

液氮冷冻暂堵设备

初德军 苗典远 邢志彪 高俊杰 佟新宇

国家海上油气应急救援天津队

一、研发创意

在石油天然气的开采过程中，确保井筒内压力与地层压力之间保持适当的平衡状态至关重要。若地层压力发生突变，或因钻井液密度不足等原因导致地层中的原油或天然气流入井筒，可能会引发溢流甚至井涌现象。若此情况失控，存在井喷的风险。鉴于井喷对人民生命财产安全以及环境安全所构成的巨大威胁，除了现有的井控技术之外，引入新的应急技术以加强安全保障、预防井喷事故的发生显得尤为必要。基于冷冻暂堵技术的设备能够在较短的时间内实现对带压油气井的有效封堵，并能够执行封堵端后侧的井口更换与维护作业，从而消除潜在风险并恢复生产。

二、成果简介

该设备由暂堵剂泵入系统和液氮冷却与控制系统两个模块组成，运作的核心机制在于利用液压系统将暂堵剂逐层注入至各层套管环空及油管内部。随后，在表层套管周边安装低温恒温装置，并在装置内填充冷冻剂。同时，通过精确控制恒温器的温度参数及降温速率，确保套管表面得以维持在最适宜的冷冻温度。经过规定时段的冷冻处理后，即可实现对多层套管环空及油管内部的暂时封堵，主要应用于以下两种工况：

（1）在钻井过程中，钻遇高渗层，且井内压力低于地层压力，底层流体就会进入井眼，及时关井后，钻杆内有高压流体，无法更换钻杆，此时可利用冷冻暂堵设备在转台上的钻杆内建立临时桥塞，并安装钻杆内防喷工具。

（2）井口采油树密封失效，导致井内的气体或液体外泄，此时利用冷冻暂堵设备在井口区域建立临时桥塞，并经过打压测试，然后更换有故障的采油树，可以实现不压井情况下完成对事故井的处置。

三、技术特点

本套设备相较于其他冷冻暂堵设备，具备精确控制温度之功能。其可根据不同种类钢材之特性，选择适宜之冷却速率及冷却温度，确保钢材恢复至室温后，金属强度得以保持不受损害。通过构建临时冷冻桥塞，实现受损采油树之更换或钻杆内防喷工具之安装，为后续修井作业或压井作业之顺利进行创造必要条件。

1. 技术路线

液氮冷冻暂堵设备主要分为暂堵剂注入系统和液氮冷却与控制系统两大部分，而且为了运输方便，装置采用橇装结构。该设备安全性好，效率高，可靠性强，操作自动化程度高，维护维修工作量小，特别适合在恶劣的油田环境使用，下文将会就这两个系统进行分别介绍。

暂堵剂注入系统是液氮冷冻暂堵设备的基础组成部分。它的主要原理是采用一系列液压设备将事先准备好的暂堵剂（一般主要原料为膨润土）通过阀门注入需要控制的井筒。暂堵剂注入系统采用高性能发动机发电作为动力，无需使用现场电力，适合无井口作业。该系统采用液压叶片泵和液压增压器配合使用达到要求注入压力，并可实现注入压力连续可控。

液氮冷却与控制系统主要包含 4 个子系统。分别是液氮储运系统、低温分配系统、低温恒温系统、测控系统。采用自动控制技术实现全程温度控制，监视和降温速度可控，可以安全、高效的实现对井筒压力的隔离。

2. 创新性

国内首次采用液氮作为冷却剂的油田冷冻暂堵设备，相较于干冰和甲醇作为冷却剂，液氮冷却的温度范围更为广泛，现场应用更为安全，无需人工手动添加冷却剂，通过远程操控阀门即可实现低温氮气的连续供给，有效避免了因搬运干冰而导致的手部冻伤风险。

国内首次研发出能够实现精确控温的冷冻暂堵设备，通过监控控制屏上的温度数据，可以实时掌握保温桶内的温度状况，进而调整低温氮气的供给速度和出口温度，实现对保温桶内温度的精确控制。

对储层的损害较小，液氮冷冻暂堵设备在井口区域进行作业时，无需向井内注入额外的压井液，能够保持井内原有液体密度的稳定性，待抢险作业完成后，将井口区域恢复至室温，即可移除临时建立的冷冻桥塞，原油井即可迅速恢复生产。

冷冻作业时间较短，液氮冷冻暂堵设备在使用前无需大量准备时间，且液氮的冷冻温度更低，以 0.6 米相同管径的套管进行试验，使用液氮作为冷冻介质的作业时间相较于使用干冰作为冷冻介质，可以缩短约 66%的作业时长。

钢材性能有所提升，钢材经过一段时间的冷冻在恢复到常温，相当于对钢材进行了冷处理，这些钢材经过冷处理后的主要强化机制为固溶强化、相变强化和时效强化，这些强化机制会使钢的抗拉强度和屈服强度随冷处理温度的降低而都有所提高。

四、实践应用成效

该设备自投产以来，不仅满足了队伍的日常演训需求，还多次成功承担了中海油集团公司组织的“井控周”和“井控日”等重要活动，圆满实现了既定的演练目标。通过不断的使用，该装置的实用性得到了充分的体现。

装置与使用场景的高度匹配性：液氮冷冻暂堵设备由 2 个集装箱模块组成，完全符合海上平台对设备尺寸的严格要求。该设备的最大作业距离可达 100 米。作业前，集装箱需吊装至平台甲板，随后将保温盒固定于井口区域，并通过保温管线将低温氮气输送到保温盒内，从而实现对接口管线的冷冻暂堵作业。

装置的卓越冷却能力：在钻井平台的常规作业中，常用的钻杆尺寸包括 3 寸半钻杆、4 寸钻杆、5 寸钻杆”和 5 寸半钻杆”。经过一系列的试验验证，平均冷却钻杆并建立桥塞所需的时间为每寸钻杆 30 分钟。在实际作业前，根据钻杆的直径，可以预先估算出所需的冷却时间，这为井控应急抢险的有序开展提供了坚实的保障。

五、代表性图片

该套设备投入运行后，国家海上油气应急救援天津队依据设备的特性，主动申请了相应的专利。并在 2022 年 6 月荣获国家知识产权局颁发的两项发明证书，分别是《一种用于油田暂堵的液氮冷冻装置》和《一种双介质注入缸》。



图 1 一种双介质注入缸



图 2 一种用于油田暂堵的液氮冷冻装置



图 3 液氮冷却与控制系统主视图



图 4 液氮冷却与控制系统内部结构

六、成果联系人

姓名：高俊杰

联系方式：15822364236

地址：天津市滨海新区渤海石油路 688 号国家海上油气应急救援天津基地

