



# 国家知识产权局

100085

北京市海淀区上地十街1号院6号楼4层427 北京智绘未来专利代理  
事务所(普通合伙)  
肖继军(010-62535882) 张红莲(010-62535882)

发文日:

2021年09月24日



申请号或专利号: 202110083981.0

发文序号: 2021091802154290

申请人或专利权人: 清华大学, 国网浙江省电力有限公司, 国家电网有限公司

发明创造名称: 超导直流能源管道系统及其动态稳定性判断方法

## 第一次审查意见通知书

1. ☒ 应申请人提出的实质审查请求, 根据专利法第 35 条第 1 款的规定, 国家知识产权局对上述发明专利申请进行实质审查。

☐ 根据专利法第 35 条第 2 款的规定, 国家知识产权局决定自行对上述发明专利申请进行审查。

2. ☐ 申请人要求以其在:

☐ 申请人已经提交了经原受理机构证明的第一次提出的在先申请文件的副本。

☐ 申请人尚未提交经原受理机构证明的第一次提出的在先申请文件的副本, 根据专利法第 30 条的规定视为未要求优先权要求。

3. ☐ 经审查, 申请人于\_\_\_\_提交的修改文件, 不符合专利法实施细则第 51 条第 1 款的规定, 不予接受。

4. 审查针对的申请文件:

☒ 原始申请文件。 ☐ 分案申请递交日提交的文件。 ☐ 下列申请文件:

5. ☐ 本通知书是在未进行检索的情况下作出的。

☒ 本通知书是在进行了检索的情况下作出的。

☒ 本通知书引用下列对比文件(其编号在今后的审查过程中继续沿用):

编号	文件号或名称	公开日期 (或抵触申请的申请日)
1	CN 110705104A	20200117
2	“氢气冷却的 MgB <sub>2</sub> 超导直流电缆本体热分析”, 成红祥等, 《低温与超导》, 第 41 卷第 3 期, 第 16-20 页	20130331

6. 审查的结论性意见:

关于说明书:

☐ 申请的内容属于专利法第 5 条规定的不授予专利权的范围。

☐ 说明书不符合专利法第 26 条第 3 款的规定。

☐ 说明书不符合专利法第 33 条的规定。

210401  
2021.6

纸件申请, 回函请寄: 100088 北京市海淀区蓟门桥西土城路 6 号 国家知识产权局专利局受理处收  
电子申请, 应当通过电子专利申请系统以电子文件形式提交相关文件。除另有规定外, 以纸件等其他形式提交的文件视为未提交。



# 国家知识产权局

☐ 说明书的撰写不符合专利法实施细则第 17 条的规定。

☐ \_\_\_\_\_

关于权利要求书：

☐ 权利要求 \_\_\_\_\_ 不符合专利法第 2 条第 2 款的规定。

☐ 权利要求 \_\_\_\_\_ 不符合专利法第 9 条第 1 款的规定。

☐ 权利要求 \_\_\_\_\_ 不具备专利法第 22 条第 2 款规定的新颖性。

☒ 权利要求 1-9 不具备专利法第 22 条第 3 款规定的创造性。

☐ 权利要求 \_\_\_\_\_ 不具备专利法第 22 条第 4 款规定的实用性。

☐ 权利要求 \_\_\_\_\_ 属于专利法第 25 条规定的不授予专利权的范围。

☐ 权利要求 \_\_\_\_\_ 不符合专利法第 26 条第 4 款的规定。

☐ 权利要求 \_\_\_\_\_ 不符合专利法第 31 条第 1 款的规定。

☐ 权利要求 \_\_\_\_\_ 不符合专利法第 33 条的规定。

☐ 权利要求 \_\_\_\_\_ 不符合专利法实施细则第 19 条的规定。

☐ 权利要求 \_\_\_\_\_ 不符合专利法实施细则第 20 条的规定。

☐ 权利要求 \_\_\_\_\_ 不符合专利法实施细则第 21 条的规定。

☐ 权利要求 \_\_\_\_\_ 不符合专利法实施细则第 22 条的规定。

☐ \_\_\_\_\_

☐ 申请不符合专利法第 26 条第 5 款或者实施细则第 26 条的规定。

☐ 申请不符合专利法第 19 条第 1 款的规定。

☐ 分案申请不符合专利法实施细则第 43 条第 1 款的规定。

上述结论性意见的具体分析见本通知书的正文部分。

7. 基于上述结论性意见，审查员认为：

☐ 申请人应当按照通知书正文部分提出的要求，对申请文件进行修改。

☐ 申请人应当在意见陈述书中论述其专利申请可以被授予专利权的理由，并对通知书正文部分中指出的不符合规定之处进行修改，否则将不能授予专利权。

☒ 专利申请中没有可以被授予专利权的实质性内容，如果申请人没有陈述理由或者陈述理由不充分，其申请将被驳回。

☐ \_\_\_\_\_

8. 申请人应注意下列事项：

(1) 根据专利法第 37 条的规定，申请人应在收到本通知书之日起的 4 个月内陈述意见，如果申请人无正当理由逾期不答复，其申请被视为撤回。

(2) 申请人对其申请的修改应当符合专利法第 33 条的规定，不得超出原说明书和权利要求书记载的范围，同时申请人对专利申请文件进行的修改应当符合专利法实施细则第 51 条第 3 款的规定，按照本通知书的要求进行修改。

(3) 申请人的意见陈述书和/或修改文本应邮寄或递交国家知识产权局专利局受理处，凡未邮寄或递交给受理处的文件不具备法律效力。

(4) 未经预约，申请人和/或代理人不得前来国家知识产权局专利局与审查员举行会晤。

(5) 对进入实质审查阶段的发明专利申请，在第一次审查意见通知书答复期限届满前（已提交答复意见的除外），主动申请撤回的，可以请求退还 50% 的专利申请实质审查费。

9. 本通知书正文部分共有 4 页，并附有下列附件：

☒ 引用的对比文件的复印件共 1 份 5 页。

☐ \_\_\_\_\_

审查员：宋晓燕

联系电话：010-53966133

审查部门：专利审查业务章 技术发明  
审查部



210401  
2021.6

纸件申请，回函请寄：100088 北京市海淀区蓟门桥西土城路 6 号 国家知识产权局专利局受理处收  
电子申请，应当通过电子专利申请系统以电子文件形式提交相关文件。除另有规定外，以纸件等其他形式提交的文件视为未提交。





第一次审查意见通知书

申请号:2021100839810

本申请涉及一种超导直流能源管道系统及其动态稳定性判断方法。经审查,审查意见如下:  
权利要求 1-9 不具备专利法第 22 条第 3 款规定的创造性。

1、权利要求 1 请求保护一种超导直流能源管道系统,对比文件 1 (CN110705104A) 公开了一种高温超导导体电流密度分布的仿真分析方法,并具体公开了一种双极性高温超导直流系统,所述双极性高温超导直流系统包括(参见说明书第[0038]-[0048]段,图 1):

两个高温超导直流电缆 1、液体绝缘层 7、液体天然气 5、隔热层 6 (相当于绝热层 10);  
在液体绝缘层 7 的内侧,高温超导直流电缆 1 与液体绝缘层 7 相互平行设置;  
所述液体天然气 5 设置在液体绝缘层 7 的外侧,隔热层 6 的内侧。

权利要求 1 与对比文件 1 相比区别在于:还包括反辐射膜,液化天然气设置在反辐射膜内侧。

基于上述区别技术特征,权利要求 1 相对于对比文件 1 实际解决的技术问题是:如何减少超导电缆的漏热。

对于本领域技术人员而言,在液体化然气 5 外侧设置反辐射膜来减少了超导直流电缆的漏热是本领域的常规技术手段。

因此,在对比文件 1 的基础上结合本领域的常规技术手段得到权利要求 1 请求保护的技术方案对本领域技术人员来说是显而易见的,权利要求 1 不具有突出的实质性特点和显著的进步,因此不符合专利法第 22 条第 3 款有关创造性的规定。

2、权利要求 2-3 引用权利要求 1,对比文件 1 还公开了(参见同上):所述高温超导直流电缆 1 包括铜支撑管 4、超导带材 2 和绝缘层 3,所述铜支撑管 4 位于所述高温超导直流电缆 1 的中心,所述绝缘层 3 设置在超导带材 2 的外周,多根所述超导带材设置在所述铜支撑管上。所述超导带材 2 为 Bi2223 带材。所述绝缘层 3 为聚丙烯层压绝缘层。其它附加技术特征是本领域的常规技术手段。

因此,在其引用的权利要求不具备创造性的基础上,该从属权利要求也不具备专利法第 22 条第 3 款规定的创造性。

3、权利要求 4 请求保护一种超导直流能源管道系统动态稳定性判断方法,对比文件 1 公开了一种双极性高温超导直流系统,包括两个高温超导直流电缆 1、液体绝缘层 7、液体天然气 5、隔热层 6。

权利要求 4 与对比文件 1 相比区别在于:

本申请包括超导直流能源管道系统动态稳定性判断方法,步骤 1,获取超导直流能源管道的





设计参数,包括:管道的外径、管道的传输距离、管道外层与环境之间的换热系数、环境温度、液化天然气整体平均温度;建立管道的周向漏热模型;步骤2,建立液化天然气在管道首末端的温差模型;步骤3,以步骤1和步骤2中的管道的周向漏热模型和管道首末端的温差模型,计算液化天然气在管道末端上的温度;步骤4,计算高温超导直流电缆的临界温度与步骤3获得的液化天然气在管道末端上的温度的差值,所述差值不超过管道温度裕量则超导直流能源管道系统能够稳定运行。

基于上述区别技术特征,权利要求4相对于对比文件1实际解决的技术问题是:如何判断超导直流能源管道系统动态稳定性。

对于上述区别技术特征,对比文件2(“氦气冷却的MgB<sub>2</sub>超导直流电缆本体热分析”,成红祥等,《低温与超导》,第41卷第3期,第16-20页,2013年3月31日)公开了一种(参见正文第2-4部分):

获取超导电缆的设计参数,包括:外层恒温壁外壁、内壁和内层不锈钢外壁、内壁的半径(即公开了管道外径)以及各个壁面的温度,其中外层恒温壁外壁设为室温(即公开了环境温度);电缆的长度(相当于管道的传输距离)、外层氦气与外层恒温器壁面之间的对流换热系数(相当于);外层氦气流体的温度;内层恒温器外层不锈钢外壁、内壁和内层不锈钢外壁、内壁的半径以及各个壁面的温度,内层氦气流体的温度,内层氦气与内层恒温器壁面的对流换热系数,建立外层恒温器径向温度分布模型和内层恒温器径向温度分布模型(相当于周向漏热模型);

建立氦气轴向温度分布模型(相当于管道首末端的温差模型);

根据外层恒温器径向温度分布模型、内层恒温器径向温度分布模型和轴向温度分布模型计算外层氦气的出口温度;

根据氦气进口温度要求和氦气进出口温差,来判断超导线材是否能稳定工作在超导状态。

由此可见,对比文件2公开了通过建立周向漏热模型和管道首末端的温差模型来获得管道末端上的温度,从而判断超导电缆是否稳定运行。对本领域技术人员而言,对超导电缆进行动态稳定性判断是本领域的常规技术问题,因此,在对比文件1公开了一种双极性高温超导直流系统的基础上,为了判断高温超导直流系统的动态稳定性,本领域技术人员容易想到将对比文件2中的方法应用到对比文件1中并对其进行适应性修改,从而获得液化天然气在管道末端上的温度。进一步,通过比较临界温度与液化天然气在管道末端上的温度的差值是否擦好过管道温度裕量来判断超导直流能源管道系统是否能够稳定运行是本领域的常规技术手段。

因此,在对比文件1的基础上结合对比文件2以及本领域的常规技术手段得到权利要求4请求保护的技术方案对本领域技术人员来说是显而易见的,权利要求1不具有突出的实质性特点





和显著的进步，因此不符合专利法第 22 条第 3 款有关创造性的规定。

4、权利要求 5-8 是从属权利要求，对比文件 2 还公开（参见同上），

外层恒温器径向温度分布模型为：

$$Q_1=2\pi r_4 L h_4 (t_4-t_{wh})$$

式中， $Q_1$  表示外层恒温器的漏热量， $r_4$  表示外层恒温壁内壁的半径， $L$  表示电缆的长度， $h_4$  表示外层氦气与外层恒温器壁面之间的对流换热系数， $t_4$  表示外层恒温壁内壁壁面温度、 $t_{wh}$  表示外层氦气流体的温度。

内层恒温器径向温度分布模型为：

$$Q_2=2\pi r_8 L h_9 (t_8-t_{nh})$$

式中， $Q_2$  表示内层恒温器的漏热量， $r_8$  表示外层恒温壁内壁的半径， $L$  表示电缆的长度， $h_9$  表示内层氦气与内层恒温器壁面之间的对流换热系数， $t_8$  表示内层恒温壁内壁壁面温度、 $t_{nh}$  表示内层氦气流体的温度。

氦气轴向温度分布模型为：

$$m_0 C_{pw} (t_{出}-t_{进}) = \Delta Q$$

式中， $\Delta Q = Q_1 - Q_2$ ， $m_0$  是外层氦气的质量流率， $C_{pw}$  是外层氦气的等压比热。

根据上述公式，可以得到出口温度  $t_{出}$  的计算公式。

对本领域技术人员而言，在将对比文件 2 应用到对比文件 1 中时，可根据对比文件 1 中的双极性高温超导直流系统，对比文件 2 中的公式可计算方法进行适应性修改，从而得到管道的周

向漏热模型  $Q=\pi DLh(T_{ext}-T_e)$  和管道首末端的温差模型  $T_2 - T_1 = \frac{Q}{U_{LNG} \rho_{LNG} C_{LNG}}$ 。此外，通过将管道始末端液化天然气温度求平均得到液化天然气整体平均温度是本领域的常规技术手段。因此，在对比文件 1 的基础上结合对比文件 2 可以得到液化天然气在管道末端上的温度为：

$$T_2 = \frac{\pi DLh T_{ext} + \left( U_{LNG} \rho_{LNG} C_{LNG} - \frac{\pi DLh}{2} \right) T_1}{U_{LNG} \rho_{LNG} C_{LNG} + \frac{\pi DLh}{2}}。$$

因此，在其引用的权利要求不具备创造性的基础上，该从属权利要求也不具备专利法第 22 条第 3 款规定的创造性。

5、权利要求 9 是从属权利要求，限制了步骤 1 中所述超导直流能源管道为权利要求 1 至 3 中任一项所述的超导直流能源管道。

结合权利要求 1-3 的评述，在其引用的权利要求不具备创造性的基础上，该从属权利要求也不具备专利法第 22 条第 3 款规定的创造性。



## 国家知识产权局

基于上述理由，本申请的权利要求都不具备创造性，同时说明书中也没有记载其他任何可以授予专利权的实质性内容。如果申请人不能在本通知书规定的答复期限内提出表明本申请具有创造性的充分理由，本申请将被驳回。

如您对审查意见存在疑问，可拨打审查员电话 010-53966133，或值班电话 010-53962391，也可通过邮箱 [sxbjzx\\_yijian@cnipa.gov.cn](mailto:sxbjzx_yijian@cnipa.gov.cn) 反馈意见。请注意：邮箱反馈的内容不具备法律效力，请将正式的意见陈述书和/或修改文本在规定期限内提交给专利局受理部门。

审查员姓名:宋晓燕  
审查员代码:273272



# 国家知识产权局

## 检索报告

申请号: 2021100839810	申请日: 20210121	首次检索			
申请人: 清华大学	最早的优先权日:				
权利要求项数: 9	说明书段数: 119+3				
审查员确定的 IPC 分类号: G01M13/00					
检索记录信息: CN110705104A: AUTO					
CN112100809A: AUTO					
US2007179062A1: AUTO					
“氦气冷却的 MgB <sub>2</sub> 超导直流电缆本体热分析”, CNKI, (主题=超导电缆 + 超导直流电缆) AND (全文=轴向温度) AND (全文=漏热 + 损耗)					
“Bi 系高温超导带材交流传输损耗的研究和分析”, CNKI, (主题=超导) AND (全文=轴向温度) AND (全文=漏热 + 损耗)					
相 关 专 利 文 献					
类型	国别以及代码[11] 给出的文献号	代码[43]或[45] 给出的日期	IPC 分类号	相关的段落 和 / 或图号	涉及的权 利要求
X	CN110705104A	20200117	G06F30/20	说明书第 [0038]-[0048] ]段, 图 1	1-3
Y	CN110705104A	20200117	G06F30/20	说明书第 [0038]-[0048] ]段, 图 1	4-9
A	CN112100809A	20201218	G06F30/20	全文	1-9
A	US2007179062A1	20070802	H01L39/24	全文	1-9







## 国家知识产权局

相 关 非 专 利 文 献					
类型	书名(包括版本号和卷号)	出版日期	作者姓名和出版者名称	相关页数	涉及的权利要求
类型	期刊或文摘名称 (包括卷号和期号)	发行日期	作者姓名和文章标题	相关页数	涉及的权利要求
Y	《低温与超导》 第 41 卷 第 3 期	20130331	成红祥等 “氦气冷却的 MgB <sub>2</sub> 超导 直流电缆本体热分析”	正 文 第 4-9 2-4 部分	
A	《低温物理学报》 第 25 卷	20031031	方进等 “Bi 系高温超导带材交 流传输损耗的研究和分 析”	全文	1-9

表格填写说明事项:

1. 审查员实际检索领域的 IPC 分类号应当填写到大组和 / 或小组所在的分类位置。
2. 期刊或其它定期出版物的名称可以使用符合一般公认的国际惯例的缩写名称。
3. 相关文件的类型说明:
  - X: 一篇文件影响新颖性或创造性;
  - Y: 与本报告中的另外的 Y 类文件组合而影响创造性;
  - A: 背景技术文件;
  - R: 任何单位或个人在申请日向专利局提交的、属于同样的发明创造的专利或专利申请文件。
  - P: 中间文件, 其公开日在申请的申请日与所要求的优先权日之间的文件;
  - E: 抵触申请。

审 查 员: 宋晓燕  
2021 年 09 月 17 日

审查部门: 专利审查协作北京中心光电技术发明审查部

# 氦气冷却的 $\text{MgB}_2$ 超导直流电缆本体热分析

成红祥, 蒋晓华

(清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京 100084)

**摘要:** 清华大学、剑桥大学和麻省理工学院正在合作研制氦气制冷的  $\text{MgB}_2$  超导直流电缆。针对此超导电缆本体结构, 建立了简化热分析模型, 求出了电缆的漏热量和氦气的轴向温度分布, 并对氦气的进口温度、质量流率进行了优化分析; 最后, 利用 FLUENT 软件对整个电缆内流动和传热过程进行了 2D 建模和数值仿真; 仿真结果和简化模型计算结果非常吻合, 表明了简化分析模型可用于该类型超导电缆的热分析和热设计。

**关键词:** 超导直流电缆; 氦气冷却; 漏热分析; 数值模拟

## Thermal analysis on helium gas cooled $\text{MgB}_2$ DC superconducting cable

Cheng Hongxiang, Jiang Xiaohua

(Department on Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Tsinghua University, University of Cambridge, and MIT are cooperating to design and fabricate a  $\text{MgB}_2$  DC superconducting cable cooled by helium gases. In this paper the simplified thermal analysis model of this cable was established, the heat leak of the cable and the temperature distribution of the helium gases were derived and the impacts of the helium gas's inlet temperature and mass flow rate were analyzed. In the end, a 2D model of the whole cable based on Fluent was built. Simulation results were in accordance with the theoretical analysis. It is demonstrated that the simplified model is viable in the heat analysis and design of this kind of superconductive cable.

**Keywords:** DC superconducting cables; Helium gas cooling; Heat loss analysis; Numerical simulation

## 1 引言

清华大学、剑桥大学和麻省理工学院正在合作设计、制造一根 30 米, 1kV/1kA 超导直流电缆用于微型智能电网。此电缆采用 2001 年由日本发现的新型超导材料——二硼化镁作为超导线材。二硼化镁原料便宜, 合成性能好, 具有重要的研究价值和良好的应用前景, 其临界转变温度不能工作在液氮温区, 本项目采用低温氦气作为制冷介质。氦气与液氮相比, 同等体积下热容低, 密度小, 这给制冷系统的设计提高了难度。对超导电缆本体进行热分析, 准确计算超导电缆本体的热负荷和制冷氦气的运行参数, 是制冷系统设计的基础, 也是超导电缆稳定运行的保证, 对氦气制冷超导电缆的研发和优化具有一定的参考价值。

当前文献中对超导电缆终端的研究较多<sup>[1-3]</sup>, 对超导电缆本体的热分析相对较少, 有些文献直接采用传热学基本公式对电缆本体的漏热

量进行估算<sup>[4-5]</sup>; 文献<sup>[6]</sup>则基于“微元法”列出了超导电缆换热的数学模型, 画出了高温超导电缆的稳态温度分布图; 以上文献均采用了解析法, 该法能够深刻揭示各物理量之间的依变关系, 便于分析各个物理量对于整体的影响, 但是所建的数学模型过于复杂不易求出解析解, 过于简单则容易误差太大。

本文针对项目中的超导电缆结构特点, 建立了超导电缆简化热分析数学模型, 求出了低温氦气的轴向温度分布, 以及电缆本体的漏热量, 对氦气的进口温度和质量流率进行了优化分析。最后, 利用 FLUENT 软件对整个超导电缆内流动和传热过程建立了 2D 模型, 进行了数值模拟, 并将仿真计算的结果和解析计算的结果进行了对比分析。

## 2 超导电缆本体结构

如图 1 所示, 超导电缆结构由电缆芯、两层氦

收稿日期: 2012-12-07

作者简介: 成红祥(1980-), 男, 硕士生, 主要从事超导电缆热分析方面的研究。



气流体和两层低温恒温器组成。电缆中心是由铜基和二硼化镁做成的超导电缆芯;外层氦气进口温度 70K, 质量流率 2g/s, 内层氦气进口温度 20K, 质量流率 0.2g/s, 两层流体流向相同, 压力均为 1MPa;内层恒温器是由两层不锈钢管做成的真空夹层, 加以环氧材料的支撑;外层恒温器的结构同样由真空夹层和环氧支撑组成, 为了进一步减少漏热, 在真空夹层中填充了多层绝热材料来减小辐射漏热。

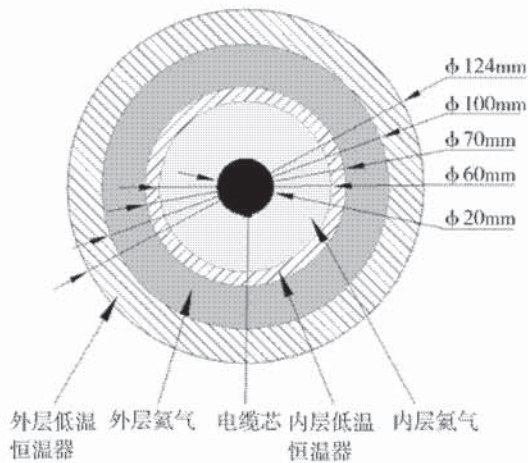


图1 超导电缆横截面结构框图

Fig.1 Structure diagram of the superconducting cable

### 3 超导电缆模型的数学模型及计算分析

#### 3.1 建立数学模型

数学模型在以下假设情况下建立:

- 本文主要对电缆本体进行热分析, 暂且不考虑电缆两端漏热, 只考虑电缆径向漏热。
- 最外层不锈钢壁面温度设为室温 300K。
- 为了简化数学模型, 忽略氦气温度沿径向上的变化, 只考虑氦气温度沿轴向上变化。

超导电缆热传递可以看作是无限长多层圆筒壁的稳态导热以及氦气的无相变圆环间隙内受迫对流换热问题。电缆本体漏热被两层低温氦气流体带走, 从而达到一种稳态热平衡状态。

(1) 外层恒温器径向温度分布模型:

在热稳定状态下, 忽略电缆两端漏热, 根据能量守恒定律, 单位时间内通过外层低温恒温器的两层不锈钢热流量相等(式(1)中第1项和第3

项), 等于通过多层绝热和环氧支撑热流量之和(式(1)中第2项), 且等于氦气和不锈钢壁之间的对流换热量(式(1)中第4项)。以此可以列出外层恒温器径向温度分布数学模型:

$$\begin{aligned} \frac{2\pi\lambda_1 L(t_1 - t_2)}{\ln \frac{r_1}{r_2}} &= \lambda_2 A_2 \frac{t_2 - t_3}{\delta_2} + \lambda_{\text{eff}} A_2 \frac{t_2 - t_3}{\delta_2} \\ &= \frac{2\pi\lambda_3 L(t_3 - t_4)}{\ln \frac{r_3}{r_4}} = 2\pi r_4 h_4 (t_4 - t_{\text{wh}}) = Q_1 \end{aligned} \quad (1)$$

式中,  $r_1, r_2, r_3, r_4$  分别是外层恒温器外层不锈钢外壁、内壁和内层不锈钢外壁、内壁的半径;  $t_1, t_2, t_3, t_4$  分别是以上各个壁面的温度,  $t_{\text{wh}}$  是外层氦气流体的温度;  $L$  是电缆的长度,  $A_2$  是环氧支撑的等效接触面积;  $\lambda_1, \lambda_3$  是外层、内层不锈钢在该温度下的热导率,  $\lambda_2$  是环氧支撑的热导率,  $\lambda_{\text{eff}}$  是多层绝热结构的表观热导率;  $\delta_2$  是环氧支撑的长度, 即多层绝热的厚度。  $h_4$  是外层氦气与外层恒温器壁面之间的对流换热系数。  $Q_1$  是外层恒温器的漏热量。

(2) 内层恒温器径向温度分布模型:

同样, 通过内层低温恒温器的内外层不锈钢热流量相等(式(2)中第2项和第4项), 等于通过真空辐射和环氧支撑热流量之和(式(1)中第3项), 且等于氦气与不锈钢壁的对流换热量(式(1)中第1项和第5项)。以此可以列出内层恒温器径向温度分布数学模型:

$$\begin{aligned} 2\pi r_5 L h_5 (t_{\text{wh}} - t_5) &= \frac{2\pi\lambda_6 L(t_5 - t_6)}{\ln \frac{r_5}{r_6}} \\ &= \lambda_7 A_7 \frac{t_6 - t_7}{\delta_7} + \frac{2\pi r_7 L X_{12} \sigma (t_6^4 - t_7^4)}{\frac{1}{\varepsilon} + \frac{r_7}{r_6} \left( \frac{1}{\varepsilon} - 1 \right)} \\ &= \frac{2\pi\lambda_8 L(t_7 - t_8)}{\ln \frac{r_7}{r_8}} = 2\pi r_8 L h_9 (t_8 - t_{\text{nh}}) = Q_2 \end{aligned} \quad (2)$$

式中,  $r_5, r_6, r_7, r_8$  分别是内层恒温器外层不锈钢外壁、内壁和内层不锈钢外壁、内壁的半径;  $t_5, t_6, t_7, t_8$  分别是以上各个壁面的温度,  $t_{\text{nh}}$  是内层氦气流体的温度;  $A_7$  是环氧支撑的等效接触面积;  $\lambda_6, \lambda_8$  是外层、内层不锈钢在该温度下的热导率,  $\lambda_7$  是环氧支撑的热导率;  $\delta_7$  是内环氧支撑的长度。



$h_4, h_9$  是外层氦气与内层恒温器壁面之间以及内层氦气与内层恒温器壁面的对流换热系数。 $\varepsilon$  是真空夹层中不锈钢的表面发射率。 $Q_2$  是内层恒温器的漏热量。

### (3) 氦气轴向温度分布模型:

根据公式:

$$mC(t_{\text{出}} - t_{\text{进}}) = \Delta Q$$

可以得出外层氦气的轴向温度分布模型:

$$m_0 C_{PW} \frac{dt_{wh}}{dx} = (Q_1 - Q_2) / L \quad (3)$$

$$x = 0, t_{nh} = 70K$$

式中,  $m_0$  是外层氦气的质量流率,  $C_{PW}$  是外层氦气的等压比热。

以及内层氦气的轴向温度分布模型:

$$m_l C_{PN} \frac{dt_{nh}}{dx} = Q_2 / L \quad (4)$$

$$x = 0, t_{nh} = 20K$$

式中,  $m_l$  是内层氦气的质量流率,  $C_{PN}$  是内层氦气的等压比热。

式(1)~(4)联立,即可算得超导电缆外层恒温器和内层恒温器的漏热量  $Q_1, Q_2$ 、各层不锈钢的壁温  $t_2 \sim t_8$  和两层氦气温度  $t_{wh}, t_{nh}$  的轴向分布图。

## 3.2 物性参数的确定

### (1) 热导率

由美国国家标准与技术研究院(NIST)网站<sup>[4]</sup>查得环氧玻璃纤维材料和不锈钢材料在4K~300K范围内,热导率随温度变化的拟合方程,并由此可以算得任意温度下环氧和不锈钢材料的热导率。

### (2) 对流换热系数

首先根据流动  $Re$  数确定氦气的流动状态:

$$Re = \frac{wd_h}{\nu} \quad (5)$$

式中,  $w$ : 氦气的平均流速 ( $m/s$ );  $\nu$ : 动力粘度 ( $m^2/s$ );  $d_h$ : 环状间隙的水力直径 ( $m$ )。由公式(5)可以求得外层氦气的雷诺数为1880,内层氦气的雷诺数为809,由此可以判断两层氦气的流态为层流。

外层氦气与内层氦气的普朗特数分别为0.7和0.77。

根据雷诺数、普朗特数以及氦气的物性参数,可以算得环状间隙内层流流体的努赛尔数<sup>[4]</sup>。

并由努赛尔数算得外层氦气和内层氦气的对流换热系数分别为  $10.85 W/(m^2 \cdot K)$  和  $4.88 W/(m^2 \cdot K)$ 。

### (3) 多层绝热结构的表观热导率

真空多层绝热材料是一种不连续的非均匀介质,其性能受到多个因素的影响,很难精确计算,工程上一般采用表观热导率来表征。文献[6]中的多层绝热材料与所用多层绝热材料较为相似,即层密度为10层/ $cm^2$ 的0.006mm铝箔和尼龙网做成的复合材料采用多层缠绕方式,在两侧温度为300K和77K的条件下表观热导率为  $7.80 \times 10^{-5} W/(m \cdot K)$ 。

### (4) 真空夹层辐射率

内层低温恒温器真空夹层内壁完全被外壁所包围,两个灰体表面组成的封闭系统热流量可以由公式(2)第三项进行计算,其中辐射角系数  $X_{12}$  取1。

不锈钢的表面发射率受表面的光洁度、氧化程度、温度等多个因素影响,项目中不锈钢为电抛光未被氧化的表面,选取辐射率为0.1<sup>[4]</sup>。

## 3.3 计算结果及分析

将上述参数代入数学模型公式(1)~(4)中,可求得外层恒温器漏热量即电缆本体漏热量为29.05W,即0.97W/m;内层恒温器漏热量为2.70W。外层氦气在质量流率为2g/s时,出口温度72.52K;内层氦气在质量流率为0.2g/s时,出口温度22.35K。此电缆每米漏热量与目前超导电缆漏热水平相当。氦气进出口温差为2K~3K,能够保证二硼化镁超导线材稳定工作在超导状态。图2为内层氦气和外层氦气的轴向温度分布。

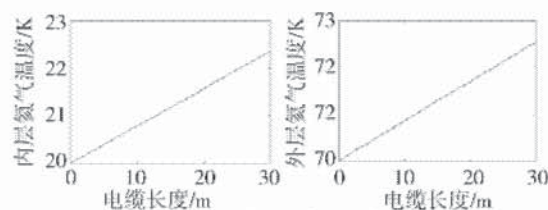


图2 内、外层氦气轴向温度分布图

Fig. 2 Temperature profile of the inner and outer helium gas

## 3.4 氦气质量流率优化分析

图3~4分别画出了在内层氦气进口温度20K,外层氦气进口温度70K条件下,出口温度随质量流率变化的分布图。为了使  $MgB_2$  线材超导状态保持稳定,要尽量减小氦气的进出口温差,即



增加氦气质量流率,而提高质量流率意味着增加制冷系统的制作成本。从图3~4中可以看出,随着氦气进口质量流率的不断增大,其出口温度随之减小,但外层氦气从 $2\text{g/s}$ 开始、内层氦气从 $0.2\text{g/s}$ 开始,随质量流率变化,出口温度开始趋于稳定,因此,项目中两层氦气的质量流率分别设置为 $2\text{g/s}$ 和 $0.2\text{g/s}$ 。

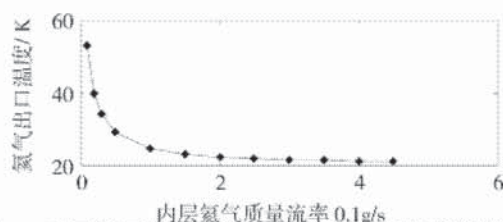


图3 内层氦气质量流率对内层氦气出口温度的影响

Fig. 3 The effect of the inner gas's mass flow rate to its outlet temperature

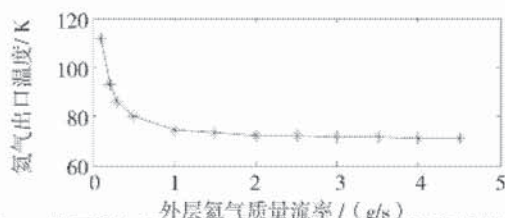


图4 外层氦气质量流率对外层氦气出口温度的影响

Fig. 4 The effect of the outer gas's mass flow rate to its outlet temperature

### 3.5 氦气进口温度优化分析

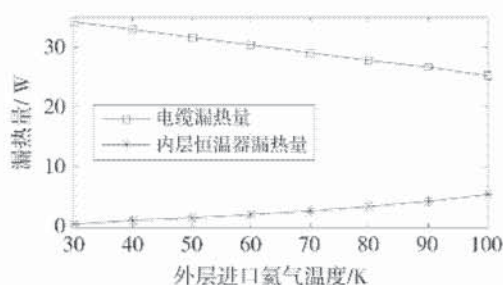


图5 外层氦气进口温度对漏热的影响

Fig. 5 The effect of the outer gas's inlet temperature to heat leakage

图5反映了在外层氦气质量流率 $2\text{g/s}$ 、内层氦气质量流率 $0.2\text{g/s}$ 条件下,外层氦气不同进口温度对两层低温恒温器漏热量的影响。随着外层氦气进口温度从 $30\text{K}$ 增加到 $100\text{K}$ ,外层恒温器总漏热量即电缆漏热量从 $34.08\text{W}$ 减少到 $25.28\text{W}$ ,内层恒温器总漏热量从 $0.52\text{W}$ 增加到 $5.38\text{W}$ ,内层恒温器漏热量太大会导致内层氦气进出口温差太大,导致超导线材周围温度环境不均匀,外层恒

温器漏热量太大必将增加制冷成本。为保证超导线材稳定处于超导状态下尽量减小超导电缆漏热量,综合考虑,外层内层氦气进口温度分别设定为 $70\text{K}$ 和 $20\text{K}$ 。

## 4 超导电缆模型的仿真计算

上述理论计算中对模型进行了一定的简化,为了检验模型简化对于结果的影响以及简化模型的可行性,本文采用 FLUENT 软件对电缆的全模型进行了仿真模拟。由于所研究电缆模型是轴对称结构,仿真时选取了 2D 轴对称模型。

首先利用 ICEM 对电缆模型进行结构网格划分,网格划分时对氦气边界层进行网格加密;首先建立 1 米超导电缆的网格模型,再通过网格镜像建立 30 米超导电缆网格全模型,最终网格数为 13503 个。

选择二维双精度,设置求解器为压力基准、稳态,不考虑重力影响。流体选择层流模型;真空辐射选用 S2S 模型,可视因子计算采用光线追踪法。

最外层不锈钢表面设置为  $300\text{K}$  定温边界,电缆没有交流损耗,电缆芯表面设置绝热边界;氦气入口边界类型选择 mass-flow-inlet,出口边界类型选择 outflow,对称轴选择 axis。

通过 fluent 仿真模拟,可求得电缆全模型的温度分布图和氦气的流速、压力分布图。

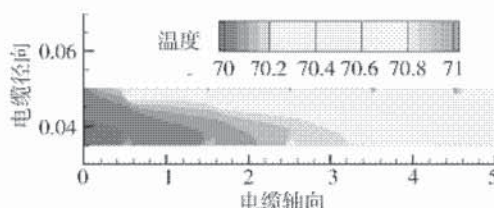


图6 外层氦气 1~5 米温度分布图

Fig. 6 Temperature distribution of the outer helium gas (0 ~ 5m)

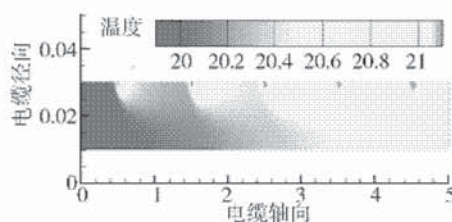


图7 内层氦气 1~5 米温度分布图

Fig. 7 Temperature distribution of the inner helium gas (0 ~ 5m)



为了视便于观察,图6、7中截取了外层氦气和内层氦气进口前5米段的温度分布图,从图中可以看出支撑漏热对于氦气温度分布的影响。

## 5 超导电缆模型仿真计算与理论计算结果比较分析

表1列出了超导电缆各层不锈钢壁面平均温度和内外层氦气出口平均温度理论计算结果和仿真计算结果。可以看出,理论计算和仿真计算的结果相当吻合,相对误差都在1%以内。

表1 温度仿真计算结果与理论计算结果对比

Tab.1 The temperature of simulation results and theoretical calculation results

名称	理论结果 /K	仿真计算 /K	相对 误差
外层恒温器内壁温度	71.50	71.57	0.10%
内层恒温器外壁温度	71.18	71.11	0.10%
内层恒温器内壁温度	21.23	21.27	0.18%
外层氦气出口温度	72.52	72.52	0.01%
内层氦气出口温度	22.35	22.30	0.22%

表2列出了超导电缆不同结构漏热量的理论计算结果与仿真计算结果。表中,电缆漏热量为多层绝热漏热与外层支撑漏热之和,内层恒温器漏热量为辐射漏热量与内层支撑漏热量之和。由表2可以发现,不只是超导电缆漏热总量,且各个结构漏热量结果对比都比较吻合,内层恒温器漏热量相对误差较大,也在3%以内。

表2 漏热量仿真计算结果与理论计算结果对比

Tab.2 The heat leakage of simulation results and theoretical calculation results

名称	理论计算 /W	仿真计算 /W	相对 误差
电缆漏热量	29.05	28.99	0.20%
多层绝热漏热量	18.76	18.75	0.05%
外层支撑漏热量	10.29	10.23	0.58%
内层恒温器漏热量	2.69	2.64	1.85%
辐射漏热量	0.46	0.47	-1.2%
内层支撑漏热量	2.23	2.17	2.7%

## 6 结论

本文以一根30米氦气冷却的二硼化镁超导

直流电缆为研究对象,针对其超导电缆结构,在对模型简化的基础上,建立了超导电缆温度分布的数学模型,确认了超导电缆的各项物性参数,计算出了超导电缆结构各层壁面、氦气流体的轴向温度分布以及超导电缆的漏热量,并对氦气的进口温度和质量流率进行了优化分析。

另外,为了验证理论计算方法的可行性,对超导电缆整体进行了基于FLUENT软件的2D仿真模拟,得出了两层氦气的温度分布图。通过对比理论计算结果和仿真模拟结果,验证本文建立的模型简化的合理性和计算方法的可行性。

## 参考文献

- [1] Kwag D S, Cheon H G, Choi J H, et al. Research on the insulation design of a 154 kV class HTS power cable and termination [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2007, 17(2): 1738-1742.
- [2] Kim H J, Cho J W, Seong K C, et al. The basic insulation properties of a termination for the 22.9 kV class HTS cable. [J] IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2010, 20(3): 1276-1279.
- [3] Li Ren, Tang Yuejin, Shi Jing, et al. Design of a termination for the HTS power cable [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2012, 22(3): 5800504.
- [4] Demko J A, Lue J W, Gouge M J, et al. Practical AC loss and thermal considerations for HTS power transmission cable systems [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2001, 11(2): 1789-1792.
- [5] Makoto Hamabe, Sasaki Atsushi, Famakinwa Tosin S, et al. Cryogenic system for DC superconducting power transmission line [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2007, 17(2): 1722-1725.
- [6] 高温超导电缆保护理论与技术研究 [D]. 武汉: 华中科技大学研究生院博士学位论文, 2006: 21-24.
- [7] American national institute of standards and technology. <http://cryogenics.nist.gov/MPropsMAY/materialproperties.htm>
- [8] 科诺赫 博恩. 热力工程计算图册 [M]. 徐智勇, 李岩青, 译. 北京: 水利电力出版社, 1991: 47.
- [9] 陈国邦, 张鹏. 低温绝热与传热技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2004: 71.
- [10] Sparrow E M, Cess R D. Radiation Heat Transfer [M]. Wagon: Hemisphere Pub. Corp., 1978.