

“贪吃蛇”钻井测井压力补偿器胶囊的研制

李有安, 许荣娟, 李荣华, 彭鑫鑫, 冯丽君, 焦洪亮, 高强,

(河北泽邦塑胶科技有限公司, 河北衡水, 053500

上海海事大学, 上海, 201306)

摘要: 旋转导向钻井和随钻测井系统被业界形象地称为“贪吃蛇”技术, 代表着当今世界钻井技术发展的最高水平, 被誉为石油钻井技术“皇冠上的明珠”。中海油田国产化研制的 Welleader 旋转导向系统、Drilog 随钻测井系统经过多次试验达到了入井应用要求。该项技术凝聚着海油人辛勤的汗水, 打破了国外垄断。中海油田开发的 Drilog LWD 系统可以支持 MWD、LWD、定向钻井、地质导向和其他工程应用。Drilog 系统由地面系统和井下工具组成。压力补偿器作为井下工具的重要组成部分, 能准确可靠的保证井下轨道控制液压系统的压力平衡, 实现对井眼轨迹的有效控制。该胶囊作为压力补偿器的重要部件, 可将环境压力通畅地引至胶囊外表面, 形成压力平衡补偿, 防止液压系统压力异常。

关键词: “贪吃蛇”钻井测井, 压力补偿器胶囊, 氟硅胶囊

Development of rubber capsule for pressure compensator used on Welleader® Rotary Steering Drilling System

Li You-an Xu Rong-juan Li Rong-hua Peng Xin-xin Feng Li-jun

Jiao Hong-liang Gao Qiang

(Hebei Zebung Rubber Technology Co.,Ltd,Hebei Hengshui;Shanghai Maritime University,Shanghai)

Abstract: The rotary steering and the logging while drilling systems are vividly called "snake" technology by the industry, representing the highest level of drilling technology development in the world today, and known as the "jewel in the crown" of oil drilling technology. The Welleader and Drilog which was developed by COSL have met the requirements of well drilling application after testing. This technology embodies the hard work of COSL workers and breaks the foreign monopoly. The Drilog® LWD System developed by COSL could support MWD, LWD, directional drilling, geosteering and other engineering application. Drilog® system consists of the surface system and the downhole tools. As an important part of downhole tools, the pressure compensator can accurately and reliably ensure the pressure balance of the downhole track control hydraulic system, and the well track can be controlled effectively. As an important part of the pressure compensator, the capsule can smoothly lead the ambient pressure to the outer surface of the capsule to keep the pressure balance and prevent abnormal pressure in the hydraulic system.

Key Words: Welleader® Rotary Steering Drilling System, Pressure compensator capsule, Fluorosilicone rubber capsule

一、前言

“贪吃蛇”代表着当今世界钻井测井技术的最高水平，长期以来，这项高科技一直被国外的几大国际公司垄断，对于中国人，他们既不卖设备，更不卖技术，只高价为中国提供钻探服务。历经多年技术攻关，中国海油在 2014 年成功研发中国首套旋转导向钻井和随钻测井系统。2015 年，“贪吃蛇”首次海上试作业一举成功，标志着中国海油成为国内首家、全球第四家完全掌握该项技术的公司。截至 2020 年底，中国自主研发的旋转导向钻井和随钻测井系统已在国内成功完成 520 井次的作业，累计钻进 50 万米，相当于钻穿了 57 座珠穆朗玛峰，作业范围全面覆盖国内海上和主要陆地油气产区。

尽管这项技术我们具有完全自主知识产权，但装置的国产化率达 90.26%。“贪吃蛇”一直使用的是进口胶囊，本公司设计的压力补偿器胶囊填补了国内的空白。我们采用的一体式结构，胶囊全部采用氟硅橡胶为主体材料，大大提高了密封性能和安装效率。

二、原料、设备及工作原理

（一）主要原材料：氟硅橡胶

胶囊要求长期高温液压油中浸泡，胶料需有较好耐油耐高温性能，因胶囊要求均匀膨胀，要求胶料永久变形较小，回弹性好，氟硅橡胶以上性能均很突出。根据客户的环境要求，我们选用氟硅橡胶为主体橡胶，氟硅橡胶是一种改性硅橡胶，聚硫橡胶耐高温达 100℃，丁腈橡胶达 130℃，而氟硅橡胶耐高温可达 180~230℃，其优势不言自明。以氟橡胶与氟硅橡胶相比较，高温下氟硅橡胶的物理机械性能要好于氟橡胶，而室温下氟橡胶的物理性能又好于氟硅橡胶 2 倍，在 150℃ 时，两者的性能相等。到了 200℃ 时，氟硅橡胶的物理性能却好于氟橡胶 2 倍，在 230℃ 时更是惊人地好于氟橡胶 4 倍之多。

由于氟橡胶本身没有硫化点，硫化时必须加碱脱去 HF 才能形成硫化点。硫化胶中所含的少量碱会腐蚀金属接触面，而氟硅橡胶的硫化不需要加入酸碱填料，没有腐蚀性。基于这两点，氟硅橡胶在高精度作业要求下是必选材料。具有优良的耐油耐溶剂性能，回弹性好，变形小。并且该胶料具有良好的硫化活性，门尼较低，加工性能优异。

物理机械性能如表 1：

表 1 氟硅橡胶物理机械性能

检测项目		指标	实测	实验方法
硬度		70±5	72	GB T 6031
拉伸强度		>9	14	GB/T528
扯断伸长率		>220	290	GB/T528
扯断永久变形		<6	2	GB/T528
撕裂强度		>13	25	GB/T529
压缩永久变形 ¹⁾		<12	7	GB/T7759.1
热空气老化 (150℃*70h)	拉伸强度变化率，%	±20	6	GB/T528 I 型哑铃试块，GB/T3512

	扯断伸长率变化率，%	±25	-4	
体积变化（%） 1#标准油（150℃*70h）		-10~3	0	GB/T 1690

¹⁾ 试验条件为 150℃*70h，压缩率 25%，A 型试样。

（二）主要仪器及设备：双阶柱塞式注射机；平板硫化机；热老化箱

因氟硅橡胶成本高，产品精度要求严格，所以选用双阶柱塞式注射机，注射系统是注射机的主要单元，该注射机的注射单元由冷喂料挤出机和柱塞式注射筒，喷嘴等部件组成，这种装置能均匀的控制喂料，受螺杆的剪切作用，使得胶料快速加热，且均匀性好，塑化均一。该设备注射单元精确的注射量控制，可以有效的减少废胶，产生极少飞边。塑化螺杆出口处的胶料温度传感器准确的监控胶料的实时温度情况，保证胶料焦烧时间的安全性，使胶料性能，保持最佳状态。为了使胶料按照一定的顺序流动，在螺杆挤出机的顶部安装止逆阀，胶料塑化后通过止逆阀进入注射系统中，并将柱塞顶起，胶料不会从喷嘴出去，因为喷嘴通道狭窄，阻力大，当柱塞将胶料以高压从喷嘴注入模腔时，因为止逆阀的作用，胶料不会倒流进入挤出机中。液压式锁模系统，快速合模由两个液压缸来实现，锁模力通过底部横梁上的主锁模油缸完成。模具配有抽真空装置，抽出模腔中的空气，以避免产品卷气，提高产品致密性。模具尺寸精度高，表面光洁度高，保证了产品内壁光滑性和尺寸精准性。双阶柱塞式注射机相对于传统的柱塞式注射机，结构严密，其塑化效率及生产能力均得到提高，使得产品质量更加均一，避免飞边，精度更高。

（三）工作原理及产品结构

为了控制钻头的钻进方向，采用液压系统作为井下导向执行机构的动力源，从而使井下工具产生增斜、稳斜或降斜的效果。由于井下几千米高温、高压、强震等特殊环境的影响，液压系统内的液压油因承受大范围变化的温度、压力和冲击的作用，体积会发生改变，因此在密封液压系统有效容积不变的情况下，会造成系统容积和油液实际体积不匹配，导致系统出现压力异常，以致动作失灵。该导向钻具压力补偿系统能准确有效的控制压力平衡。胶囊底部通过螺母和导管与防护罩壳相连，既能将环境压力引至胶囊外表面，也能有效防止杂物进入防护罩，破坏胶囊。若胶囊内外存在压力差，因橡胶弹性模量小，壁厚较小（2mm），压力补偿时变形压力损失小，提高了液压系统的灵敏度。若环境压力大于内部压力，会挤压胶囊产生形变，容积减小，以此来保证内外压力相等。胶囊结构图见图 1。

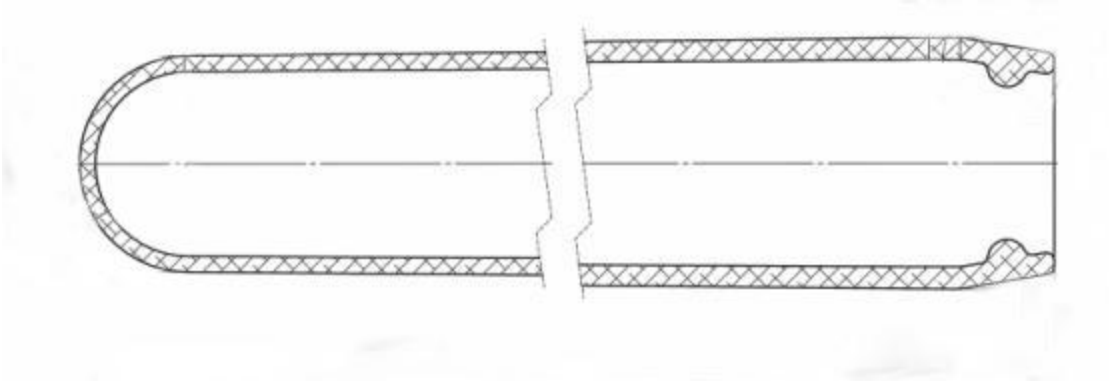


图 1 胶囊结构图

三、加工工艺

先完成注射机各模块（螺杆转速，塑化温度，注胶量，上下模温度，硫化时间等）的参数设置，待模具和注射单元各部分的温度升至设定值时，开启全自动循环模式。启动挤出机给注射筒喂料，将胶条从喂料口喂入，加料口与螺杆成 90° 倾角，以便胶料沿着螺杆底部进入筒腔，通过螺杆旋转，使胶料在螺杆和机筒筒壁之间受到较大的挤压力，使胶料塑化，当胶料达到机筒前端时，注射杆受到液压缸的推动，在一定的压力和速度下，通过注射杆将塑化后的胶料挤入到柱塞注射系统中，最后由柱塞注射到模腔。胶料经注胶嘴、流浇道高压注入模腔，保压定型硫化，一次脱模，清理模具后连续自动作业。

热空气老化箱二次硫化，200℃，4h。

二次硫化可以使氟硅橡胶进一步硫化交联，除去胶层内的小分子、配合剂等未分解物质，提高胶囊的力学性能和压缩永久变形等物理机械性能。

四、胶囊测试

（一）胶囊的外观：无飞边，无裂痕，无气孔，壁厚均匀。橡胶油囊膨胀均匀，没有明显侧偏，鼓包。外观均满足客户要求。

（二）水压测试：25℃条件下，将胶囊注满水后，额外注入 300ml；观察外观，膨胀均匀，外观无明显侧偏和鼓包。放出水的体积在 290-300ml。这充分体现了氟硅橡胶的回弹性好这一特性。

将上述测试的胶囊加温到 175℃，保温 5 分钟，自然冷却至 25℃，再次进行注水测试。25℃条件下，将胶囊注满水后，额外注入 300ml；观察外观，膨胀均匀，外观无明显侧偏和鼓包。放出水的体积在 290-300ml。

（三）破坏性测试：水全部放出后，再次注入 1000ml 水，皮囊未开裂，膨胀均匀。最大注水量可达 1560ml。

经测试，胶囊制品完全通过测试，充分体现了氟硅橡胶优异的密封性能和高回弹性，模具设计的合理性，可完全满足产品的使用性能要求，大大提高了制品合格率。

五、结论

压力补偿器用氟硅胶囊，发挥其优越的耐油性及耐高温特性、高回弹性和较小的压缩变形性能，完成了井下连续作业 200h 的设计要求，其一体式结构设计，精简了安装工序，缩短了安装时间，为制品的密封性提供了更可靠的保障。这一国产化高技术的产品解决了我国长期以来进口交期长和运输成本高的问题，填补了国内空白。

参考文献

- [1] 周振良, 付宝强, 等. 垂直钻井工具用压力补偿器胶囊的研制[J]. 特种橡胶制品, 2014(5):57-60.
- [2] 陈虎, 和鹏飞, 等. 国产旋转导向及随钻测井系统在渤海某油田的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2017(3):35-38
- [3] 盛利民, 等. 导向钻具液压系统压力补偿器:CN 201687390 U[P].2010.12.29
- [4] 王一端,等, “贪吃蛇”与深水海洋勘探生产技术[J]. 石油知识, 2021(6):12-13