



中国科学引文数据库 (CSCD) 来源期刊  
全国中文核心期刊  
美国《化学文摘》(CA) 收录期刊  
俄罗斯《文摘杂志》(AJ) 收录期刊  
EBSCO学术数据库收录期刊 (美)  
AAPG协会期刊出版平台收录期刊 (美)  
中国科技论文统计源期刊  
RCCSE中国核心学术期刊

## 含寄生管和中心管的套管隔热效果影响因素研究

鲍洪志 孙元伟 邹德一 牛成成

### Research of the Influencing Factors on Thermal Insulation Effect of Casing with Parasitic Pipes and Central Tubing

BAO Hongzhi, SUN Yuanwei, ZOU Deyi, NIU Chengcheng

在线阅读 View online: <http://doi.org/10.11911/syztjs.2021048>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 粒子射流冲击破岩效果影响因素试验研究

The Influencing Factors of the Rock Breaking Effect under Particle Water Jet Impacting

石油钻探技术. 2017, 45(2): 40–45 <http://doi.org/10.11911/syztjs.201702007>

#### 南海莺歌海盆地中深层高温高压水平井钻井关键技术

Key Drilling Techniques of HTHP Horizontal Wells in Mid-Deep Strata of the Yinggehai Basin, South China Sea

石油钻探技术. 2020, 48(2): 63–69 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2019112>

#### 中低温地热井钻井完井工艺技术研究与实践

Drilling and Completion Technologies for Geothermal Wells with Medium and Low Temperatures

石油钻探技术. 2017, 45(4): 27–32 <http://doi.org/10.11911/syztjs.201704005>

#### 玛湖油田玛18井区体积压裂对钻井作业干扰问题的探讨

Discussion of Frac Interferences during Volumetric Fracturing in Drilling Operation of Ma 18 Well Area in Mahu Oilfield

石油钻探技术. 2019, 47(1): 20–24 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2019023>

#### 川西海相超深大斜度井井身结构优化及钻井配套技术

Casing Program Optimization and Drilling Matching Technologies for Marine Ultra-Deep Highly Deviated Wells in Western Sichuan

石油钻探技术. 2020, 48(3): 22–28 <http://doi.org/10.11911/syztjs.20200053>

#### 免钻式膨胀管补贴技术研究与现场试验

Research and Field Test of Non-Drilling Plug Expandable Casing Patching Technology

石油钻探技术. 2017, 45(5): 73–77 <http://doi.org/10.11911/syztjs.201705013>



扫码关注公众号，获取更多信息！

◀ 极地冷海 ▶

doi:10.11911/syztjs.2021048

引用格式: 鲍洪志, 孙元伟, 邹德一, 等. 含寄生管和中心管的套管隔热效果影响因素研究 [J]. 石油钻探技术, 2021, 49(3): 42-47.

BAO Hongzhi, SUN Yuanwei, ZOU Deyi, et al. Research of the influencing factors on thermal insulation effect of casing with parasitic pipes and central tubing [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49(3): 42-47.

## 含寄生管和中心管的套管隔热效果影响因素研究

鲍洪志<sup>1</sup>, 孙元伟<sup>2</sup>, 邹德一<sup>2</sup>, 牛成成<sup>1</sup>

(1. 中国石油化工工程技术研发院, 北京 102206; 2. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东青岛 266580)

**摘要:** 在冻土层钻井过程中, 冻土容易受到钻井液影响而融化。针对该问题, 提出使用含寄生管和中心管的套管对冻土层隔热, 并应用含寄生管和中心管的套管的隔热效果试验系统分析了影响该套管隔热效果的因素。试验发现, 含寄生管和中心管的套管其中间部分可以有效抑制径向传热和轴向传热, 使外壁温度稳定在低值, 但是两侧接箍部分隔热性能较差, 提高了其外壁温度, 使得外壁温度按 U 形轴向分布。通过对环境参数和施工参数进行敏感性分析并进行单因素拟合, 发现环境温度、热流体温度和冷流体温度的提高会按线性关系升高套管外壁温度, 提高钻井液排量会按对数关系降低外壁温度。根据多因素拟合方程的系数大小, 可知对外壁温度的影响由大到小依次为环境温度、冷流体温度和热流体温度。研究结果表明, 应用含寄生管和中心管的套管保护冻土层具有很好的可行性, 而采取加长中间套管段、改进接箍结构、维持冷流体低温和排量等工程技术措施可显著提升其保护效果。

**关键词:** 冻土层; 钻井; 寄生管; 中心管; 套管; 隔热; 多元非线性拟合

中图分类号: TE921

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2021)03-0042-06

## Research of the Influencing Factors on Thermal Insulation Effect of Casing with Parasitic Pipes and Central Tubing

BAO Hongzhi<sup>1</sup>, SUN Yuanwei<sup>2</sup>, ZOU Deyi<sup>2</sup>, NIU Chengcheng<sup>1</sup>

(1. Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing, 102206, China; 2. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong, 266580, China)

**Abstract:** In the process of drilling in permafrost, the frozen soil is susceptible to melt under the influence of drilling fluid. To solve this problem, casing with parasitic pipes and central tubing was introduced to insulate the pipe from the permafrost. Then, a set of test system for the thermal insulation of casing with parasitic pipes and central tubing was designed to analyze its performance and influencing factors. The experiment reveals that the central part of the casing can effectively suppress heat transfer in the radial and axial direction and keep the outer wall at a low temperature. However, thermal insulation of the couplings on both sides are poor, which raise the outer wall temperature, resulting in a U-shape distribution of it. In addition, the sensitivity analysis and single-factor fitting of environmental and operational parameters indicate that the temperature rise from the environment and fluids will increase the outer wall temperature linearly, and the increase of drilling fluid displacement will reduce the outer wall temperature following a logarithmic relationship. From the coefficient of the multivariate fitting equation, it is clear that the most influential factor on outer casing wall temperature is the environmental temperature followed by cold fluid and hot fluid temperature. The research results show that using casing with parasitic pipes and central tubing to protect the permafrost is very feasible, and engineering technical measures such as lengthening the intermediate casing section, improving the coupling structure, maintaining low temperature and displacement of cold fluid can significantly improve the protective effect.

**Key words:** permafrost; drilling; parasitic pipe; central tubing; casing; thermal insulation; multivariate nonlinear fitting

北极冻土层油气开发已经成为相关国家和国际各大油气公司关注的焦点<sup>[1-3]</sup>。但是, 在冻土层钻井

存在一大难题——冻土孔隙中存在冰颗粒, 如果钻井液通过井筒传至冻土层的热量过多, 会使冰颗粒融

收稿日期: 2020-11-03; 改回日期: 2021-03-26。

作者简介: 鲍洪志 (1966—), 男, 辽宁盖州人, 1987 年毕业于长春地质学校钻探工程专业, 2006 年毕业于中国石油大学 (华东) 石油工程专业, 教授级高级工程师, 主要从事钻井工艺和技术研究及钻井工程设计工作。E-mail: baohz.sripe@sinopec.com。

通信作者: 孙元伟, 1032834965@qq.com。

基金项目: 国家重点研发计划课题“钻井工艺及井筒工作液关键技术研究”(编号: 2016YFC0303303)资助。

化, 影响冻土层的力学性能, 甚至会导致井眼失稳、冻土融沉和井口沉降等问题。如在俄罗斯西西伯利亚的 Zapolrnoye 气田, 曾在钻井过程中因隔热处理不当引发了冻土层融化, 导致井口下沉达 3 m 之多。因此, 在北极冻土层钻井需要采取有效的隔热措施。

近 20 年来, 国内外对冻土层钻井的研究不断加强, 并取得了一系列技术成果, 但截至目前, 在冻土层钻井隔热保护方面可供采用的技术不多。我国近些年在极地冻土层钻井技术上的突破主要体现在钻井装备及工具方面, 关于隔热的研究不够: 在管道隔热方面, 主要分析了隔热材料和管材的力学性能<sup>[4-8]</sup>, 尚未形成技术; 在井筒控温方面(如防冻型钻井液、低温及温变条件下的井眼稳定等), 只进行了初步研究, 尚处于技术储备阶段<sup>[9-11]</sup>。

基于上述现状, 借鉴注蒸汽井和热采井中已经使用的隔热套管技术, 提出使用一种含寄生管和中心管的套管并在其中使用冷流体换热来进行隔热以防止冻土层融化的工程方法<sup>[12-14]</sup>。为了验证该工程方法的有效性, 中国石油大学(华东)按照其工作原理设计了一套含寄生管和中心管的套管的隔热效果试验系统, 来分析套管外环境温度、中心管内热流体温度以及寄生管内所注入冷流体温度、排量对套管外壁温度的影响; 之后利用试验数据建立了套管外壁温度与各影响因素之间的拟合关系, 分析了各因素对套管外壁温度的影响程度; 在此基础上, 提出了提升该套管保护冻土层性能的改进措施和工程方案, 以期为北极冻土层钻井设计提供技术支撑。

## 1 隔热效果试验系统及试验方法

### 1.1 含寄生管和中心管的套管的工作原理

在极地冻土层钻井过程中, 钻井液在环空返排时会先被深部地层加热, 后向冻土层传热, 引发冻土层分解。含寄生管和中心管的套管在冻土层的工作原理如图 1 所示: 钻井过程中, 中心管是钻头和钻柱的下入通道, 同时也是上返高温钻井液的环空通道; 中心管和真空套管内管之间有一环形空间, 通过寄生注入管向该环形空间注入温度低于钻井液的冷流体, 与中心管内的热流体进行强制对流换热, 冷流体会携带一部分热量从寄生返回管上返离开井筒, 所以整个系统内的温度会显著下降, 达到较好的隔热效果。

### 1.2 隔热效果试验系统的设计

为了模拟含寄生管和中心管的套管的工作方式

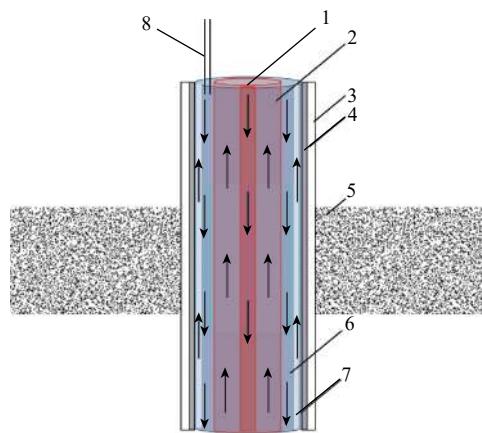


图 1 含寄生管和中心管的套管保护冻土层的工作原理示意

Fig. 1 The principle of casing with parasitic pipes and central tubing to protect permafrost

1.钻柱内的钻井液; 2.中心管环空上返的钻井液;

3.真空套管外管; 4.真空套管内管; 5.冻土层;

6.冷流体; 7.寄生返回管; 8.寄生注入管

并验证其可行性, 按照其工作原理设计了含寄生管和中心管的套管的隔热效果试验系统, 如图 2 所示。含寄生管和中心管的套管其外径为 177.8 mm、长度为 2 100 mm, 中心管内径为 76.0 mm, 寄生管内径为 127.0 mm, 真空度为 50 Pa。因为钻柱和寄生返回管相对于套管真空结构热阻小, 其中的流体流速快, 对于单根套管内的温度分布影响不明显, 因此设计隔热效果试验系统时省去了钻柱和寄生返回管。该试验系统将循环流体控温装置和套管连接起来, 放置在由微电脑控制的模拟恒温环境系统中。其中, 冷流体流动方向为顺时针并流经寄生管(图 2 中标为绿色), 模拟钻井液的热流体流动方向为逆时针并流经中心管(图 2 中标为蓝色)。

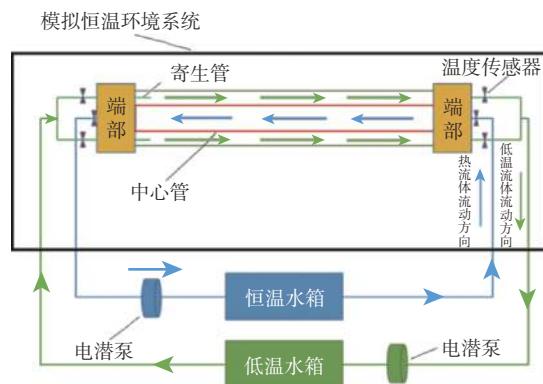


图 2 含寄生管和中心管的套管的隔热效果试验系统工作原理示意

Fig.2 Working principle of the test system for the thermal insulation effect of casing with parasitic pipes and central tubing

### 1.3 试验条件和试验方法

为了获取不同环境温度、不同热流体温度、不同冷流体温度、不同冷流体排量下的套管外壁温度, 将其作为隔热效果的评价指标, 需利用含寄生管和中心管的套管的隔热效果试验系统进行试验。

考虑模拟恒温环境系统、恒温水箱和低温水箱性能许可的范围以及隔膜泵的固定排量限制, 预设环境温度在-20.0~20.0 °C 变化, 预设热流体温度在40.0~70.0 °C 变化, 预设冷流体温度在5.0~35.0 °C 变化, 冷流体排量在2.42~5.38 L/min 变化, 热流体的排量为2.42 L/min。真空隔热套管热阻大, 季节性气温变化对冻土层温度影响小; 同时, 由于钻井液循环时间较短, 井周冻土层温度升高幅度不大。基于以上认识, 试验过程中将环境温度设置为恒温。

应在试验前向真空隔热套管内注入恒温热流体并循环一定时间, 测量管体外壁的温度, 待管体外壁温度稳定之后开始试验。为满足传热的相似原理, 试验所用大部分管道的尺寸参考现场工况。不过, 中心管中模拟钻井液的热流体为热水, 流速较慢, 会导致中心管中流体出入口过渡区长度、特征数以及对流换热系数与现场工况有所不同; 同时, 试验中的环境介质为空气, 会产生额外的自然对流换热系数。但由传热学知识可知<sup>[15]</sup>, 在较短的钻井液循环时间内, 上述情况引起的热阻差异相对于套管真空结构的高热阻来说很小, 因此它们对径向传热的影响可忽略。

## 2 外壁温度的分布特征和影响因素

### 2.1 不同排量下的试验结果分析

当预设环境温度为20.0 °C、预设热流体温度为40 °C、预设冷流体温度为25 °C时, 试验得出了冷流体排量分别为2.42、4.86和5.38 L/min时套管外壁温度的轴向分布, 如图3所示。

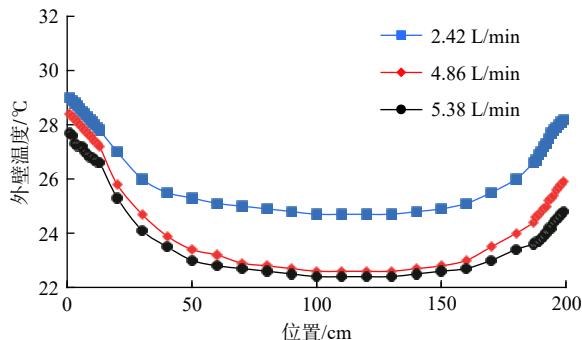


图3 不同冷流体排量下套管外壁温度的轴向分布

Fig.3 Axial distribution of outer casing wall temperatures under different cold fluid displacements

由图3可知, 冷流体排量分别为2.42, 4.86和5.38 L/min时, 套管中间段外壁的温度分别为24.7, 22.6和22.4 °C, 说明在其他条件一致的情况下, 冷流体排量越大, 套管中间段外壁的温度越低。

从图3也可以看出, 套管外壁温度轴向整体呈U形分布, 套管外壁温度沿轴向可被分为2段: 1)两侧接箍位置处的温度升高段, 段内缺少套管真空结构的阻隔, 同时套管接箍内的焊接结构会绕过冷流体在热流体和外壁之间形成固体传热通道; 2)中间段, 由于套管真空结构和冷流体阻止径向传热, 段内温度较低, 与环境温度十分接近。中间段的温度非常平稳, 没有明显的梯度, 说明中间段内外壁轴向传热不明显, 温度受两侧的影响小。因此, 现场使用结构相同但长度更长的含寄生管和中心管的套管; 或对含寄生管和中心管的套管进行改进, 使真空结构深入到接箍部分, 可以更好地保护冻土层。

从图3还可以看出, 冷流体排量越大, 套管中间段外壁的温度越低。这是因为, 高排量下冷流体在管内的循环时间更短, 收到来自高温钻井液的热量更少。但是, 对于长达几百米的井身结构, 高排量会使寄生管的对流换热系数增大, 使冷流体更快地吸收热量而升温, 反而不利于冻土层控温。

### 2.2 不同预设热流体温度下的试验结果分析

当预设环境温度为-20 °C、预设冷流体温度为35 °C、冷流体排量为2.42 L/min时, 试验得出了预设热流体温度分别为40, 50, 60 和70 °C时套管外壁温度的轴向分布, 如图4所示。

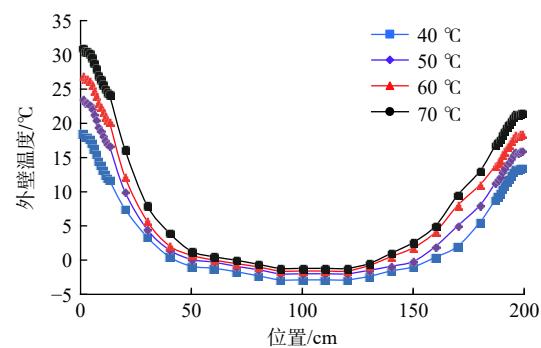


图4 不同预设热流体温度下套管外壁温度的轴向分布

Fig.4 Axial distribution of outer casing wall temperatures at different preset hot fluid temperatures

对比图3和图4发现, 在不同的预设条件下套管外壁温度的轴向分布形态相似, 中间段外壁的温度始终更接近于预设环境温度而较低, 接箍位置处容易受热流体影响温度升高。对比图4中各条曲线可知, 预设热流体温度升高会引起外壁温度升高,

但升高幅度不大。同时,由图4可知,热流体温度的变化仅仅改变了套管两侧接箍处的温度,中间位置的温度没有明显改变,这说明高温钻井液在端部的传热效应会被限制在接箍内。

### 2.3 不同预设冷流体温度下的试验结果分析

当预设环境温度为-5 °C、预设热流体温度为40 °C、冷流体排量为2.42 L/min时,试验得出了预设冷流体温度分别为5, 15, 25和35 °C时套管外壁温度的轴向分布,如图5所示。

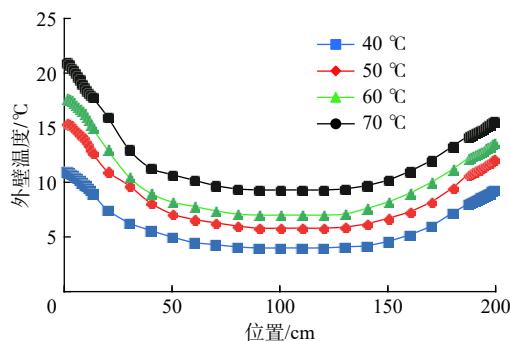


图5 不同预设冷流体温度下套管外壁温度的轴向分布

Fig.5 Axial distribution of outer casing wall temperatures at different preset cold fluid temperatures

从图5可以看出,冷流体温度降低会引起外壁温度整体降低,且降低幅度较大。分析认为,冷流体显著影响套管的整体温度,是通过影响径向传热实现的。应用含寄生管和中心管套管保护冻土层时,降低冷流体温度是一种有效的办法。

## 3 套管外壁温度与影响因素的拟合分析

选取环境温度、热流体温度、冷流体温度、冷流体排量等4个影响含寄生管和中心管的套管隔热效果的因素进行试验(套管的隔热效果通过中间端外壁温度反映),基于试验结果建立了套管外壁温度与影响因素的拟合关系。为了精准评价各施工参数的影响,先分析单一变量对套管外壁温度的影响程度,再分析多因素对其的影响程度。

### 3.1 套管外壁温度与环境温度的拟合分析

当预设热流体温度为40 °C、预设冷流体温度为20 °C、冷流体排量为2.42 L/min时,试验得出实际环境温度分别为-18.3, -8.0, 0.8和8.0 °C时套管中间段外壁温度随实际环境温度的变化规律,如图6所示。

由图6可知,套管中间段外壁温度与实际环境温度近似呈线性关系。经过拟合,可得该条件下套

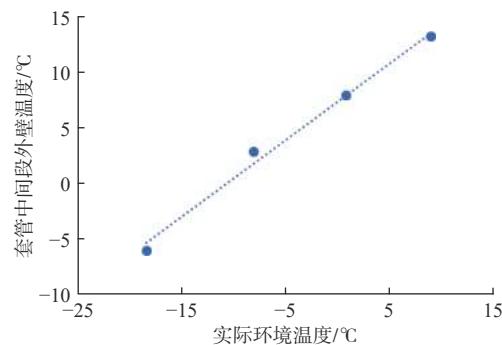


图6 环境温度对套管中间段外壁温度的影响

Fig.6 Effect of environmental temperature on outer casing wall temperature in the intermediate casing section

管中间段外壁温度与实际环境温度的定量关系式:

$$t_{ow} = 0.6933t_a + 7.3599 \quad (1)$$

式中: $t_{ow}$ 为套管中间段外壁温度, °C;  $t_a$ 为实际环境温度, °C。

### 3.2 套管外壁温度与热流体温度的拟合分析

当预设环境温度为-20 °C、预设冷流体温度为35 °C、冷流体排量为2.42 L/min时,试验得出实际热流体温度分别为31.4, 36.6, 44.9和50.1 °C时套管中间段外壁温度随实际热流体温度的变化规律,如图7所示。

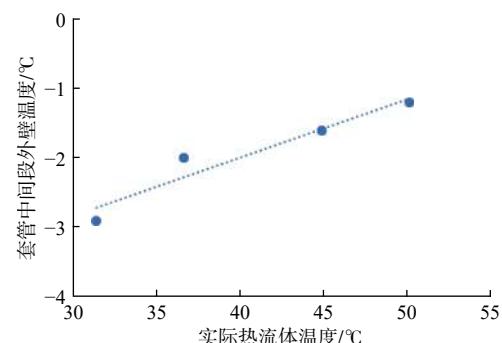


图7 热流体温度对套管中间段外壁温度的影响

Fig.7 Effect of hot fluid temperature on outer casing wall temperature in the intermediate casing section

由图7可知,套管中间段外壁温度与实际热流体温度呈线性相关。经过拟合,可得该条件下套管中间段外壁温度与实际热流体温度的定量关系式:

$$t_{ow} = 0.0842t_{hf} - 5.3528 \quad (2)$$

式中: $t_{hf}$ 为实际热流体温度, °C。

### 3.3 套管外壁温度与冷流体温度的拟合分析

当预设环境温度为-5.0 °C、预设热流体温度为40.0 °C、冷流体排量为2.42 L/min时,试验得出实际冷流体温度分别为7.4, 15.8, 25.0和30.3 °C时套管

中间段外壁温度随实际冷流体温度的变化规律, 如图 8 所示。

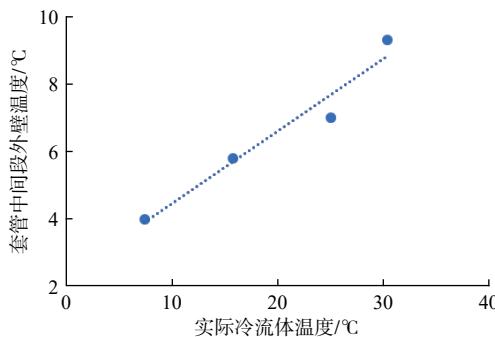


图 8 冷流体温度对套管中间段外壁温度的影响

Fig.8 Effect of cold fluid temperature on outer casing wall temperature in the intermediate casing section

由图 8 可知, 套管中间段外壁温度与实际冷流体温度呈线性相关。经过拟合, 可得该条件下中间段外壁温度与实际冷流体温度的定量关系式:

$$t_{ow} = 0.2143 t_{lf} + 2.3222 \quad (3)$$

式中:  $t_{lf}$  为实际冷流体温度,  $^{\circ}\text{C}$ 。

式(3)的拟合关系表明, 降低冷流体温度可以显著降低套管中间段外壁温度。结合章节 2.3 中的结论, 建议工程实践中尽可能降低冷流体温度。

#### 3.4 套管外壁温度与冷流体排量的拟合分析

当预设环境温度为  $20.0\ ^{\circ}\text{C}$ 、预设冷流体温度为  $25.0\ ^{\circ}\text{C}$ , 而预设热流体温度分别为  $40.0$  和  $60.0\ ^{\circ}\text{C}$  时, 套管中间段外壁温度随冷流体排量的变化规律如图 9 所示。

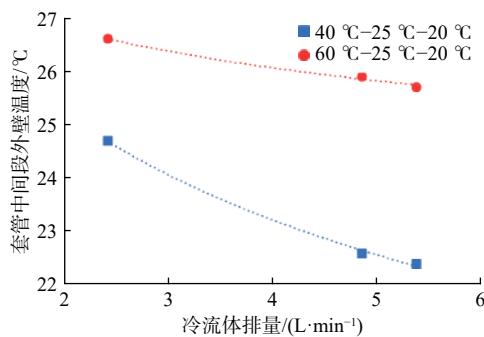


图 9 冷流体排量对套管中间段外壁温度的影响

Fig.9 Effect of cold fluid displacement on outer casing wall temperature in the intermediate casing section

由图 9 可知, 套管中间段外壁温度与冷流体排量之间不是简单的线性关系。经过拟合, 可得预设热流体温度  $40.0\ ^{\circ}\text{C}$  时中间段外壁温度与冷流体排量的定量关系式:

$$t_{ow} = -2.928 \ln Q + 27.281 \quad (4)$$

式中:  $Q$  为冷流体排量,  $\text{L}/\text{min}$ 。

同样地, 可得预设热流体温度为  $60.0\ ^{\circ}\text{C}$  时中间段外壁温度与冷流体排量的定量关系式:

$$t_{ow} = -1.082 \ln Q + 27.562 \quad (5)$$

通过式(4)和式(5)的拟合关系发现, 增大冷流体排量可以更好地抑制中间段外壁温度升高, 但这一效应会随着排量增大而逐渐减弱。因此, 在现场应综合考虑地面机泵的工作特性和循环压耗的情况下维持合理的冷流体排量。

#### 3.5 套管外壁温度多因素拟合模型

环境温度、热流体温度、冷流体温度、冷流体排量与套管中间段外壁温度的关系都可以近似用线性关系或对数关系表示。在此基础上, 利用 1stOpt 数学优化分析软件中的通用全局优化算法对试验数据进行多元非线性拟合, 将上述 4 因素结合起来, 得到了套管中间段外壁温度与环境温度、循环流体温度、冷流体温度和冷流体排量的关系式:

$$t_{ow} = 0.6869 t_a + 0.0551 t_{hf} + 0.1636 t_{lf} - 0.6804 \ln Q + 4.3455 \quad (6)$$

式(6)的决定系数  $R^2$  超过 0.99, 说明拟合得到的关系式具有较高的精度。由式(6)的系数可知, 对套管中间段外壁温度的影响程度从大至小依次为环境温度、冷流体温度和热流体温度。环境温度影响程度较大的原因是, 自然对流的热阻相对于真空套管外管的热阻很小, 说明真空套管外管的确提供了良好的隔热效果; 热流体温度影响程度较小的原因是, 热流体的传热过程同时受到冷流体对流换热和真空套管外管的阻隔, 这验证了含寄生管和中心管的套管保护冻土层的工作原理。

## 4 结论与建议

1) 含寄生管和中心管的套管的外壁温度沿轴向呈 U 形分布。真空结构和冷流体循环可以有效抑制径向传热和轴向传热, 降低中间段温度。该套管两侧接箍部分缺乏真空结构阻隔, 外壁温度较高。现场使用该类套管时可以对其进行改进, 使用较长的含寄生管和中心管的套管或在接箍部分使用真空结构, 以有效提升其隔热性能。

2) 环境温度、热流体温度、冷流体温度、冷流体排量与含寄生管和中心管的套管中间段外壁温度满足线性或对数关系。通过多因素拟合模型, 发现对套管中间段外壁温度的影响程度从大至小依次为环境温度、冷流体温度和热流体温度。根据拟合结

果,提出了尽可能地降低冷流体温度并且合理地维持冷流体排量的冻土层保护措施。

3)室内试验和数据拟合提供了含寄生管和中心管的套管保护冻土层的理论依据和工程建议。为了更好地将含寄生管和中心管的套管应用于极地冻土层钻井中,建议进一步开展现场试验。

## 参 考 文 献

### References

- [1] EMBRY A F. Geological and geophysical evidence in support of the hypothesis of anticlockwise rotation of northern Alaska[J]. *Marine Geology*, 1990, 93: 317–329.
- [2] DRACHEV S S, SAVOSTIN L A, GROSHEV V G, et al. Structure and geology of the continental shelf of the Laptev Sea, Eastern Russian Arctic[J]. *Tectonophysics*, 1998, 298(4): 357–393.
- [3] IVANOVA N M, SAKOULINA T S, ROSLOV Y V. Deep seismic investigation across the Barents-Kara region and Novozemelskiy Fold Belt (Arctic Shelf)[J]. *Tectonophysics*, 2006, 420(1/2): 123–140.
- [4] 马巍,王大雁.中国冻土力学研究50 a回顾与展望[J].岩土工程学报,2012,34(4):625–640.  
MA Wei, WANG Dayan. Studies on frozen soil mechanics in China in past 50 years and their prospect[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 34(4): 625–640.
- [5] 杨进,路保平.极地冷海钻井技术挑战及关键技术[J].石油钻探技术,2017,45(5):1–7.  
YANG Jin, LU Baoping. The challenges and key technologies of drilling in the cold water area of the Arctic[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2017, 45(5): 1–7.
- [6] 苏广兰,殷凤仕,谢甲伟,等.隔热油管外管断裂失效分析[J].热加工工艺,2020,49(10):156–158,161.  
SU Guanglan, YIN Fengshi, XIE Jiawei, et al. Fracture failure analysis of insulated tubing outer pipe[J]. *Hot Working Technology*, 2020, 49(10): 156–158, 161.
- [7] 荣雁.新型绝热材料在稠油注蒸汽管线保温中的应用[J].材料导报,2020,34(增刊1):173–177.  
RONG Yan. Application of new thermal insulation material in thermal insulation of heavy oil steam injection pipeline[J]. *Materials Reports*, 2020, 34(supplement 1): 173–177.
- [8] 徐超,张兆,刘鹏,等.输油管道保温技术及应用研究进展[J].中国塑料,2019,33(11):99–111.
- [9] XU Chao, ZHANG Zhao, LIU Peng, et al. Research progress in technology of oil pipeline insulation and its applications[J]. *China Plastics*, 2019, 33(11): 99–111.
- [10] 刘俊,蔡皖龙,王沣浩,等.深层地源热泵系统实验研究及管井结构优化[J].工程热物理学报,2019,40(9):2143–2150.  
LIU Jun, CAI Wanlong, WANG Fenghao, et al. Experimental study and tube structure optimization of deep borehole ground source heat pump[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2019, 40(9): 2143–2150.
- [11] 冉运敏,卜宪标.保温对地热单井换热性能的影响分析[J].化工学报,2019,70(11):4191–4198.  
RAN Yunmin, BU Xianbiao. Influence analysis of insulation on performance of single well geothermal heating system[J]. *CIESC Journal*, 2019, 70(11): 4191–4198.
- [12] LI Yang, CHENG Yuanfang, YAN Chuanliang, et al. Simulating the effect of frozen soil thaw on wellhead stability during oil and gas drilling operations in arctic waters[J]. *Journal of Cold Regions Engineering*, 2020, 34(4): 04020026.
- [13] 陈会娟,李明忠,狄勤丰,等.多点注汽水平井井筒出流规律数值模拟[J].*石油学报*,2017,38(6):696–704.  
CHEN Huijuan, LI Mingzhong, DI Qinfeng, et al. Numerical simulation of the outflow performance for horizontal wells with multiple steam injection valves[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2017, 38(6): 696–704.
- [14] 李朋,张艳玉,孙晓飞,等.稠油油藏双管水平井注汽井筒参数预测新模型[J].*特种油气藏*,2019,26(4):85–90.  
LI Peng, ZHANG Yanyu, SUN Xiaofei, et al. A new wellbore parameter prediction model for dual-tube horizontal well steam injection in heavy oil reservoir[J]. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 2019, 26(4): 85–90.
- [15] 倪学锋,程林松,李春兰,等.注蒸汽井井筒内参数计算新模型[J].*计算物理*,2005,22(3):251–255.  
NI Xuefeng, CHENG Linsong, LI Chunlan, et al. A new model for the steam properties in steam injection wells[J]. *Chinese Journal of Computational Physics*, 2005, 22(3): 251–255.
- [16] 凯斯W M,克拉福德M E,威甘德B.对流传热与传质[M].4版.赵镇南,译.北京:高等教育出版社,2007:69–70.  
KAYS W M, CRAWFORD M E, WEIGAND B. Convective heat and mass transfer[M]. 4th ed. Translated by ZHAO Zhennan. Beijing: Higher Education Press, 2007: 69–70.

[编辑 令文学]