

超导电缆过冷液氮冷却循环系统设计及试验验证

黎予颖¹, 伦振坚¹, 杜翔宇¹, 周敏¹, 王哲², 袁宇良³, 李艳锋³
(1. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510000;
2. 深圳供电局有限公司, 广东 深圳 518000;
3. 中船重工鹏力(南京)超低温技术有限公司, 南京 211100)

摘要: 超导电缆过冷液氮冷却循环系统是三相同轴高温超导电缆试验装置中的主要分系统。根据电缆运行参数和负荷要求, 进行了过冷液氮冷却循环系统的流程设计; 对冷箱和稳压装置进行了结构设计; 对流程阻力进行了分析计算, 选择了水力曲线匹配的液氮泵; 结合电缆的热负载要求, 对浸液式盘管换热器进行设计计算, 联机试验结果表明设计满足冷却要求。

关键词: 高温超导电缆; 过冷液氮循环; 压力控制

中图分类号: TB657

文献标志码: A

文章编号: 1006-7086(2023)02-0188-06

DOI: 10.3969/j.issn.1006-7086.2023.02.012

Design and Experiment of Subcooled Liquid Nitrogen Cooling Circulation System for Superconducting Cables

LI Yuying¹, LUN Zhenjian¹, DU Xiangyu¹, ZHOU Min¹, WANG Zhe², YUAN Yuliang³, LI Yanfeng³

(1. Guangdong Electric Power Design Institute of China Energy Engineering Group Co., Ltd, Guangzhou 510000, China;
2. Shenzhen Power Supply Co., Ltd, Shenzhen 518000, Guangdong, China;
3. CSIC Pride(Nanjing) Cryogenic Technology Co., Ltd, Nanjing 211100, China)

Abstract: The subcooled liquid nitrogen cooling circulation system for superconducting cables is a main sub-system in the three-coaxial high-temperature superconducting cable test device. According to the operating parameters and load requirements of the cable, the process design of the subcooled liquid nitrogen cooling circulation system and the structural design of cold box and pressure control device are finished. The flow resistance is analyzed and calculated to choose the liquid nitrogen pump that matching the hydraulic curve. Combined with the heat load required by the cable, the immersion coil heat exchanger in the system is designed and calculated. The on-line test results show that the design meets the cooling requirements.

Key words: high temperature superconducting cable; subcooled liquid nitrogen cycle; pressure control

0 引言

高温超导电缆具有线损低、传输容量大、走廊占地小以及环境友好等优点, 在高压输电领域的应用研究得到了国内外的广泛关注^[1]。1999年, 美国Southwire公司建成的30 m三相冷绝缘超导电缆系统采用液氮循环系统, 以PHPK公司生产的氮制冷机为冷源, 实现了12.5 kV/1 250 A局域网运行^[2-5]。

2001年, 丹麦NKT公司建成的30 m热绝缘超导电缆采用两台斯特林制冷机为冷源的液氮循环系统, 实现了30 kV/2 000 A并网运行, 这也是世界上第一根在公用电网中并网运行的超导电缆^[6-8]。21世纪初, 北京云电英纳超导电缆公司和中科院电工所相继完成了4 m单相35 kV/2 kA和10 m三相10.5 kV/1.5 kA高温超导电缆试验系统, 其制冷系统为消耗

收稿日期: 2022-01-10

作者简介: 黎予颖, 硕士, 工程师, 主要从事超导电缆系统工程建设研究。E-mail: 281114435@qq.com

引文信息: 黎予颖, 伦振坚, 杜翔宇, 等. 超导电缆过冷液氮冷却循环系统设计及试验验证[J]. 真空与低温, 2023, 29(2): 188-193.

LI Y Y, LUN Z J, DU X Y, et al. Design and experiment of subcooled liquid nitrogen cooling circulation system for superconducting cables[J]. Vacuum and Cryogenics, 2023, 29(2): 188-193.

液氮型冷源液氮循环系统^[9-11]。2004年,三相30 m的35 kV/2 kA高温超导电缆在昆明普吉变电站并网试运行成功,其制冷系统为两台斯特林制冷机为主体的闭式过冷液氮循环系统,成为世界第三根投入电网实际运行的高温超导电缆^[12]。

现阶段,国内外高温超导电缆项目大部分采用的是闭式单相液氮循环冷却系统,最佳工作温区为50~90 K^[13]。一般来说,一个完整的循环制冷系统包括制冷机、液氮泵、绝热容器、换热器、液氮储槽、绝热管道、阀门和各种传感器等,为超导电缆提供一个稳定可靠的低温环境。本文设计一种过冷液氮冷却循环系统,配合30 m超导电缆样品的短路电流冲击试验,取得型式试验报告和相关认证,验证制冷系统设计和运行参数。

1 过冷液氮冷却循环系统设计要

本文设计的过冷液氮冷却循环系统为一段30 m三相同轴超导电缆样品提供低温冷量,配合电缆完成型式试验,并提供型式试验报告和相关认证。过冷液氮循环冷却系统的指标要求稳定可靠,满足各运行条件下的冷却要求,要求如表1所列。

2 低温流程设计

超导电缆带材为钇钡铜氧(YBCO),工作环境温度约为78 K。超导带材缠绕在金属波纹管上形成三相同轴型式。过冷液氮在内管和圆环通道内逆向流动,通过通道内强迫对流换热冷却超导电缆。

表1 过冷液氮冷却循环系统设计参数要求

Tab. 1 Design parameters requirements of subcooled liquid nitrogen cooling circulation system

序号	系统设计参数
1	循环系统出口温度70~72 K,控温精度±0.3 K
2	过冷液氮循环质量流量最大0.7 kg/s,可调节为0.35~0.7 kg/s
3	过冷液氮压力0.1~0.5 MPa,压力波动不大于0.01 MPa
4	最大制冷量1 500 W@70 K
5	系统供回液口压差最大0.4 MPa

过冷液氮冷却循环系统以GM制冷机作为冷源,液氮作为工质,系统热负载通过换热器将热量传递给冷源,并在全程保持载冷剂处于过冷单相状态。过冷液氮冷却循环系统主要由GM制冷机、稳压罐、液氮泵、低温阀门和真空绝热管道等组成。其中GM制冷机为系统提供冷量,为系统的核心部件;液氮泵为系统提供动力,调节循环流量;稳压罐为系统提供稳定的压力控制;真空绝热管道用于连接低温系统和超导电缆。低温系统可以实现整个超导系统的吹扫和真空置换、控温降温、过冷运行、复温和故障运行等工艺流程,满足超导系统运行要求。根据以上五个工艺流程要求,设计了过冷液氮冷却循环系统的流程,如图1所示。

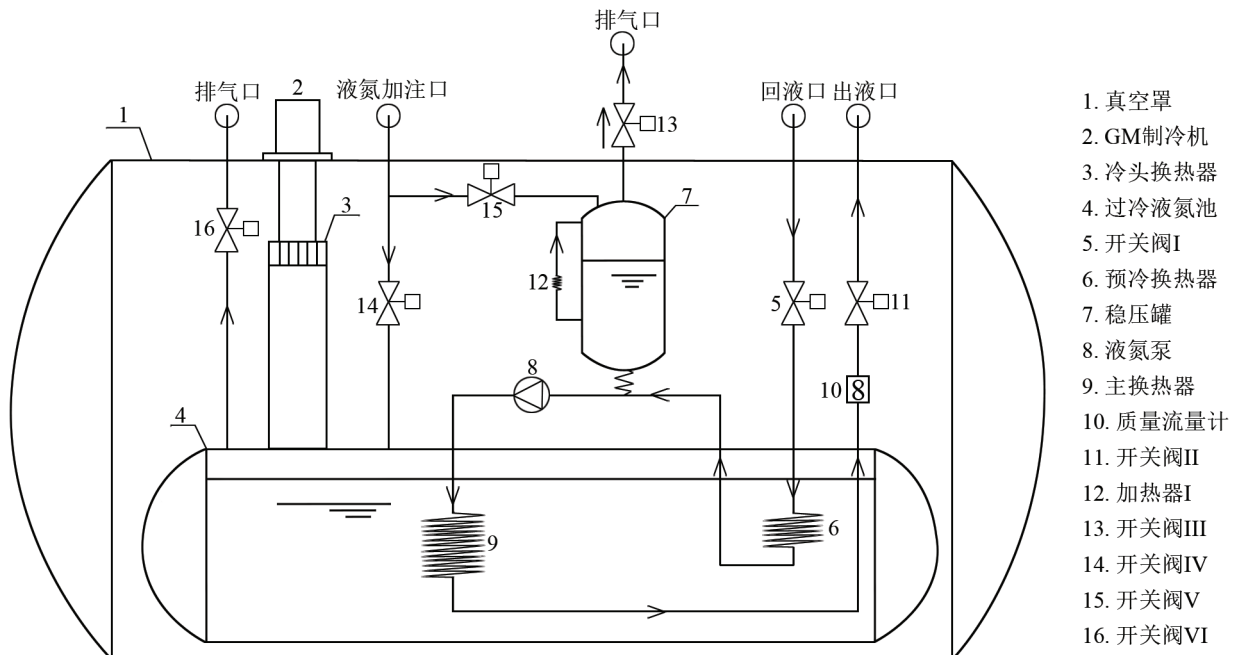


图1 过冷液氮冷却循环系统流程图

Fig. 1 Flow design diagram of subcooled liquid nitrogen cooling circulation system

系统流程中,过冷液氮杜瓦中装有适量液氮,制冷机通过换热器将过冷液氮杜瓦中的液氮降温至70 K左右。在液氮循环方面,从超导电缆流回的液氮通过真空绝热管道流入液氮泵入口的预冷换热器进行初步降温,被液氮泵增压后,进入过冷换热器与冷源换热达到过冷状态,再流入超导电缆终端入口带走热量返回低温系统,进行新一轮循环。液氮供回液由阀门控制通断。流量由压差孔板流量计测量,各个关键节点均布置有温度和压力传感器,两个液氮容器中布置有电容式液位计。当GM制冷机发生故障或需要检修时,可以启动消耗式抽空减压系统来作为备用冷源为超导电缆提供冷量,维持运行。低温系统可以满足超导电缆系统运行各个阶段的要求,并在温度、压力和流量控制等方面

具有良好的稳定性。

3 冷箱设计

低温系统中,冷箱是一个重要部件,低温系统的大部分重要的部件均安装在冷箱中。首先,冷箱是整个液氮循环的冷源,所有冷量由6台中船重工鹏力(南京)超低温技术有限公司的KDE300SA型号GM制冷机提供,总共可以提供1 500 W@70 K的冷量;其次,通过系统中的各个低温阀来调节供给超导电缆的过冷液氮流量;同时,冷箱在正常运行时调节整个超导系统液氮循环的运行压力和温度等参数,为超导电缆的正常运行提供稳定的低温环境。冷箱设计如图2所示,冷箱中各个主要部件参数如表2所列。

表2 过冷液氮冷却循环系统冷箱主要部件参数

Tab. 2 Parameter of main components of cold box of subcooled liquid nitrogen cooling circulation system

序号	部件名称	型号	数量	说明
1	制冷机	KDE300SA	6台	单台冷量 250 W@70 K
2	过冷液氮杜瓦	D906×t3	1个	有效容积 50 L
3	稳压罐	D356×t3	1个	压力容器,有效容积 30 L
4	预冷换热器	D32×t2.9	1个	浸液式盘管换热器,长度 10 m
5	过冷换热器	D32×t2.9	1个	浸液式盘管换热器,长度 34.5 m
6	真空罩	D1260×t5	1个	顶装式真空容器

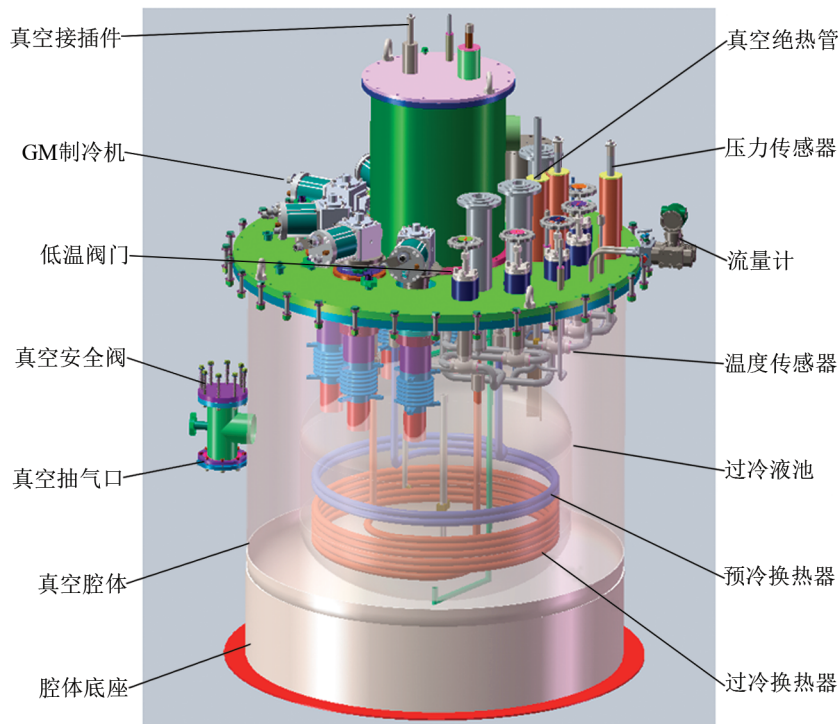


图2 冷箱设计图

Fig. 2 Design drawing of cold box

3.1 过冷液氮杜瓦和真空罩

过冷液氮杜瓦为真空绝热罐式结构,按照真空夹层低温压力容器的特点,设计为立式筒状封头结构。过冷液氮杜瓦材料为304不锈钢,设计压力0.3 MPa,设计温度77 K,中间为筒状,两头焊接封头。杜瓦和真空罩之间为真空夹层。真空罩设计承压0.1 MPa,材料为304不锈钢,经过强度校核计算确定尺寸为直径1 260 mm、厚度5 mm,底部为封头结构,顶端为法兰结构,法兰厚度28 mm,使用钩头螺栓固定。

3.2 自动控压组件

自动控压组件主要用于将整个过冷液氮循环的压力控制在设计范围内,确保循环系统中各个部件的安全运行,以及确保循环液氮在设计压力范围内处于过冷单相。自动控压组件包括稳压罐、补液阀门及管道、卸压排气阀门、加热增压装置、压力测量以及安全部件等。其中,稳压罐设计压力范围0.25~0.4 MPa,工作压力为0.25~0.4 MPa,设计耐压1.0 MPa,设计温度77 K,材料为304不锈钢,容量为30 L。

如图1所示,稳压罐通过三通与循环管道相连,只将压力传递给循环系统而不参与主循环。稳压罐内最低压力远高于回流液氮所处温度的饱和蒸气压,从而确保回流液氮处于过冷状态。稳压罐的控压逻辑为:稳压罐顶部安装加热器,当压力偏低时,加热稳压罐上部的氮气以升高压力;当压力偏高时,开启排气阀门,排出氮气,降低罐内压力。稳压正常工作时,缓冲罐内压力为0.3 MPa,压力调节范围为0.25~0.4 MPa。过冷液氮循环系统为闭式零蒸发系统,在系统整体漏率小于 10^{-8} Pa·L/s时,系统液氮损失量少。当稳压罐中液氮液位低于设定值时,从液氮储槽向系统自动补充液氮。

3.3 液氮泵参数计算

整个循环系统的驱动部件为真空长轴液氮泵。液氮泵的选择主要考虑流量和扬程两个参数。

流量参数主要依据热负荷1 500 W和循环液氮温升2 K计算,如式(1)。

$$q_v = \frac{Q}{C_p \Delta T} \quad (1)$$

式中: q_v 为液氮循环质量流量,kg/s; Q 为系统的制冷量,W; C_p 为液氮定压比热容,J/(kg·K); ΔT 为制冷系统供回液温度差,K。计算质量流量为0.35 kg/s,取整个循环系统过冷液氮循环流量为0.35~0.7 kg/s。

根据实际布置结构和管内流阻公式,计算不同

工况下制冷系统、超导线缆沿程和端部冷箱的流阻。液氮管道内流阻计算依据理论公式^[3]:

$$\Delta p = f_D \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho v^2}{2} \quad (2)$$

式中: Δp 为流阻,Pa; f_D 为阻力系数,无量纲; L 为流动等效长度,m; D 为水力直径,m; ρ 为液氮密度,kg/m³; v 为液氮流动速度,m/s。系统流阻主要由三部分组成: $\Delta p = \Delta p_1 + \Delta p_2 + \Delta p_3$ 。 Δp_1 为终端局部阻力,为1 kPa; Δp_2 为内管流阻; Δp_3 为环形管道流阻。

对于流阻系数,管道为波纹管且管内雷诺数 Re 大于4 000,流阻系数计算公式采用Swamee-Jain方程^[14]:

$$f = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{\epsilon}{3.7D} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^2} \quad (3)$$

式中: ϵ 为管道内粗糙度,m。

代入实际制冷量1 500 W@70 K、超导电缆稳定运行所需的供回液最大温差2 K、内管水力直径44 mm、外管水力直径25 mm和雷诺数9 569,按照质量流量0.35 kg/s计算,整个系统流阻约为125 kPa。按照质量流量0.45 kg/s计算,整个系统流阻约为175 kPa。流阻175 kPa折算成液氮柱高度约为21.9 m,所以液氮泵的最小扬程不小于21.9 m液氮柱高度。

3.4 过冷换热器参数计算

液氮由冷箱中的预冷换热器和过冷换热器实现冷量的交换。过冷换热器为浸液式盘管换热器,管内为流动的循环液氮,整体浸泡在过冷液氮中,管道内外的液氮通过盘管进行换热。盘管需要有一定承压能力,同时在液氮温区有良好的换热性能。因此过冷换热器选用不锈钢管,规格为D32,壁厚2.9 mm。压力0.3 MPa、温度70 K时,液氮的物性参数如表3所列。浸液式盘管换热器设计传热温差2 K,出口温度70 K,进口温度72 K,过冷液氮杜瓦温度68 K。

表3 液氮物性参数

Tab. 3 Physical properties of liquid nitrogen

序号	物性参数	符号	参数值
1	运动黏度/(m ² ·s ⁻¹)	ν	2.63×10^{-3}
2	动力黏度/(kg·(s·m) ⁻¹)	μ	2.21×10^{-4}
3	定压比热/(J·(kg·K) ⁻¹)	C_p	2.015×10^3
4	导热系数/(W·(m·K) ⁻¹)	λ	0.159
5	密度/(kg·m ⁻³)	ρ	839.06

过冷换热器所需的换热面积及其他参数计算公式^[15-16]如下:

$$L = \frac{F}{\pi d_2} \quad (4)$$

$$F = 1.3 \frac{Q}{K \Delta T} \quad (5)$$

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} \cdot \frac{d_1}{d_2} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (6)$$

$$\Delta T = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} \quad (7)$$

$$\alpha_1 = 0.027 Re^{0.8} \frac{\lambda}{d_1} Pr^{\frac{1}{3}} \left[1 + 10.3 \left(\frac{d_1}{R} \right)^3 \right] \quad (8)$$

$$Pr = \frac{\mu C_p}{\lambda} \quad (9)$$

$$Re = \frac{v_1 d_1}{\nu} \quad (10)$$

$$v_1 = \frac{qm}{\rho \frac{\pi d_1^2}{4}} \quad (11)$$

式中: L 为不锈钢管所需长度,m; F 为过冷换热器所需面积, m^2 ; Pr 为普朗特数; Q 为系统的制冷量1500W; K 为过冷换热器传热系数, $W \cdot (m^2 \cdot k)^{-1}$; ΔT 为对数平均温差,K; Δt_1 为换热器较大温差,K, $\Delta t_1=4$ K; Δt_2 为换热器较小温差,K,式中 $\Delta t_2=2$ K; d_1 、 d_2 分别为换热器内、外管直径,式中 $d_1=32$ mm、 $d_2=26.2$ mm; α_1 、 α_2 分别为管内、外换热系数, $\alpha_2=369.4$ W·(m²·k)⁻¹为自然对流; R 为盘管曲率半径,m,取 $R=0.5$ m; v_1 为管内流速,m·s⁻¹; q_m 为管内质量流量,kg·s⁻¹。

计算得到 $F=1.65$ m², $L=21$ m。管道长度考虑1.5的裕度,取32 m。由于过冷换热器为浸液式螺旋盘管,螺旋直径为1 m,所需圈数为11圈,最终长度为34.5 m。

3.5 温度控制设计

过冷液氮冷却循环系统正常工作时,6台GM制冷机全开。在过冷液氮杜瓦中安装加热负载,加热负载由PLC控制程序控制,当供液温度降低时,加热量增加,供液温度升高时,加热量减小。

4 试验测试结果

过冷液氮冷却循环系统组装完成后,经过吹扫置换、冷却降温 and 过冷运行后,系统正常运行,满足30 m超导电缆的运行工况,超导电缆长时间带电顺利运行。温度计采用PT100,测量精度为±34 mK;压力测量采用绝压型压力传感器,测量精度为±1%

FSO;流量测量采用孔板式压差流量计,测量精度为±0.025% FSO。

4.1 冷却降温和过冷

过冷液氮冷却循环系统和超导电缆连接后使用液氮降温,液氮从循环系统注液口进入,流经循环系统管路,从供液口流向超导电缆,再从回液口返回循环系统。同时液氮流经过冷液氮杜瓦,对过冷液氮杜瓦进行降温。当循环系统管路和过冷液氮杜瓦充满液氮时,开启制冷机和液氮泵,实现系统过冷,各点温度曲线如图3所示。

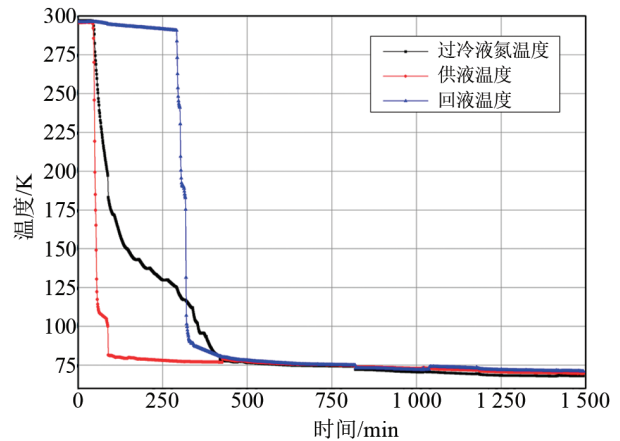


图3 降温和过冷的温度随时间变化曲线

Fig. 3 Temperature of cooling and subcooling changes with time

图3显示系统降温时间约500 min,其中过冷液氮温度为过冷液氮杜瓦内温度。降温速率由液氮流量控制,降温总耗时约1000 min达到超导电缆正常运行工况。

4.2 压力和流量控制

系统在设计工况下稳定运行一段时间后,取10 min稳定运行区间,稳压罐压力和流量稳定性试验如图4和图5所示。

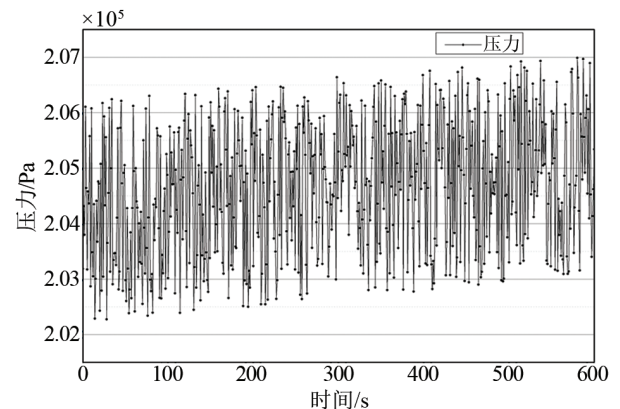


图4 压力稳定性测试曲线

Fig. 4 Curve of pressure stability test

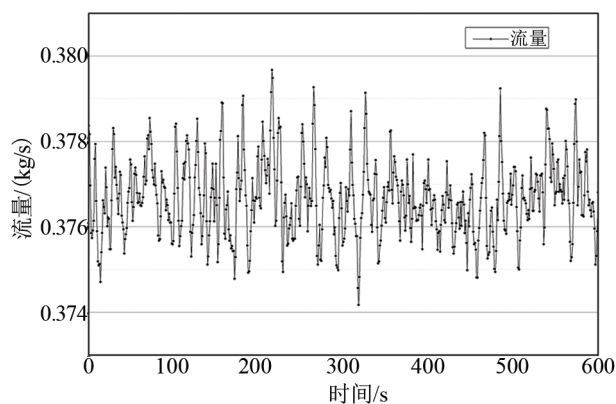


图5 流量稳定性测试数据曲线

Fig. 5 Curve of flow stability test

图中可以看出,压力和流量能够稳定在设定值附近,压力波动小于4.2 kPa,流量波动小于0.006 kg/s,满足试验要求。

测试供、回液温度及流量随时间变化,分析系统的稳定调节能力,如图6所示。可以看出,超导电缆系统稳定运行时,过冷液氮供、回液温度变化波动范围小于 ± 0.2 K,制冷系统供、回液温差小于2.5 K,符合设计指标。由图6可以看出,由于超导电缆和终端等外部热负荷波动,回液温度在流量基本不变情况下呈现小范围波动。系统能够确保供液温度基本保持在70.1 K左右,稳定性高,保证超导电缆的正常运行。同时测得液氮流量约为0.35 kg/s时,供、回液压差约为142 kPa。

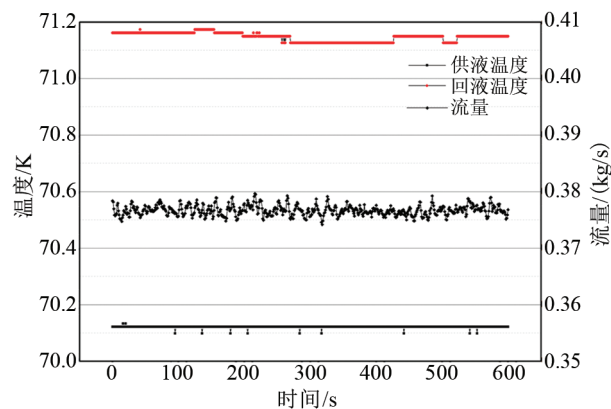


图6 过冷液氮供液、回液温度及流量随时间变化曲线

Fig. 6 The supply and return temperature and flow curve of subcooled liquid nitrogen over time

5 结论

根据电缆运行参数和负荷要求,进行了过冷液氮冷却循环系统的流程设计。根据超导电缆工作参数,计算出液氮泵选型所需参数;计算得到过冷

换热器的尺寸和形式;设计了系统自动控压组件。进行了系统和超导电缆联调测试。测试结果表明,系统稳定运行,各项性能指标满足超导电缆的运行要求,为后续进一步优化系统奠定了基础。

参考文献:

- [1] 范宇峰,龚领会,徐向东,等. 10 m 10.5 kV/1.5 kA 三相交流高温超导电缆低温系统[J]. 制冷学报, 2005, 26(2): 27-29.
- [2] HUBBELL R H, TOSCANO W M. Thermodynamic optimization of helium liquefaction cycles[J]. Advances in Cryogenic Engineering, 1980, 25: 551-562.
- [3] TOSCANO W M, KUDIRKA F J. Thermodynamic and mechanical design of the FNAL central helium liquefier[J]. Advances in Cryogenic Engineering, 1978, 23: 456-466.
- [4] BROWN D, SCHLAFKE A, WU K. Cycle design for the ISABELLE helium refrigerator[J]. Advances in Cryogenic Engineering, 1982, 27: 135-146.
- [5] HUNG C S. Cryogenics in China today[C]//8th International Cryogenic Engineering Conference, 1980.
- [6] MITO T, SATOH S, MAEKAWA R, et al. Development of a cryogenic system for the large helical device[J]. Advances in Cryogenic Engineering, 1998, 43: 589-596.
- [7] DUZHEV V E, ZHULKIN V F, KASHIRSKIKH G M, et al. TOKAMAK-15 modernization and an analysis of cryogenic system operation for the period from 1988 to 1994[J]. Advances in Cryogenic Engineering, 1996, 41: 745-750.
- [8] SPATH F, HEIL R, LESSER J, et al. A 2 kW He refrigerator for SC magnet tests down to 3.3 K[J]. Cryogenics, 1992, 32: 56-59.
- [9] 龚领会,徐向东,李来风,等. 10 m 10.5 kV/1.5 kA 三相交流高温超导电缆低温系统[J]. 制冷学报, 2005, 26(1): 5.
- [10] XIN Y, HOU B, BI Y, et al. China's 30 m, 35 kV/2 kA ac HTS power cable project[J]. Superconductor Science & Technology, 2004, 17(5): S332.
- [11] 丁怀况,施锦,滕健,等. 4M-2000A 高温超导电缆制冷系统[J]. 低温与超导, 2003, 31(3): 70-74.
- [12] 丁怀况. 30 M ~ 35 kV/2 000 A 高温超导电缆制冷系统[J]. 低温与超导, 2005, 33(4): 60-63.
- [13] 宝旭峥,诸嘉慧. 高温超导电缆优化设计现状与发展[J]. 电气应用, 2011, 30(9): 30-34.
- [14] 孔珑. 工程流体力学[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
- [15] 杨世铭,陶文铨. 传热学[M]. 第四版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [16] 刘纪福. 翅片管换热器的原理与设计[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2013.

(责任编辑:郭云)