

油气钻机的“心脏”——钻井泵

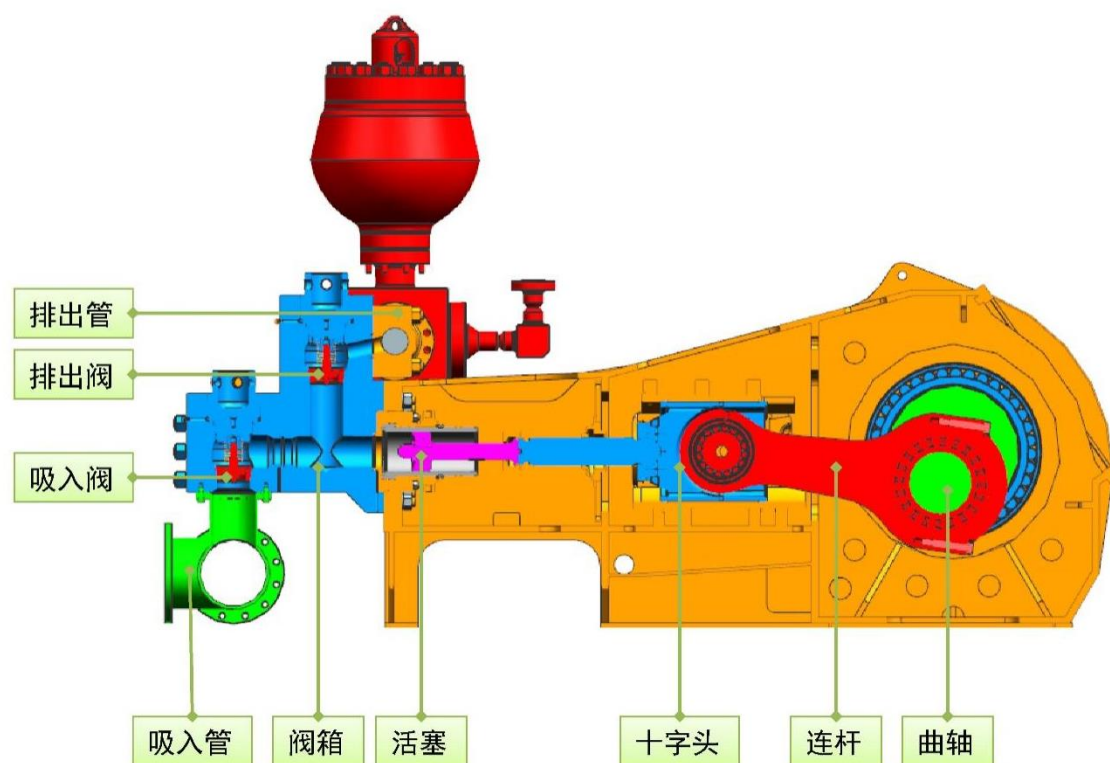
在上世纪60年代,铁人王进喜是家喻户晓的石油英雄,他用身体搅拌泥浆阻止石油井喷的画面,烙印在一代代中国人的心中,而他搅拌的泥浆就是被喻为石油钻机“血液”的钻井液。在钻井过程中,循环的钻井液不仅带走了岩屑,还能起到润滑冷却钻头、平衡地层压力、稳定井壁、为井下动力钻具提供动力等作用,钻井泵就是让这种“血液”循环起来的机器,它也因此被石油工人形象地称为油气钻机的“心脏”。

1.这颗“心脏”长什么样呢?

钻井泵这颗“心脏”主要由动力端和液力端组成。

动力端类似于心脏的心肌,为心脏的跳动提供动力,它主要由动力源、曲轴、连杆、十字头等组成。

液力端类似于心脏的心房和心室结构,它主要由阀箱、活塞、吸入阀、排出阀、吸入管、排出管等组成。



2.这颗“心脏”又是怎样工作的呢？

钻井泵的工作原理就像小朋友们玩水枪，先使劲拉手柄把水吸进来，再使劲推手柄把水喷出去。所不同的是，水枪是从同一个口吸入和排出液体，而钻井泵的吸入口和排出口是分开的。在动力端的作用下，钻井泵的巨大活塞连续不断地进进退退，使返回的低压钻井液（“静脉血液”）进入吸入管（“心房”），穿过吸入阀（“三尖瓣”）进入阀箱（“心室”），经过活塞加压后变成“动脉血液”，再穿过排出阀（动脉瓣）进入排出管，然后进入钻机的“大动脉”——高压管汇，随后从钻具中心进入井底，最终返回地面，形成一个循环。

3.“心脏”的起源和进化

在 1901 年左右，钻井泵起源于美国，那是一种双缸钻井泵，相当于有两个“心室”，它能提供的压力大致等于 17.5 兆帕，它的出现，带动了美国旋转钻井技术的快速发展。

20 世纪 60 年代末，工程师们发明了一种具有三个“心室”的更强的“心脏”，叫做三缸钻井泵。这种钻井泵在当时的大、中马力钻井泵中脱颖而出，迅速取代了老式的双缸钻井泵。直到今天，三缸泵仍然被当做主流产品使用，能提供的最高压力已经达到 35 兆帕，有的甚至达到了 52 兆帕！

到了 2000 年前后，国内外掀起了研发五缸、六缸、七缸等多缸钻井泵的热潮，因为工程师们发现“心室”数量越多，“心脏”输送的“血液”波动越小、工作越平稳，这对油气钻井作业非常有利。最终诞生了美国 NOV 公司的六缸泵、宝石机械 QDP 系列五缸泵、四川宏华公司的 2400 马力五缸泵等新产品，这些大“心脏”能提供的最高压力已经达到 50~70 兆帕！

钻井泵在我国的发展主要经历了“从小到大”，“从跟随模仿到自主创新”两个阶段。目前，我国自主研发的钻井泵输入功率已达到 3000 马力，最高压力达到 70 兆帕，这个压力可以将水从海平面打到 7000 米的高空，足以支撑我国油气钻探事业向地心深处开进，我国油气钻机的“心脏”——钻井泵已经完全实现了自主设计和制造。

从小到大：国内首台 2200 马力 52 兆帕高压钻井泵



我们最初从 500 马力、800 马力、1000 马力三缸钻井泵入手，随后开发了 1300 马力和 1600 马力，但受到当时人员技术能力、机床设备和工艺水平、工业基础条件等限制，生产的钻井泵存在导板拉伤、齿轮点蚀、轴承破损和密封不严等质量问题。为了解决这些问题，工程师们深入油田现场收集第一手资料、分析原因，然后制定各种设计和工艺改进措施，历时近十年，终于制造出质量性能稳定的三缸钻井泵，为钻井泵的自主创新奠定了坚实的基础。

2000 年左右，钻井深度的增加和钻井新工艺的应用，对钻井泵提出了新的要求：高压、大排量、高可靠性。宝石机械 F-2200HL 高压钻井泵就是在这种背景下诞生的，它是国内首台 52 兆帕高压钻井泵，排量达到每秒 78 升。为了验证 F-2200HL 钻井泵的可靠性，工程师们从油田搬来 100 余吨泥浆进行模拟现场试验，试验共持续了 260 天，从当年的

春季一直进行到冬季，经历了炎热的夏天和寒冷的冬天，可靠性得到了充分的考验。刚开始试验时，活塞几十个小时就损坏了，有的甚至几个小时就坏了，工程师们设计制造了十余种密封结构、采用了多种橡胶材料，都没有解决这个致命问题。

就在大家一筹莫展之际，一名工程师在洗手时突发奇想：“现在缸套内部有喷水管，给活塞冷却。是不是可以在缸套外面加装个水龙头？让缸套也降降温”。当他把这个想法说出来时，大家都觉得可以试一试，于是“钻井泵缸套内外表面冷却装置”就这样出现了，并应用到后续的试验中，大幅降低了缸套的温度，提高了活塞的使用寿命。随后，工程师将“钻井泵缸套内外表面冷却装置”申请了专利，2011年获得国际专利授权，2013年获得“中国专利优秀奖”。类似的情况还有很多，我们的设计团队本着绝不把问题留给用户的原则，针对试验过程中暴露出的问题，逐一分析原因，提出优化改进方案，最终产出了质量性能优异的 F-2200HL 钻井泵。

F-2200HL 钻井泵的成功研制，是从小功率钻井泵到大功率高压钻井泵的突破，是我国完全掌握钻井泵设计制造核心技术的关键节点，使我国摆脱了高压钻井泵依赖进口的窘境，助力我国石油钻机突破了一个又一个井深纪录。

从跟随模仿到自主创新：全球首台 3000 马力 70 兆帕五缸钻井泵



随着“万米科探工程”被提上日程，对技术水平更先进、作业能力更强大的新型钻井泵的需求就更迫切，拥有三个“心室”的三缸钻井泵已无法在性能上形成新的突破，需要工程师们进行多缸钻井泵的技术研究。

宝石机械选择了“3000 马力 70 兆帕五缸钻井泵”作为研究方向。在研究过程中，他们发现随着“心室”数量增多，“心脏”的结构变得更加复杂，活塞的进退顺序选择也更复杂，同时还增加了设计、制造的难度和振动的风险。

钻井泵往复运动件（十字头、中间拉杆、活塞杆、活塞）跟缸套的对中性，直接影响缸套、活塞的使用寿命，但受尺寸和重量限制，五缸泵的缸间距比三缸泵小，这增加了十字头同心度调整的难度。如何才能做到十字头与缸套的同心度不用调整，还不影响缸套、活塞的使用寿命呢？为了实现这个目标，设计团队的每一个人都在出谋划策，但想出来的方案无法得到大家的一致认可。受到摩托车后视镜旋转的启发，一名工程师提出：十字头与中间拉杆之间采用球铰代替原来的法兰连接，当十字头与缸套不同心时，球铰会自动旋转，调整活塞角度，避免活塞的金属部分与缸套直接摩擦，这样

就可以不用调整十字头与缸套的同心度了。

一批刚毕业的大学生加入了创新设计团队，他们带来的更加开放的思维方式和更先进的设计方法，与老工程师们丰富的设计经验相融合，形成更加科学合理的设计路线和方案，他们建立完整的三维模型，运用计算机仿真和分析技术，模拟装配制造过程，分析高压密封件的密封性能，并根据分析结果进行设计优化，解决了五缸泵结构复杂、活塞的进退顺序选择、超高压动密封等难题，成功研制出全球首台 3000 马力 70 兆帕五缸钻井泵。

4.展望未来：智能化发展让钻井泵更加“聪明”

钻井作业期间，钻井泵需要 24 小时连续工作，如何掌握了解钻井泵安全运行情况？目前还不能完全实现自动化和无人化，需要人们走进高压工作区，依靠听觉和视觉手段来判断零部件运行情况，检查判断工作量特别大，存在较大的安全风险和滞后性。

随着自动化和智能化技术的发展，研究设计适合钻井泵的“感觉器官”，如用于测量传动系统振动、压力波动等可靠使用的传感器，随时监测运行情况。依靠工程师们丰富的经验积累数据模型，形成“智慧大脑”，最后，运用大数据和科学算法实现钻井泵的自我监测、故障诊断和全生命周期自动化、一体化管理。