

车载大冷量GM-JT制冷系统实验研究

崔运浩^{1,2}, 周伟¹, 王晓涛², 张志华¹, 崔成凤¹, 张永炜¹

(¹ 高速飞车山西省实验室 (超高速低真空管道磁浮交通系统山西省实验室), 山西 大同 038103; ² 中国科学院理化技术研究所低温科学与技术全国重点实验室, 北京 100190)

摘要: 低温超导电动悬浮系统中的超导磁体需采用液氦构建4.2 K低温环境, 实现高强磁场保证车体悬浮。采用吉福德-麦克马洪 (Gifford-McMahon, GM) 制冷机预冷的焦耳-汤姆逊 (Joule-Thomson, JT) 制冷机结合了回热式与节流式制冷, 具有效率高、冷量大、空间利用率高、冷端无运动部件和冷量长距离传输等优势, 是低温超导磁体最佳制冷方案。对GM-JT制冷系统开展了理论分析和实验测试研究, 首先介绍制冷流程的工作原理, 接着理论分析预冷温度和高压压力对制冷流程的影响规律, 其次开展核心设备线下性能输出测试, 最后搭建低温测试平台, 完成制冷机性能测试。经测得, GM-JT制冷机可实现7.4 W@4.16 K制冷量, 输入功耗为11.5 kW, 相对卡诺效率为4.51%。本研究为低温超导电动悬浮系统工程化研制奠定基础。

关键词: 传热; 热力学; 液化; 电动悬浮; 低温超导; JT节流制冷

中图分类号: TB 651

文献标志码: A

文章编号: 0438-1157 (XXXX) XX-0001-10

Experimental study on GM-JT cryocooler system with large cooling capacity for vehicles

CUI Yunhao^{1,2}, ZHOU Wei¹, WANG Xiaotao², ZHANG Zhihua¹, CUI Chengfeng¹, ZHANG Yongwei¹

(¹ T-Flight Laboratory In ShanXi Provincial (Ultra-High Speed and Low Vacuum Pipeline Maglev Transportation System Laboratory In ShanXi Provincial), Datong 038103, Shanxi, China; ² State Key Laboratory of Cryogenic Science and Technology, Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: In the low-temperature superconducting electromagnetic suspension system, superconducting magnets need to be constructed with liquid helium to create a 4.2 K low-temperature environment to achieve a strong magnetic field and ensure the levitation of the vehicle body. The Joule-Thomson (JT) cryocooler precooled by Gifford-McMahon (GM) cryocooler combines the performance characteristics of regenerative cooling and throttling cooling in different operation temperature zones. It features high cooling efficiency, large cooling capacity, high space utilization, no moving parts at the low-temperature end and the ability to transport cooling capacity over long distances, making it the best cooling solution for low-temperature superconducting magnets. This paper carried out theoretical analysis and experimental testing research on the GM-JT cryocooler system. Firstly, it introduces the working principle of the GM-JT cooling process. Then, based on the cooling target requirements, it analyzes the influence laws of secondary pre-cooling temperature and high-pressure pressure on the cooling process. Next, it

收稿日期: 2026-02-11 修回日期: 2026-04-23

通信作者: 周伟(1992—),男,博士,高级工程师, zhouwei910545@126.com

第一作者: 崔运浩(1996—),男,博士,工程师, Yunhao_Cui@163.com

基金项目: 高速飞车山西省实验室开放基金课题: 紧凑高效间壁式换热器研究(GSFC2024KFJJ03)

引用本文: 崔运浩, 周伟, 王晓涛, 张志华, 崔成凤, 张永炜. 车载大冷量GM-JT制冷系统实验研究[J]. 化工学报, XXXX, XX(XX): 1–10

Citation: CUI Yunhao, ZHOU Wei, WANG Xiaotao, ZHANG Zhihua, CUI Chengfeng, ZHANG Yongwei. Experimental study on GM-JT cryocooler system with large cooling capacity for vehicles[J]. CIESC Journal, XXXX, XX(XX): 1–10

conducts offline performance tests of the GM pre-cooling cryocooler and the JT compressor separately. Finally, it builds a low-temperature testing platform and completes the cooling performance test of the cryocooler. It has been measured that the GM-JT cooling system can achieve a cooling capacity of 7.4 W at 4.2 K, with an input power of 11.3 kW and a relative Carnot efficiency of 4.48%. This research lays a technical foundation for the engineering development of the low-temperature superconducting electromagnetic suspension system.

Keywords: heat transfer; thermodynamics; liquefaction; electromagnetic suspension; low-temperature superconducting; JT throttling cooling

引 言

低温超导电动悬浮技术基于动生电动势原理,通过地面直线电机牵引加速的车载超导磁体与地面轨道线圈间相对运动,线圈内磁通量变化产生的磁斥力实现车体的悬浮和导向^[1]。系统结构拓扑简单,具有运行速度快、车辆轻、悬浮间隙大、稳定性好等优势,是目前超高速磁悬浮列车发展的主流趋势^[2-3]。低温超导磁体是全系统的动力之源,需采用液氦作为冷媒构建 4.2 K 低温环境维持超导态,实现高强磁场保证车体悬浮。

车载制冷系统用于克服超导磁体的漏热,实现整机系统的液氦闭环运行,缩短操作流程,降低运行成本,是低温超导电动悬浮的技术核心。JT节流制冷是利用实际气体的焦耳-汤姆逊效应实现制冷的过程,GM-JT制冷系统采用GM制冷机进行预冷,结合了回热式制冷和节流式制冷在不同工作温区的效率优势,具有制冷效率高、重量轻、空间利用率高、低温端无运动部件、冷量可长距离和小温差下输出的优势^[4-5],是低温超导磁体最佳制冷解决方案。

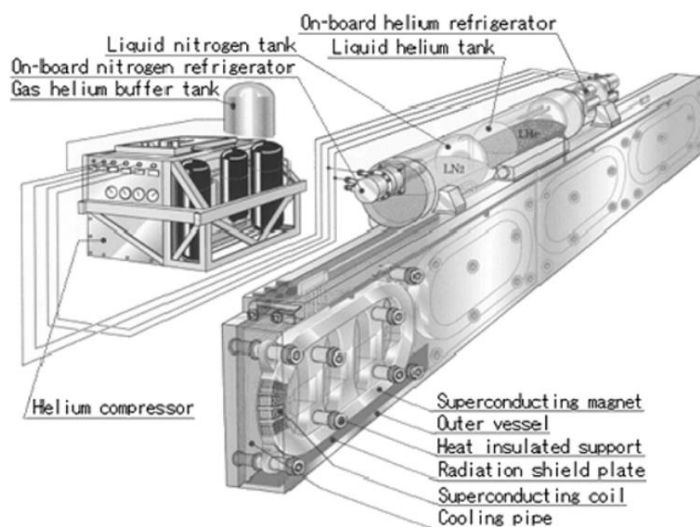


图1 超导电动悬浮系统中低温超导磁体和车载制冷系统^[6]

Fig. 1 The low-temperature superconducting magnets and on-board cryocooler system in the superconducting electric levitation system^[6]

最早大冷量 GM-JT 制冷机的研究主要集中在氦液化器和超导核磁共振成像应用场合。1960 年美国 Arthur D. Little 公司率先研制的 GM-JT 制冷机,可在 3 kW 输入功下实现 0.75 W@4.2 K 制冷量^[7]。20 世纪 80 年代起,日本的日立公司、三菱公司、住友公司、HOXAN 公司、东芝公司、大金公司和美国的 Airproducts and Chemicals 公司相继推出 GM-JT 制冷机的研制成果,此时制冷量可实现 5 W

以上,相对卡诺效率在 3% 以上^[8-11]。直至 90 年代,磁性蓄冷材料的发现和应用使得 GM-JT 制冷机的制冷量和效率均得到显著提升^[12],促使其在低温超导电动悬浮列车应用的研究。1997 年,日本中央铁路公司联合大金和东芝合作研发的 GM-JT 制冷机,在消耗 7.9 kW 输入功下实现 8.3 W@4.5 K 制冷量,相对卡诺效率为 6.74%,是迄今为止液氦温区小型制冷机最高运行效率,已搭载至山梨线系列磁悬浮

列车中成功实现超导磁体的液氮闭环运行^[13]。国内在20世纪90年代开始进行大冷量GM-JT制冷机的研究^[14-16],1990年,合肥低温电子研究所研制的GM-JT制冷机可实现2.0 W@4.4 K制冷量^[17]。2023年,中国航天科工集团飞航技术研究院研制出一台可实现5.85 W@4.44 K制冷量的GM-JT制冷系统,输入功耗为10.5 kW,相对卡诺效率为3.62%^[18-19]。该制冷系统集成至电动悬浮列车后,在山西省高速飞车试验基地成功完成了常压和低真空环境下全尺寸超导电动悬浮试验,但制冷系统仍无法实现液氮闭环运行。

中国发展超高速磁悬浮列车亟待解决大冷量高效率车载制冷系统难题。本研究团队基于低温超导电动悬浮系统超导磁体的制冷需求、尺寸和重量设计要求为牵引,对大冷量、高效率GM-JT制冷系统开展理论分析和实验测试研究,实现制冷机全系统核心技术自主可控,进一步为超高速磁浮列车工程化运行奠定技术基础,同时促进低温制冷机技术在量子计算、生物医疗和深空探测等应用领域

发展。

1 制冷流程介绍

GM-JT制冷系统由GM预冷单元和JT节流制冷单元两部分组成,二者之间热耦合连接,系统流程示意图如图2所示。GM预冷单元采用一台两级GM制冷机对JT循环中高压冷氦气进行预冷。JT节流制冷单元包含JT压缩机、一级、二级、三级换热器、一级、二级冷端换热器、节流元件和蒸发器,工质为氦气。制冷单元由单机JT压缩机驱动,高压氦气依次经过一级换热器、GM制冷机一级冷端换热器、二级换热器、GM制冷机二级冷端换热器和三级换热器,被回流冷氦气和GM制冷机的一级、二级冷头冷却至节流转变温度以下,通常低于氦气临界温度。接着在节流元件中利用焦耳-汤姆逊效应,经过近似绝热等焓膨胀过程,温度降低至液氮温区,获得气液两相状态。在蒸发器中,液相氦工质经过蒸发相变产生的吸热现象对外输出冷量。

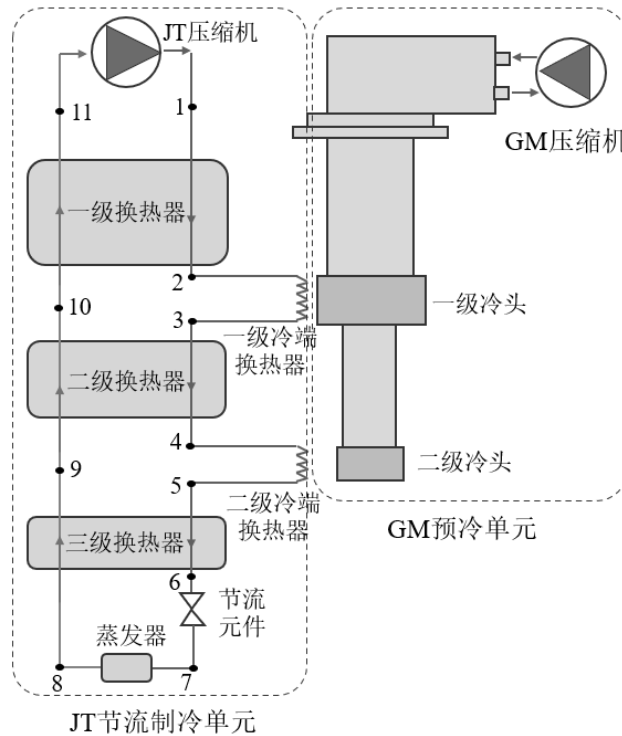


图2 GM-JT制冷系统流程示意图

Fig. 2 GM-JT cryocooler system process schematic diagram

当制冷系统集成至车载应用场合,为增加磁悬浮列车内部乘客空间,包含GM预冷机在内的制冷系统需整体卧式布置以降低垂向高度,制冷系统内

部需增设液氮储槽,用于液氮的运输、储存和再液化功能。蒸发器布置于液氮储槽内部,与因超导磁体热负荷而蒸发的冷氦气进行热交换,将蒸发吸热

产生的冷量传递至冷氦气使其再冷凝,返回至储槽液相区,实现超导磁体系统内液氦零蒸发运行。

2 制冷流程分析

基于超导磁体静、动态漏热量,确定 GM-JT 制冷机冷量输出指标要求为 $\leq 7.0 \text{ W}@4.2 \text{ K}$。参考以往测试数据^[19]并结合制冷机的实际运行特点,提出如下假设:(1)JT 循环中不存在漏热源和泄漏源;(2)JT 循环中仅节流元件内部存在压降;(3)节流元件内部进行理想等焓绝热膨胀过程;(4)一级、二级和三级换热器换热效率分别为 96%、97%、98%,且不受运行工况和换热量影响;(5)一级和二级冷端换热器出口与冷头间的温差分别为 1 K 和 0.5 K;(6)GM 一级冷头温度保持 54 K 恒定。

基于换热器内部高压侧与低压侧工质的能量守恒关系,并结合换热器效率 η ,可计算得到流程中各节点的比焓 h 和温度 T ,从而得到各项物理量数据。以二级换热器为例,其计算公式如下:

$$h(p_3, T_3) - h(p_4, T_4) = h(p_{10}, T_{10}) - h(p_9, T_9) \quad (1)$$

$$\eta = \frac{h(p_3, T_3) - h(p_4, T_4)}{\min[h(p_3, T_3) - h(p_4, T_9), h(p_{10}, T_3) - h(p_9, T_9)]} \quad (2)$$

单位质量制冷量 q_c 定义为蒸发器进出口工质比焓之差,表达式为:

$$q_c = h(p_8, T_8) - h(p_7, T_7) \quad (3)$$

JT 制冷单元循环流量 \dot{m} 为制冷量 Q_c 与单位质量制冷量 q_c 的比值,即:

$$\dot{m} = \frac{Q_c}{q_c} \quad (4)$$

此外,GM 制冷机一级冷头与二级冷头的预冷量 Q_1 和 Q_2 可通过下式计算:

$$Q_1 = \dot{m}(h(p_2, T_2) - h(p_3, T_3)) \quad (5)$$

$$Q_2 = \dot{m}(h(p_4, T_4) - h(p_5, T_5)) \quad (6)$$

下文对 JT 制冷机在低压压力 P_l 为 1.0 bar (4.2 K 对应的饱和压力),高压压力 P_h 在 14 bar~20 bar,二级预冷温度在 8 K~16 K 范围内所能提供的单位制冷量、所需的循环流量和二级冷头预冷量数据进行分析。

图 3 和图 4 分别给出了二级预冷温度和高压压力对单位质量制冷量和循环流量的影响规律,从图中可以看出,随着二级预冷温度的降低,由于三级换热器高压进口与低压出口焓差增加,单位质量制冷量先呈显著增加趋势,实现 7W 制冷量时所需循

环流量显著降低;接着由于高低压焓差大于理论最大单位质量制冷量,且三级换热器内非理想换热,使得单位质量制冷量后呈缓慢减小的趋势,所需循环流量缓慢增加。当高压压力分别为 14 bar、16 bar 和 18 bar 时,单位质量制冷量显著变化的拐点所对应的二级预冷温度在 10 K、12 K 和 14 K 附近,当高压压力为 20 bar 时,拐点温度在 16 K 以上。此外,系统存在最优高压压力以实现最大单位制冷量输出,此时所需循环流量最小,随着预冷温度的降低,最佳高压压力逐渐降低。当预冷温度在 12 K 附近时,最优高压压力为 16 bar,此时单位制冷制冷量为 13.1 kJ/kg,循环流量为 0.54 g/s。

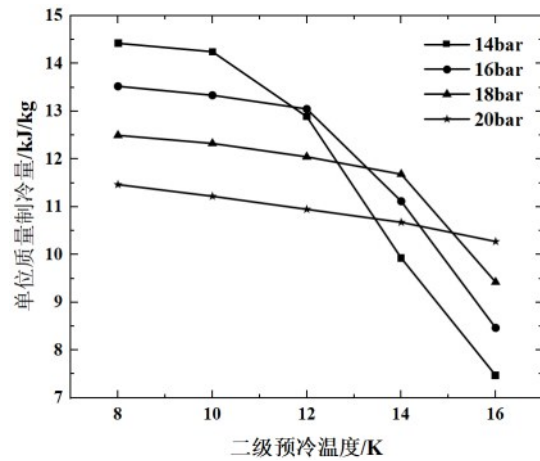


图 3 单位制冷量随二级预冷温度和高压压力变化
Fig. 3 Unit cooling capacity varies with secondary pre-cooling temperature and high-pressure pressure

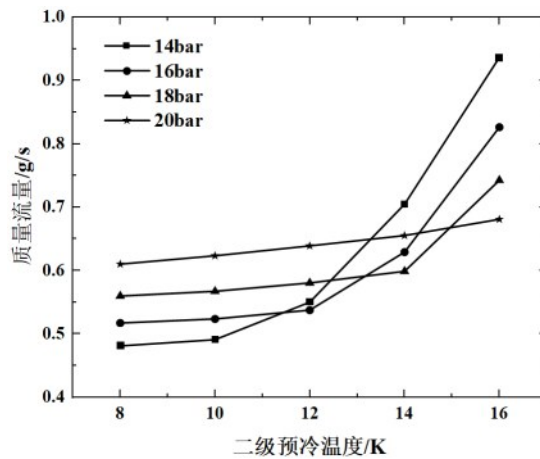


图 4 质量流量随二级预冷温度和高压压力变化
Fig. 4 The circulating mass flow rate varies with the secondary pre-cooling temperature and the high-pressure pressure

图 5 和图 6 分别给出了二级预冷量和一级预冷量随二级预冷温度和高压压力的变化规律。从图

中可以看出,随着二级预冷温度的降低,所需的二级预冷量和一级预冷量同样呈先显著减小后缓慢的趋势,高压压力越低,二级预冷温度的影响越大,拐点位置与单位质量制冷量变化趋势基本一致。此外,系统同样存在最优高压压力,此时所需的二级和一级预冷量最小,随着预冷温度的降低,最佳高压压力逐渐降低。当二级预冷温度为 12 K,高压压力为 16 bar 时,实现 7 W@4.2 K 制冷量时所需一级预冷量为 23.8 W@54 K,二级预冷量为 11.8 W@12 K。

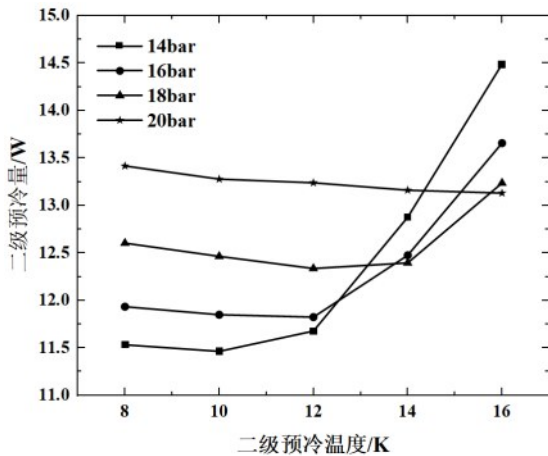


图5 二级预冷量随二级预冷温度和高压压力变化

Fig. 5 The secondary pre-cooling capacity varies with the secondary pre-cooling temperature and the high pressure

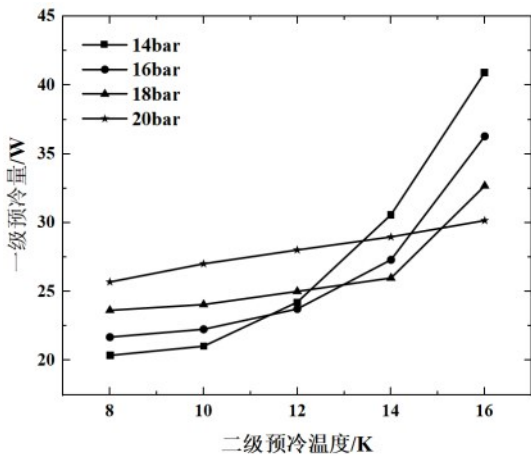


图6 一级预冷量随二级预冷温度和高压压力变化

Fig. 6 The first-stage pre-cooling capacity varies with the secondary pre-cooling temperature and the high pressure

综上所述,尽管二级预冷温度越低,在最佳运行压力下系统可实现的单位质量制冷量越高,所需的循环流量、一级和二级预冷量越低。但过低的二级预冷温度并无法显著改善单位质量制冷量和循

环流量,反而带来预冷机制冷负荷的显著增加,导致制冷效率降低。因此需结合实际各级换热器效率、JT压缩机循环流量和GM预冷机的制冷量确定运行工况,尽可能选择曲线拐点附近工况以获得综合较优的制冷性能。本文选择二级预冷温度 12 K,高压压力 16 bar 作为设计工况,此时 JT 压缩机在 1 bar 吸气压力下的循环流量 < 0.54 g/s,为考虑冷屏和支撑件的漏热后,GM 制冷机需提供一级制冷量 < 32 W@54 K,二级制冷量 < 11.8 W@12 K。

3 单机输出测试

3.1 GM 制冷机冷量测试

参考 GM 制冷机垂直布置时冷量输出能力,本章选择中船鹏力(南京)超低温技术有限公司(后文简称鹏力超低温)的 GM 制冷机货架产品 KDE415SE 搭配 KDC6000V 压缩机作为测试对象,测试装置如图 7 所示,包括有 GM 压缩机、GM 冷头、测试杜瓦、水冷机组、交变电源、真空机组、加热电源、水流量计、温度传感器和信号采集系统等组成。针对一级冷头处于 50 K-60 K,二级冷头处于 10 K-14 K 温度下进行冷量测试,测试中 GM 制冷机冷头保持水平放置以满足实际超导电动悬浮系统装载要求。

系统采用交变电源为压缩机提供三相电 380 V/50 Hz 输入,同时测量稳定运行时耗功;冷水机组和浮子流量计用于控制输出 8 L/min@20 °C 冷却循环水对压缩机进行冷却;采集系统实现对温度信号采集和处理。GM 冷头被水平放置于测试杜瓦内部,一级冷头连接有冷屏用于有效隔绝室温侧辐射漏热,真空机组为测试杜瓦内部提供 $> 1 \times 10^{-3}$ Pa 真空度,隔绝内部气体带来对流和传导漏热。GM 制冷机一级和二级冷头端面上均装有标定过的 lakeshore CX-1050 温度传感器和 EBG LXP50 功率电阻器,引线绕于冷头气缸上并贴紧。温度计测量范围覆盖 1.5 K-300 K,温度计引线接至 Lakeshore 218 数据采集器,10K 温区测试准确度 < 10 mK,50 K 温区测试准确度 < 0.4 K。加热器引线接至 Faith FTP1060 直流电源,电流和电压测试准确度均为 $\pm(0.1\%+0.1\% \text{ F.S.})$,满足测试需求。

冷量测试结果如图 8 所示,制冷机可同时实现一级冷量 30W@52K,二级冷量 12W@9.6K,此时压缩机输入功耗为 6.7 kW。基于一级制冷量 < 30 W@54 K,二级制冷量 < 11.8 W@12 K 设计要求,通过冷

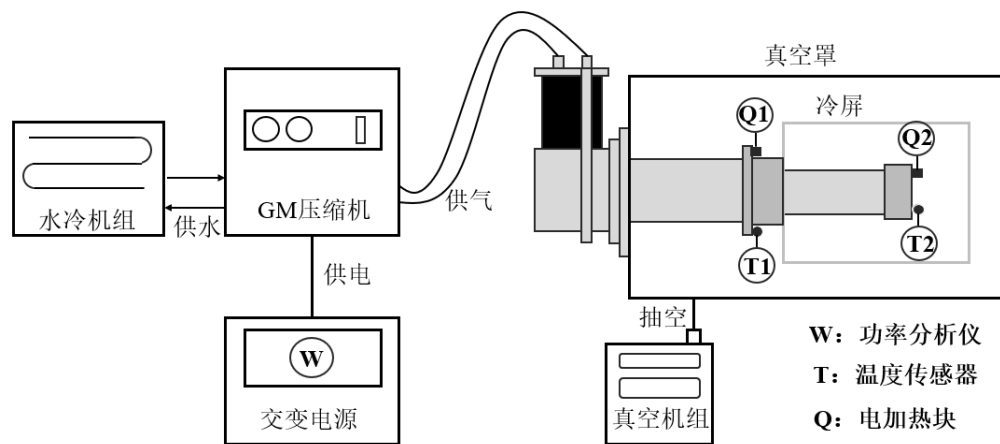


图7 GM制冷机制冷性能测试示意图

Fig. 7 Schematic diagram of GM cryocooler cooling performance test

量网格图可估算出,制冷机在一级温度 54 K 时制冷量约为 35 W,设计余量为 10%;二级温度 12 K 时制冷量约为 16 W,设计余量为 30%,满足指标要求。

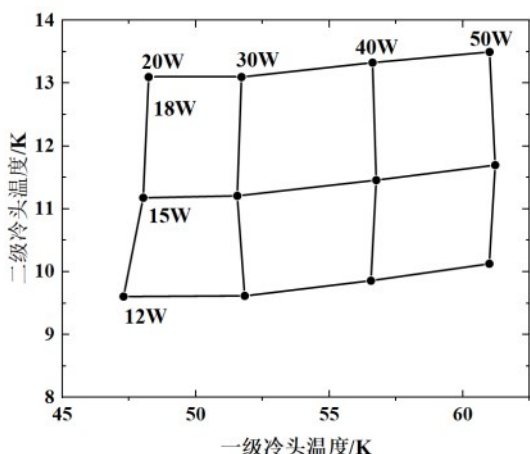


图8 GM制冷机制冷量输出曲线

Fig. 8 GM pre-cooling cryocooler cooling capacity output curve

3.2 JT 压缩机输出测试

参考涡旋压包排量参数,本文选择KDC6000V作为JT压缩机输出测试对象,测试原理示意图如图9所示,包括JT压缩机、交流电源、水冷机组、数据采集系统、水流量计、气体流量计、流量调节阀、压力计和管路线缆等组成。系统采用交变电源为压缩机提供三相380 V/50 Hz的输入,同时测量压缩机在稳定运行时耗功;冷水机组和浮子流量计用于控制输出8 L/min@20 °C冷却水对压缩机进行冷却;采集系统实现对压力、流量等信号采集和处理。压缩机吸气口处布置有BD BAROLI 02数字压力表,用于精确测量压缩机吸气压力,准确度为±0.125% F.S.;

排气口处分别布置有测量准确度为±0.25% F.S.的星仪CYYZ11A压力变送器和测量准确度为±(0.5% Pt+0.2% F.S.)的Teledyne HFM-D-305B热式气体质量流量计用于测量排气压力和循环流量。可调节针阀用于模拟JT循环负载,实现JT压缩机输出高低压差。系统通过调节针阀开度控制吸气压力1 bar恒定,调节循环回路中氦气充注量控制压缩机的排气压力,即实现压缩机在不同工况下稳定工作。

压缩机的输出测试结果如下表1所示,保持吸气压力为1 bar,当排气压力为15.9 bar时,压缩机输出循环流量为0.59 g/s,满足0.54 g/s设计指标要求,设计余量为9%,此时输入电功为4.5 kW,容积效率为87%,等熵效率为42%。当排气压力降低时,循环流量,容积效率和等熵效率略有提升,输入功耗略有降低。

4 整机性能测试

4.1 实验测试装置

依据上述GM-JT制冷流程分析和核心器件单独输出测试,确定制冷系统的运行工况并完成制冷设备选型,并搭建了如图10所示的制冷机性能测试平台,为保证超导电动悬浮系统车体内具备充足的乘客空间,GM-JT制冷系统需采用卧式布置,尺寸重量满足车载设计指标要求。核心器件参数如下表2所示,其中GM制冷机选择鹏力超低温的KDE415SE商业化制冷机冷头,并搭配KDC6000V商业化涡旋压缩机驱动使用,JT制冷单元采用鹏力超低温单台单级KDC6000V商业化涡旋压缩机驱动。GM压缩机单独驱动GM冷头,与JT循环相互

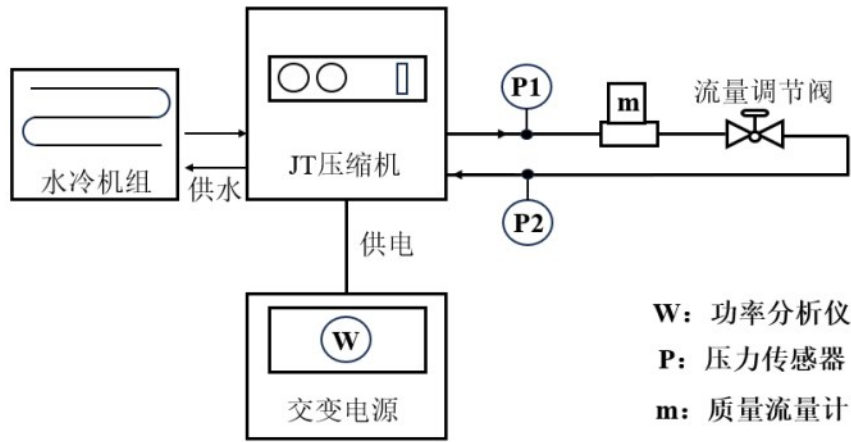


图9 JT压缩机输出性能测试示意图

Fig. 9 Schematic diagram of output performance test for JT compressor

表1 JT压缩机输出性能测试结果

Table 1 Test results of JT compressor output performance

排气压力	吸气压力	循环流量	输入功耗	容积效率	等熵效率
15.9 bar	1.0 bar	0.59 g/s	4.5 kW	87%	42%
14.1 bar	1.0 bar	0.51 g/s	4.2 kW	90%	44%

独立。一级、二级和三级间壁式换热器均采用苏瑞普的板式换热器,换热效率均大于95%。节流部件采用流阻不可调的1/16 in 不锈钢毛细管。蒸发器采用紫铜圆柱筒结构,便于实验中电加热量输入。

在实验测试中,冷水机组为两台压缩机并联提供8 L/min@20 °C冷却循环水,真空机组为制冷机罐体内部提供 $>1 \times 10^{-3}$ Pa真空度,隔绝内部气体带来

表2 GM-JT制冷测试平台部件型号参数

Table 2 Component model parameters of the GM-JT cryocooler test platform

部件	型号参数
GM压缩机	鹏力超低温KDC6000V
GM制冷机冷头	KDE415SE
JT压缩机	鹏力超低温KDC6000V
间壁式换热器	苏瑞普SWEP板式换热器
毛细管	1/16 in 不锈钢毛细管
JT制冷机冷头	紫铜圆柱筒

对流和传导漏热,采集系统用于温度、压力和循环流量等信号采集与处理。配电箱直接为压缩机提供380V/50Hz供电输入,供电电流和电压均由准确

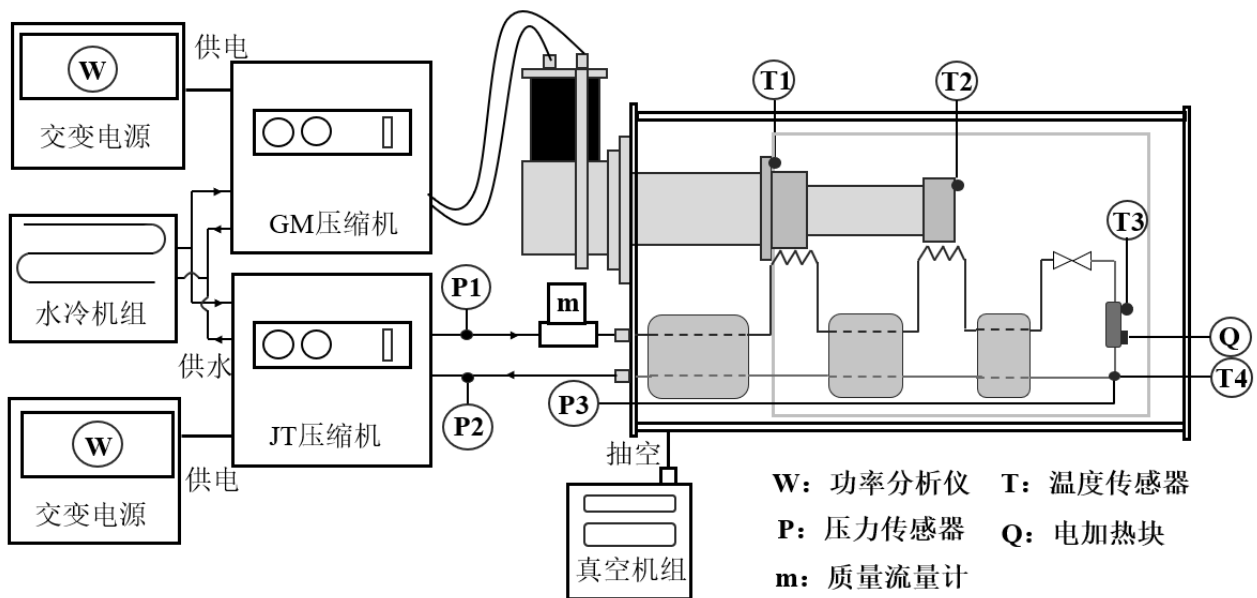


图10 制冷性能测试示意图

Fig. 10 Schematic diagram of the cooling performance test

度为±1%的 Chauvin Arnouxf F607 万用钳表测量。压缩机排气侧依次布置有准确度为±0.5% F.S.的 Danfoss MBS3000 压力变送器和准确度为±(0.8%+0.2% F.S)的 Alicat 20Q 气体质量流量计,分别用于测量 JT 循环的高压压力和循环流量。压缩机吸气侧和蒸发器出气口均布置有准确度为±0.5% F.S.的 Danfoss MBS3000 压力变送器,分别用于测量 JT 循环的低压压力和蒸发器运行压力,其中蒸发器运行压力对应的气液饱和温度作为蒸发器入口的温度值。蒸发器采用紫铜圆柱筒结构,实现基本气液分离作用,冷头下侧布置有电加热块,用于模拟热负载输入作为制冷机的制冷量,加热器引线接至 Faith FTP1060 直流电源,电流和电压测试准确度均为±(0.1%+0.1% F.S)。蒸发器的入口、出口和各级换热器出入口管路外壁面均布置有 LakeShore CX-1050 和 PT100 温度传感器,以蒸发器出口管路温度作为制冷机的制冷温度,温度计引线分别接至 Lakeshore 218 和 TOPRIE TP700 数据采集器中,在 10 K 以下、10 K-77 K 和 77 K-300 K 温区测试准确度分别在 10 mK、0.4 K 和 0.5 K 以内。

4.2 测试结果与分析

通过调整不同毛细管长度和工质充注量,获取 4.2 K 制冷温度时最佳毛细管尺寸参数和运行工况。在此基础上,开展 GM-JT 制冷机在不同制冷温度时制冷性能测试,测试结果如图 11、12 所示。从图中可以看出,随着制冷温度的提高,制冷量和输入功耗先呈显著增加趋势,在制冷温度超过 4.16 K 后,增加趋势变缓。相对卡诺效率随制冷温度提高呈先增加后降低趋势,在 4.16 K 附近存在最佳值。GM-JT 制冷机可在 4.16 K 制冷温度下可实现 7.4 W 制冷量,输入功耗为 11.5 kW,相对卡诺效率为 4.51%,此时 JT 循环高压压力为 15.5 bar,低压压力为 0.89 bar,循环流量为 0.53 g/s,蒸发器出口压力为 0.92 bar,即蒸发器内过热度为 0.03 K。此外,制冷机分别可实现 3 W@3.58 K、5 W@3.87 K、7 W@4.11 K 制冷量输出。

表 3 给出了实验测得各级换热器的换热效率数据。结果表明,三级换热器的实测换热效率满足设计要求,而一级和二级换热器效率均明显低于设计值,主要原因分析如下:一方面,受车载环境对制冷机的空间约束,选用的换热器沿温度梯度方向的长度偏短,造成固体壁面传导漏热损失偏大;另一方面,设计阶段为保证低压侧实现较低流动压降,

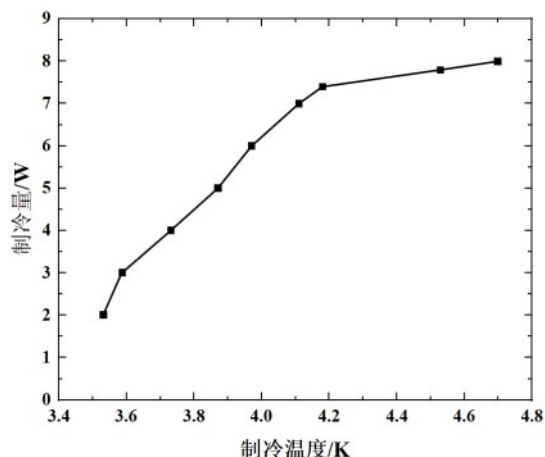


图 11 不同制冷温度下 GM-JT 制冷机制冷量
Fig. 11 Cooling capacity of GM-JT cryocooler at different cooling temperatures

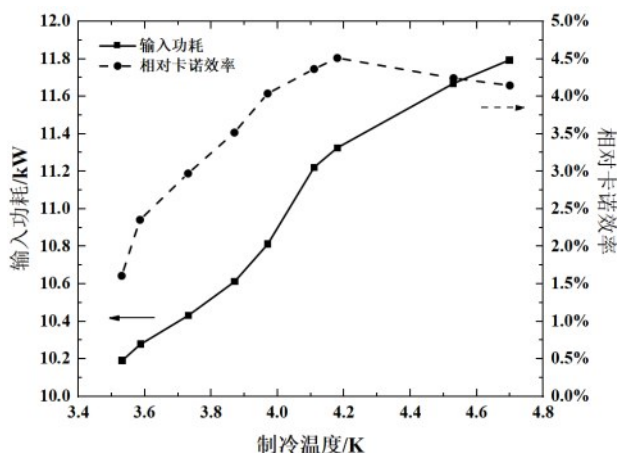


图 12 不同制冷温度下 GM-JT 制冷机输入功耗和运行效率
Fig. 12 Input power consumption and operating efficiency of GM-JT cryocooler at different cooling temperatures

选用的换热器流道特征尺寸偏大,导致有效换热面积不足,在换热量需求较高时换热温差偏大。因此,后续需针对一级和二级换热器分别开展结构优化设计。

表 3 各级换热器的换热效率实测数据

Table 3 Measured data of heat transfer efficiency for each stage of heat exchangers

部件	一级换热器	二级换热器	三级换热器
设计值	96%	97%	98%
实验值	93.3%	92.4%	98.2%

5 结论

本文开展 GM-JT 制冷系统的理论分析和实验测试研究。首先介绍了 GM-JT 制冷流程的工作原

理,接着依据制冷目标要求理论分析了二级预冷温度和高压压力对单位质量制冷量、循环流量、一级和二级预冷量的影响规律,其次对GM预冷制冷机和JT压缩机进行选型并开展单独线下性能输出测试,最后搭建制冷系统的低温测试平台,并完成制冷机制冷性能验证性测试。经测得,GM-JT制冷机可分别实现3 W@3.58 K、5 W@3.87 K、7 W@4.11 K和7.4 W@4.16 K制冷量输出,其中制冷量为7.4 W@4.16 K时系统运行效率最高,输入功耗为11.5 kW,相对卡诺效率为4.51%,满足设计指标要求。

本研究仍需进一步优化一级与二级换热器效率,以提升系统整体制冷性能。在此基础上,拟增设高强度、低漏热的支撑组件以及液氦、液氮储槽与配套管路,使其更好适配车载超导磁体的冷却需求,进而有力推动GM-JT制冷技术在超导电动悬浮、生物医药及深空探测等领域的工程化应用与发展。

符号说明

- h ——比焓, kJ/kg
 \dot{m} ——JT制冷单元循环流量, g/s
 \min ——取两组数据的最小值
 P ——绝对压力, bar
 Q_c ——制冷量, W
 Q_1 ——GM制冷机一级冷头预冷量, W
 Q_2 ——GM制冷机二级冷头预冷量, W
 q_c ——单位质量制冷量, W
 η ——换热器效率,

参考文献

- [1] 熊嘉阳, 邓自刚. 高速磁悬浮轨道交通研究进展[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(1): 177-198.
Xiong J Y, Deng Z G. Research progress of high-speed maglev rail transit[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(1): 177-198.
- [2] 刘士菟, 王磊, 王路忠, 等. 电动悬浮列车及车载超导磁体研究综述[J]. 西南交通大学学报, 2023, 58(4): 734-753.
Liu S X, Wang L, Wang L Z, et al. Review on electrodynamic suspension trains and on-board superconducting magnets[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2023, 58(4): 734-753.
- [3] 于青松, 李凯, 胡浩, 等. 超导电动悬浮应用研究与技术展望[J]. 机车电传动, 2023(4): 1-8.
Yu Q S, Li K, Hu H, et al. Research and technological prospects of applications for superconducting electrodynamic suspension[J]. Electric Drive for Locomotives, 2023(4): 1-8.
- [4] Radebaugh R. Cryocoolers: the state of the art and recent developments[J]. Journal of Physics: Condensed Matter, 2009, 21(16): 164219.
- [5] 周振君, 王娟, 梁惊涛. 液氦温区小型节流制冷机发展现状及趋势[J]. 低温工程, 2011(5): 6-10, 18.
Zhou Z J, Wang J, Liang J T. Status and development trends of refrigerator range in liquid helium temperature[J]. Cryogenics, 2011(5): 6-10, 18.
- [6] Nishijima S, Eckroad S, Marian A, et al. Superconductivity and the environment: a roadmap[J]. Superconductor Science and Technology, 2013, 26(11): 113001.
- [7] Gifford W E, Hoffman T E. A new refrigeration system for 4.2° K [C]//Advances in Cryogenic Engineering. Boston, MA: Springer, 1961: 82-94.
- [8] Longworth R C. 4 K gifford Mc Mahon/joule-Thomson cycle refrigerators[M]//Advances in Cryogenic Engineering. Boston, MA: Springer US, 1988: 689-698.
- [9] Matsubara Y. Recent cryocooler progress in Japan[C]//Proceedings of the Third Cryocooler Conference. Boulder, Colorado: U.S. Government Printing Office, 1985: 10-19.
- [10] Koizumi T, Kuroki K, Tomita Y, et al. Recondensing refrigerator for superconducting NMR-CT[C]//Cryocoolers 4. Easton, Maryland: David Taylor Naval Ship Research and Development Center, 1986: 199-207.
- [11] Kang Y M, Ogura T, Uosaki S, et al. 4K GM/JT cryocooler for cryogenic sensors[C]//Cryocoolers 6. Plymouth, Massachusetts: David Taylor Research Center, 1991: 17-25.
- [12] Nakagome H, Hakamada R, Takahashi M, et al. High efficient 4 K refrigerator (GM refrigerator with JT circuit) using Er3Ni regenerator[C]//Cryocoolers 6. Plymouth, Massachusetts: David Taylor Research Center, 1991: 15-24.
- [13] Fujimoto S, Taneya S, Kurihara T, et al. Development of a 4K GM/JT refrigerator for maglev vehicle[M]//Proceedings of the Sixteenth International Cryogenic Engineering Conference/International Cryogenic Materials Conference. Amsterdam: Elsevier, 1997: 331-334.
- [14] 刘香庭, 查文杰, 沈雪传. G-M/J-T闭式循环4.5K氦制冷液化装置的研制与试验[C]//1991年全国低温超导学术会议论文报告集. 北京: 中国电机工程学会, 1993: 1-6.
Liu X T, Zha W J, Shen X C. Development and test of G-M/J-T closed cycle 4.5K helium refrigeration and liquefaction device [C]//Proceedings of the 1991 National Conference on Cryogenics and Superconductivity. Beijing: China Electrotechnical Society, 1993: 1-6.
- [15] 申运伟, 刘东立, 刘磊, 等. 无油浮动涡旋压缩机驱动液氦温区JT制冷机实验研究[J]. 低温工程, 2021(3): 1-5.
Shen Y W, Liu D L, Liu L, et al. Experimental study on an oil-free floating scroll-type compressor driving a precooled JT cryocooler working at liquid helium temperature[J]. Cryogenics, 2021(3): 1-5.
- [16] 刘少帅, 丁磊, 蒋珍华, 等. 有阀线性压缩机驱动液氦温区闭式JT制冷机性能[J]. 科学通报, 2020, 65(8): 750-756.
Liu S S, Ding L, Jiang Z H, et al. Performance of a linear compressor driven JT cryocooler at liquid helium temperature[J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(8): 750-756.
- [17] 郭良珠, 王国香, 冯寿仁. 4.4K制冷恒温器制冷特性的实验研究[J]. 低温与超导, 1990, 18(3): 9-12.
Guo L Z, Wang G X, Feng S R. Experimental study on the performances of a 4.4k cryostat[J]. Cryogenics and Superconductivity, 1990, 18(3): 9-12.

- [18] 崔运浩, 周伟, 梁思源, 等. 液氦温区大冷量GM-JT制冷系统实验研究[J]. 真空与低温, 2025, **31**(6): 726-731.
Cui Y H, Zhou W, Liang S Y, et al. Experimental study on GM-JT cryocooler system with large cooling capacity in liquid helium temperature range[J]. Vacuum and Cryogenics, 2025, **31**(6): 726-731.
- [19] 梁思源, 崔运浩, 周伟. 板式换热器布局方向对GM-JT制冷机制冷性能的影响研究[C]//第十六届全国低温工程会议论文报告集. 合肥: 中国制冷学会, 2023: 692-697.
Liang S Y, Cui Y H, Zhou W, et al. Research on the Influence of Plate Heat Exchanger Layout Direction on the Refrigeration Performance of GM-JT Refrigeration System [C]// Proceedings of the 16th National Conference on Cryogenic Engineering. Hefei: Chinese Association of Refrigeration, 2023: 692-697.