

文章编号:0253-9993(2013)07-1143-06

# 液氮冻结管内沸腾段分布特征的试验研究

石荣剑<sup>1,2</sup>,岳丰田<sup>1,2</sup>,张 勇<sup>1,2</sup>,陆 路<sup>1,2</sup>

(1. 中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室,江苏 徐州 221008;2. 中国矿业大学 力学与建筑工程学院,江苏 徐州 221116)

**摘 要:**为获得液氮冻结管内沸腾段的分布特征,采用在供液管上开孔的冻结管结构,进行了现场冻结试验,通过布置在冻结管内的测温管,测试了液氮冻结过程中冻结管内的温度,获得了冻结管内沸腾段的分布特征,得出以下基本结论:采用供液管上开孔的冻结管结构,冻结管内出现液氮沸腾状态时,冻结管出口氮气温度较传统液氮冻结的出口温度低。随着液氮灌注量的增加,在供液管开孔段上部位置首先出现液氮沸腾段,并逐渐向下延伸,直至下部冻结管全部进入沸腾段,而上部未开孔的范围内较难获得液氮沸腾状态。由于不同位置液氮气化量的差异,造成液氮沸腾段内形成的冻结壁均匀性较差。研究结果表明,调节供液管上的开孔范围和液氮供应量,可以有效控制冻结管内沸腾段分布范围,提高液氮利用效率,发挥液氮快速冻结的优势。

**关键词:**液氮冻结;液氮沸腾段;冻结管结构;温度分布;原型试验

**中图分类号:**TD265.3 **文献标志码:**A

## Experimental study on the distribution of boiling sections in liquid nitrogen freezing pipe

SHI Rong-jian<sup>1,2</sup>, YUE Feng-tian<sup>1,2</sup>, ZHANG Yong<sup>1,2</sup>, LU Lu<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China; 2. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** In order to obtain distribution characteristics of liquid nitrogen boiling sections in freezing pipe, an in-situ liquid nitrogen freezing experiment was carried out in this study. There are opened holes on the liquid nitrogen supplying tube. The temperature and distribution of liquid nitrogen boiling sections can be obtained through the temperature measuring tube installed inside the freezing pipe. The study shows that firstly, the export temperature of the freezing pipe with opening-holes on supplying tube is lower than that of traditional pipe when liquid nitrogen boiling sections appear in the freezing pipe. Secondly, with the increase of liquid nitrogen perfusion, liquid nitrogen boiling sections appear initially on the top of opening-holes supply pipe, and gradually extend down the pipe. It is difficult to obtain the boiling situation on the sections with no opened-holes in the upper freezing pipe. Thirdly, the frozen wall is non-uniform because of the amount difference of liquid nitrogen gasification in different positions. The test results show that the adjustment on the open-holes sections of the supply pipe and the amount of liquid nitrogen supply can effectively determine the distribution characteristics of the liquid nitrogen boiling sections. The adjustment of liquid nitrogen boiling sections, which may improve the efficiency in liquid nitrogen usage, can enhance the rapid freezing.

**Key words:** liquid nitrogen freezing; liquid nitrogen boiling section; freezing pipe structure; temperature distribution; prototype experiment

液氮人工冻结是液氮在冻结管内直接气化,利用液氮的气化潜热和温升显热实现制冷,吸收地层中的

收稿日期:2012-07-04 责任编辑:常 琛

基金项目:国家自然科学基金面上资助项目(41171065);上海市科学技术委员会科研计划资助项目(10231200400)

作者简介:石荣剑(1975—),男,江苏徐州人,讲师,博士研究生。Tel:0516-83590666, E-mail: rjshi@cumt.edu.cn

热量,实现土层快速冻结的人工冻结技术,属于物态变化的制冷范畴<sup>[1-2]</sup>。液氮冻结具有系统简单、冻结温度低、冻结速度快、形成的冻土强度高等特点<sup>[2]</sup>,常应用于施工工期要求紧张的冻结施工中,尤其在地质条件复杂或是工程抢险中,液氮冻结更能发挥其快速冻结的优势<sup>[3-8]</sup>。

液氮制冷过程中,液氮吸热蒸发完全转化为气态,吸收的热量称为液氮的气化潜热<sup>[2]</sup>。而完全汽化后,氮气在冻结管内依然靠其自身温度变化吸收的热量称为氮气的显热。由于氮气的比热容较小,液氮潜热起主要制冷作用,且潜热是伴随相变产生的。液氮潜热释放速度快、过程剧烈,而自身温度改变吸收的热量受温度梯度以及导热系数等因素影响,其冷量释放较缓慢,液氮冻结温度较低的原因主要是由于潜热剧烈释放造成的。冻结过程中,应使土体的冻结段处于液氮的沸腾区,以充分发挥液氮的冻结效果。

对于液氮沸腾状态的研究,目前多集中于航天、电子工业、超导磁体和超导电缆冷却及低温生物医疗等领域<sup>[9-13]</sup>。王斯民通过数值模拟研究,修正了竖直圆管中的气泡参量模型,确定了壁面热流密度的拆分方法,构建了液氮的过冷沸腾计算模型<sup>[10]</sup>;何鸿辉基于气液两相流理论,建立垂直上升管内液氮气液两相流动的一维均相流模型,并通过数值模拟获得了重力自循环封闭系统内液氮流动的流体动力特性<sup>[11]</sup>。李祥东通过研究建立了垂直圆管内液氮流动沸腾的理论模型,发现两相流参数分布的不均匀性对液氮流动沸腾过程中的热质传输特性有重要影响<sup>[12]</sup>。孙淑凤等对狭缝通道内液氮受迫流动沸腾换热的情况进行了试验研究,获得了通道换热效果的影响因素<sup>[13]</sup>。这些研究主要针对封闭循环制冷系统中微通道中的液氮状态进行的,其通道尺寸多处于 0~1 mm,一般不超过 10 mm<sup>[10-13]</sup>。

应用于岩土工程中的液氮冻结,使用的冻结管直径较大(一般均大于 89 mm)<sup>[3-8]</sup>,且属于开放的冻结系统,与狭小封闭空间内的液氮沸腾状态差别较大。而液氮冻结管内温度非常低(液氮在常压时的气化温度为 $-195.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[8]</sup>),气化后氮气体积膨胀 643 倍,导致冻结管内气体压力大,低温气体的快速流动容易造成布置在冻结管内的传感器和绝缘导线的损坏,很难测试到冻结管内沸腾段的分布规律,一般多采用冻结管外壁的温度来推测冻结管内沸腾段的分布情况。如岳丰田等在深度达到 130 m 的冻结井筒水文孔单管液氮冻结施工中,控制氮气出口温度为 $-80\sim-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,测得 60 m 深度处冻结管外壁的温度为 $-160\sim-185\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[7]</sup>。翁家杰在液氮冻结的工业性实

验中,首次测得冻结管壁的温度可达到 $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[8]</sup>。熊旺、尚逸飞进行了不同供液管结构形式下的液氮冻结实验,测试了冻结管壁的温度差别,提出了冻结管壁温度均匀的处理措施<sup>[14-15]</sup>,林元楠等通过液氮人工冻结地基模型实验,研究了液氮冻结管与周围土体的换热以及液氮耗量情况,获得液氮沸腾段为最佳换热区,且其长度与液氮输入强度成正比的结论<sup>[16-17]</sup>。以上研究中,一般认为冻结管壁温度在 $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右时,冻结管内相应位置处于沸腾状态。而冻结管壁温度受到地层、液氮灌注状况等施工参数的影响大,通过管壁温度推测液氮的沸腾状态,易产生较大误差。本文通过现场试验,通过测试冻结管内的温度,获得液氮冻结过程中冻结管内沸腾段的分布特征及主要影响因素,可供类似研究参考。

## 1 试验基本情况

利用某斜井帷幕冻结施工的冻结孔进行现场冻结试验,有效冻结深度范围为 15~30 m,其中碎石层所在的 20.6~25.3 m 为控制冻结段。施工范围内地层的地质资料见表 1。

表 1 地层的地质资料

Table 1 Geological data of freezing stratum

序号	地层性质	地层厚度/m	累计深度/m
1	黏土	1.0	1.0
2	粉砂	5.6	6.6
3	粉土	14.0	20.6
4	碎石	4.7	25.3
5	泥岩	4.3	29.6

冻结管选用  $\phi 133\text{ mm}\times 5\text{ mm}$  的无缝钢管,深度为 30.5 m;供液管选用  $\phi 32\text{ mm}\times 2.5\text{ mm}$  无缝钢管,深度为 29 m,在深度 20~25 m 的控制冻结段范围内,间隔 500 mm 开 8 mm 对穿孔;回气管采用  $\phi 50\text{ mm}\times 3\text{ mm}$  无缝钢管,深度 15 m。即有效冻结范围分为 3 段:供液管上部未开孔段(深度 15~20 m)、供液管中部开孔段(深度 20~25 m)及供液管下部未开孔段(深度 25~30 m)。

冻结系统由冻结管、液氮分配器、不锈钢软管和液氮运输槽车等组成,冻结时,根据管口排出氮气温度,通过低温阀门控制液氮供应量,液氮气化后通过排气管直接排入大气中。

为了测试冻结过程中冻结管内的温度分布,在冻结管内布置一封闭的  $\phi 32\text{ mm}\times 2.5\text{ mm}$  无缝钢管作为测温管,深度同冻结深度。测温管的温度测点按控制冻结段内(深度 20~25.5 m)间隔 500 mm,其余冻

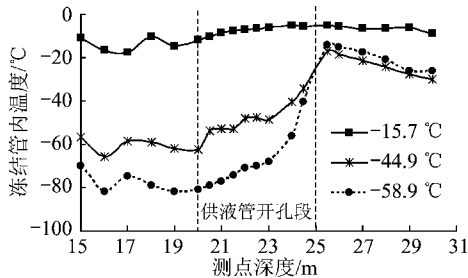
结范围间隔 1 000 mm 的原则进行布置。温度传感器选用铜—康铜热电偶,其采集最低温度可达到  $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[8]</sup>。同时在冻结管的出口位置敷设温度测点,监测排出氮气的温度,作为控制和调节液氮灌入量的依据。

## 2 试验结果分析

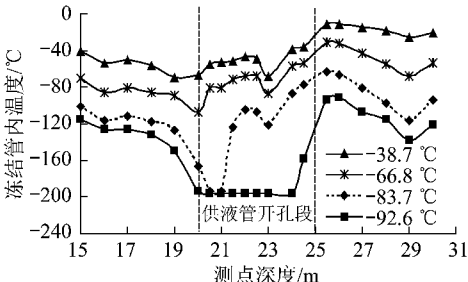
由于液氮完全气化后,形成的气体温度明显升高,可以认为冻结管内的温度低于  $-190\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,冻结管内的液氮处于沸腾状态。通过监测冻结管内的温度,来反映冻结管内液氮沸腾段的分布特征。

### 2.1 灌入气态氮时冻结管内温度分布

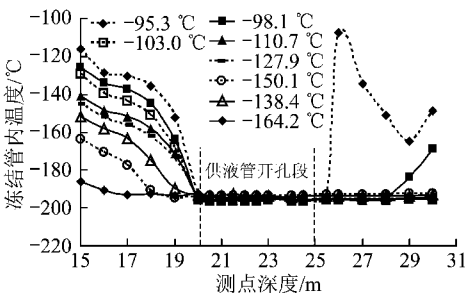
冻结开始时,首先向冻结管内充入少量低温氮气,对冻结系统进行预冷。经过一段时间预冷后,再逐渐加大氮气灌入量,在出口温度分别为  $-15.7$ 、 $-44.9$ 、 $-58.9\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,冻结管内的温度分布如图 1(a) 所示。



(a) 灌入氮气预冷阶段



(b) 初始灌入液氮阶段



(c) 加大液氮灌入量阶段

图1 不同出口温度时冻结管内温度分布

Fig. 1 Temperature distribution in freezing-pipe at different export temperature

从图 1(a) 可以看出,初始预冷阶段灌入冻结管的氮气量较少,通过供液管开孔扩散到冻结管内后迅

速升高到较高的温度,此时冻结管内的氮气温度与周围地层温度的差别较小,两者之间的热交换不剧烈,所以冻结管内的氮气温度较均匀。而排气管的设置,减小了深度 15 m 以上范围氮气与周围地层的热交换,冻结管内氮气温度与出口处氮气温度相差不大。

增加氮气的灌入量,可以明显降低冻结管内氮气的温度。较低温度的氮气首先从供液管开孔段的上部喷出,随着灌入氮气量的逐渐增加,喷出低温氮气的开孔位置逐渐下移。氮气进入冻结管后,沿冻结管向上流动,所以从供液管开孔喷出的液氮随着上升的氮气进入冻结管上部未开孔段(深度 15 ~ 20 m),使该段冻结管内温度降低。而通过供液管末端进入冻结管底部的氮气量较小,冻结管内下部未开孔段的温度较高。

继续增加氮气的灌入量,可以进一步降低冻结管内的温度。由于灌入氮气量增加,供液管内的氮气压力增大,从供液管中部开孔处喷出的氮气量增加,进入底部的氮气量有少许减少,造成底部未开孔段的氮气温度有少许升高。

向冻结管内仅灌入氮气时,冻结管内的温度均高于  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,冻结管内不出现液氮沸腾段,仅靠氮气温度升高来吸收周围地层热量,冻结效果较差。

### 2.2 灌入液氮时冻结管内的温度分布

冻结系统预冷结束后,向冻结系统内灌入液氮,进行正式冻结。考虑到冻结系统的预冷,开始时控制向冻结管内灌入的液氮量,随着冻结进行逐渐加大液氮的灌注量。灌注液氮后,不同出气口温度情况下,冻结管内的温度分布如图 1(b) 所示。

当灌入冻结管内的液氮量较少时,液氮进入供液管后即气化为氮气后从供液管喷出进入冻结管,冻结管内的温度较高,如出口氮气温度在  $-38.7$  和  $-66.8\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,冻结管内的温度分布规律与图 1(a) 中相应的出口温度时基本相似。

加大液氮灌入量后,当出口氮气温度达到  $-83.7\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,从供液管开孔段的上部开始喷出液氮,在冻结管内出现气液混合状态,即出现液氮的沸腾段。冻结管内初始液氮沸腾段出现的位置位于深度 20.5 和 21 m 范围,其原因是液氮优先从供液管上部开孔喷出,而最上部深度为 20 m 处开孔喷出的液氮由于周围温度较高,气化速度快,未出现液氮沸腾段。当出口氮气温度达到  $-92.6\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,供液管开孔段范围内冻结管内的温度均低于  $-190\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,整个开孔范围内的冻结管均处于液氮沸腾段。所以要保证控制冻结段的冻结效果,使该范围内的冻结管处于沸腾状态,应保证氮气出口温度低于  $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。这与传统液氮



冻结中出口温度控制在 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,液氮利用效率较高的结论不一致,其原因是在供液管不开孔的传统冻结管结构中,液氮从底部上升的过程中逐渐气化,液氮气化的路径长,而供液管开孔后,从供液管上部开孔中喷出的液氮,随着氮气向上流动,到达出口气化的路径较短,温度升高幅度少,所以两者出口温度差别较大。

由于从供液管末端流入冻结管底部的液氮量较少,进入冻结管底部的液氮全部气化后上升,所以下部未开孔段冻结管内温度较高。受到冻结管底部上升氮气气流的影响,供液管最下部的开孔位置(深度 $25\text{ m}$ 处)未出现液氮沸腾状态。

### 2.3 增加液氮灌注量时冻结管内温度分布

为了测试不同液氮灌注量情况下,冻结管内液氮沸腾段的分布特征,继续增加液氮灌注量,不同出口氮气温度时,冻结管内温度分布如图1(c)所示。

随着供液管内液氮量增加,进入冻结管底部的液氮量增多,同时从供液管中部开孔段喷出较多的液氮,在重力的作用下向下流动,也会进入冻结管下部未开孔段,所以在出口温度为 $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右时,下部未开孔段也进入液氮沸腾状态。从供液管开孔处喷出的液氮,随气体流动沿冻结管上升的量较小,冻结管出口氮气温度在 $-130\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,冻结管上部未开孔段未出现液氮沸腾状态,但氮气温度明显降低。随着液氮量的进一步增加,气化后氮气流动压力和速度的提高,携带未气化的液氮向上移动,冻结管内液氮沸腾段的范围逐渐向上扩展,当出口氮气温度达到 $-164.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,有效冻结段内冻结管几乎全部处于液氮沸腾状态。在液氮沸腾段内,受到灌注液氮量的影响,冻结管内压力波动,会影响液氮的气化温度,所以沸腾段冻结管内的温度有少许波动,这对冻结效果影响不大。

在出口氮气温度在 $-100\sim-130\text{ }^{\circ}\text{C}$ 内变化时,冻结管内沸腾段的范围几乎没有改变,仅冻结管上部未开孔段内的氮气温度有差别,这与文献[16]和[17]中,液氮沸腾段长度与液氮灌注量成正比的结论不一致,原因是文献[16]和[17]的结论是在供液管上未开孔的传统冻结管结构试验中获得的。这也说明在冻结管的供液管上开孔,可以有效控制液氮沸腾段的分布范围,从而控制液氮冻结的有效区域。出口氮气温度在 $-100\sim-130\text{ }^{\circ}\text{C}$ 内变化时,液氮冻结的冷量损失差别仅是出口氮气温差产生的氮气显热。考虑氮气的比热容较小,温差导致冷量的损失较少,为了充分发挥液氮快速冻结的优点,可以将氮气出口温度控

制在 $-130\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。

### 2.4 停止冻结后冻结管内温度分布

停止液氮灌注后,由于冻结管底部积存部分液氮,冻结管内氮气的释放还能维护一段时间。冻结管内无氮气释放后,由于冻结过程中在管口形成的冰,使测点温度仍维持在负温。停止液氮灌注后,排气管口的温度变化如图2(a)所示,不同时刻对应冻结管内的温度分布如图2(b)所示。

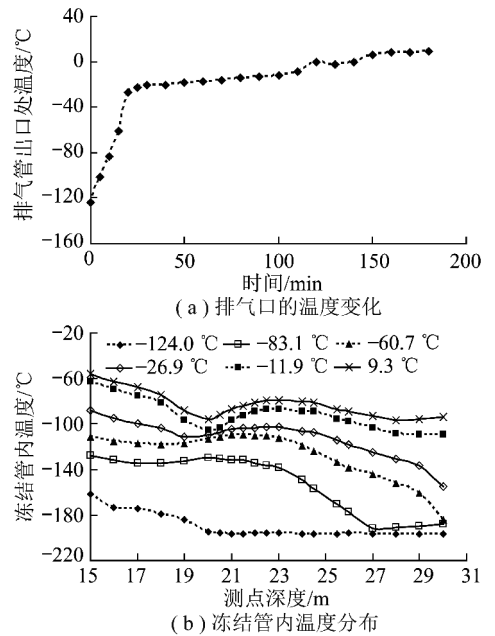


图2 冻结结束后的温度分布

Fig. 2 Temperature distribution after termination of freezing

从图2(a)可以看出,停止液氮灌注后,积存在冻结管底部的液氮继续气化,但出气管口处的温度升高较快,其原因是没有持续的液氮灌入,静止状态的液氮仅在表面气化,液氮气化的强度低。冻结管底部积存的液氮可以维持冻结管内充满低温氮气约 $20\text{ min}$ 。

从图2(b)可以看出,停止液氮灌入后,冻结管内沸腾段范围迅速减小,停止冻结 $10\text{ min}$ 后(排气管口温度为 $-83.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时),仅深度 $27\sim 30\text{ m}$ 为沸腾段,其余冻结段内全部为低温氮气,不能继续维持冻结作用。

当冻结管内没有氮气排出后,冻结管可以作为测温管,利用布置的温度测点测试周围土体的温度。从图2(b)可以看出,当停止冻结 $20\text{ min}$ 后,出口处温度为 $-26.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,冻结管周围土体沿冻结管长度方向的温差较大,形成的冻结壁不均匀。停止冻结 $3\text{ h}$ 后(出口温度为 $9.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时),冻结壁不同位置的温差仍然超过 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,说明虽然同处于液氮沸腾段,由于不同位置液氮气化量的差别,造成从周围地层吸收热量的不同,使形成的冻结壁均匀性较差。

## 3 讨 论

### 3.1 灌入氮状态对冻结管内温度分布的影响

向冻结系统内灌入液氮量较小时,液氮进入供液管后即气化为氮气,相同的出口温度下,灌入液氮和氮气时冻结管内的温度分布基本相同,如图3所示。现场施工中,如果没有条件提供低温氮气,可以直接通入少量液氮,利用液氮吸热后气化得到的低温氮气来冷却冻结系统。

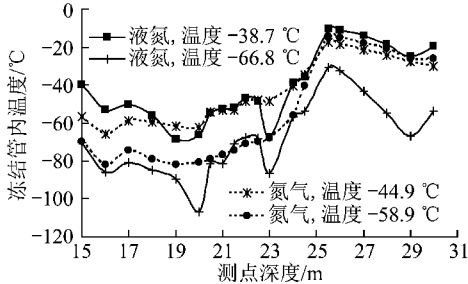


图3 冻结管内温度分布

Fig. 3 Temperature distribution in freezing-pipe

液氮气化后体积的膨胀,提高了供液管内的气体压力,使供液管上开孔尺寸的误差引起冻结管内的温差加大。如图3中出口温度为 $-44.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,灌入氮气时冻结管内深度为23 m处温度与灌入液氮出口温度为 $-38.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时相差近 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

当冻结管长度较长时,向冻结管内灌入低温氮气,冻结管底部未开孔段的温度一直维持在较高的水平,无法达到冷却底部冻结管的目的,所以在开始向冻结管内灌入液氮时,仍要控制液氮的流量,利用冻结管内灌入的少量液氮,气化后形成的低温氮气冷却底部冻结管后,再开始正式冻结。

### 3.2 地层条件对冻结管内温度分布的影响

试验中,深度为20.6~25.3 m的碎石地层含水量大,冻结过程中此范围吸热量大,但在冻结开始后,由于采用在相应深度范围开孔的供液管结构,该深度范围冻结管内首先出现液氮沸腾段,如图1(b)所示。其原因是沸腾段液氮气化释放潜热速度快,与周围地层热交换剧烈,冻结管的结构直接决定冻结管内液氮的分布,对沸腾段分布范围影响较大。而周围地层的导热系数引起吸热量的差异,与液氮气化吸热的强度相比相对较弱,对沸腾段分布范围的影响可以忽略不计,所以为了控制冻结管内液氮沸腾段的范围,在确定施工参数时,可不考虑周围地层差异的影响。

### 3.3 土体状况对冻结管内温度分布的影响

随着冻结的进行,冻结管周围的冻土帷幕厚度逐渐增大而温度逐渐降低,冻结管与周围土层的热交换

逐渐减弱,液氮气化后的吸热量减少。维持出口氮气温度基本不变,冻结管内沸腾段的分布特征变化较小,仅在冻结管上部未开孔段内的氮气温度的变化。如维持排气口温度约为 $-130\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,冻结时间为27,43,96,112,132和137 h时冻结管内的温度分布情况如图4所示,冻结管内温度基本保持不变。所以可以通过监测出气口氮气温度来控制液氮的供应量,保持出气口温度稳定时,冻结管内沸腾段的分布范围基本不变。

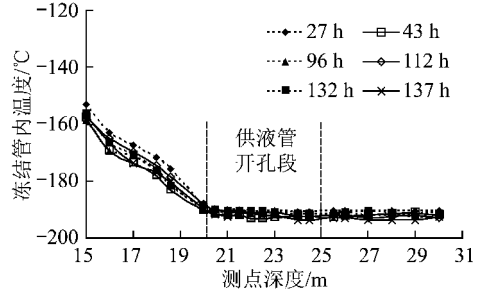


图4 不同冻结时刻冻结管内温度分布

Fig. 4 Temperature distribution in freezing-pipe at different moment

## 4 结 论

(1)与地层条件、冻结时间、液氮灌入量相比,供液管上开孔范围是影响冻结管内液氮沸腾段分布特征的主要因素。当出口氮气温度控制在 $-100\sim-130\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围时,冻结管内开孔段范围均处于液氮沸腾状态。

(2)与采用传统冻结管结构的液氮冻结相比,在供液管上开孔时,冻结管内出现液氮沸腾段时的出口氮气温度较传统液氮冻结低,且液氮出口温度不能直接反映冻结管内液氮沸腾段的分布特征。

(3)停止液氮冻结后,积存在冻结管内的液氮在较短时间内继续气化吸热,但冻结管内液氮沸腾段范围迅速减小。所以在冻结过程中,应控制停止液氮供应的时间间隔,保持冻结的连续性。

为了控制冻结管内不同位置的液氮气化量,进一步提高液氮冻结形成冻结壁的均匀性,可以继续开展供液管开孔尺寸、开孔间距和液氮供应量等参数对液氮沸腾段的分布特征和状态的影响研究,为确定合适的施工参数提供依据。

### 参考文献:

- [1] Weng J J. Thermal model and design in shaft freezing[J]. Transaction of Society of Mining Engineers of AIME, 1984, 274 (4): 1986-1903.
- [2] 翁家杰. 液氮冻结土层的理论与实践[J]. 煤炭科学技术, 1994,

- 22(9):11-15.
- Weng Jiajie. Theory and practice in liquid nitrogen freezing in soil ground[J]. Coal Science and Technology, 1994, 22(9):11-15.
- [3] 李宏安,何满潮,雷 军,等.液氮冻结技术在盾构始发地层加固工程中的应用[J].市政技术,2008,26(6):539-541.
- Li Hongan, He Manchao, Lei Jun, et al. Application of freezing process by liquid nitrogen in the place of shield departure for strengthening strata work[J]. Municipal Engineering Technology, 2008, 26(6):539-541.
- [4] 黄见峰,徐兵壮.地铁隧道盾构出洞口液氮竖直冻结加固技术[J].中国市政工程,2009(5):62-63.
- Huang Jianfeng, Xu Bingzhuang. Freezing reinforcement technique by liquid nitrogen in the place of shield departure[J]. China Municipal Engineering, 2009(5):62-63.
- [5] 李为强.液氮冻结在盾构出洞施工中的应用[J].安徽建筑,2006(6):53-54.
- Li Weiqiang. Application of liquid nitrogen freezing in the construction of the shield driving out of the tunnel[J]. Anhui Architecture, 2006(6):53-54.
- [6] Rebhan D. Artificial ground freezing-theory and application of the method liquid nitrogen[J]. Refrigeration Science and Technology, 2000(6):202-203.
- [7] 岳丰田,王 涛,檀鲁新,等.液氮冻结技术在井筒封水抢险中的应用[J].煤炭科学技术,2009,37(2):29-31.
- Yue Fengtian, Wang Tao, Tan Luxin, et al. Application of liquid nitrogen technology to water sealing rescue in mine shaft[J]. Coal Science and Technology, 2009, 37(2):29-31.
- [8] 翁家杰.液氮低温快速冻结——关于冻结时间的探讨[J].中国矿业学院学报,1979,3:1-18.
- Weng Jiajie. Rapid liquid nitrogen freezing in low temperature-inquiry on the time in freezing[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1979, 3:1-18.
- [9] 齐守良,张 鹏,王如竹.液氮流动沸腾换热研究综述[J].低温技术,2006,34(6):417-423.
- Qi Shouliang, Zhang Peng, Wang Ruzhu. Review of liquid nitrogen flow boiling heat transfer[J]. Cryogenics, 2006, 34(6):417-423.
- [10] 王斯民,厉彦忠,文 键,等.竖直圆管内液氮过冷流动沸腾数值模拟研究[J].化学工程,2008,36(10):17-20.
- Wang Simin, Li Yanzhong, Wen Jian, et al. Numerical simulation for subcooled boiling process of liquid nitrogen in vertical tube[J]. Chemical Engineering, 2008, 36(10):17-20.
- [11] 何鸿辉,刘国青,刘波涛.垂直上升管内气液两相流动特性的数值模拟[J].低温工程,2006,153(5):22-26.
- He Honghui, Liu Guoqing, Liu Botao. Numerical simulation of gas-liquid two phase flow in the vertical tube[J]. Cryogenics, 2006, 153(5):22-26.
- [12] 李祥东,汪荣顺,黄荣国,等.垂直圆管内液氮流动沸腾的理论模型及数值模拟[J].化学学报,2006,57(3):491-497.
- Li Xiangdong, Wang Rongshun, Huang Rongguo, et al. Modelling and numerical simulation of boiling flow of liquid nitrogen in vertical tube[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2006, 57(3):491-497.
- [13] 孙淑风,吴裕远.液氮在狭缝通道内受迫流动沸腾换热的实验研究[J].西安交通大学学报,2001,35(5):450-454.
- Sun Shufeng, Wu Yuyuan. Experimental studies oil the boiling heat transfer performance of aforced liquid nitrogen flow in narrow channel[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2001, 35(5):450-454.
- [14] 尚逸飞.液氮冻结温度场均匀性实验[J].黑龙江科技学院学报,2009,19(2):101-104.
- Shang Yifei. Experiment on uniformity of temperature field in liquid nitrogen freezing[J]. Journal of Heilongjiang Institute of Science and Technology, 2009, 19(2):101-104.
- [15] 熊 旺.运营地铁隧道液氮快速冻结技术研究[D].徐州:中国矿业大学,2007.
- [16] Zhu Linnan, Chen Ruijie. Large-scale model test on the artificial freezing of foundation with liquid Nitrogen [A]. Int Symp on Ground Freezing97[C]. Rotterdam; Balkema, 1997.
- [17] Chen Ruijie, Zhu Linnan. On the heat exchange of freeze pipe with liquid nitrogen in ground Freezing[A]. Int Symp on Ground Freezing97[C]. Rotterdam; Balkema, 1997.