

团 体 标 准

T/GSC 012—2025

超长重力热管地热能开发技术规范

Technical specification for geothermal energy exploitation by
super long gravity heat pipes

2025-12-12 发布

2026-01-01 实施

中国地质学会 发布

T/GSC 012—2025

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 电子信箱: zgdzxh@geosociety.org.cn

目 次

目 次	I
前 言	II
引 言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 总体要求	3
5 勘查与评估	3
5.1 一般要求	3
5.2 场地调查	3
5.3 地热资源地质勘查	3
5.4 钻井工程	4
5.5 资源评估	4
6 井下取热	5
6.1 一般要求	5
6.2 管型设计	5
6.3 热管工质设计	5
6.4 超长重力热管井下换热器安装	6
6.5 热管工质加注与回收	7
6.6 安全要求	7
7 地面用热	8
7.1 一般要求	8
7.2 供热系统设计	8
7.3 热管工质蒸气直驱发电系统设计	8
7.4 地面用热系统安装	9
7.5 施工安全	9
8 运行与评价	9
8.1 一般要求	9
8.2 系统运行	10
8.3 系统监测	10
8.4 取（制）热性能评价	10
8.5 经济与环境效益评价	12
附录 A（资料性） 超长重力热管运行原理	13
附录 B（资料性） 超长重力热管开采中深层地热能数学模型	14
附录 C（资料性） 超长重力热管下管记录表	17
附录 D（资料性） 超长重力热管地源热泵供暖系统运行状态监测记录表	18
参考文献	19

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件由中国地质学会提出并归口。

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，西安交通大学，电力规划设计总院，中国矿业大学。

本文件主要起草人：蒋方明、王贵玲、岑继文、黄文博、邢林啸、李龙、陈娟雯、李曼、郭剑、杨军、上官栓通、田兰兰、鞠贵冬、李龙、汪丽君、高铁瑜、王家瑞、邓立生、何雨江、王婉丽、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，中国地质学会不承担识别这些专利的责任。

本文件为首次制定。

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，地热能特别是中深层地热能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受到一定制约，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发中深层地热能技术，作为地热能开采技术的组成。

超长重力热管地热能开发技术，通过工质在热管内的闭式循环取热，与周边地质体只发生能量交换，不发生物质交换，能避免对地下水扰动造成地质环境问题，取热环节无需使用水泵，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。本文件可为超长重力热管开采中深层地热能工作提供技术支持，推动该项技术的市场化发展。

为规范超长重力热管地热能开发技术的推广和应用，特制定本文件。

超长重力热管地热能开发技术规范

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（简称超长重力热管工程）的总体要求、勘查与评估、井下取热、地面用热、系统运行监测与评价等技术要求。

本文件适用于以地下的地质体为热源、采用超长重力热管技术进行中深层地热开发工程的设计、建设和运行。

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 151 热交换器

GB/T 8117.2 汽轮机热力性能验收试验规程. 第2部分:方法 B.各种类型和容量的汽轮机宽准确度试验

GB/T 14909 能量系统焓分析技术导则

GB/T 11615 地热资源地质勘查规范

GB/T 19830 石油天然气工业 油气井套管或油管用钢管

GB/T 20801 压力管道规范

GB/T 41703 商业或工业用及类似用途的热泵热水系统设计、安装、验收规范

GB 50058 爆炸危险环境电力装置设计规范

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

HG/T 4686 液氨泄漏的处理处置方法

HG/T 20275 化工设备工程施工及验收规范

JGJ 33 建筑机械使用安全技术规程

JGJ 46 施工现场临时用电安全技术规范

JGJ 59 建筑施工安全检查标准

NB/T 47015 压力容器焊接规程

SY/T 5374.1 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 5333 钻井工程设计规范

SY/T 5974 钻井井场、设备、作业安全技术规程

SY/T 6592 固井质量评价方法

T/CMIF 278 超长重力热管

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

重力热管 gravity heat pipe

两相闭式热虹吸管 closed two-phase thermosyphon

依靠重力完成液态工质回流的热管。

3.2

超长重力热管 super long gravity heat pipe

利用重力作用实现热管工质循环，长度为数百至数千米且长径比超过 1000 的密封圆筒形组合体。

注：超长重力热管由多段热管模块连接组成，运行原理见附录 A。

3.2.1

热管模块 heat pipe module

由内管与管壳构成的圆筒形组合体。

注：是连接组成超长重力热管的基本单元，气态热管工质在内管空腔内流动，液态热管工质在管壳内壁面流动。

3.3

超长重力热管井下换热器 gravity heat pipe downhole heat exchanger

用于开采中深层地热能的超长重力热管(3.2)井下换热装置，分为蒸发段、绝热段、冷凝段三部分。

3.3.1

蒸发段 evaporating section

超长重力热管井下换热器中液态热管工质吸热、汽化成气态的部分。

3.3.2

绝热段 adiabatic section

超长重力热管井下换热器中蒸发段与冷凝段之间不与外界换热的部分。

3.3.3

热管工质 heat pipe working fluid

超长重力热管换热器中，实现将地热井深部的热能通过蒸发相变和蒸气上升传输至地表换热器，经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

超长重力热管井下取热系统 super long gravity heat pipe heat extraction system

利用安装在地热井内的超长重力热管井下换热器(3.3)，经过管外壁与周边地质体换热，管内热管工质吸热相变并在重力与饱和压力差作用下循环从而提取地热能的系统。

3.5

制热性能系数 heating coefficient of performance (COP)

采用热泵增温的超长重力热管取热系统输出热量与耗电量的比值。

3.6

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

单位时间内，单井超长重力热管取热系统从地下热储中提取热量的能力。

注：通常以千瓦(kW)或兆瓦(MW)为单位。

3.7

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

超长重力热管蒸发段单位长度的取热功率。

注：单位为瓦(特)/米(W/m)。

4 总体要求

- 4.1 应开展前期策划，前期策划应与能源规划、可再生能源发展规划等相协调。
- 4.2 应进行方案设计，方案应符合安全可靠、绿色低碳、节能高效、经济可行的要求。
- 4.3 应通过环境影响评价，并选用节能高效设备及绿色环保材料。
- 4.4 应明确实施单位，实施单位在勘查、设计、安装、运维等方面应具有相应的技术能力与资质。
- 4.5 超长重力热管开发地热能应包括井下取热、地面换热、系统运行和评估等。
- 4.6 超长重力热管开发地热能实施前应进行地热地质勘查与评估。

5 勘查与评估

5.1 一般要求

- 5.1.1 地热资源勘查应符合 GB/T 11615 的规定，收集拟建场地及周边一定范围的基础地质、水文地质、地热地质等相关资料，查明建设场地及周边中深层地热地质条件，并编制地热资源评估报告。
- 5.1.2 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、准确地获取各项钻井地质及地热参数资料，做好地质编录，并按照超长重力热管安装要求成井。
- 5.1.3 应根据场地及周边一定范围的地热资源条件、地层温度、岩石物性、用热需求等，提出合理的地热能开发方式。

5.2 场地调查

5.2.1 超长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 基本要求包括以下内容：

- 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地热储层；
- 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、取热量，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) 场地内超长重力热管取热井的施工条件。

5.3 地热资源地质勘查

5.3.1 地热资源地质勘查应在查明地质背景基础上，围绕超长重力热管井下取热系统取热能力开展地热资源地质勘查工作。

5.3.2 地热资源地质勘查工作应查明：

- a) 地层结构、断裂发育条件；
- b) 地温场特征及大地热流值；
- c) 地层岩性、厚度及其组合情况；
- d) 热储的热物性、埋深、厚度及其分布；
- e) 盖层的热物性、厚度及其分布；

f) 施工地热井所需的其他地质参数。

5.4 钻井工程

5.4.1 对无取心钻孔控制的场地，应部署不少于 1 口探采结合井，用于地热资源勘查与超长重力热管换热器安装。

5.4.2 超长重力热管地热井工程设计应包括：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、取心设计、储层保护要求、固井设计、成井设计、井口装置、施工组织与进度计划、安全预案等，参照 SY/T 5333 的相关规定执行。

5.4.3 超长重力热管工程地热井应根据热管管型设计方案确定成井结构，终孔孔径宜不小于 120 mm。

5.4.4 钻井施工作业及工程质量应符合 DZ/T 0260 的相关规定，并符合 SY/T 5974 对安全的要求。

5.4.5 固井作业参照 SY/T 5374.1 及 SY/T 6592 的相关规定执行，应在钻孔测井作业结束后及时进行并符合以下要求：

- a) 超长重力热管井下换热器绝热段应严格固井，封固套管外部环形空间，应优先选用低导热水泥浆体系的固井材料。
- b) 超长重力热管井下换热器蒸发段地层不稳需要下入套管并固井的，应优先选用高导热系数的固井材料。

5.4.6 为查明场地地热资源条件实施的探采结合井，应开展以下测试工作：

- a) 样品采集与测试：对探采结合井非取热段地层按照 1 组/500 m 的间隔进行取心，取热段各地层按照 1 组/300 m 的密度进行取心，各地层取心数量不少于 1 组，取心长度不小于 2 m/组，岩心采取率宜不低于 75%。取心后进行岩心样品的密度、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，近似稳态测温工作宜按 12 h、12 h、12 h、24 h、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 °C 或总测温时间已达 84 h。
- c) 综合测井：探采结合井宜进行全井综合测井，测井项目包括视电阻率、自然电位、自然伽马、声波速度、密度、井径、井斜及固井质量等。

5.5 资源评估

5.5.1 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)计算单个超长重力热管工程地热井年最大取热量。

$$Q_y = 0.15 \cdot s \cdot H \cdot c_r \cdot \rho_r \cdot (T_r - T_0) / 100 \dots\dots\dots(1)$$

式中：

Q_y ——超长重力热管工程地热井单井年最大允许取热量，单位为焦耳(J)；

s ——超长重力热管工程地热井取热影响范围横截面积，按照公式(2)计算，单位为平方米(m²)；

H ——超长重力热管工程地热井取热段热储厚度，单位为米(m)；

c_r ——取热段热储比热容，单位为焦耳每千克摄氏度(J/(kg·°C))；

ρ_r ——取热段热储平均密度，单位为千克每立方米(kg/m³)；

T_r ——热储温度，单位为摄氏度(°C)；

T_0 ——基准温度，热管工质在实际运行工况下的蒸发温度，单位为摄氏度(°C)；

其中，超长重力热管工程地热井取热影响范围横截面积(s)，采用公式(2)计算：

$$s = \pi \cdot R^2 \dots\dots\dots(2)$$

式中：

π ——圆周率，取值为 3.14，单位为无量纲。

R ——超长重力热管井下换热器取热影响半径，该取值应该考虑不同地区不同地层热物性参数条件，参考取值为 30-50，单位为米(m)。取值方法按附录 B 的模型计算获得。

5.5.2 对于取热段有多套热储的超长重力热管工程，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。

5.5.3 地热资源评估报告内容应包括：

- a) 项目概况;
- b) 自然地理与气象条件;
- c) 用能需求及特征;
- d) 勘查工作概况;
- 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) 中深层地热可利用量评价;
- j) 超长重力热管取热能力与热平衡分析;
- k) 地热井布设建议;
- l) 地质环境影响与评价;
- m) 结论与建议。

6 井下取热

6.1 一般要求

- 6.1.1 井下取热应充分考虑地热资源地质勘查与评估、钻井成本等因素。
- 6.1.2 井下取热系统设计应包括管型设计、热管工质设计。
- 6.1.3 超长重力热管的结构型式、连接方式应符合 T/CMIF 278 的相关要求。
- 6.1.4 超长重力热管模块的产品参数、技术要求、性能测试应符合 T/CMIF 278 的相关要求。

6.2 管型设计

- 6.2.1 超长重力热管取热系统的井下部分由绝热段和蒸发段两部分组成。超长重力热管的长度应根据目标取热量通过计算模型初步确定，目标取热量的计算数学模型见附录 B。
- 6.2.2 蒸发段热储最低温度宜高于管内循环工质的蒸发温度，绝热段地层最高温度宜低于管内循环工质蒸发温度。
- 6.2.3 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：

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

式中：

- L_{iso} ——绝热段长度，单位为米(m)；
- T_{con} ——超长重力热管蒸气出口温度，单位为摄氏度(°C)；
- T_{grd} ——浅表/恒温层温度，单位为摄氏度(°C)；
- G_{geo} ——热管蒸发段以内平均地温梯度，单位为摄氏度每米(°C/m)；
- G_{hp} ——超长重力热管内部温度梯度，建议取值 0.0025，单位为摄氏度每米(°C/m)。

- 6.2.4 绝热段的保温性能应符合 T/CMIF 278 要求，以降低热量在超长传输过程的热损失，保障热管传热效率。
- 6.2.5 超长重力热管的外径尺寸应与接箍外径及井孔内径相匹配，热管外壁与井壁环空距离应大于 10 毫米。

6.3 热管工质设计

6.3.1 热管工质选择

- 6.3.1.1 一般工况下，宜选择液氨(NH₃)作为热管工质。
- 6.3.1.2 特殊工况下，可选择二氧化碳(CO₂)、二氟甲烷(CH₂F₂)和水(H₂O)作为热管工质，具体见表 1。

表 1 热管工质适用工况表

工质		NH ₃	CO ₂	CH ₂ F ₂	H ₂ O
工况	热管蒸气出口温度 °C	-5~110	-5~20	-5~60	50~200
	井垂直深度 m	<6000	<2000	<1000	<10000
	热管外径 mm	88.9~244.5	<88.9	88.9~244.5	>244.5

6.3.2 工质注液量计算

热管工质注液质量采用公式(4)进行计算:

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

式中:

m ——热管工质的注液质量, 单位为千克(kg);

ρ_l ——液态工质密度, 单位为千克每立方米(kg/m³);

ρ_v ——气态工质密度, 单位为千克每立方米(kg/m³);

V_l ——液态工质体积, 单位为立方米(m³);

V_v ——气态工质体积, 单位为立方米(m³);

L ——热管总长, 单位为米(m);

L_{pipe} ——热管模块长度, 单位为米(m);

Q ——超长重力热管单井取热功率, 单位为瓦特(W);

Δh ——热管工质气液焓差即工质发生相变所需热量, 单位为焦耳每千克(J/kg);

t_{pipe} ——为热管循环运行时液体工质在每根热管管段中的驻留时间, 通过现场试验测得, 单位为秒(s);

其中, 液态工质体积(V_l)根据公式(5)计算:

$$V_l = V_0 \cdot n \quad (5)$$

式中:

V_0 ——蒸发段热管模块标准充注量, 单位为立方米(m³), 取值根据表 2 确定;

n ——蒸发段热管模块数量, 单位为无量纲。

表 2 蒸发段热管模块标准充注量表

热管外径 mm	88.9	114.7	127.0	139.7	177.8	193.7	219.1	244.5
V_0 10 ⁻³ m ³	13.46	21.30	25.65	30.54	47.75	56.05	70.66	86.95

气态工质体积(V_v)根据公式(6)计算:

$$V_v = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot L - V_l - \frac{L}{2L_{\text{pipe}}} \cdot \frac{Q}{\Delta h \cdot \rho_l} \cdot t_{\text{pipe}} \quad (6)$$

式中:

d ——热管外壳内径, 单位为米(m)。

注: 计算中工质物性参数为设计温度下的饱和物性参数。

6.4 超长重力热管井下换热器安装

6.4.1 准备工作

- 6.4.1.1 应结合钻井记录与综合测井资料，确定绝热段、蒸发段位置，做好排管记录。
- 6.4.1.2 安装前进行重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。
- 6.4.1.3 安装前应校正孔深，并扫孔。
- 6.4.1.4 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。
- 6.4.1.5 安装前应重点检查热管模块管材和丝扣状态，确保热管模块无腐蚀破损，螺纹应符合 T/CMIF 278 标准要求。

6.4.2 现场安装

- 6.4.2.1 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。
- 6.4.2.2 安装应使用液动力矩仪，确保热管模块间气密扣扭矩符合套管紧扣扭矩表要求。
- 6.4.2.3 下入过程应减少热管与井壁间碰撞，防止热管破损。
- 6.4.2.4 不稳定地层热管下入速度应小于 0.15 m/s，普通稳定地层宜小于 0.3 m/s。
- 6.4.2.5 下管过程中如遇到阻力或下入困难，应立刻停止下管并进行处理，必要时起拔井管重新扫孔。
- 6.4.2.6 下管过程应对热管编号、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，按照附录 C 填写热管下管记录表 C.1。

6.4.3 气密性检查

- 6.4.3.1 采用真空度保持测试方法对安装好的超长重力热管井下换热器进行气密性检查。
- 6.4.3.2 采用真空度保持测试应符合以下要求：
 - a) 超长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) 使用真空泵对超长重力热管进行抽真空处理，直至井口绝对压力降至 800 Pa 以下；
 - c) 静置 24 h，观察井口绝压上升幅度，小于等于 50 Pa 为满足气密性要求；
 - 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，则应起拔热管，进行更换。

6.5 热管工质加注与回收

- 6.5.1 热管工质加注前，应对与热管蒸气管路连接的地面系统进行 1.2 倍设计压强条件下的打压及保压测试，确保地面管路及连接处无泄露。
- 6.5.2 热管工质加注过程槽车应水平停放，通过双臂鹤管连接槽车的注液及回气管路。
- 6.5.3 热管工质加注过程中应使用冷却系统将超长重力热管的蒸气压力控制在 1.5 MPa 以内。
- 6.5.4 热管工质加注过程应严密观察槽车液位计变化情况，避免过量注液。
- 6.5.5 热管工质加注前后应分别对槽车进行称重，计算工质实际注入量。
- 6.5.6 热管工质实际注入量与设计注入量误差应控制在 5% 以内，否则应进行补充加注或反排。
- 6.5.7 热管工质回收采用冷凝回收方式，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。

6.6 安全要求

- 6.6.1 超长重力热管外管的抗拉强度和屈服强度应符合 GB/T 19830 要求。
- 6.6.2 超长重力热管安装前应按照 T/CMIF 278 标准对各热管模块进行静液压试验，确保各管段满足所在井深的抗压强度要求。
- 6.6.3 井场施工作业应符合 GB 50194 和 SY 5974 的相关安全规定。
- 6.6.4 热管工质充注回收，应严格遵守所选工质的相关安全操作要求。
- 6.6.5 液氨的储存、使用、装卸应符合所在地区液氨使用的安全生产管理规定，达到 GB 18218-2018 规定的重大危险源的临界量的，应参照《危险化学品重大危险源监督管理暂行规定》的相关要求设置相关安全措施。
- 6.6.6 液氨发生泄露时，按照 HG/T 4686-2014 相关规定处理处置。

7 地面用热

7.1 一般要求

7.1.1 地面用热系统设计包括供热系统、热管蒸气直驱发电系统等的设计。

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

7.1.3 设计前应进行动态负荷计算，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。

7.1.4 地面用热系统选用的管材、循环工质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。

7.2 供热系统设计

7.2.1 设计范围包括井口至热用户间循环工质运行线路上的管路及设备。

7.2.2 系统设计前，应确定超长重力热管取热系统的取热性能及超长重力热管工程在供热负荷中的比例、供热系统流程、终端用户的用热形式及不同工况负荷时的调节、保障手段。

7.2.3 宜采用现场试验的方法确定超长重力热管取热系统的取热性能。对于有多个地热井的项目，应选取具有代表性的地热井开展现场试验，其它地热井可根据现场试验获取的数据用类比的方式确定取热性能。

7.2.4 取热性能测试应满足以下要求：

- a) 测试时被测井应处于热初始状态，即取热测试是超长重力热管井下换热器安装完成后的首次取热活动，或距前次取热活动已经历 3 倍取热时长的热恢复；
- b) 取热性能测试宜连续进行 72 h；
- c) 测试应记录热管出口蒸气饱和温度、冷却水流量、进出口温差等参数，性能评价按照 8.4.4 c) 执行。

7.2.5 有准确可靠的地热地质模型时，可构建超长重力热管数值仿真模型，通过数值仿真获取超长重力热管取热系统的取热性能参数，具体数学模型见附录 B。

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

7.2.7 根据热源条件及用户需求，可采用以下两种供热方式：

- a) 直接供热式：热管取出热能直接经换热器向用户供热；
- b) 热管-热泵耦合式：热管取出热能经热泵提升温度后向用户供热。

7.2.8 超长重力热管地面冷凝器宜采用列管管壳式结构，热管工质走壳程。

7.2.9 热管-热泵耦合式供热，可采用以下两种换热方式：

- a) 热管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升温后将热量输出给用户；
- b) 超长重力热管作为热泵的蒸发器，热管工质经压缩机压缩升温后将热量输出给用户。

7.2.10 地面供热系统热管工质侧的流道设计应满足热管工质液体能够完全依靠重力回流至热管的要求。

7.2.11 供热管网系统、换热器、热泵机组的设计分别按照 CJJ/T 34、GB/T 151、GB/T 41703 执行。

7.3 热管工质蒸气直驱发电系统设计

7.3.1 热管工质蒸气直驱发电系统设计范围包括发电机组选型、热管工质蒸气运行控制设计。

7.3.2 发电机组选型应与超长重力热管取热系统取热性能相匹配，确定取热性能的方法参照 7.2.3、7.2.4。

7.3.3 发电机组设计运行温度 T_e 为超长重力热管直驱发电系统的最佳生产温度，在此温度下整个系统的发电量最大，通过模型计算得出。

7.3.4 发电机组设计蒸气流量 Q_e 按照公式(7)计算：

$$Q_e = 0.75 \cdot Q_{72h} \cdot \left(\frac{T_h - T_e}{T_h - T_{72h}} \right) \dots \dots \dots (7)$$

式中：

T_h ——非取热状态下的热管出口蒸气饱和温度，单位为摄氏度(°C)；

Q_{72h} ——取热性能测试第三天（49 至 72 小时）的平均热管蒸气流量，单位为千克每秒(kg/s)；

T_{72h} ——取热性能测试第三天（49 至 72 小时）的热管出口平均蒸气饱和温度，单位为摄氏度(°C)。

7.3.5 有准确可靠的地热地质模型时，可构建超长重力热管数值仿真模型，通过数值仿真获取 7.3.3、7.3.4 中相关参数，数学模型见附录 B。

7.3.6 超长重力热管作为发电系统的蒸气发生器，热管工质蒸气经透平机组直接驱动电机发电。

7.3.7 热管工质蒸气进入透平机组应保持过热状态，避免夹带液滴造成液击。

7.3.8 热管蒸气出口应设置气液分离器，以分离器入口蒸气干度 85%作为分离器选型依据。

7.3.9 如透平机组对蒸气干度要求较高，可在气液分离器之后设置蒸气过热器。

7.3.10 应在透平机组蒸气入口加装电动/气动调节阀，调节能力为系统设计压力的 150%，确保热管蒸气压力平稳。

7.3.11 发电机组的其他设计参数应符合 GB/T 8117.2、GB/T 14909 相关要求，使用氨工质时电力装置应符合 GB 50058 要求。

7.4 地面用热系统安装

7.4.1 地面用热系统安装与建设应满足 GB 50243、GB 50274、GB 55015 的要求。

7.4.2 压力管道的焊接按照 NB/T 47015 规定执行。

7.4.3 压力管道焊接完成后应按照 GB/T 20801 规定进行探伤检查。

7.4.4 系统设备安装前，应对管道进行干空气通气吹扫，保证管道内干燥、清洁、无杂质。

7.4.5 压力管道及设备施工应符合 HG/T 20275 规定。

7.4.6 系统安装完毕后，应按以下要求进行气密性检查：

a) 在系统内注入干燥清洁的空气或氮气进行打压和保压测试，试验压力不小于设计工况的 1.5 倍；

b) 达到规定压力后，在焊接和法兰连接等部位使用发泡剂进行检测，确保无泄露。

7.4.7 贮氨器上方应设置局部水喷淋系统，水喷淋系统宜选用开式喷头，开式喷头保护面积应按贮氨器占地面积确定。开式喷头的水源可由消防给水系统供给，操作可为手动或电动方式。

7.5 施工安全

7.5.1 施工作业应满足以下安全要求：

a) 施工企业按规定实行安全资格认证，并依法取得安全生产许可证；

b) 施工企业负责人按国家规定经过安全卫生管理资格培训合格；

c) 专职管理人员培训合格，取得上岗资格；

d) 特种作业人员经培训考核取得特种作业人员操作证后持证上岗。

7.5.2 建筑工程施工安全应符合 JGJ 33、JGJ 59 的规定。

7.5.3 电气安装施工安全应符合 GB 50194、JGJ 46 的规定。

7.5.4 有限空间作业安全应符合所在地区的安全生产技术规范要求。

8 运行与评价

8.1 一般要求

8.1.1 超长重力热管工程应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。

8.1.2 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。

8.1.3 示范性 or 代表性超长重力热管工程，宜选取 1 口地下换热井设置沿程温度监测系统，对地层温度进行实时监测。

8.1.4 采用液氨为热管工质的超长重力热管工程应做好安全、环境风险防控，制定专项应急预案，

明确泄漏检测、人员疏散、应急处理等措施，并与当地安全生产、环保部门建立联动机制。

8.2 系统运行

8.2.1 在超长重力热管安装完毕、完成气密性检查和热管工质加注之后，应通过监测比较地下温度和地面冷凝器内的温度和压力，确保超长重力热管性能良好，达到工程预期。

8.2.2 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。

8.2.3 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。

8.2.4 确定好长期运行试验参数后，可开始长期运行测试。

8.2.5 系统运行前应进行全面的安全生产检查，按热泵供暖机组、发电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。

8.3 系统监测

8.3.1 超长重力热管工程监测系统设计时应遵循安全、节能、运行管理方便等原则。

8.3.2 超长重力热管工程应设置热管温度、压力、工质泄漏报警，冷却水循环流量和温度监测系统，建议同时计算绘制实时取热量变化曲线，通过观测是否出现突变以判断系统是否出现问题。

8.3.3 应在便于观察到的位置设置现场监测仪表，对重要参数进行监测，并做好记录，按照附录 D 填写表 D.1。

8.3.4 宜对超长重力热管工程各主要耗能设备进行单独用电计量。

8.3.5 除设置现场监测仪表外，超长重力热管工程的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。

8.3.6 超长重力热管工程地面注液系统及冷凝器等设备应进行防漏监测，采用液氨为热管工质的应配备氨气报警器，电子设备应选择防爆型，并符合 GB 50058 相关规定。

8.4 取（制）热性能评价

8.4.1 超长重力热管工程取（制）热性能的评价指标及其要求应符合以下规定：

- a) 取热性能评价应计算超长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 4.5。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。

8.4.2 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：已安装测试系统的超长重力热管井下取热系统，测试周期与采暖季同步。
- b) 短期测试应符合下列规定：
 - 1) 未安装测试系统的超长重力热管井下取热系统，应在开始供热 15 d 后进行短期测试，测试时间应不小于 24 h；
 - 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。

8.4.3 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。

8.4.4 取（制）热性能系数确定应按下列规定进行：

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) 超长重力热管单井取热功率利用公式(8)计算:

$$Q = C \cdot M \cdot (T_2 - T_1) \dots\dots\dots(8)$$

式中:

- Q ——超长重力热管单井热管取热功率, 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 ——冷凝器进口水温和出口水温, 单位为摄氏度(°C);
 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〕每千克摄氏度(J/(kg·°C))。
d) 蒸发段延米取热功率利用公式(9)计算:

$$q_0 = \frac{Q}{L_{eva}} \dots\dots\dots(9)$$

式中:

- q_0 ——蒸发段延米取热功率, 单位为瓦特每米(W/m);
 L_{eva} ——热管蒸发段的长度, 单位为米(m)。
e) 超长重力热管井下取热系统的制热性能系数利用公式(10)计算:

$$COP_{sys} = \frac{Q_s}{N_s} \dots\dots\dots(10)$$

式中:

- Q_s ——供热系统热源设备的供热量, 单位为千瓦(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 4.5。

8.4.5 常规能源的替代量应按下列规定进行评价:

- a) 供热系统的常规能源替代量 Q_r 应按公式(11)计算:

$$Q_r = Q_t - Q_y \dots\dots\dots(11)$$

式中:

- Q_r ——常规能源替代量, 单位为千克标准煤(kgce);
 Q_t ——传统系统的总能耗, 单位为千克标准煤(kgce);
 Q_y ——供热系统的总能耗, 单位为千克标准煤(kgce)。

- b) 对于采暖系统, 传统系统的总能耗应按公式(12)计算:

$$Q_t = \frac{Q_H}{\eta_t \cdot q} \dots\dots\dots(12)$$

式中:

- Q_t ——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(MJ);
 η_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%。

- c) 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(13)计算:

$$C_s = \frac{D \cdot Q_L}{3.6 \cdot COP_{sys}} \dots\dots\dots(13)$$

式中:

- Q_y ——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_L ——建筑物全年累计热负荷, 单位为兆焦(MJ);
 COP_{sys} ——系统的制热性能系数。

8.5 经济与环境效益评价

8.5.1 系统的年节约费用 C_s 应按公式(14)计算:

$$C_s = P_j \cdot \frac{Q_i \cdot q}{3.6} - C_m \dots\dots\dots(14)$$

式中:

C_s ——系统的年节约费用,单位为元每年(元/年);

Q_i ——常规能源替代量,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;

P_j ——常规能源价格,单位为元每千瓦时(元/kWh);

C_m ——每年运行维护增加费用,单位为元(元),由建设单位委托运行维护部门测算得出。

8.5.2 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,可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_j 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_j 应按公式(15)计算:

$$P_j = P_q / q_r \dots\dots\dots(15)$$

式中:

P_j ——常规能源价格,单位为元每千瓦时(元/kWh);

P_q ——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/Nm³或元/kg);

q_r ——天然气或煤的热值,天然气的 q_r 值取 11 kWh/Nm³,煤的 q_r 值取 8.14 kWh/kg。

8.5.3 根据系统运行替代常规能源量 Q_r , 计算可节约电量及 CO₂、SO₂、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 ₂ 减排量 kg/年	SO ₂ 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_r	3.02 Q_r	0.09 Q_r	0.82 Q_r

附录 A
(资料性)
超长重力热管运行原理

A.1 重力热管运行原理

在一个封闭的真空管体内部注入规定量的液体工质（低沸点工质），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传输至地面换热设备。重力热管运行原理示意图见图 A.1。

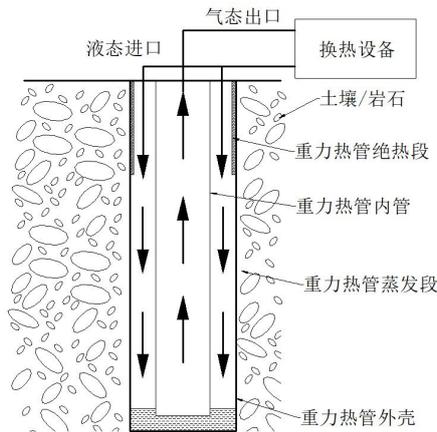


图 A.1 重力热管运行原理示意图

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区别是热管的结构尺寸，见表 A.1。

表 A.1 普通重力热管与超长重力热管常见尺寸对比

参数	普通重力热管	超长重力热管
长度, L	≤ 10 m	通常 ≥ 200 m
直径, D	1 mm~35 mm	100 mm~300 mm
壁厚, δ	≤ 2 mm	≥ 8 mm
长径比, L/D	≤ 400	≥ 1000

附录 B
(资料性)

超长重力热管开采中深层地热能数学模型

热管外岩体区的传热模型只考虑导热，如下式：

$$[n_p \rho^f c_p^f + (1 - n_p) \rho^s c_p^s] \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda_{\text{eff}} \nabla T) \dots \dots \dots (\text{B.1})$$

式中：

n_p ——孔隙率，无单位；

ρ ——密度，单位为千克每立方米(kg/m^3)；

c_p ——比热容，单位为焦耳每千克摄氏度($\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$)；

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($^\circ\text{C}$)；

t ——时间，单位为秒(s)；

λ_{eff} ——岩体的有效导热系数，单位为瓦特每米摄氏度($\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$)；

岩体的有效导热系数计算公式如下：

$$\lambda_{\text{eff}} = n_p \lambda^f + (1 - n_p) \lambda^s \dots \dots \dots (\text{B.2})$$

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：

(i)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；

(ii)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气的流动阻力决定，并遵循经验的管内湍流流动阻力关系；

(iii)热管内流体始终处于相平衡状态；

(iv)液体在超长重力热管顶部的恒温 T_c 下冷凝；

(v)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，而直径的量级不足 1 m，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

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

动量方程

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

能量方程

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

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_q ——相变热源，单位为瓦特(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；

ϕ ——气相体积分数；

P ——压力，单位为帕斯卡(Pa)；

Q_{surf} ：热管外表面的热流密度，单位为瓦特每平方米(W/m^2)。

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

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

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

式中:

e ——热管内表面粗糙度, 单位为米(m);

D ——热管内径, 单位为米(m);

Re ——雷诺数, 无量纲。

由于蒸气质量变化等于冷凝物质量, 蒸气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, 蒸气质量流量和冷凝液质量流量是相反的, 即:

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

式中:

ϕ ——气相体积分数, 无单位。

能量方程可以简化为:

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

由方程组成的方程组(B.3)、(B.4)和(B.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和关系:

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

从控制方程组(由方程(B.3)、(B.4)和(B.8)组成)计算出的 T, p 与饱和 T-p 关系(方程(B.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:

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

式中:

δ_{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 B.3、B.4、B.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(B.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 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。热管内动量控制方程如下:

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

根据假设 ii 流阻项 $R^v(v^v)^2$ 只与蒸气流动相关, R^v 代表蒸气阻力系数可以通过 Swamee and Jain 提出的经验关联式来计算:

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

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: $10^{-8} < e/D < 0.01$, $5000 < Re < 10^8$ 。

由公式(B.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,蒸气的速度从 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(B.12),比例 k 可化简如下:

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

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 $0.1 \text{ m} \leq D \leq 0.5 \text{ m}$,管内的蒸气流动雷诺数满足 $5000 \leq Re \leq 10^8$,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 14811-2008 热管术语
 - [2] GB 18218-2018 危险化学品重大危险源辨识
 - [3] GB 50072-2021 冷库设计标准
 - [4] DB13(J)/T 8429-2021 中深层地热井下换热供热工程技术标准
 - [5] DB11/T 2038-2022 中深层地热供热技术规范 井下换热
 - [6] DB11/T 1014-2021 液氨使用与储存安全技术规范
 - [7] DB13/T 3027-2022 液氨贮存使用单位环境风险防控技术规范
 - [8] DB37/T 1914-2024 液氨存储与装卸作业安全技术规范
 - [9] DB11/T 852-2019 有限空间作业安全技术规范
 - [10] 危险化学品重大危险源监督管理暂行规定（国家安全监管总局令第40号）
-

ICS F15

27.010

关键词：地热能开发 超长重力热管
