

# 团 体 标 准

T/GSC XXX—XXXX

## 地热能开发超长重力热管技术标准

Technical standard for geothermal energy development of  
super long gravity heat pipe engineering

(征求意见稿)

XXXX-xx-xx 发布

XXXX-xx-xx 实施

中国地质学会 发布

## T/GSC XXX—XXXX

中国地质学会（GSC）是组织开展国内、国际标准化活动的全国性社会团体。制定中国地质学会团体标准，满足市场需要，增加标准的有效供给，促进科技创新，是中国地质学会的工作内容之一。中国境内的团体和个人，均可提出制、修订中国地质学会团体标准的建议并参与有关工作。

中国地质学会团体标准按《中国地质学会团体标准管理办法》进行制定和管理。

中国地质学会团体标准草案经向社会公开征求意见，并得到参加审定会议的 3/4 以上的专家、成员的投票赞同，方可作为中国地质学会团体标准予以发布。

在本文件实施过程中，如发现需要修改或补充之处，请将意见和有关资料寄给中国地质学会团体标准秘书处，以便修订时参考。

本文件版权为中国地质学会所有，除了用于国家法律或事先得到中国地质学会的许可外，不得以任何形式或任何手段复制、再版或使用本文件及其章节，包括电子版、影印件，或发布在互联网及内部网络等。

中国地质学会地址：北京市西城区百万庄大街 26 号

邮政编码：100037 电话：010-68999018 传真：010-68995305

网址：[www.geosociety.org.cn](http://www.geosociety.org.cn) 电子信箱：[zgdzxh@geosociety.org.cn](mailto:zgdzxh@geosociety.org.cn)

---

## 目 次

前言 .....	IV
引言 .....	V
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 术语和定义 .....	1
4 总则 .....	3
5 地热调查与钻井工程 .....	3
5.1 一般规定 .....	3
5.2 场地与资源调查 .....	3
5.3 资源评估 .....	4
5.4 钻井工程 .....	5
6 重力热管设计与生产 .....	5
6.1 一般规定 .....	5
6.2 模块化热管结构型式 .....	5
6.3 模块化热管尺寸 .....	6
6.4 模块化热管生产要求 .....	7
6.5 超长重力热管管型设计 .....	7
7 重力热管运输、贮存与安装 .....	8
7.1 一般规定 .....	8
7.2 热管运输与贮存 .....	8
7.3 重力热管安装 .....	8
7.4 换热工质加注与回收 .....	9
8 地面用热系统设计 .....	10
8.1 一般规定 .....	10
8.2 地面供热系统设计 .....	10
8.3 超长重力热管蒸汽直驱发电与制冷系统的设计 .....	11
9 系统运行、监测与评价 .....	11
9.1 一般规定 .....	11

9.2 系统运行要求 .....	11
9.3 系统监测与控制 .....	12
9.4 采（制）热性能评价 .....	12
9.5 经济与环境效益评价 .....	13
附录 A（资料性附录） 重力热管运行原理 .....	15
附录 B（资料性附录） 重力热管下管记录表 .....	16
附录 C（资料性附录） 超长重力热管开采中深层地热能数值模型 .....	17
附录 D（资料性附录） 重力热管地源热泵供暖系统运行状态监测记录表 .....	20
参考文献 .....	21

## 前 言

本文件依据 T/CAS 1.1—2017《团体标准的结构和编写指南》的有关要求编写。

本文件起草单位：中国科学院广州能源研究所，中国地质科学院水文地质环境地质研究所，清华大学，河北省煤田地质局第二地质队，双良节能股份有限公司，电力规划设计总院，中国矿业大学。

本文件起草人：蒋方明、王贵玲、岑继文、张薇、邢林啸、李曼、李龙、陈娟雯、黄文博、郭剑、杨军、上官栓通、田兰兰、鞠贵东、李龙、高铁瑜、王家瑞、邓立生、李骥飞、乔伟、解经宇。

考虑到本文件中的某些条款可能涉及专利，中国地质学会不负责对其任何专利的鉴别。

本文件首次制定。

## 引 言

随着我国经济社会发展与能源结构调整，对清洁能源的需求不断增大，地热资源特别是中深层地热资源的开发利用成为重要选择。受开发利用规模持续增大、部分地层回灌难度大等因素影响，传统的直接抽取热水的开采方式弊端显现，为实现资源的可持续开发利用，“取热不取（耗）水”的开发利用理念被广泛接受。在此背景下，提出了超长重力热管开采深部地热能技术，作为地热能开采技术的组成。

本文件提出的地热能开采的超长重力热管技术，无需使用水泵，能耗低、采热效率高，避免对地下水扰动造成的地质环境问题，投资风险小，是一种稳定、高效、运行成本低的地热能开采技术。随着我国地下水管理及环境保护政策趋于严格，优势愈加明显。本技术标准可为深部地热能重力热管开采提供技术支持，推动该项技术的市场化发展。

为规范地热能开采超长重力热管技术的推广和应用，特制定本文件。

# 地热能开发超长重力热管技术标准

## 1 范围

本文件规定了采用超长重力热管技术开发地热能工程（以下简称超长重力热管工程）的基本要求、地热调查与钻探工程、重力热管的设计与制备、重力热管的运输、贮存与安装、地面用热系统设计、系统运行监测与评价等。

本文件适用于以地下岩体、流体为主要热源，采用超长重力热管技术进行采热的地热开发工程的设计和运行。

## 2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB /T 5117 碳钢焊条  
GB /T 5118 热强钢焊条  
GB/T 8110 熔化极气体保护电弧焊用非合金钢及细晶粒钢实心焊丝  
GB/T 11615 地热资源地质勘查规范  
GB/T 14957 熔化焊用钢丝  
GB/T 19830 石油天然气工业油气井套管或油管用钢管  
GB 50194 建设工程施工现场供用电安全规范  
GB 50243 通风与空调工程施工质量验收规范  
GB 50274 制冷设备、空气分离设备安装工程施工及验收规范  
GB 55015 建筑节能与可再生能源利用通用规范  
CJJ/T 34 城镇供热管网设计标准  
DZ/T 0260 地热钻探技术规程  
SY/T5374.1 固井作业规程(常规固井)  
SY/T 5396 石油套管现场检验、运输与贮存  
SY/T 6592 固井质量评价方法

## 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

**热管** heat pipe

以毛细结构的抽吸作用或工质相变前后重力作用来驱动工质循环流动的蒸发、冷凝传热装置。

### 3.2

**重力热管** gravity heat pipe

依靠重力完成液态工质回流的热管，又称两相闭式热虹吸管。

## 3.3

**超长重力热管** super long gravity heat pipe

长达数千米，长径比达数千量级的重力热管，由模块化的热管组成，用于深部地热能的开采，其运行原理见附录 A。

## 3.4

**重力热管换热器** gravity heat pipe heat exchanger

当蒸发段受热时，液体状态的循环工质吸收热量气化成蒸汽，蒸汽流向另一端，在冷凝段释放潜热凝结成液体，液体在重力的作用下，回流到蒸发段并再次气化，如此循环往复，提取与传递热量的装置。分为蒸发段、冷凝段、绝热段三部分，由管壳、内管、接箍等组成。

## 3.4.1

**蒸发段（区）** evaporator (evaporating section)

热管液态工质吸热、汽化成气态的部分（区）。

## 3.4.2

**冷凝段（区）** condenser (section)

热管气态工质放热，由气态转变成液态的部分（区）。

## 3.4.3

**绝热段（区）** adiabatic section

热管蒸发器与冷凝器之间不与外界换热的部分（区）。

## 3.4.4

**热管工质** heat pipe working fluid

重力热管系统中，实现将地热井深处的热能通过蒸发相变后，蒸汽上升传输至地表换热器中，冷凝变成液体后再依靠重力返回热管底部的媒介物质。

## 3.4.5

**管壳** Heat pipe tube

由石油套管或油管构成的超长重力热管外部管件。

## 3.4.6

**内管** Heat pipe inner tube

由钢管构成的超长重力热管内部管件。

## 3.4.7

**接箍** Couplings

用于连接两根带螺纹管子并具有内螺纹的圆筒体。

## 3.5

**重力热管井下换热系统** gravity heat pipe heat exchange system

利用安装在中深层地热井内的重力热管，经过管内热管工质相变换热、管外壁与周边地下岩体换热从而提取地热能的换热系统。

## 3.6

能效比 energy efficiency ratio

在标准测试工况下，热管换热设备换热能力与消耗功率之比。

### 3.7

单井取热功率 heat extraction rate from a single well

单位时间内，单井重力热管取热系统从地下热储中提取热量的能力，通常以千瓦（kW）或兆瓦（MW）为单位。

### 3.8

蒸发段延米取热功率 heat extraction rate per meter of evaporation section

单位时间内，单位长度的重力热管蒸发段延米上的换热功率，单位为瓦特/米(W/m)。

### 3.9

壳程 shell side

壳程是指管式换热器中管束外部的空间，流体在这个空间中流动，主要功能是通过管壁的传导作用与来自管程的流体进行热量交换。

## 4 总则

- 4.1 超长重力热管工程的规划与建设应与能源规划、清洁能源供热规划等相协调。
- 4.2 超长重力热管工程的实施单位在勘查、设计、施工、运维等方面应具有相应的技术能力。
- 4.3 超长重力热管工程实施前，应对拟利用场地进行工程场地状况调查及中深层地热勘查。
- 4.4 超长重力热管工程设计方案应符合安全可靠、绿色低碳、节能高效、经济可行的要求。
- 4.5 超长重力热管工程施工应选优节能高效设备及绿色环保材料。

## 5 地热调查与钻井工程

### 5.1 一般规定

5.1.1 在进行地热资源超长重力热管开采工程方案设计之前，应由具有地热地质勘查能力与经验的专业单位对拟利用场地的地热资源情况以及相关开采利用条件进行详细调查。

5.1.2 地热资源调查工作应符合 GB/T 11615 的规定，查明建设场地及周边中深层地热资源条件，并编写地热资源评估报告。

5.1.3 钻井工程应符合 DZ/T 0260 的规定，宜按照探采结合的原则进行工程设计，全面、准确的获取各项钻井地质及地热参数资料，做好地质编录，并按照重力热管安装要求成井。

5.1.4 重力热管地热工程井底温度宜大于 60℃，地温梯度不小于 2.0℃/100m。

### 5.2 场地与资源调查

5.2.1 重力热管工程场地调查应包括建设场地状况、热泵机房及配套设施的施工、建筑空间条件及钻井施工条件等。

#### 5.2.2 场地调查工作基本要求：

- a) 对场地的地热开采利用条件进行调查，了解场地内有无可供开发利用的中深层热储；
- b) 场地附近已有的中深层地热供热工程，应了解其位置、用途、类型、开采层位、采热量，对中深层热水供热系统，应了解其含水层条件、出水量、年用水量、水位、水温及水质等情况；

- c) 场地内已有或拟建建筑物的位置、布局、规模、功能及热负荷状况；
- d) 场地内重力热管地热井施工条件。

5.2.3 重力热管工程地热资源调查应在查明地质背景条件基础上，开展以重力热管采热工程能力为核心的资源调查工作。

5.2.4 场地地热地质调查基本要求：

- a) 查明地层结构、断裂发育条件；
- b) 查明地温场特征及大地热流值；
- c) 查明地层岩性、厚度及其组合情况；
- d) 查明热储的岩性、埋深、厚度及其分布；
- e) 查明盖层的岩性、厚度及其分布；
- f) 查明地热流体温度、压力及其化学组分；
- g) 获取施工地热井所需的地质参数。

5.2.5 对无取芯钻孔控制的场地，应选取不少于 1 口地热井作为探采结合井，开展以下调查测试工作：

a) 样品采集与测试：对探采结合井非取热段地层按照 1 组/200 m 的频率进行取芯，取热段各地层按照 1 组/100 m 的频率进行取心，各地层取芯数量不少于 1 组，取芯长度不小于 9 m/次，岩芯采取率不低于 75%。取芯后进行岩芯样品的密度、孔隙度、热导率、热扩散系数和比热容等参数测试；

b) 井温测井：在保证钻孔稳定性的前提下，对地热井进行近似稳态测温，获取地层温度及地温梯度，近似稳态测温工作应按 12h、12h、12h、24h、24 h 间隔顺序用同一仪器进行监测，直至 24 h 内温度变化不大于 0.5℃或总测温时间已达 84 h。

c) 物探测井：探采结合孔宜进行全孔地球物理综合测井，测井参数包括视电阻率、自然电位、自然伽马、声波速度、密度、井径、井斜及固井质量等。

### 5.3 资源评估

5.3.1 应对建设场地内中深层地热资源可利用热容量进行计算和评估，计算方法参照 GB/T 11615，按照运行 100 年、消耗 15%地热储量，根据公式（1）计算单个重力热管采热井年最大采热量。

$$Q = sHc_r\rho_r(t_r - t_0) \times 0.15 \div 100 \cdots \cdots \cdots (1)$$

式中：

$Q$ ：单个重力热管采热井每年最大允许采热量，单位为焦耳（J）；

$s$ ：重力热管采热井采热影响范围，按照公式（2）计算，单位为平方米（m<sup>2</sup>）；

$H$ ：重力热管采热井用热段热储厚度，单位为米（m）；

$c_r$ ：用热段热储比热容，单位为焦[耳]每千克开[尔文]（J/(kg·K)）；

$\rho_r$ ：用热段热储平均密度，单位为千克每立方米（kg/m<sup>3</sup>）；

$t_r$ ：热储温度，单位为摄氏度（℃）；

$t_0$ ：基准温度，取当地年均平均气温，单位为摄氏度（℃）；

$$s = \pi R^2 \cdots \cdots \cdots (2)$$

式中：

$R$ ：重力热管采热影响半径，建议取值 50，单位为米（m）。

5.3.2 对于取热段有多套热储的重力热管采热工程，宜分层计算各储层的比热容及地热储量，累加计算获得地热总储量。

5.3.3 地热资源调查评估报告内容宜包括：

- a) 项目概况；
- b) 调查工作概况；
- c) 拟建工程场区供暖期气象条件；

- d) 供热建筑物的用能需求及特征;
- e) 拟建工程场区场地条件;
- f) 拟建工程场区地质条件;
- g) 地温场特征;
- h) 岩土体热物性特征;
- i) 中深层地热可利用容量;
- j) 重力热管采热井钻探建议方案;
- k) 重力热管换热能力分析评价;
- l) 地质环境影响与评价;
- m) 结论与建议。

#### 5.4 钻井工程

5.4.1 重力热管采热井工程设计宜包括：工程概况、设计依据、质量要求、井身结构、钻进方法、钻井液设计、取芯设计、储层保护要求、固井设计、成井设计、井口装置、安全技术措施、施工组织与进度计划等。

5.4.2 重力热管采热井宜按照垂直井设计，一般为 2 开至 4 开成井，根据热管管型设计方案，选用合适的钻头尺寸，钻孔孔径宜不小于 120.6 mm。

5.4.3 钻井施工作业应符合以下要求：

- a) 施工作业参照 DZ/T 0260 执行；
- b) 取芯和测井作业应符合 5.2.5 要求。

5.4.4 固井作业应符合以下要求：

- a) 固井作业参照 SY/T 5374.1 及 SY/T 6592 执行；
- b) 重力热管工程的绝热段应严格固井，封固套管外部环形空间；蒸发段地层不稳，需要套管固井的，固井材料导热系数不宜低于岩土体的导热系数；
- c) 固井作业在钻孔测井作业结束后及时进行，防止施工过程中出现地下水串层现象；
- d) 重力热管的蒸发段、绝热段之间存在含水层时，应采取止水措施防止地下水串层。

### 6 重力热管设计与生产

#### 6.1 一般规定

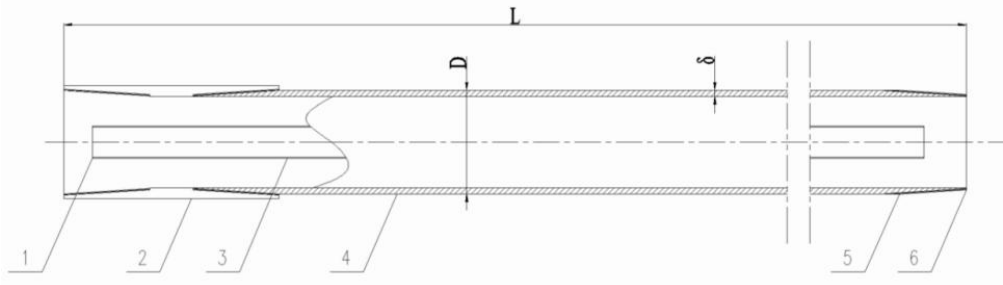
6.1.1 深部地热能开发使用的超长重力热管由多组模块化热管构成，通过各段模块首尾拼接组成。

6.1.2 超长重力热管应具备良好的气密性，各段模块拼接组装时连接处必须保证良好的密封性能，可满足内部真空要求且能承受井内水压不发生泄漏。

6.1.3 超长重力热管管壁应具有一定强度，能抵御所在地层压力不发生变形。

#### 6.2 模块化热管结构型式

超长重力热管根据功能分为蒸发段热管和绝热段热管，其结构分别见图 1 和图 2。

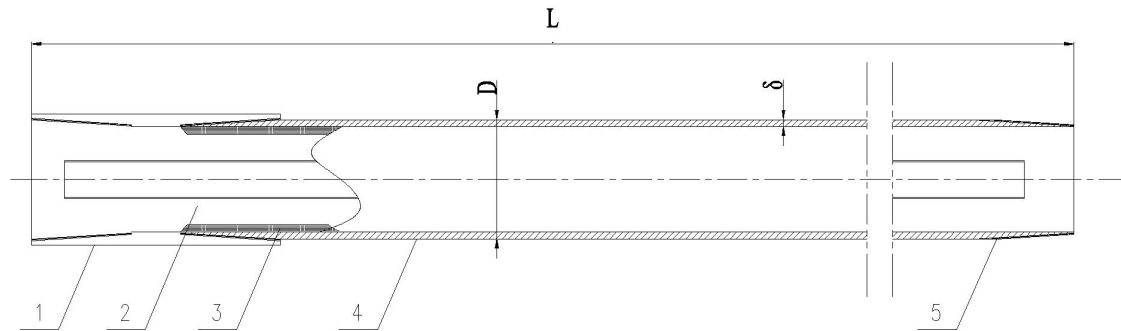


标引说明：  
1-内管管端  
2-接箍  
3-内管

4-管壳  
5-螺纹  
6-管壳管端

L-单根热管长度  
D-外径  
δ-壁厚

图 1 蒸发段热管的结构



标引说明：  
1-接箍  
2-内管  
3-保温层

4-管壳  
5-螺纹  
L-单根热管长度

D-外径  
δ-壁厚

图 2 绝热段热管的结构

### 6.3 模块化热管尺寸

#### 6.3.1 模块化热管外形尺寸

热管外壳采用 API 标准石油套管或油管，最小热管外径不小于 88.9 mm，基本尺寸及允许误差见表 1。

表 1 热管基本尺寸及允许误差

热管外径 D (mm)	母扣接箍外径 (mm)	管壳长度范围/允许变化量 (m)		热管外径尺寸公差
		套管管壳	油管管壳	
88.9	100.6	7.62-10.36/<1.52; 10.36-14.63/<1.83	8.35-12.8/<0.61; 11.58-12.8/<0.61	±0.79
114.7	126.2			
127.0	141.7			
139.7	154.2			
177.8	194.2			
193.7	215.9			
219.1	244.5			
244.5	269.6			-0.5%D~+ 1.0%D

### 6.3.2 模块化热管结构尺寸

热管内部功能性结构尺寸应在设计误差范围内。其中热管内管端面距管壳母扣端面的距离误差应控制在±10 mm；热管内管端面距管壳公扣端面的距离误差应控制在±10 mm。

## 6.4 模块化热管生产要求

### 6.4.1 通用要求：

- a) 热管应按经规定程序批准的图纸和技术文件（或用户和制造商的协议）制造；
- b) 热管管壳应采用石油套管或油管，性能应符合 GB/T 19830 要求；
- c) 焊条应符合 GB/T 5117、GB/T 5118 的规定；
- d) 焊丝应符合 GB/T 14957、GB/T 8110 的规定。

### 6.4.2 螺纹要求：

- a) 模块化热管外壳管端及接箍采用气密性螺纹牙型，连接强度与密封性能满足需求；
- b) 螺纹不应划扣、波纹、平扣、毛刺、崩刀、乱扣、碰伤、撕裂、断裂和黑皮。

### 6.4.2 尺寸要求：

- a) 成品热管长度测量值尺寸公差为±0.05 m；
- b) 符合 6.3 要求。

### 6.4.3 性能要求：

- a) 气密性要求热管焊接处不应出现泄露；
- b) 液压要求热管各部位不应有异常变形和泄漏；
- c) 保温性能要求保温管的导热系数应不大于 0.20 W/(m·K)。

## 6.5 超长重力热管管型设计

6.5.1 开采深部地热能的超长重力热管由绝热段和蒸发段两部分组成。由模块化热管通过气密扣连接而成。热管的长度可根据目标采热量通过计算模型初步确定，计算方法参见附录 C。

6.5.2 蒸发段热储最低温度应高于管内循环工质的蒸发温度，绝热段热储最高温度不高于管内循环工质蒸发温度。

6.5.3 重力热管绝热段和蒸发段的长度根据地层温度及地面用热系统需求综合确定，根据公式（3）计算：

$$L_{iso} = \frac{T_{grd} - T_{con}}{G_{geo} - 0.0025} \dots\dots\dots (3)$$

式中：

$L_{iso}$ ：绝热段长度，单位为米（m）；

$T_{grd}$ ：浅表/恒温层温度，单位为摄氏度（℃）；

$T_{con}$ ：热管蒸汽出口温度，单位为摄氏度（℃）；

$G_{geo}$ ：热管蒸发段以内平均地温梯度，单位为摄氏度每米（℃/m）。

6.5.4 重力热管的外径尺寸由接箍外径与井孔内径确定，二者间环空距离不小于 10 mm，以保证热管顺利下井。常用热管与井孔内径匹配关系见表 2。

表 2 热管尺寸与井孔内径匹配关系表

钻孔孔径或套管内径 (mm)	热管外径 (mm)	母扣接箍外径 (mm)
120.6	88.9	100.6

149.2	114.7	126.2
155.6	127.0	141.7
171.4	139.7	154.2
215.9	177.8	194.2
244.5	193.7	215.9
269.6	219.1	244.5
311.1	244.5	269.6

## 7 重力热管运输、贮存与安装

### 7.1 一般规定

7.1.1 重力热管在生产出厂后的运输、贮存与安装过程应避免发生机械变形与破损。

7.1.2 重力热管连接螺纹有油脂保护，应始终保持清洁，不可被污染或参入杂质颗粒，安装连接操作之前塑料护丝帽不可缺失。

7.1.3 重力热管的包装、运输和贮存应符合 SY/T 5396 要求。

### 7.2 热管运输与贮存

7.2.1 热管装车时，外螺纹或接箍应统一装在车辆一端。车上应垫断面为 100 mm×150 mm 的枕木，若装运两层以上，层间应垫 50 mm×100 mm 的枕木。运输过程中应防水、防潮和防磕碰。热管卸车时，禁止直接从车上滚下，应用吊装带平稳吊装。

7.2.2 热管应存放于硬化场地，平整清洁。贮存支架顶端距离地面 50 cm，支架结实可靠。每层套管间应均匀布置垫木，堆垛高度不超过 1.6 m，层数不超过 6 层。热管贮存的场地附近，不应有酸、碱和盐等腐蚀性物质。

### 7.3 重力热管安装

#### 7.3.1 安装前准备工作

7.3.1.1 综合钻探记录与综合测井资料，确定绝热段、采热段位置，做好排管记录。

7.3.1.2 安装前进行质量和强度的计算与校核，确保钻井设备满足提吊法安装所需的提升力及安全负荷。

7.3.1.3 安装前应校正孔深，并扫孔。

7.3.1.4 安装前应做好钻塔、天车、游动滑车、提升系统下管辅助工具的检查。

7.3.1.5 安装前应重点检查热管管材和丝扣状态，确保热管无腐蚀破损，丝扣螺纹应符合 6.5.2 要求。

#### 7.3.2 热管现场安装

7.3.2.1 严格按照排管记录，依次将蒸发段热管、绝热段热管连接并下入井孔。

7.3.2.2 热管安装应使用液压动力钳扭矩仪，确保模块化热管间气密扣扭矩符合套管紧扣扭矩表要求。

7.3.2.3 热管安装过程中如遇到阻力或下入困难时，应起拔井管重新扫孔。

7.3.2.4 热管安装过程中如发现井漏、井塌等问题，应及时进行处理，待井壁稳定后重新下管。

7.3.2.5 热管下入速度不宜过快，减少与井壁间碰撞，避免热管破损，不稳定地层应小于 0.3 m/s。

7.3.2.6 热管下入过程应对热管编号、累计长度、理论悬重、实际悬重、下入时间、热管壁厚、管材密度、泥浆密度、热管长度等信息进行记录，填写热管下管记录表，参见附录 B。

### 7.3.3 现场气密性检查

7.3.3.1 采用真空度保持测试方法对安装好的重力热管进行检查。

7.3.3.2 安装好的热管气密性应符合以下要求：

- a) 重力热管安装完毕之后，将井口通过气密扣、法兰或焊接等方式密封并预留抽真空接口、绝压表接口；
- b) 使用真空泵对重力热管进行抽真空处理，直至井口绝对压力降至 800Pa 以下；
- c) 静置 24h，观察井口绝压上升幅度，小于等于 20Pa 可认为重力热管满足气密性要求；
- d) 如果不满足气密性要求，应对地面抽真空系统全面的检漏、堵漏工作，若之后仍不能满足气密性要求，且地面管路在抽真空过程中有明显温度变化，则认为重力热管存在井下泄漏，应起拔井管，进行更换。

## 7.4 换热工质加注与回收

### 7.4.1 换热工质类型选择

综合考虑工质性能及工质成本，在所有场景下，均建议选择液氨作为循环工质。

### 7.4.2 换热工质注液量计算

对于供暖工况，换热工质注液质量可采用公式（4）进行计算：

$$m = \rho_v \cdot V_v + \rho_l \cdot V_l + \frac{L}{2L_{pipe}} \cdot \frac{Q}{\Delta h} \cdot t_{pipe} \dots\dots\dots (4)$$

式中：

- $m$ ：工质的注液质量，单位为千克（kg）；
  - $\rho_v$ ：液态工质密度，单位为千克每立方米（kg/m<sup>3</sup>）；
  - $\rho_l$ ：气态工质密度，单位为千克每立方米（kg/m<sup>3</sup>）；
  - $V_v$ ：液态工质体积，单位为立方米（m<sup>3</sup>）；
  - $V_l$ ：气态工质体积，单位为立方米（m<sup>3</sup>）；
  - $L$ ：热管总长，单位为米（m）；
  - $L_{pipe}$ ：单根热管长度，单位为米（m）；
  - $Q$ ：热管采热量，单位为焦[耳]（J）；
  - $t_{pipe}$ ：为热管循环运行时液体工质在每根热管中的驻留时间，通过现场试验测得，单位为秒（s）。
- 工质体积按照公式（5）（6）计算：

$$V_l = \frac{\pi}{4} d_1^2 \cdot L_l \cdot n \dots\dots\dots (5)$$

式中：

- $d_1$ ：热管内径，单位为米（m）
- $L_l$ ：液位控制高度，单位为米（m）；
- $n$ ：蒸发段套管数量，无量纲。

$$V_v = \frac{\pi}{4} d_1^2 \cdot L - \frac{m_{inner}}{7850} - V_l - \frac{L}{2L_{pipe}} \cdot \frac{Q}{\Delta h \cdot \rho_l} \cdot t_{pipe} \dots\dots\dots (6)$$

式中：

- $m_{inner}$ ：内结构钢材总重量，单位为千克（kg）。

注：计算时，工质物性参数参考设计温度下的饱和物性参数。

### 7.4.3 换热工质加注

7.4.3.1 加注前，地面与热管蒸汽管路连接的所有系统需要在设计压强的 1.2 倍条件下完成打压测试，确保地面管路及连接处无泄露情况，并对运氨槽车进行称重。

7.4.3.2 加注过程槽车应水平停放，并通过双臂鹤管连接槽车的注液及回气管路，并注意通过冷却系统降低热管的蒸汽压力，控制在 1.5 MPa 以内，同时实时记录槽车液位计变化情况，据此控制注氨量达到预计水平。

7.4.3.3 加注完毕后，通过磅秤记录运氨槽车重量变化，如果槽车称重结果与预计注氨量相差在 5% 以内则认为完成液氨充注，否则需要再次返回充注或反排。

7.4.5 换热工质回收采用冷凝回收方式，通过将气态工质冷凝为液态，利用回收泵将液态工质回收至槽车或储罐中。

## 8 地面用热系统设计

### 8.1 一般规定

8.1.1 地面用热系统设计应充分结合场地工程与资源调查成果、超长重力热管换热性能、地面热负荷等因素综合考虑。

8.1.2 地热能重力热管工程地面用热系统的设计与建设应满足 GB 50194、GB 50243、GB 50274、GB 55015、CJJ/T 34 的要求。

8.1.3 宜进行动态负荷计算，并对超长重力热管取热量进行数值模拟计算，根据计算结果进行用热系统设计。

8.1.4 地面换热系统选用的管材、循环工质、固井材料等材料设备要适应其使用环境，应满足强度、耐久性、密封等安全指标，并符合绿色环保要求。

### 8.2 地面供热系统设计

8.2.1 设计范围包括超长重力热管和热源侧循环工质运行线路上的关联设备。

8.2.2 宜采用现场实验的方法确定换热井换热能力。对于有多个换热井的项目，应选取具有代表性的换热井开展现场试验，其它换热井可根据现场试验获取的数据用类比的方式确定换热能力。

8.2.3 确定超长重力热管工程在供热负荷中的比例、供热系统流程、建筑供热形式及不同工况负荷时的调节、保障手段。

8.2.3 换热系统管内循环工质应优先采用软化水，补水系统应有除氧及软化处理装置。

8.2.4 与热管工质直接接触的地面换热设备材质需要与热管工质兼容，能够耐工质腐蚀。

8.2.5 地面换热器热管工质侧的流道设计应满足液体能够完全依靠重力向下回流至热管的要求，避免出现积液现象，阻碍气体流通甚至堵塞管路。

8.2.6 常用超长重力热管地热开采系统地面换热器的结构主要为列管管壳式结构，其中热管工质蒸汽走壳程。

8.2.7 地面换热器热管工质侧的流道应尽量减少迂回结构，保持热管蒸汽工质的均匀顺畅流动。

8.2.8 可根据不同地热资源条件采用合理的梯级利用方式，实现地热资源的充分利用，但需保证地热梯级利用时回井下热管的液态工质温度应不低于 0℃。

8.2.9 梯级利用时应根据热管系统进出口流体参数和末端系统温度，合理选择直接供暖、通过换热器调整温度流量后的间接供暖、提温设备提升温度后供暖或混合方式供暖。

8.2.10 应根据源侧热管蒸汽温度、温差、流量设计梯级利用设备，选取合适的管网系统、水泵、换热器、热泵机组等提升或取热设备。

8.2.11 配套热泵系统可采用热管工质直接换热热泵，重力热管中的工质进入热泵蒸发器中与热泵工质换热，热泵工质经压缩机压缩后将热量输出给用户。

8.2.12 设备与辅助配件的选用选型应满足以下要求：

- a) 设备与辅助配件的材料与承压选用，应按热管系统与供热末端系统要求选用；
- b) 设备选取应满足设计工况，水泵应配合热管系统和供热末端系统及要求分别选用，系统宜优先选用具有变频调节功能的水泵。

### 8.3 超长重力热管蒸汽直驱发电与制冷系统的设计

8.4.1 系统设计应充分考虑超长热管吸取地下热能产生蒸汽的特点，确保在稳定的蒸汽温度下运行，最大化利用地热能源。

8.4.2 吸附式热泵系统应采用高效、环保的吸附剂和制冷剂，提高系统的制冷及制热效率和环境适应性。

8.4.3 系统的运行设计条件应考虑蒸汽的流速、温度和压力等参数，确保系统稳定运行，换热管蒸汽质量流速不高于  $750 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ，蒸汽温度不低于  $55^\circ\text{C}$  及不高于  $100^\circ\text{C}$ ，蒸汽饱和压力不高于  $10 \text{ MPa}$ 。

8.4.4 系统应具备自动监测和控制功能，包括超长重力热管采热产出蒸汽的温度、流量、压力等参数的实时监测和调节，同时还应具备制冷和制热温度的实时监测和调节。

## 9 系统运行、监测与评价

### 9.1 一般规定

9.1.1 监测与控制系统是超长重力热管地热开采和利用一体化系统的重要组成部分，在设计时应遵循安全、节能、运行管理方便等原则，具备运行工况实时分析、参数报警、能耗数据存储、分析、导出等功能。

9.1.2 用于计量的设备和传感器的选型、安装、使用、维护应符合国家或相关行业标准。

9.1.3 示范性 or 代表性供热工程，宜考虑选取 1 口地下换热井设置沿程温度监测系统。

### 9.2 系统运行要求

9.2.1 在重力热管安装完备、完成抽真空和流体力工质灌注之后，应通过监测和比较地下温度和地面冷凝器内的温度和压力，确保重力热管性能良好，达到工程预期。

9.2.2 确定热管性能良好后，可开工建设地面的换（用）热系统，并开展短期循环试验。

9.2.3 短期循环试验在完成测试热管的性能之外，还需为长期运行试验做准备，应包括变冷却流体流量或入口温度测试、周期性的启-停测试等。

9.2.4 确定好长期运行试验参数后，可开始长期运行测试。

9.2.5 系统运行前应进行全面的安全检查，按热泵供暖机组、汽轮发电机组、制冷机组制造厂技术文件规定对系统进行安全检查，内容包括：

- a) 机组外观清洁，固定件紧固无松动，无漏水、漏油、漏气现象；
- b) 机组与热管及外部用户系统管道、电气连接可靠；
- c) 测试用设备、仪表、仪器工作正常，操作良好；
- d) 机组与测试设备及测试仪器可靠连接；
- e) 机组性能指标应满足制造厂要求，制造、装配记录齐全；
- f) 危险气体泄漏报警及应急防护系统工作正常；
- g) 热管工质为液氨时，其压力较高，并且存在一定毒性，地面注液系统及冷凝器等设备需加强防漏措施。

### 9.3 系统监测与控制

9.3.1 超长重力热管地热开采和利用一体化系统的监测与控制系统在设计时应遵循安全、节能、运行管理方便等原则。

9.3.2 一体化系统应在便于观察到的位置设置现场监测仪表，以监测重要参数，填写系统运行状态监测记录表，参见附录 D。

9.3.3 超长重力热管地热开采和利用一体化系统应设置热管温度、压力、工质泄漏报警，冷却水循环流量和温度监测系统。

9.3.4 宜对系统各主要耗能设备进行单独用电计量。

9.3.5 地热供热系统除设置现场监测仪表外，各种机电设备控制柜应给自动控制系统预留通讯或控制接口。

### 9.4 采（制）热性能评价

9.4.1 地热资源重力热管井下换热系统的评价指标及其要求应符合以下规定：

a) 采热性能评价应计算重力热管单井取热功率、蒸发段延米取热功率。当系统制热性能系数在设计文件无明确规定时，系数（包括热泵增温系统） $COP_{sys}$  不宜低于 3.0。如有相关文件规定，参照其要求。

b) 当系统常规的能源替代量、二氧化碳减排量、二氧化硫减排量、粉尘减排量无文件明确规定时，应在评价报告中给出。如有相关文件规定，参照其要求。

9.4.2 系统的测试分为长期测试和短期测试，具体要求如下：

a) 长期测试应符合下列规定：已安装测试系统的重力热管井下换热系统，测试周期与采暖季同步。

b) 短期测试应符合下列规定：

1) 未安装测试系统的重力热管井下换热系统，应在开始供热 15d 后进行短期测试，测试时间应不小于 24h；

2) 系统的性能测试宜在系统负荷率达到 60% 以上进行；

3) 热源设备的性能测试宜在设备负荷率达到额定值的 80% 以上进行。

9.4.3 在开始相关测试之前，应对测试系统主要传感器的准确度进行校核和确认，确保测试准确。

9.4.4 采（制）热性能系数应按下列规定进行：

a) 应对系统的热源侧流量、热源设备用户侧流量、热源侧进出口温度、用户侧进出口温度和热源设备的输入功率等参数进行测试；

b) 各项参数记录间隔不得大于 600 s；

c) 重力热管单井取热功率利用公式（7）计算：

$$Q = CM(T_2 - T_1) \dots\dots\dots (7)$$

式中：

$Q$ ：热管取热功率，单位为瓦[特]（W）；

$M$ ：循环冷却水的质量流量，单位为千克每秒（kg/s）；

$T_1, T_2$ ：冷凝器进口水温 and 出口水温，单位为摄氏度（℃）；

$C$ ：水的比热容，取  $(T_1 + T_2) / 2$  温度条件下的相应值，单位为焦[耳]每千克开[尔文]（J/(kg·K)）。

d) 蒸发段延米取热功率利用公式（8）计算：

$$q_0 = \frac{Q}{L_{eva}} \dots\dots\dots (8)$$

式中：

$q_0$ ：蒸发段延米取热功率，单位为瓦[特]每米(W/m)；

$Q$ : 热管取热功率, 单位为瓦[特](W);

$L_{eva}$ : 热管蒸发段的长度, m。

e) 重力热管井下换热系统的制热性能系数可按公式 (9) 进行计算:

$$COP_{sys} = \frac{Q_s}{N_s} \dots\dots\dots (9)$$

式中:

$Q_s$ : 供热系统热源设备的供热量, 单位为千瓦[特] (kW);

$N_s$ : 供热系统总输入功率, 包括热源设备、热源侧水泵及用户侧水泵的功率, 单位为千瓦[特] (kW);

$COP_{sys}$ : 供热系统制热性能系数, 无量纲, 在运行工况下不宜低于 3.0。

#### 9.4.5 常规能源的替代量应按下列规定进行评价:

供热系统的常规能源替代量  $Q_s$  应按公式 (10) 计算:

$$Q_s = Q_r - Q_d \dots\dots\dots (10)$$

式中:

$Q_s$ : 常规能源替代量, 单位为千克标准煤 (kgce);

$Q_r$ : 传统系统的总能耗, 单位为千克标准煤 (kgce);

$Q_d$ : 供热系统的总能耗, 单位为千克标准煤 (kgce)。

对于采暖系统, 传统系统的总能耗应按公式 (11) 计算:

$$Q_r = \frac{Q_H}{\eta_t q} \dots\dots\dots (11)$$

式中:

$Q_r$ : 传统系统的总能耗, 单位为千克标准煤 (kgce);

$q$ : 标准煤热值, 单位为兆焦耳每千克标准煤 (MJ/kgce), 本标准取  $q=29.307$  MJ/kgce;

$Q_H$ : 长期测试时为系统记录的总制热量, 短期测试时, 根据测试期间系统的实测制热量和室外气象参数, 采用度日法计算采暖季累计热负荷, 单位为兆焦[耳] (MJ);

$\eta_t$ : 以传统能源为热源时的运行效率, 参考燃煤锅炉效率为 78%。

整个采暖季供热系统的耗电量应根据实测的系统能效比和建筑全年热负荷按公式 (12) 计算:

$$Q_d = \frac{DQ_H}{3.6COP_{sys}} \dots\dots\dots (12)$$

式中:

$Q_d$ : 系统年制热总能耗, 单位为千克标准煤 (kgce);

$D$ : 每度电折合所耗标准煤量, 单位为千克标准煤每千瓦时 (kgce/kWh), 本标准中取  $D=0.33$  kgce/kWh;

$Q_H$ : 建筑物全年累计热负荷, 单位为兆焦[耳] (MJ);

$COP_{sys}$ : 系统的制热性能系数。

### 9.5 经济与环境效益评价

#### 9.5.1 系统的年节约费用 $C_s$ 应按公式 (13) 计算:

$$C_s = P \times \frac{Q_s \times q}{3.6} - M \dots\dots\dots (13)$$

式中:

$C_s$ : 系统的年节约费用 (元/年);

$Q_s$ : 常规能源替代量 (kgce);

$q$ : 标准煤热值, 单位为兆焦耳每千克标准煤 (MJ/kgce), 本标准取  $q=29.307$  MJ/kgce;

$P$ : 常规能源价格, 单位为元每千瓦时 (元/kWh);

$M$ : 每年运行维护增加费用 (元), 由建设单位委托运行维护部门测算得出。

9.5.2 常规能源的价格  $P$  应根据项目设计文件所对比的常规能源类型进行比较, 当无文件明确规定时, 此测评单位和项目建设单位根据当地实际用能状况确定常规能源的类型, 应按下列规定选取:

a) 常规能源为电力时, 对于热水系统,  $P$  为当地家庭用电价格, 采暖系统不应考虑常规能源为电的情况;

b) 常规能源为天然气或煤时,  $P$  应按公式 (14) 计算:

$$P = P_q / R \dots\dots\dots (14)$$

式中:

$P$ : 常规能源价格, 单位为元每千瓦时 (元/kWh);

$P_{qe}$ : 当地天然气或煤的价格, 单位为元每标准立方米或元每千克 (元/Nm<sup>3</sup>或元/kg);

$q_e$ : 天然气或煤的热值, 天然气的  $q_e$  值取 11 kWh/Nm<sup>3</sup>, 煤的  $R$  值取 8.14 kWh/kg。

9.5.3 根据系统运行替代常规能源量  $Q_s$ , 计算可节约电量及 CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、粉尘等污染物减排量, 评价系统运行的环境效益。具体系数及评价结果见表 3。

表 3 环境效益评价表

评价指标	节约电量 (kWh/年)	CO <sub>2</sub> 减排量 (kg/年)	SO <sub>2</sub> 减排 (kg/年)	粉尘减排量 (kg/年)
换算系数	3.03	3.02	0.09	0.82
评价结果	3.03 $Q_s$	3.02 $Q_s$	0.09 $Q_s$	0.82 $Q_s$

附录 A  
(资料性附录)  
重力热管运行原理

### A.1 重力热管运行原理

在一个封闭的真空管体内部注入一定量的液体工质，液态工质在热管底部蒸发吸热变为气态，气态工质自发流向热管顶部并冷凝放热，冷凝液体在重力作用下回流至热管底部，从而持续将热量从热管底部。重力热管运行原理示意图 A.1。

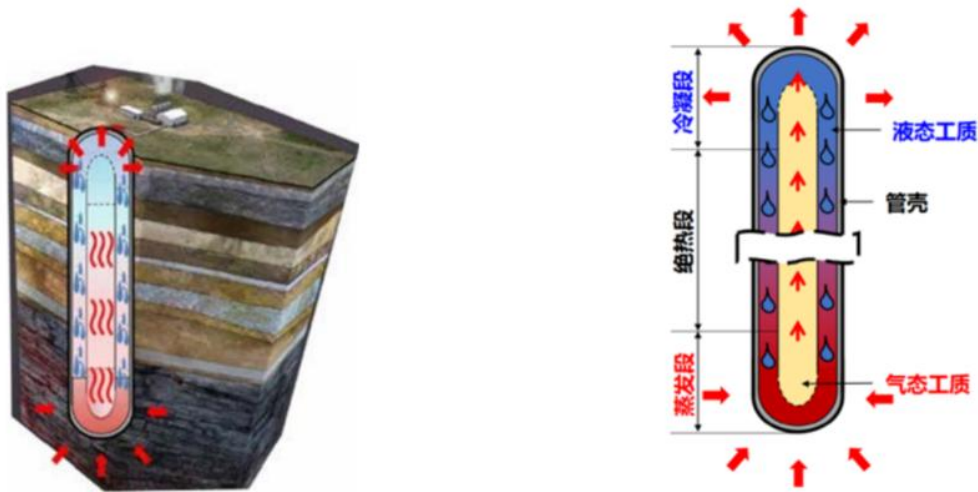


图 A.1 重力热管运行原理示意图

### A.2 超长重力热管与普通重力热管的区别

超长重力热管和普通重力热管在地热提取方面的本质区别在于热管的尺寸，特别是其长度和直径。普通重力热管通常长度小于 10 m，直径在 1mm-10 mm 范围内。

深层地热开采热源位于地表下几公里处，采用一根长度为  $L$ 、直径为  $D$  的热管从地面插入井筒深处。在提取深层地热时，地热储层的深度高于 1000m，地热钻孔的直径通常限制在 100mm-300mm。因此，用于深层地热提取的超长重力热管长度应至少为 1000m，直径应至少为 100mm。

超长重力热管的长度和长度与直径的比率明显大于普通重力热管。此外，由于高压条件和热管的巨大重量，超长重力热管的壁通常由厚度相对较大的钢制成，以确保其承压能力。超长重力热管壁的厚度  $\geq 8\text{mm}$ ，远远大于普通重力热管要求的厚度(1mm)。普通重力热管与超长重力热管尺寸对比见表 A.1。

表 A.1 普通重力热管与超长重力热管尺寸对比

参数	普通重力热管	超长重力热管
长度, $L$	$\leq 10\text{m}$	$\geq 1000\text{mm}$
直径, $D$	1mm-10mm	100mm-300mm
壁厚, $\delta$	$\leq 1\text{mm}$	$\geq 8\text{mm}$



## 附录 C

(资料性附录)

## 超长重力热管开采中深层地热能数值模型

热管外干热岩内的传热模型只考虑导热，如下式：

$$\left[ \varepsilon \rho^f c_p^f + (1-\varepsilon) \rho^s c_p^s \right] \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda_{eff} \nabla T) \quad \dots\dots\dots(C.1)$$

式中：

- ε：孔隙率，无单位；
  - ρ：密度，单位为千克每立方米 (kg/m<sup>3</sup>)；
  - cp：比热容，单位为焦[耳]每千克开[尔文] (J/(kg·K))；
  - s：上标表示岩石区固体；
  - f：上标表示岩石区流体；
  - T：温度，单位为摄氏度 (°C)；
  - t：时间，单位为秒 (s)；
  - λ<sub>eff</sub>：岩体的有效导热系数，单位为焦[耳]每千克开[尔文] (J/(kg·K))；
- 岩体的有效导热系数计算公式如下：

$$\lambda_{eff} = \varepsilon \lambda^f + (1-\varepsilon) \lambda^s \quad \dots\dots\dots(C.2)$$

假设超长重力热管系统通过管道内部结构优化，可以实现以下功能：

热管底部无积液或干区，即热管底部蒸发部分无抑制蒸发作用或局部过热现象；

由于热管沿线没有汽液夹带，因此超长重力热管内的流动阻力主要由蒸汽的流动阻力决定，并遵循经验的管内湍流流动阻力关系；

热管内流体始终处于相平衡状态；

液体在超长重力热管顶部的恒温 T<sub>c</sub> 下冷凝；

忽略气液两相间的动量交换。

由于超长重力热管的长度超过 1000 m，而直径仅有不足 1 m 的量级，考虑到热管内状态参数的径向梯度远小于轴向梯度，因此管内的径向梯度可忽略，仅考虑轴向变化。描述管道内流体的质量守恒、动量守恒和能量守恒的控制方程如下：

连续方程

$$\frac{\partial \rho^v}{\partial t} + \frac{\partial (\rho^v v^v)}{\partial y} = \frac{S_q}{h^v - h^l} \quad \dots\dots\dots(C.3)$$

动量方程

$$\frac{\partial (\rho^v v^v)}{\partial t} + v^v \frac{\partial (\rho^v v^v)}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial y} + R^v (v^v)^2 + \rho^v g \quad \dots\dots\dots(C.4)$$

能量方程

$$\left[ \phi \rho^v c_p^v + (1-\phi) \rho^l c_p^l \right] \frac{\partial T}{\partial t} + \phi \rho^v c_p^v \frac{\partial (v^v T)}{\partial y} + (1-\phi) \rho^l c_p^l \frac{\partial (v^l T)}{\partial y} = \lambda^v \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{4q_{surf}}{D} - S_q \quad \dots(C.5)$$

式中，

- v：速度的轴向分量，单位为米每秒 (m/s)；
- y：以地面为零点的轴向深度，单位为米 (m)；
- S<sub>q</sub>：相变热源，单位为瓦 (W)；
- h：比焓，单位为焦耳每千克 (J/kg)；
- v 和 l：上标，分别表示气相和液相；

$\phi$ : 气相体积分数;

P: 压力, 单位为帕斯卡 (Pa);

Qsurf: 热管外表面的热流密度, 单位为瓦每平方米 (W/m<sup>2</sup>)。

式(C.4)中的流动阻力项  $Rv(vv)^2$  是由假设 ii 得到的, 其中  $Rv$  为蒸汽阻力系数。利用 Swamee 和 Jain 提出的经验相关性可以计算出  $Rv$ , 给出如下:

$$R^v = 0.66 \frac{\rho}{D} \left\{ \ln \left[ 0.27 \left( \frac{e}{D} \right) + 5.74 \left( \frac{1}{Re} \right)^{0.9} \right] \right\}^{-2} \dots\dots\dots (C.6)$$

(适用范围:  $10^{-8} < e/D < 0.01, 5000 < Re < 108$ ).

式中:

e: 热管内表面粗糙度, 单位米 (m);

D: 热管内径, 单位米 (m);

Re: 雷诺数, 无量纲。

由于蒸汽质量变化等于冷凝物质量, 蒸汽流和液体返回底部的差为零(假设), 它可以推断出, 无论超长重力热管的横截面, 蒸汽质量流量和冷凝液质量流量是相反的, 即:

$$\phi \rho^v v^v = (1 - \phi) \rho^l v^l \dots\dots\dots (C.7)$$

式中:

$\phi$ : 蒸汽份额, 无单位。

能量方程可以简化为:

$$\left[ \phi \rho^v c_p^v + (1 - \phi) \rho^l c_p^l \right] \frac{\partial T}{\partial t} + \phi \rho^v (c_p^v - c_p^l) \frac{\partial (v^v T)}{\partial y} = \lambda^v \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{4q_{surf}}{D} S_q \dots\dots\dots (C.8)$$

由方程组成的方程组(C.3)、(C.4)和(C.8)是热管内发生的能量传输过程, 涉及三个变量:  $v^v$ 、 $p$  和  $T$ , 因此在数学上是封闭的。需要另外两个方程来计算这两个未知项:  $S_q$  和  $q_{surf}$ 。考虑假设 iii, 温度和压力服从工质饱和度关系:

$$T = f(p) \dots\dots\dots (C.9)$$

从控制方程组(由方程(C.3)、(C.4)和(C.8)组成)计算出的  $T, p$  与饱和  $T$ - $p$  关系(方程(C.9))相结合, 以确定  $S_q$ 。另一方面, 假设管道壁上没有蓄热, 则可以确定管道壁上的热流密度  $q_{surf}$  为:

$$q_{surf} = \frac{T_{surf} - T}{\delta_{surf} / \lambda_{surf}} \dots\dots\dots (C.10)$$

式中:

$\delta_{surf}$ : 管外壁厚度, 单位为米 (m);

在计算过程中,  $q_{surf}$  由热管外区域的控制方程的解得到, 然后用于求解热管内的控制方程(即式 C.3、C.4、C.8)。通过对热管内方程的求解, 可以得到热管外壁温度  $T_{surf}$  由式(C.10)表示。在求解热管外区域的控制方程时, 用  $T_{surf}$  作为温度边界。在计算过程中, 每迭代一步都会更新  $q_{surf}$  和  $T_{surf}$ , 以满足管内流程和外流程的强耦合。

由于超长重力热管的长度超过 1000m, 而直径仅有不足 1m 的量级, 考虑到热管内状态参数的径向梯度远小于轴向梯度, 因此管内的径向梯度可忽略, 仅考虑轴向变化。热管内动量控制方程如下:

$$\frac{\partial (\rho^v v^v)}{\partial t} + v^v \frac{\partial (\rho^v v^v)}{\partial y} = -\frac{\partial P}{\partial y} + R^v (v^v)^2 + \rho^v g \dots\dots\dots (C.11)$$

根据假设 ii 流阻项  $Rv(vv)^2$  只与蒸汽流动相关,  $Rv$  代表蒸汽阻力系数可以通过 Swamee 和 Jain 提出的经验关联式来计算:

$$R^v = 0.66 \frac{\rho}{D} \left\{ \ln \left[ 0.27 \left( \frac{e}{D} \right) + 5.74 \left( \frac{1}{Re} \right)^{0.9} \right] \right\}^{-2} \dots\dots\dots (C.12)$$

这里,  $e, D$  和  $Re$  表示管壁的粗糙度, 等效流通直径, 和雷诺数。该式的有效区间为:  $10^{-8} < e/D < 0.01$ ,  $5000 < Re < 108$ 。

由公式 (C.1) 可见, 当系统接近稳态, 瞬态项  $\partial(\rho^v v^v) / \partial t$  可以忽略。惯性力项  $v^v \partial(\rho^v v^v) / \partial y$  和阻力项  $R^v (v^v)^2$  记为  $k$ 。沿着超长重力热管从底部到顶部, 蒸汽的速度从 0 上升至  $v^v$ , 那么  $v^v \partial(\rho^v v^v) / \partial y$  与  $\rho^v (v^v)^2 / L$  是相同的量级, 代入公式 (C.12), 比例  $k$  可化简如下:

$$k \approx \frac{\rho^v (v^v)^2 / L}{0.66 \frac{\rho^v}{D} \left\{ \ln \left[ 0.27 \left( \frac{e}{D} \right) + 5.74 \left( \frac{1}{Re} \right)^{0.9} \right] \right\}^{-2} (v^v)^2} = D \left\{ \ln \left[ 0.27 \left( \frac{e}{D} \right) + 5.74 \left( \frac{1}{Re} \right)^{0.9} \right] \right\}^2 / 0.66 L \dots\dots\dots (C.13)$$

假设粗糙度为 0.1 mm, 热管长度  $L$  为 4000 m, 热管直径  $D$  范围为  $0.1 \text{ m} \leq D \leq 0.5 \text{ m}$ , 管内的蒸汽流动雷诺数满足  $5000 \leq Re \leq 108$ , 那么  $k$  的范围为  $0.0175 \sim 7.7 \times 10^{-5}$ , 远远小于 1, 表明惯性力项可以忽略。因此, 压力沿  $y$  轴的变化可以分为两部分: 摩擦压降分量  $R^v (v^v)^2$  和重力压降分量  $\rho v g$ 。



参考文献

- [1] GB/T 14811 《热管术语》
  - [2] DB13(J)/T 8429-2021 《中深层地热井下换热供热工程技术标准》
  - [3] DB11/T 2038-2022 《中深层地热供热技术规范 井下换热》
- 

---

---

ICS 号

中国标准文献分类号

关键词：地热能 超长重力热管

---

---