

探秘连续管钻井：开启石油开采新时代

在石油开采领域，一项被称为“钢铁软管”的技术正在颠覆传统钻井模式。连续管钻井技术如同工业领域的“柔术大师”，以千米长的连续管为核心，在油气开发中展现出惊人的灵活性与效率。它凭借高效、灵活、经济等诸多优势，成为石油开采领域的“新宠”。接下来，就让我们聊聊这根“钢铁软管”如何在地下展开奇妙探险，以及中国工程师如何让它拥有了“中国智慧”的大脑。

一、从修井工具到钻井明星：钢铁软管的逆袭之路

想象一下，传统钻井就像用筷子吃饭，一根一根接起来才能伸到碗里；而连续管钻井则像用吸管，一根长长的管子直接插到底。这种没有接头的连续管，最早其实是用来给老井“治病”的——比如清理井内杂物，如同疏通血管堵塞。1991年，当国外工程师第一次试着用它来钻井时，谁也没想到这个“副业”后来会变成“主业”。

这根神奇的管子由高强度合金钢制成，卷在一个巨大的滚筒上，直径从2英寸到3.5英寸不等（相当于矿泉水瓶到保温杯的粗细），却能长达4500米甚至更长！更神奇的是，它能弯曲成半径仅2.6米的圆弧——相当于在一辆家用SUV（常规长度4.5-5.5米）的旁边，就能轻松完成转向，这让它特别适合在老井里“开分店”（侧钻新井眼）。



图 1 卷在滚筒上的连续管

早期的连续管钻井就像蹒跚学步的孩子，1991 年全球只钻了 4 口试验井，到 1995 年才累计 200 口。但很快，人们发现了它的独特优势：不用像传统钻井那样频繁拆装钻杆，大大节省了时间。在加拿大，有的连续管钻机一年能钻 295 口井，平均每天就有一口新井诞生，效率惊人！

二、地下探险的装备：钢铁软管的“超级套装”

要让这根钢铁软管在地下完成精准探险，需要一套“超级套装”。地面上，最显眼的是井口顶部的注入头，如图 2 所示，它就像一双有力的大手，以每秒 0.5 米的速度把连续管送入地下，最大拉力能达到 90 吨——相当于 60 辆小汽车的重量。而地下的工具组合更像是一套精密的“微创手术器械”。

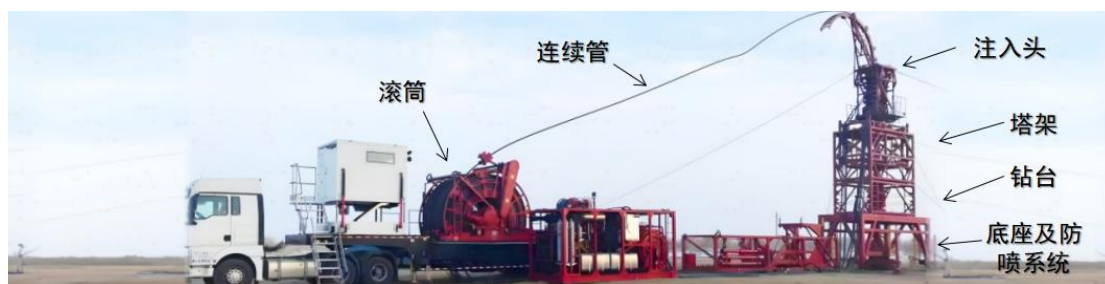


图 2 连续管钻井地面装备图

比如“开窗大师”——连续管侧钻井下工具，专门负责在老井的套管上开一个精准的窗口。想象一下在鸡蛋壳上开一个光滑的圆洞，不能弄碎蛋壳，还要保证洞口够大够平整。斯伦贝谢的开窗工具能在两次起下钻内完成定位、开窗，而中国自主研发的工具更是把磨铣时间缩短了40%。还有随钻测量工具(MWD)，就像装在管子前端的“导航仪”，实时传回井斜、方位数据，让工程师在地面就能知道管子有没有“走偏”，其精度能达到 $\pm 1^\circ$ ——相当于在30米外瞄准一个篮球（直径约24厘米），偏差范围能控制在两个篮球大小以内，确保井眼轨迹不偏离预设路线。

特别值得骄傲的是，中国工程师还研发了“无缆式”钻井工具。就像无线耳机摆脱了线材束缚，这种工具不需要电缆就能控制方向，通过控制停开泵的次数实现角度调整（每操作一次调整 15° ），在复杂井况下特别好用。而“有缆式”工具则像带着高速网络，能实时传输数据，在阿拉斯加的一口井里，它钻出了长达1053米的水平段——相当于在地下挖了10个足球场长度的通道！

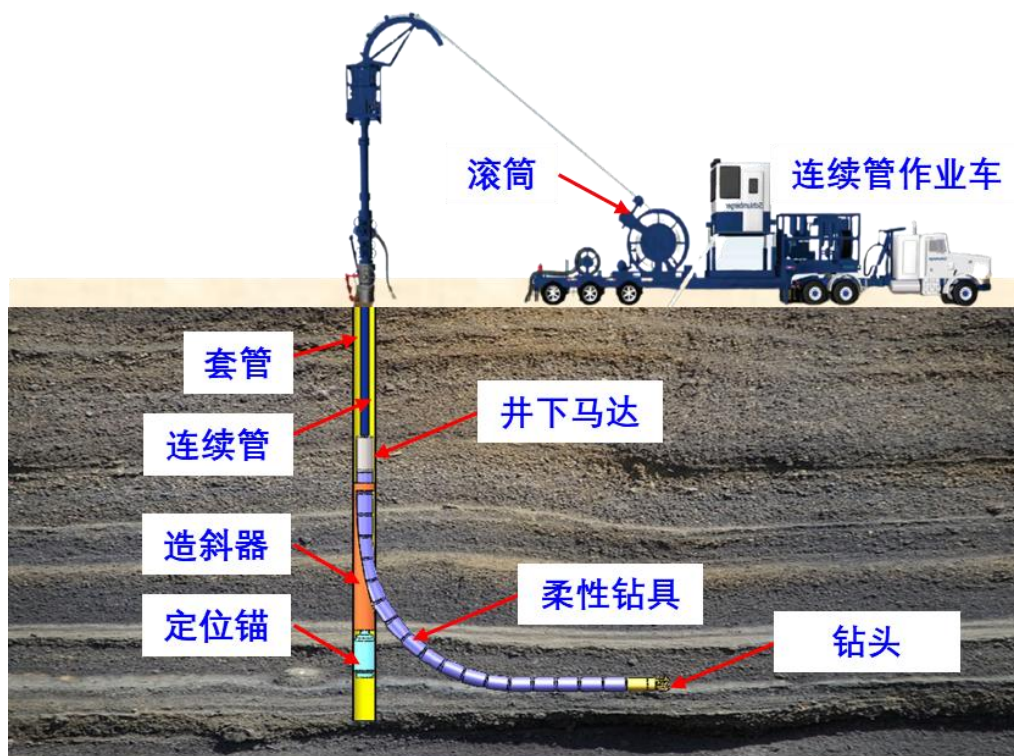


图 3 连续管侧钻井下工具示意图

三、钢铁软管的“超能力”：为什么油田都爱它？

连续管钻井最厉害的“超能力”，是能在传统钻井“够不着”的地方大显身手。比如在老油田里，很多井因为产量下降被“闲置”，就像老房子里没被利用的房间，连续管钻井可以从老井眼侧面钻出新的分支，就像在老房子里开一扇新门通向藏宝室。美国德克萨斯油田的统计显示，用连续管侧钻的成本只有打新井的 31%，相当于花三分之一的钱就能让老井“焕发第二春”。

它还特别擅长“走弯路”。在水平井钻井中，传统钻杆要转个弯得“大费周章”，而连续管因为柔韧性好，能轻松钻出“之字形”轨迹。在锦 2-9-303CH 井的案例中，中国工程师用连续管钻出了最大井斜 90.11° 的水平段，就像在地下画了一个完美的直角，还创下了 802 米单井进尺的国内纪录。更神奇的是欠平衡钻井（即让井内压力低于地层压力的钻井方式）——就像给井眼“减压”，

让油气自己“跑出来”，减少对地层的伤害，这在高难度油藏开发中特别有用。

除了效率与成本优势，环保和安全也是它的“加分项”。因为减少了起下钻的高空作业，安全事故率大幅降低；没有接头的设计也让钻井液泄漏的风险大大减少。在深海钻井中，它更是“空间大师”——海上平台空间宝贵，连续管设备占地面积小，就像小户型里的多功能家具，特别适合“寸土寸金”的海上环境。

四、中国智慧的注入：从跟跑到领跑的跨越

别看连续管钻井技术起源于国外，但中国工程师的追赶速度让世界惊叹。早期，我们只能进口国外设备，不仅价格昂贵，还处处受制。就像买手机不能拆电池换配件一样，国外的工具系统往往是“打包销售”，无法根据中国油田的特点调整。

但短短几年间，中国就实现了从“跟跑”到“并跑”再到“领跑”的跨越。在长庆油田和大港油田，自主研发的复合式连续管钻机已经批量应用，最大钩载达到 1125kN（相当于约 114.8 吨的拉力），注入头能力国内最大、国际先进。更厉害的是，我们还研发了适合中国地质特点的“智能大脑”——电控液连续管钻具组合，通过一根内置电缆就能实现供电与通信，就像给钢铁软管装上了“神经中枢”，能精准控制工具面，误差不超过 $\pm 1^\circ$ 。

2019 年，国内首口连续管侧钻水平井锦 2-9-303CH 井的圆满完成，标志着中国连续管侧钻技术实现了关键瓶颈的重大突破。而在青海油田，连续管径向钻井技术让老井日产油量达到邻井的 2 倍，稳产期从 0.5 年延长至 1.5 年——相当于让老油田的“服役周期”延长到原来的 3 倍！

五、未来探险：钢铁软管的下一站去哪儿？

当这根钢铁软管拥有了“智能大脑”，它的探险范围就不再局限于陆地。科学家们正在研究让它去深海开采可燃冰——这种未来能源藏在海底深处，传统钻井平台成本极高，而连续管海底钻机就像“水下机器人”，能在高压环境下作业，有望把开采成本降低 40%。

更令人期待的是“超短半径水平井”技术。想象一下，在地下 5 米的范围内就能完成 90°转弯，这让连续管能像“八爪鱼”一样从一个主井眼伸出多个分支，最大化接触油气层。中国在陵 72-5CZ 井的试验中，已经实现了造斜半径仅 2.63 米的超短转弯，未来这项技术将在薄油层、页岩气开发中大显身手。

智能化是未来的核心方向。就像自动驾驶汽车一样，未来的连续管钻井可能不需要人工频繁调整，而是通过人工智能预测井眼轨迹，自动避开风险。斯伦贝谢的 Fusion 系统已经能实时传输地质数据，而中国工程师正在研发更先进的“专家系统”，如中石油工程技术研究院研发的连续管作业智能支持平台，如图 4 所示，它实现了生产动态、工程动态、统计分析等区域化的作业和装备多级协同管理，以及对重点井、重点作业远程专家支持与指挥决策的功能，为实现智慧油田奠定基础。



图 4 连续管作业智能支持平台

结语：柔韧之力，撬动能源未来

从一根简单的修井软管，到拥有智能大脑的地下探险利器，连续管钻井技术的进化史，就是一部人类用智慧突破自然限制的奋斗史。当中国工程师让这根钢铁软管既能“穿针引线”（精准侧钻），又能“翻山越岭”（复杂井眼轨迹），我们不仅改写了石油开采的技术版图，更展现了科技自立自强的力量。

在能源需求日益增长的今天，这种“以柔克刚”的技术，正为全球能源安全提供新的解决方案。或许在不久的将来，这根钢铁软管会带着中国智慧，走向更深的地下、更远的海洋，成为打开未来能源宝库的“金钥匙”。