数值和结果的难度很大。因此需要依靠实验手段才能得出准确的数值和状态规律。

1.2 制冷器流量理论分析

对于制冷型红外探测系统来说,制冷器的工作流量是一个非常重要的参考指标。它是指红外探测器工作时制冷器单位时间所需的制冷工质的质量。本波纹管自调式 J-T 制冷器的节流结构如图 1 所示。

图 1 中,纵轴 r 代表阀针的半径;横轴 x 代表阀针与节流孔的相对位移; α 为阀针锥角; d 代表节流孔内径。 r 与 x 的关系为

$$r = x \cdot \tan \frac{\alpha}{2} \quad (2)$$

根据图 1,流量 g 的计算式为

$$g = \left(\frac{\pi D^2}{4} - \pi r^2 \right) \cdot \left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^{1/(\kappa + 1)} \sqrt{\frac{2\kappa \rho P}{\kappa + 1}} \quad (3)$$

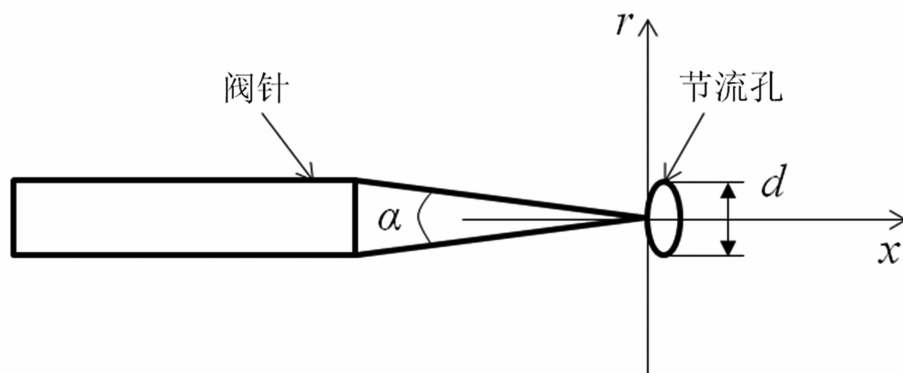


图 1 波纹管自调式 J-T 制冷器的节流结构

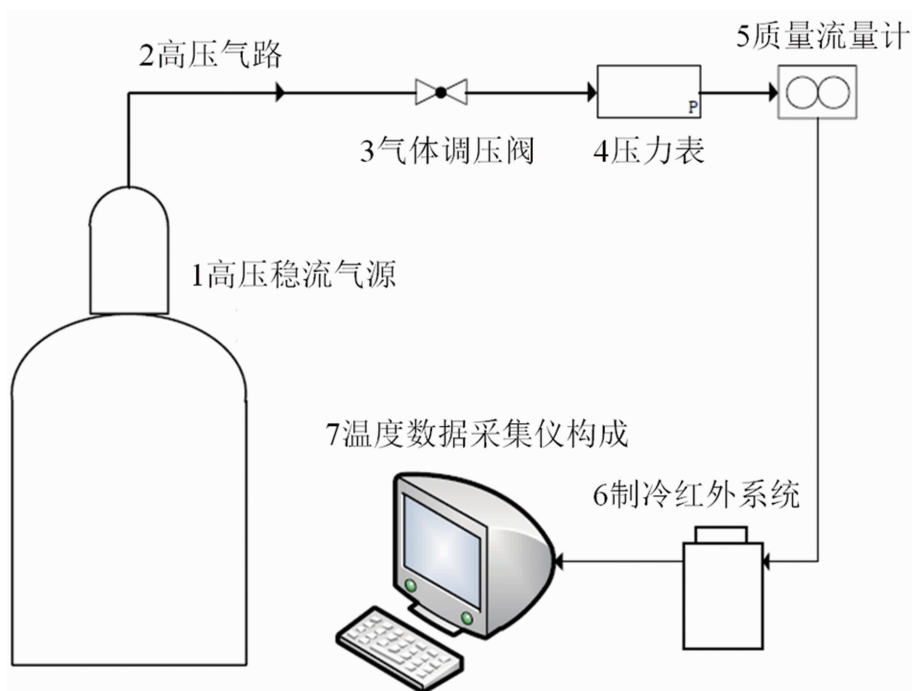


图 2 实验系统示意图

式中, ρ 和 P 为节流前气体的密度和压力; κ 为气体绝热指数。

与制冷器启动过程的理论计算分析一样, 本计算方法只可用作分析制冷器工作流量的参考依据。若想得到准确的数值和状态规律, 也需要依靠实验手段。

2 实验研究

2.1 实验对象

自调式 J-T 制冷器主要分为波纹管自调式 J-T 制冷器和记忆弹簧自调式 J-T 制冷器。本文对波纹管自调式 J-T 制冷器进行研究。选取一款波纹管自调式 J-T 制冷器: 波纹管自调式 J-T 制冷器 A 和 B。该款波纹管自调式 J-T 制

冷器已研制和生产多年, 性能可靠且工作稳定, 可以作为实验研究对象。

2.2 实验系统

实验系统主要由高压稳流气源、高压气路、气体调压阀、压力表、质量流量计、制冷红外系统和温度数据采集仪构成, 具体如图 2 所示。

采用图 2 中的实验系统, 对波纹管自调式制冷器进行不同制冷工质压力的制冷性能测试。对于波纹管自调式制冷器的实验研究, 本文采用一款典型产品。由于此制冷红外系统具有测温二极管, 制冷性能测试选取系统启动时间、工质最大流量、工质稳定流量、系统蓄冷

时间作为实验研究指标。

以上实验指标的选取对自调式 J-T 制冷器以及使用自调式 J-T 制冷器的制冷红外系统的正向设计有重要借鉴意义,同时对该红外系统的气瓶体积选取、压力确定以及系统本身的工作性能均有直接的工程借鉴意义。

2.3 实验方法

对于波纹管自调式制冷器实验,选取氮气工质的压力为 11~27 MPa(间隔 2 MPa)。每次实验结束后,将制冷器和红外系统在室温环境下放置 8 h。等待两者彻底恢复到常温后,再进行下一组实验,以保证每组实验的独立性以及试验数据的稳定性和准确性。

3 实验结果与分析

3.1 制冷工质压力对系统启动时间和蓄冷时间的影响

启动时间和蓄冷时间是制冷型红外系统的关键运行指标。本文研究制冷工质压力对应用波纹管自调式 J-T 制冷器的红外系统的启动时间和蓄冷时间的影响,实验数据和变化趋势如图 3 所示。

由图 3 可知,本文研究的制冷器在一定的压力范围内(11 MPa $\leq P \leq 23$ MPa)。随着制冷

器制冷工质压力的增大,应用波纹管自调式 J-T 制冷器的红外系统的启动时间逐步缩短,即红外系统启动越快。但红外系统启动加快的速率会随着制冷器制冷工质压力的增大而减小。当制冷器的制冷工质压力增大到一定程度(23 MPa $\leq P \leq 27$ MPa)时,红外系统的启动时间将趋于稳定,不再有明显的变化。

因此,在实际的正向设计和工程实践中,对于波纹管自调式 J-T 制冷器,在一定程度上可以通过增加制冷工质的压力来加快制冷器和红外系统的启动速度。但是当制冷工质的压力达到一定程度时,再增大也达不到很好地提高制冷器和红外系统的启动速度的效果,相反会增加气瓶的压力以及制冷型红外系统的重量和体积。此研究结果可以对实际的工程实践予以指导。

由图 3 可知,对于本文研究的制冷器,在一定的压力范围内(11 MPa $\leq P \leq 15$ MPa),随着制冷器制冷工质压力的增大,应用波纹管自调式 J-T 制冷器的红外系统的蓄冷时间逐步加长。但当制冷器制冷工质压力增大到一定程度(15 MPa $\leq P \leq 27$ MPa)时,红外系统的蓄冷时间将趋于稳定,不再有明显的变化。

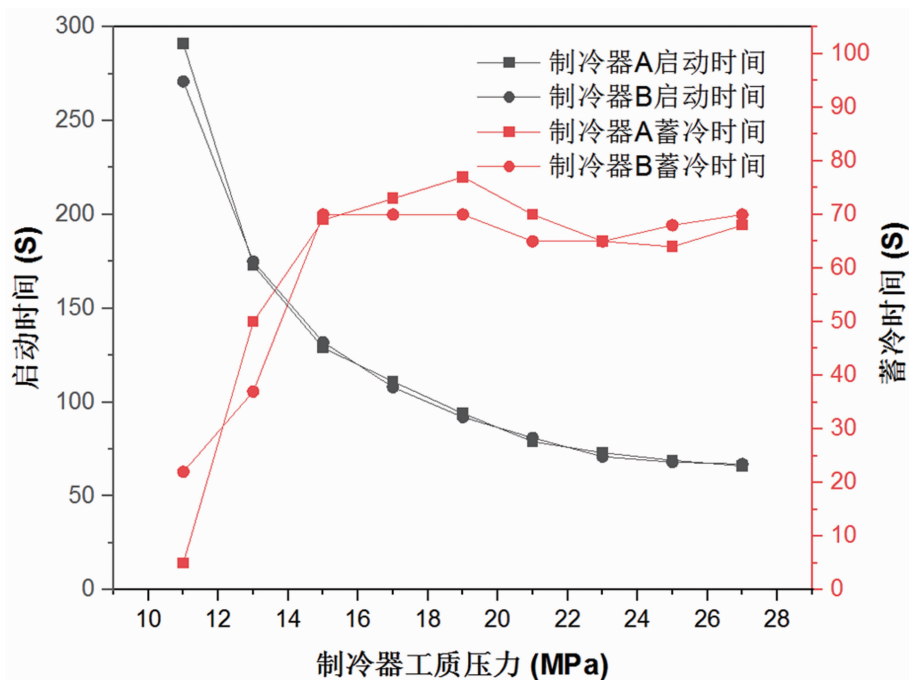


图 3 制冷工质压力对应用波纹管自调式 J-T 制冷器的红外系统的启动时间和蓄冷时间的影响

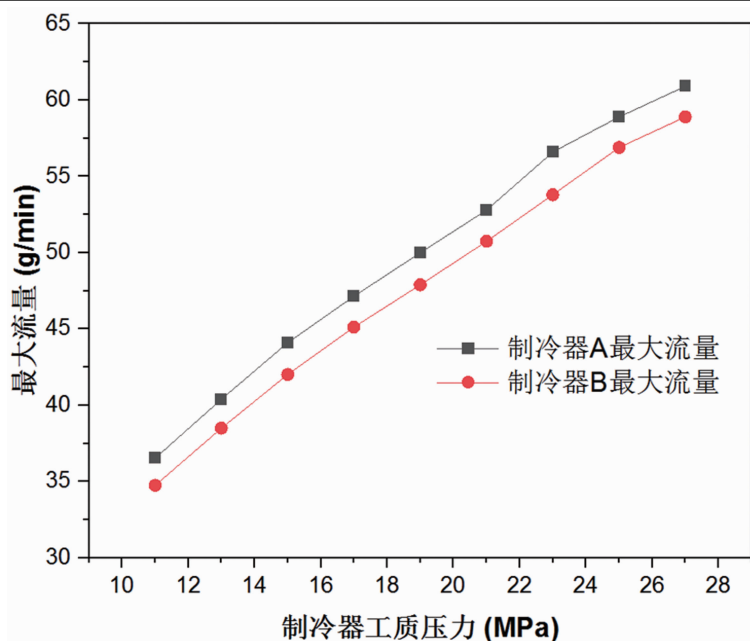


图 4 制冷工质压力对波纹管自调式 J-T 制冷器最大流量的影响

因此, 在实际的正向设计和工程实践中, 对于波纹管自调式 J-T 制冷器, 在一定程度上可以通过增加制冷工质的压力来增加应用波纹管自调式 J-T 制冷器的红外系统的蓄冷时间。但是当制冷工质的压力达到一定程度时, 再增大也达不到很好地提高红外系统蓄冷时间的效果, 相反会增加气瓶的压力以及制冷型红外系统的重量和体积负担。此研究结果可以对实际的工程实践予以指导。

3.2 制冷工质压力对制冷器最大流量的影响

制冷器启动时的最大流量直接影响红外系统的性能, 是红外系统需要控制的关键指标。本文研究制冷工质压力对波纹管自调式 J-T 制冷器启动时最大流量的影响, 实验数据和变化趋势如图 4 所示。

由图 4 可知, 在一定的压力范围内(11~27 MPa), 随着制冷器制冷工质压力的增大, 波纹管自调式 J-T 制冷器启动时的最大流量逐步增大(随制冷工质压力增大而线性增大)。因此, 在实际的正向设计和工程实践中, 对于波纹管自调式 J-T 制冷器, 在一定程度上增加制冷工质的压力会引起制冷器启动时的最大流量增大, 且影响很大。如果红外系统对制冷器制冷工质的最大流量有明显的限制, 那么在制冷

工质压力改变时就需要综合考虑和仔细计算, 以保证正向设计的正确性。此研究结果可以对实际的工程实践予以指导。

3.3 制冷工质压力对制冷器稳定流量的影响

制冷器运行时的稳定流量直接影响红外系统的性能, 在制冷工质储存气瓶容积一定时, 直接决定制冷器和红外系统的工作时间。本文研究制冷工质压力对波纹管自调式 J-T 制冷器运行时的稳定流量的影响, 实验数据和变化趋势如图 5 所示。

由图 5 可知, 在一定的压力范围内(11~27 MPa), 随着制冷器制冷工质压力的增大, 波纹管自调式 J-T 制冷器运行时的稳定流量逐步增大, 即制冷器的耗气速率加快。制冷器耗气速率会随着制冷器制冷工质压力的增大而增大。

因此, 在实际的正向设计和工程实践中, 对于波纹管自调式 J-T 制冷器, 增大制冷工质压力虽然会提高制冷器和制冷系统的启动速度, 但会导致制冷器耗气速率的增大, 直接造成制冷系统的运行时间降低。尤其当制冷工质的压力达到一定程度(本文研究的制冷器压力为 19 MPa)时, 制冷器的耗气速率会随着制冷工质压力的增大而较快增加, 对制冷系统的运行时间有很大的影响。此研究结

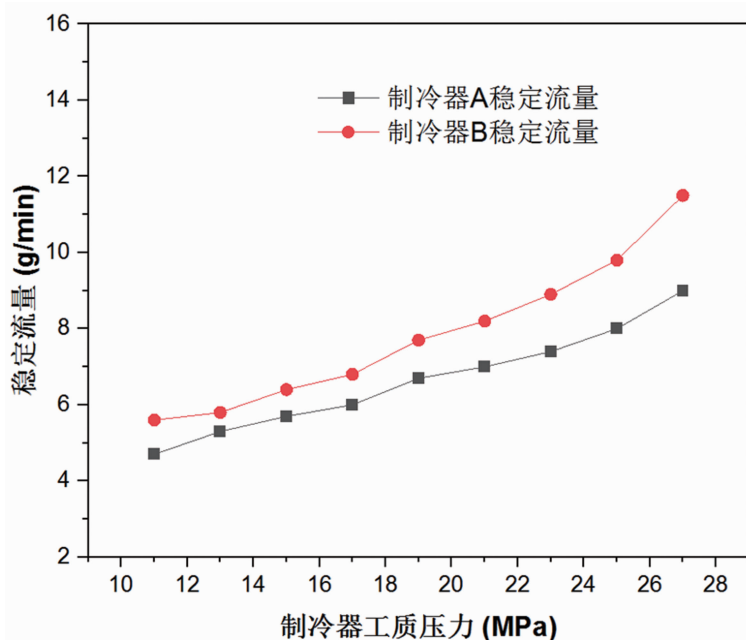


图5 制冷工质压力对波纹管自调式 J-T 制冷器稳定流量的影响

果可以对实际的工程实践予以指导。

4 结束语

本文以某款波纹管自调式 J-T 制冷器为研究对象,通过具体的实验研究,分析了制冷工质压力对波纹管自调式 J-T 制冷器制冷性能的影响。在试验工况范围内,获得以下结论:

(1)在一定的压力范围内(本文为 $11 \text{ MPa} \leq P \leq 23 \text{ MPa}$),随着制冷器制冷工质压力的增大,应用波纹管自调式 J-T 制冷器的红外系统的启动时间逐步缩短,即红外系统启动越快。但红外系统启动加快的速率会随着制冷器制冷工质压力的增大而减小。当制冷器制冷工质压力增大到一定程度时(本文为 $23 \text{ MPa} \leq P \leq 27 \text{ MPa}$),红外系统的启动时间将趋于稳定,不再有明显的变化。

(2)在一定的压力范围内(本文为 $11 \text{ MPa} \leq P \leq 15 \text{ MPa}$),随着制冷器制冷工质压力的增大,应用波纹管自调式 J-T 制冷器的红外系统的蓄冷时间逐步加长。但当制冷器制冷工质压力增大到一定程度时(本文为 $15 \text{ MPa} \leq P \leq 27 \text{ MPa}$),应用波纹管自调式 J-T 制冷器的红外系统的蓄冷时间将趋于稳定,不再有明显的变化。

(3)在一定的压力范围内($11 \sim 27 \text{ MPa}$),随着制冷器制冷工质压力的增大,波纹管自调式 J-T 制冷器启动时的最大流量逐步增大,且启动时最大流量随制冷工质压力增大而线性增大。

(4)在一定的压力范围内($11 \sim 27 \text{ MPa}$),随着制冷器制冷工质压力的增大,波纹管自调式 J-T 制冷器运行时的稳定流量逐步增大,即制冷器耗气速率加快。制冷器耗气速率的增速会随着制冷器制冷工质压力的增大而增大。

本文实验研究的过程方法和研究结果对波纹管自调式 J-T 制冷器以及应用波纹管自调式 J-T 制冷器的红外系统的正向设计有借鉴意义,同时对应用波纹管自调式 J-T 制冷器的红外系统的气瓶体积选取、压力确定以及系统本身的工作性能均有直接的工程借鉴意义。以后的研究重点可以结合具体的实用场景和性能指标对制冷工质压力这一关键因素进行多维度的分析研究,以期更直接地为工程实践提供指导。

参考文献

- [1] Sugita H, Sato Y, Nakagawa T, et al. Cryogenic System Design of the Next Generation Infrared Space Tele-scope SPICA [J]. *Cryogenics*, 2010,

- 50(9): 566–571.
- [2] 王三煜. 制冷器在导弹系统中的应用 [J]. **红外技术**, 2005, **27**(5): 399–402.
- [3] Skye H, Nellis G, Klein S. Modeling and Optimization of a Cascaded Mixed Gas Joule-Thompson Cryoprobe System [J]. *ASHRAE Transactions*, 2009, **115**: 966–983.
- [4] Lee C, Baek S, Lee J, et al. Development of a Closed-loop J-T Cryoablation Device with a Long Cooling Area and Multiple Expansion Parts [J]. *Medical Engineering & Physics*, 2014, **36**(11): 1464–1472.
- [5] 曹菁, 陈军, 李家鹏, 等. 小型自调式 J-T 制冷机波纹管刚度特性分析 [J]. **低温与超导**, 2017, **45**(4): 17–21.