



·脉冲功率技术·

# 基于微通道液氮换热的脉冲磁体快速冷却方法研究

何 勇<sup>1</sup>, 孟昭男<sup>2</sup>, 张 鹏<sup>2</sup>, 孙衢骏<sup>3</sup>, 周星健<sup>1</sup>

(1. 中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900; 2. 上海交通大学 制冷与低温工程研究所, 上海 200240;  
3. 武汉第二舰船设计研究院, 武汉 430205)

**摘 要:** 影响脉冲磁体重频运行能力的关键因素是磁体的冷却速度。提出了一种脉冲磁体快速冷却方法: 在磁体导体内开微小通道, 在通道内注入液氮, 通过增大导体与液氮之间的直接接触面积(换热面积)、液氮单相流动换热、液氮流动沸腾换热这三个途径来大幅提高导体的冷却速度, 与此同时尽可能减小对脉冲磁体性能(磁场强度、脉宽和内直径)的影响。阐述了基于微通道内液氮流动、沸腾换热的脉冲磁体快速冷却方法的原理, 开展了数值模拟和验证性试验, 结果表明, 对于 25 T 的 20 mm 口径脉冲磁体, 采用快速冷却方法, 30 s 即可冷却至初始温度, 为磁体仅浸泡在液氮中的冷却时间(600 s)的 5%, 冷却速度提高了 19 倍。

**关键词:** 脉冲磁体; 重频运行能力; 微通道; 沸腾换热; 对流换热

中图分类号: TL331

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.220069

## Investigation on fast cooling method for pulsed magnet based on heat transfer of flowing liquid nitrogen in micro-channels

He Yong<sup>1</sup>, Meng Zhaonan<sup>2</sup>, Zhang Peng<sup>2</sup>, Sun Quqin<sup>3</sup>, Zhou Xingjian<sup>1</sup>

(1. Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900, China;

2. Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

3. Wuhan Second Ship Design and Research Institute, Wuhan 430205, China)

**Abstract:** The cooling-down time limits the capability of repetitive operation of the pulsed magnet. A fast cooling method for the pulsed magnet based on heat transfer of flowing liquid nitrogen (LN<sub>2</sub>) in micro-channels formed inside the conductors of the pulsed magnet is presented. The large amount of heat produced during discharging of the pulsed magnet can be quickly dissipated by LN<sub>2</sub> inside the micro-channels through the enlarged contact areas between LN<sub>2</sub> and conductors, by single-phase LN<sub>2</sub> flow and/or flow boiling. Furthermore, the impacts of the micro-channels on the performances (strengthening of the magnetic field, pulse duration and diameter of inner bore) can be tolerable. The principles of fast cooling method based on single-phase LN<sub>2</sub> flow or flow boiling are elucidated. Numerical simulations and validation experiments of the fast cooling method indicate that pulsed magnet with inner bore diameter of 20 mm and magnetic field of 25 T can be cooled down in 30 s. The cooling speed of the pulsed magnet of the fast cooling method is increased by about 19 times compared with the conventional cooling method (600 s) where the pulsed magnet is simply immersed in LN<sub>2</sub>.

**Key words:** pulsed magnet, capability of repetitive operation, micro-channels, flow boiling, forced convection

脉冲磁体大电流放电时, 磁体导体中会产生大量的焦耳热。为保证磁体结构强度, 脉冲磁体内部层间及最外层常采用强度高而导热性能差的纤维复合材料加固, 这使得每次放电所产生的焦耳热很难快速耗散, 焦耳热将沉积在磁体导体上。不难想象, 当脉冲磁体重复放电频率提高到一定程度时, 脉冲磁体由于无法快速冷却而导致磁体导体温度持续升高, 严重时经过几次放电即可导致导体绝缘层以及磁体结构的破坏<sup>[1-3]</sup>。

如何有效地提高脉冲磁体冷却速度且不显著降低磁体的其他性能是重频脉冲磁体研究和应用的一个重要问题。常见的方法有减少纤维复合材料的用量以改善导体散热能力、在导体层间增设冷却通道以提高散热能力等。目前, 30 T、20 mm 口径脉冲磁体的重频运行能力 ≤ 10 min/次<sup>[1-3]</sup>。

\* 收稿日期: 2022-03-14; 修订日期: 2022-09-05  
联系方式: 何 勇, 4045604@qq.com。

本文提出一种脉冲磁体快速冷却方法:在磁体导体内开微小通道,在通道内注入液氮,通过增大导体与液氮之间的直接接触面积(换热面积)、液氮单相流动换热、液氮流动沸腾换热这三个途径来大幅提高导体的冷却速度,与此同时尽可能减小对脉冲磁体性能(磁场强度、脉宽和内直径)的影响。预期可将 30 T、20 mm 口径脉冲磁体的重频放电能力提高到 10 s/次。需要说明的是,在导体内开孔会影响导体的力学强度、导体的通流能力和电阻,针对具体应用,需仔细评估此方法的适应性。

通常,脉冲磁体整体浸泡在液氮环境中运行,但由于仅仅磁体外表面与液氮接触,磁体导体并不直接与液氮接触,散热能力较弱。欲提升液氮对脉冲磁体的冷却效果,使之可以高重频运行,就需要改进液氮和磁体导体之间的换热方式。根据牛顿冷却定律  $Q=hA\Delta T$ , 换热功率  $Q$  与换热系数  $h$ 、换热面积  $A$  和换热温差  $\Delta T$  有关。液氮和磁体之间的换热温差主要取决于磁体的温度,不能无限制增大。因此要达到更大的换热功率,就必须提升液氮和磁体之间的换热面积和换热系数。

在导体内增设微小通道,使液氮在导体内流动,可以增大磁体和液氮之间的换热面积,并可以迅速将沉积在导体中的热量散出。此外,导体内流动的液氮与磁体导体之间的换热方式可分为单相对流换热和流动沸腾换热两种,其中流动沸腾换热的换热系数更高,通过液氮在磁体导体内流动沸腾,可以显著提升磁体的冷却效果。

针对液氮在管内的单相流动换热和流动沸腾换热,已经开展了很多实验和理论研究<sup>[4-11]</sup>。孙凤玉等<sup>[4]</sup>对液氮在毛细管内的自然对流换热进行数值计算分析,研究了液氮在不同倾斜角度的毛细管内的流动换热特性。Qi 等<sup>[8-10]</sup>通过实验对液氮在微通道圆管内的单相对流换热和流动沸腾换热特性进行了研究,发现管内流动液氮在沸腾情况下的换热系数比单相对流换热情况增大数倍,同时液氮沸腾换热时的管路压降也明显增大。Fu 等<sup>[11]</sup>对液氮在微通道圆管内的流动沸腾进行了可视化研究,确定了不同工况下液氮的流型以及流动换热特性。在此基础上,Zhang 和 Jia<sup>[12]</sup>基于 VOF 和 Level Set 模型对液氮在微通道圆管内的流动沸腾换热进行了数值仿真模拟,数值计算结果与实验结果吻合良好。

## 1 快速冷却脉冲磁体的设计与仿真

### 1.1 脉冲磁体的设计

针对脉冲强磁场下 X 射线衍射实验需求<sup>[13-14]</sup>,快速冷却脉冲磁体的概念设计如图 1 所示,由上下两个磁体组成,磁体间间距为 20 mm,轴向孔径为 20 mm,加载峰值 15 kA 脉冲电流(脉宽 35 ms,峰值时刻 10 ms),峰值时刻的轴向磁场为 30 T,磁体导体热作用量( $\int I^2 dt$ )为  $2.87 \times 10^6 \text{ A}^2 \cdot \text{s}$ 。磁体导体截面积为  $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ ,截面开圆孔,直径为 2 mm,每个磁体为 200 匝,轴向 10 匝,径向 20 层。

设计的脉冲磁体冷却至液氮温度后,单次放电(认为放电时间内处于绝热状态)后,磁体内导体温度分布如图 2 所示

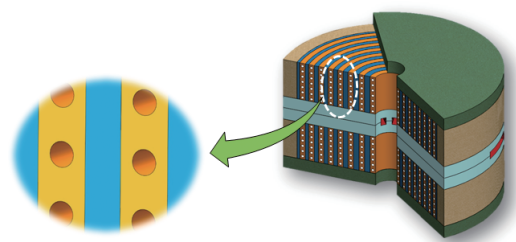


Fig. 1 Structure of the designed magnet

图 1 快速冷却脉冲磁体示意图

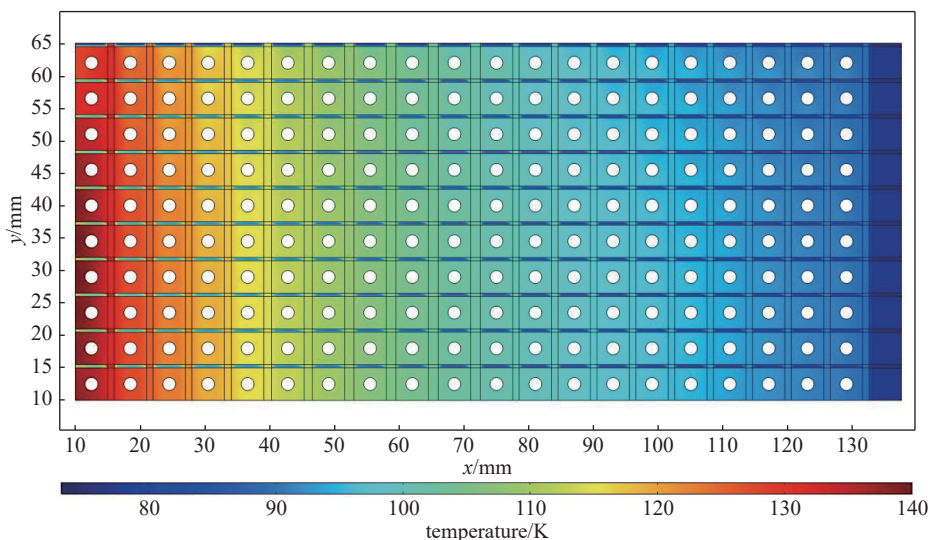


Fig. 2 Temperature distribution of the magnet at the end of discharge, initial temperature is 77 K

图 2 初始温度为 77 K 时,放电结束时磁体的温度分布

(其中横坐标表示磁体径向尺寸,纵坐标表示磁体轴向尺寸),最内层温升最大,约 60 K。各层导体上沉积的能量如图 3 所示,中间层沉积的能量较多,约 5 kJ,8~9 层,两层的能量沉积为 10 kJ,1~20 层的总沉积能量为 80 kJ。单位长度(质量)上沉积能量最多的是最内层,2.9 kJ/m,因此其温升也最大。

### 1.2 冷却过程建模

采用数值计算对磁体的散热情况进行研究。为简化计算,仅对磁体的螺线管和复合材料部分建立计算域,磁体与外部和导体内液氮的换热作用作为边界条件耦合到计算中。两个计算域内的传热方式均为导热,其中磁体导体部分作为均匀体热源处理。导体和复合材料部分的温度  $T_c$  和  $T_e$  分别由导热方程(1)和(2)描述,即

$$\rho_c c_{pc} \frac{\partial T_c}{\partial t} = \nabla \cdot (k_c \nabla T_c) + S_c \quad (1)$$

$$\rho_e c_{pe} \frac{\partial T_e}{\partial t} = \nabla \cdot (k_e \nabla T_e) \quad (2)$$

式中: $\rho_c, \rho_e$  是铜和复合材料的密度; $c_{pc}, c_{pe}$  是铜和环氧树脂的比热容; $k_c, k_e$  是铜和环氧树脂的热导率; $S_c$  是铜导线螺线管的发热功率。在计算中,铜和环氧树脂材料在温度范围 77~135 K 的热物性如表 1 所示,其中密度视为常数,比热容和热导率则随温度变化。

表 1 铜和环氧树脂材料在不同温度下的热物性

Table 1 Thermal properties of copper and epoxy under different temperatures

thermal property/K	density of cooper/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	specific heat capacity of cooper/( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	thermal conductivity of cooper/( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ )	density of composite material/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	specific heat capacity of composite material/( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	thermal conductivity of composite material/( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ )
95	8978	199.13	579.14	1560	246.40	0.22
77	8978	245.20	490.34	1560	304.00	0.29
135	8978	307.03	440.22	1560	432.00	

磁体整体浸没在液氮中,磁体外表面与液氮的换热方式为自然对流换热。磁体外表面设置对流换热边界条件,换热系数设为  $50 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ,换热温度设为 77 K。液氮在导体内部流动,液氮与导体进行单相对流换热或者流动沸腾换热。导体内壁也设置为对流换热边界条件,换热温度设为 77 K。在单相对流换热方式下,换热系数设为  $3 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ <sup>[11]</sup>,在流动沸腾换热方式下,换热系数设为  $15 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ <sup>[12]</sup>。

将计算域划分四面体网格,为验证网格无关性,分别采用网格总数为 1 437 772、2 526 316 和 4 933 583 的网格进行计算。其中网格数为 1 437 772 和 2 526 316 的网格计算结果差异小于 1.0%,网格数为 2 526 316 和 4 933 583 的网格计算结果差异小于 0.2%。综合考虑数值计算精度和计算速度,选用网格数为 2 526 316 的网格进行计算。计算方式采用瞬态计算,计算步长为 0.1 s。对于每一步长的迭代计算,当能量方程的残差小于  $10^{-8}$  时,可视为计算收敛,结束当前步长迭代并进入下一步长的计算。

### 1.3 数值仿真结果及分析

为了验证液氮在磁体导体内流动换热的冷却效果,用简化模型计算了三种工况(磁体导体内无液氮流动、单相对流换热、流动沸腾换热)下磁体导体的冷却情况,模型中磁体导体为内热源型导体,加热功率为 10 kW,加热时间 1 s。如图 4 所示,不同换热系数下,导体的冷却速度明显不同,沸腾换热约 2.1 s 即可冷却到初始温度,单相对流换热稍长,约 9.8 s。考虑到微通道内流动液氮冷却是一个多种因素综合作用过程,在下面的计算中,取换热系数为  $4 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ,略高于单相对流换热系数,远低于流动沸腾换热系数。

如图 5 所示,用简化模型计算了 1~20 层的冷却情况。

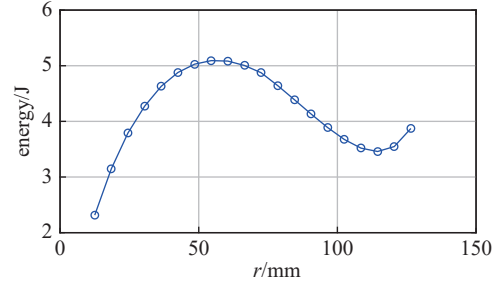


Fig. 3 Deposited energy for each layer conductor of the magnet at the end of discharge

图 3 放电结束时各层导体沉积的热量

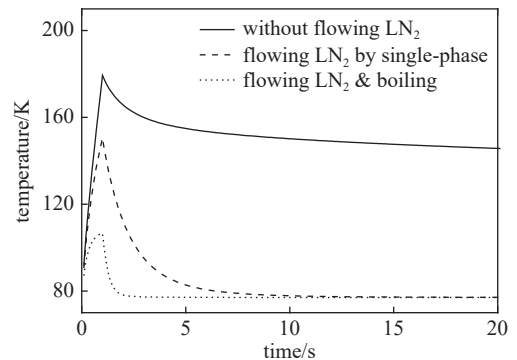


Fig. 4 Temporal evolution of average temperature of the magnet conductor during intermittent running process

图 4 磁体导体平均温度随时间的变化



黄色部分为铜导体,截面尺寸为 $5\text{ mm}\times 5\text{ mm}$ ,共20层1匝,每层铜导线内有直径为 $2\text{ mm}$ 的圆形通孔。黑色部分为复合材料,每层铜导体之间复合材料的厚度为 $1\text{ mm}$ ,最外层复合材料的厚度为 $5\text{ mm}$ 。磁体的外表面设置为绝热条件,铜导体在通孔内壁与液氮的换热设置为对流换热条件,换热系数为 $4\text{ kW}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ,换热温度为 $77\text{ K}$ 。

铜导体区域设置为内热源,总加热功率为 $80\text{ kW}$ ,磁体每一个加热-散热周期为 $10\text{ s}$ ,在每个周期开始时磁体进入加热阶段,加热时间为 $1\text{ s}$ ,磁体的温度迅速升高,如图6所示,与图2的温度分布基本一致,磁体不同层的导体有较大的温度差异,其温度总体上呈从内向外逐渐减小的趋势。加热阶段结束后,铜导体平均温度上升到 $93\text{ K}$ 左右,最高温度上升到 $122\text{ K}$ 左右。

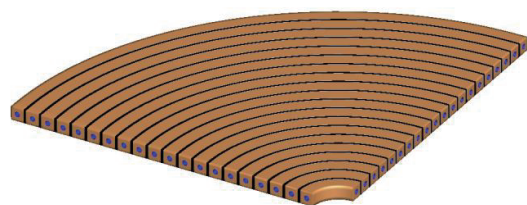


Fig. 5 Model for the cooling processing simulation for the designed magnet ( $1^{\text{st}}\sim 20^{\text{th}}$  layer)

图5 1~20层导体冷却情况计算模型

之后磁体导体停止加热,进入散热阶段,磁体导体的温度在液氮换热的作用下逐渐降低,其散热过程如图7所示,经过 $10\text{ s}$ 的散热,磁体导体均能冷却到初始温度。

由于 $8\sim 9$ 层导体热沉积最大,且导线长度在整个磁体中处于平均水平,因此特别计算了 $8\sim 9$ 层的散热情况,计算模型的设置与 $1\sim 20$ 层模型相同,外包复合材料的厚度为 $5\text{ mm}$ 。前述模型不同的是,铜导体区域的加热功率为 $12\text{ kW}$ ,加热时间为 $1\text{ s}$ ,磁体的温度迅速升高,两层之间温差不大,为 $104\text{ K}$ 左右,如图8所示。其散热过程如图9所示,经过 $10\text{ s}$ 的散热,磁体导体均能冷却到初始温度。

通过上述计算,可以得出的结论是:在导体内开微通道,注入流动液氮,通过增大导体与液氮之间的换热面积、液氮单相流动换热、液氮流动沸腾换热这三个途径,可显著提高脉冲磁体的冷却速度,有望在 $10\text{ s}$ 时间内使本文所设计的脉冲磁体在脉冲大电流放电后冷却到初始温度。

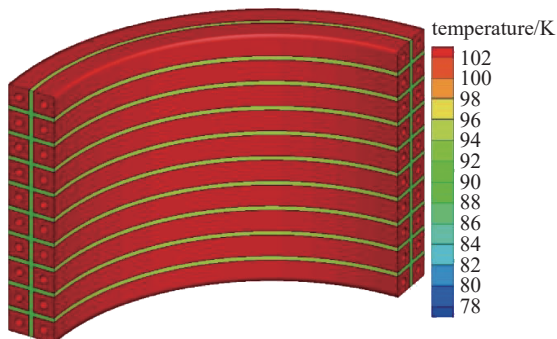


Fig. 8 Temperature of the  $8^{\text{th}}\sim 9^{\text{th}}$  layer after  $1\text{ s}$  heating with  $12\text{ kW}$

图8 1s加热(功率 $12\text{ kW}$ )后,8~9层导体温度分布

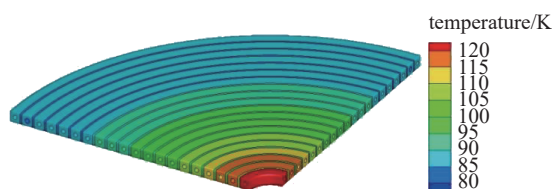


Fig. 6 Temperature of the  $1^{\text{st}}\sim 20^{\text{th}}$  layer after  $1\text{ s}$  heating with  $80\text{ kW}$

图6 1s加热(功率 $80\text{ kW}$ )后,1~20层导体温度分布

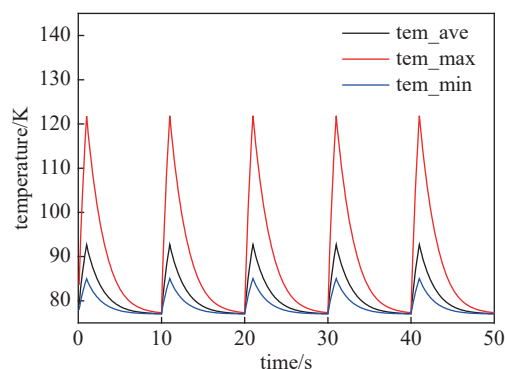


Fig. 7 Cooling processing of magnet conductors ( $1^{\text{st}}\sim 20^{\text{th}}$  layer model)

图7 磁体导体( $1\sim 20$ 层模型)冷却过程

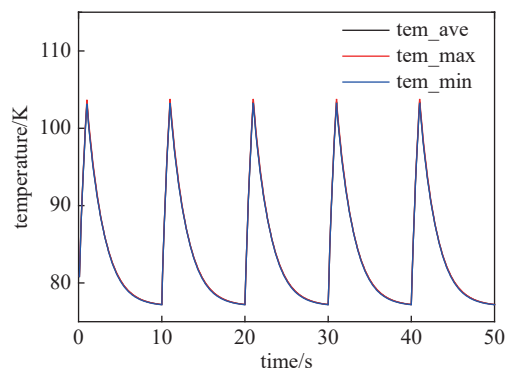


Fig. 9 Cooling processing of magnet conductors ( $8^{\text{th}}\sim 9^{\text{th}}$  layer model)

图9 磁体导体( $8\sim 9$ 层模型)冷却过程

## 2 验证性试验及结果分析

为验证本文所提出的脉冲磁体快速冷却技术,设计了如图10所示的缩比型脉冲磁体,该磁体由概念设计磁体( $30\text{ T}$ )前四层组成,为使缩比型脉冲磁体的热作用量与概念设计磁体( $30\text{ T}$ )相当,采用 $25\text{ mF}$ , $1.25\text{ kV}$ 脉冲电容器对磁体进行放电,放电电流波形如图11所示,磁体导体上的热作用量为 $2.54\times 10^6\text{ A}^2\cdot\text{s}$ ,对应峰值时刻,缩比型磁体



的中心磁场为 24.9 T。

设计了对比试验,在放电参数(电容量、充电电压)一致时,将磁体浸泡在液氮中,比较磁体微通道内不加注液氮,磁体微通道内加注液氮和微通道内加注加压使液氮流动(压力为 1 MPa)三种情况下,脉冲磁体的冷却速度。放电的初始温度均为 77 K,放电电流波形基本一致(放电过程中,脉冲磁体导体电阻的变化对电流波形的影响不显著)。

磁体导体电阻的变化情况即为脉冲磁体的冷却过程。三种情况下,脉冲磁体放电后的电阻变化如图 12 所示,磁体仅浸泡在液氮中时,磁体冷却到初始温度需要的时间约 600 s,微通道内加注液氮,冷却时间约 300 s,微通道内加压 1 MPa 使液氮流动,冷却时间约 30 s。

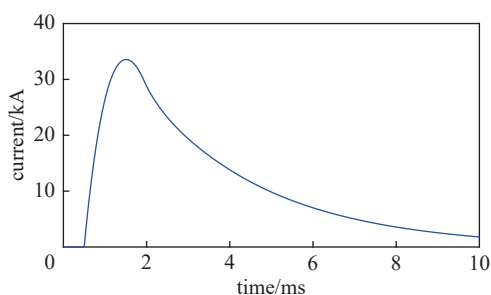


Fig. 11 Discharged current of the scaled pulsed magnet

图 11 缩比型脉冲磁体放电电流波形

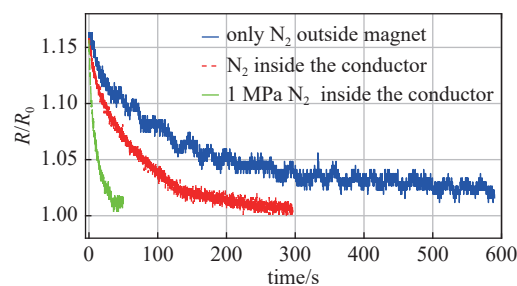


Fig. 12 Cooling processing of the magnet with 3 kinds of cooling method

图 12 三种不同冷却方式下,磁体冷却过程

结果表明,磁体仅浸泡在液氮中时,磁体很难快速冷却到初始温度,冷却时间约 10 min,与文献结果相当。在磁体导体内开微通道,并注入液氮,能大幅提升脉冲磁体冷却速度。比较微通道内液氮是否流动的情况下,脉冲磁体的冷却过程,发现液氮不流动时,脉冲磁体的冷却速度有明显拐点,拐点出现在约 150 s 位置,拐点前,磁体的冷却速度较快,拐点后,明显变缓。在微通道内液氮流动时,磁体冷却时间约 30 s,未出现明显拐点。关于上述过程的解释是:(a)放电结束后的短时间内,导体温度与液氮温差较大,管内液氮沸腾,换热系数较高,之后随着液氮的汽化膨胀,在液氮不流动的情况下,液氮换热能力较弱,换热系数较小,散热能力较弱,在液氮流动的情况下,能较好地维持较高换热能力;(b)换热系数未达到简化模型中预期的  $4 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ,根据散热时间,管内液氮在 1 MPa 加压条件下估算的换热系数为  $1.3 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ,这说明流动液氮冷却是一个多种因素综合作用过程,比如液氮汽化局部形成空泡,液氮流阻变大,导体内壁的粗糙度等都可能冷却能力下降,需要进一步的研究。

### 3 结 论

本文提出了基于微通道内液氮流动沸腾换热的脉冲磁体快速冷却方法,阐述了该方法的原理,开展了数值模拟和验证性试验。简化模型的数值模拟表明:在短时间(1 s)大功率(10 kW)加热后,单相对流换热和流动沸腾换热方式可以显著加快磁体降温,磁体导体平均温度分别在 9.8 s 和 2.1 s 时可降至初始温度。若无人工加压使液氮流动的方式很难令磁体温度快速降回至初始温度。验证性试验结果表明,在脉冲磁体导体内开微通道,并注入液氮冷却,能大幅提升脉冲磁体冷却速度,使得冷却时间降为 30 s,是磁体仅浸泡在液氮中的冷却时间(600 s)的 5%。另外,微通道内液氮流动冷却是多种复杂因素综合作用过程,还需结合实际应用深入分析,进一步研究初始条件、边界条件等参数对冷却过程的影响。

#### 参考文献:

- [1] Noe II G T, Nojiri H, Lee J, et al. A table-top, repetitive pulsed magnet for nonlinear and ultrafast spectroscopy in high magnetic fields up to 30 T[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2013, 84: 123906.
- [2] Frings P, Witte H, Jones H, et al. Rapid cooling methods for pulsed magnets[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2008, 18(2): 612-615.
- [3] Peng Tao, Sun Quqin, Zhao Jianlong, et al. Development of fast cooling pulsed magnets at the Wuhan National High Magnetic Field Center[J]. *Review of*

- [Scientific Instruments](#), 2013, 84: 125112.
- [4] 孙凤玉, 张鹏, 王如竹. 毛细管内液氮的自然对流换热数值计算分析[J]. [低温与超导](#), 2006, 34(2): 79-84. (Sun Fengyu, Zhang Peng, Wang Ruzhu. Numerical study of the natural convection heat transfer of liquid nitrogen in the capillary tubes[J]. [Cryogenics](#), 2006, 34(2): 79-84)
- [5] Steiner D, Schlünder E U. Heat transfer and pressure drop for boiling nitrogen flowing in a horizontal tube: 1. Saturated flow boiling[J]. [Cryogenics](#), 1976, 16(7): 387-399.
- [6] Steiner D, Schlünder E U. Heat transfer and pressure drop for boiling nitrogen flowing in a horizontal tube: 2. Pressure drop[J]. [Cryogenics](#), 1976, 16(8): 457-464.
- [7] Klimenko V V. Heat transfer intensity at forced flow boiling of cryogenic liquids in tubes[J]. [Cryogenics](#), 1982, 22(11): 569-576.
- [8] Qi Shouliang, Zhang Pingang, Wang R Z, et al. Single-phase pressure drop and heat transfer characteristics of turbulent liquid nitrogen flow in micro-tubes[J]. [International Journal of Heat and Mass Transfer](#), 2007, 50(9/10): 1993-2001.
- [9] Qi Shouliang, Zhang Pingang, Wang R Z, et al. Flow boiling of liquid nitrogen in micro-tubes: part I—the onset of nucleate boiling, two-phase flow instability and two-phase flow pressure drop[J]. [International Journal of Heat and Mass Transfer](#), 2007, 50(25/26): 4999-5016.
- [10] Qi Shouliang, Zhang Pingang, Wang R Z, et al. Flow boiling of liquid nitrogen in micro-tubes: part II—heat transfer characteristics and critical heat flux[J]. [International Journal of Heat and Mass Transfer](#), 2007, 50(25/26): 5017-5030.
- [11] Fu X, Qi Shouliang, Zhang Pingang, et al. Visualization of flow boiling of liquid nitrogen in a vertical mini-tube[J]. [International Journal of Multiphase Flow](#), 2008, 34(4): 333-351.
- [12] Zhang Pingang, Jia Hongwei. Evolution of flow patterns and the associated heat and mass transfer characteristics during flow boiling in mini-/micro-channels[J]. [Chemical Engineering Journal](#), 2016, 306: 978-991.
- [13] Billette J, Duc F, Frings P, et al. A 30 T pulsed magnet with conical bore for synchrotron powder diffraction[J]. [Review of Scientific Instruments](#), 2012, 83: 043904.
- [14] Islam Z, Capatina D, Ruff J P C, et al. A single-solenoid pulsed-magnet system for single-crystal scattering studies[J]. [Review of Scientific Instruments](#), 2012, 83: 035101.