

关于万米深井的建议

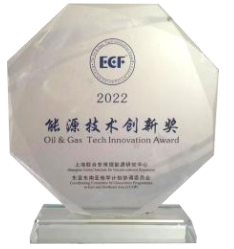
天津市景宝中泰科技有限公司

2025年7月



成果水平：国际领先

中国的石油希望在超深井，产量翻翻靠超深



- 地幔生油：

碳氢以离子形式存在于地壳下1万米至100公里内，延地壳裂缝上升，经过金属矿带的催化作用，发生炼油厂中的托莫反应，聚合成轻烃。路程中多次聚合运移形成石油，被地表储层聚集成藏。这就是生、运移、储聚、盖。所以，中国超深井一定有大油田。

目标

- 所以，万米深井意义重大。关注重点在寒武纪盐膏层是个大盖层，其盐下地层是油气聚集重点区域。打潜山的低点，因为它离地幔近，更易获得油气。

陆地近似可观察地幔环境的窗口是炼铁高炉，炉温1500℃等效地壳下70公里处，已经1000℃干馏过的焦炭+铁矿石还原反应，顶部出甲烷下部出铁水。说明轻烃的合成作用。

万米深井工程难点



- 万米管柱极其细长，宏观上非常柔软。造成其“波动”特性不可忽视，其在井下随时间累计**可随机产生**高加速度（100~600g）高频率（约40Hz）的**强烈振动**，它来无影去无踪，有激发条件，地面无法模拟必须实战，经典力学无法分析，是各种钻具损坏的主要破坏者，井身质量的麻烦制造者。
- 如何处理管柱“波动”？ **钻头，钻铤，钻杆**。（把整个钻杆系统分成三份：钻头、钻铤、钻杆）

钻铤是钻头钻压的产生者，对钻铤运动状态的稳定，对钻头吃入地层的效果，及破岩及井身质量有决定性影响。

把**钻铤**看作一个独立体，钻头与钻杆都看作能量及力的输入，分析钻铤的谐振状态，即钻铤对外界能量输入的消耗反应，即是系统熵增的最大窗口，关闭或减弱这个谐振窗口，即达到系统稳定作用。所以，超深井要求有对钻铤系统能减熵的工具。（熵是混乱度，熵越大代表系统越混乱）

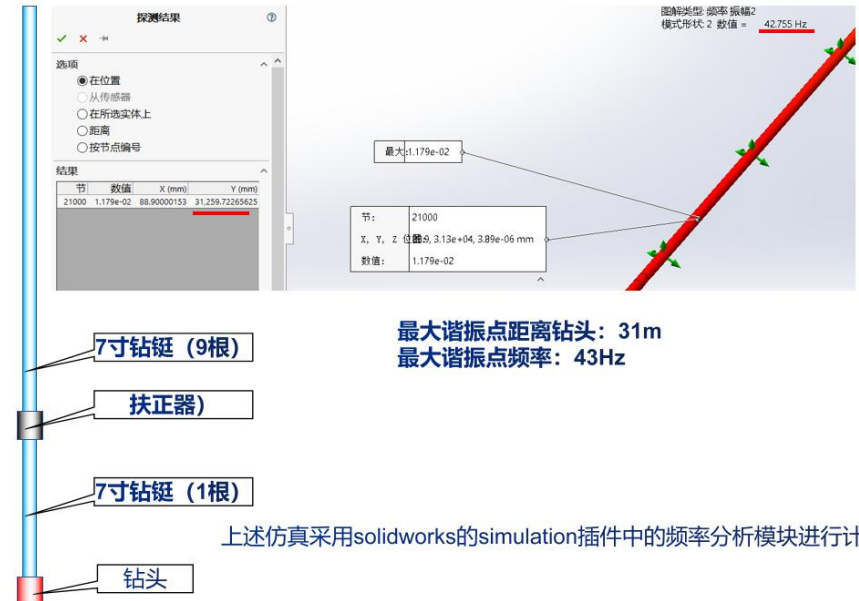
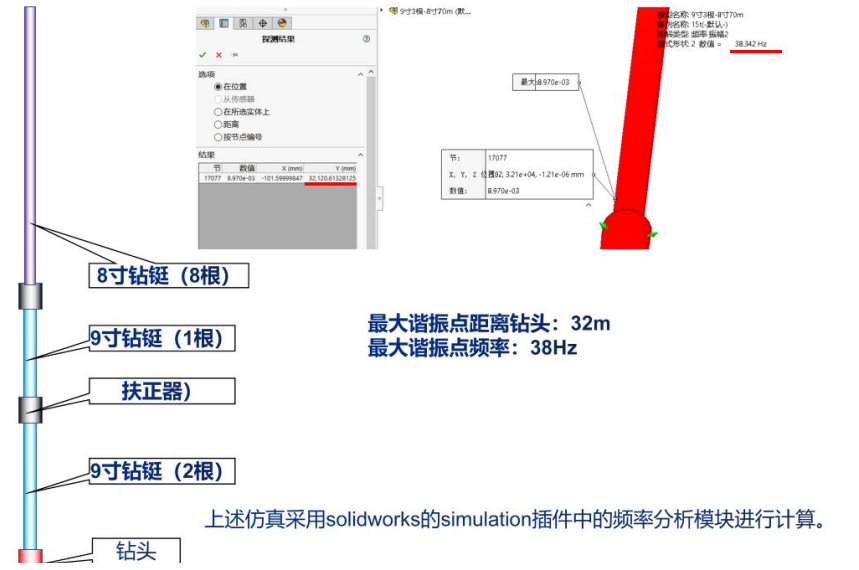
钻头也是一样，对钻头切削地层的阻力振荡，与钻铤谐振复合，也是熵增，需要弱化它。

长距离**钻杆**是不同口径钻杆组合，其自身的不同谐振同样会影响钻铤的振动，其复合振动也是熵增，需要阻断它。

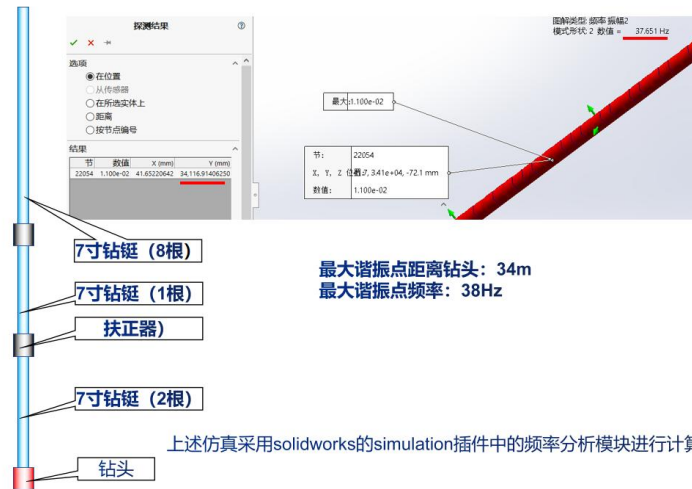
如何分解钻铤谐振，钻头阻力振荡，及阻断不同口径的钻杆谐振，**不使管柱系混乱度增加就是万米深井的核心技术！**

钻具谐振点仿真汇总表

钻具组合	总长 (m)	谐振点 (m)	频率 (Hz)
钻头+9寸钻铤 (2) +扶正器+9寸钻铤+扶正器+8寸钻铤 (8)	102	32	38
钻头+7寸钻铤 (2) +扶正器+7寸钻铤+扶正器+7寸钻铤 (8)	105	34	38
钻头+7寸钻铤 (1) +扶正器+7寸钻铤 (9)	94	31	43



上述仿真采用solidworks的simulation插件中的频率分析模块进行计算。



成果水平: 国际领先

钻铤的第一谐振点



成果水平：国际领先

钻铤的谐振点有很多个（一般可计算10个），其中第一谐振点占了总能量的70~80%多，所以其它谐振频率点就简化忽略了。

- 9寸钻铤系列

最大谐振点距离钻头：32m，最大谐振点频率：38Hz

- 7寸钻铤系列

最大谐振点距离钻头：31m，最大谐振点频率：43Hz

- 以上计算在不同的扶正器组合及钻压下都有偏差，大致在钻铤30米处，40Hz左右的最大谐振点频率。说明对于钻铤系其输入的各方能量，都在这个位置附近及频率上消耗最多。这个谐振点的能量**随时间积累**及迅速消耗释放就是钻铤各种涡动现象的主因（振动的卷积积分）。

钻头对地层的切削、犁削、磨削状态也会产生各种的钻头阻力振荡，与钻铤自身谐振复合**随时间积累**就是各种粘滑现象的主因。

分解谐振



成果水平：国际领先

- 在波的叠加特性中，只能用高频率去分解低频率的能量积累，反之不行。即用高频率波给低频率波的能量一个释放的窗口，使其无法**随时间积累**而**剧烈变化**。（同环境下波的能量=常数×频率）
- 这就是万米深井，井下提速工具的**减熵设计**的核心理论。
- 所以，双摆系列工具的核心设计频率要大于40Hz。

双摆 I 型工具目标针对钻铤，是**被动破岩主动减震**工具。

双摆 II 型工具目标针对钻头，是**主动破岩兼有主动减震**工具。

双摆工具的减震机理是**对打型**，即与振动对打比快（所以打击频率必须比谐振要高），抑制振动的初发状态达到减震，是用振动打击抑制振动，主动减震的意思就是这个。

双摆 III 型工具，整合 I、II 型工具的主要指标（I 型减震功能75%，II 型功能的全部），在双摆 I 型工具上改变陀螺摆锤平衡关系，已试验多口高难度井趋于成熟，效果良好。

技术手段：工作频率大于40Hz，所以只能在气相下工作，屏蔽钻井液的干扰。

工程参数：耐压200MPa，耐温270℃，适应万米井深（按15000米设计）。

对超深井的一些认识



成果水平：国际领先

- **钻井痛点：超过7000米深的高温、高压、高硬、高软硬交替，井壁垮塌，都是井下熵增（混乱度增加）**
- **寒武纪白云岩下段，石膏岩与白云岩交替混杂，不管是高分子水基泥浆，还是油基泥浆，钻进过程中井壁极易垮塌。**
- **深部逆反地层的火山辉绿岩，井壁脆性极高，水基油基泥浆都搞不定，钻进中随时间积累垮塌是必然的。**
- **其它万米以上井深的未知地层，最主要难点就是怕井壁垮塌。**
- **这类地层不建议用螺杆及垂钻类工具，初期的井壁落物会造成螺杆偏心钻进，形成螺旋及蛇形轨迹，垂导仅稍好，积累一段就一定卡钻。所以，此类地层只适合光杆钻具组合。**
- **双摆Ⅱ、Ⅲ工具的出现，其主动破岩性、自解卡性、可堵漏性、提高井身质量性，提供了这些痛点地层的解决办法。**

井下安全的数学量化表现就是熵不增加



- 超过7000米井深的地层，未知因素增加很多，井下安全是第一要素，井身质量好，不垮塌、不卡钻及卡钻后能快速解卡是安全钻进核心，是顶层设计理念。双摆 II 型提速工具具有主动破岩性、自解卡性、可随钻堵漏性、提高井身质量性，是针对超深井钻进的顶层设计，配合超深井钻井液设计可成完整体系。
- 超深井应用指标排序：第一，降低超深井井底事故率是第一位（极简钻具组合）；第二，井身质量高，狗腿度小，井斜小是第二位；第三，提高机械钻速，增加行程钻速是第三位。
 - 双摆 I 型、II 型提速工具的组合，即针对钻铤复杂振动的强抑制，又有辅助钻头主动破岩的功能，以及工具的无损传递特性，对超深井的高温高压地层也是非常好的解决方案。双摆 III 型工具是 I、II 合体效果良好。

双摆系列工具与其它类工具比较



成果水平：国际领先

➤ 双摆Ⅱ型提速工具与其它扭冲类工具区别

- 双摆Ⅱ型工具，似乎与扭冲类似，但完全不同。它是在气相下激震，出力部件不与钻井液接触，所以不受钻井液的各种干扰，工具万米井深下与地表现是一样的，做到了无损传递。而其它类扭冲工具随井深增加围压升起，钻井液体的雷诺系数（惯性力与内摩擦力的比值）急剧减小，而液体内的摩擦力巨增，所以其靠液力压降差驱动力急剧下降，所以振不起来。这是最根本区别。
- 双摆Ⅱ、Ⅲ型工具是主动型工具，不仅有双摆Ⅰ工具的减震功能（约30~75%），还有径向的激振功能，是辅助钻头主动破岩。对付高塑性高弹性地层非常有效，康7康10井可证。

➤ 双摆系列提速工具与POWER-V垂直钻井工具比较

- 双摆系列提速工具的理论基础是傅里叶变换，不是力学理论，是“波”的能量分解理论及处理。
- POWER-V垂直钻井是电子测量主动控制机械推臂的机电一体提高井身质量的工具。其理论基础是经典力学。
- 双摆Ⅱ、Ⅲ工具的主动辅助钻头破岩、辅助防斜提高井身质量及井下自解卡特点，也是超深井的痛点：垮塌埋钻具。独此一家，是有效对治，目前有唯一性。
- POWER-V没有对付深井卡钻的能力及主动辅助钻头破岩的能力。

以熵减理论评价井下工具



成果水平：国际领先

- 扭冲类的工作频率较低，在浅层及部分区域可以取得熵减效果，有提速性。但深井及泥浆密度上来后，就振不起来了，减熵效果大打折扣。而自身的机械结构缺陷易断落井，形成熵增。
- POWER-V垂钻类，单体作用功能上对井下钻铤系统是减熵的，而在难深井上应用广泛。但其自身机电一体的特性，又是增加机电复杂性，自身是增熵的（典型事例：推靠臂的磨损及地层卡住和自卡住）。
- 双摆系列工具，40Hz以上的工作频率高于钻铤谐振频率，对井下钻铤系统是减熵，工具自身小压降、可随钻堵漏，全通的流道不会调制泥浆脉冲，即不干扰测斜仪器，是本质安全型工具，即使内部损坏也是与普通钻铤短节一样，**不增加井下钻铤系统熵值。**

对于整个钻井系统，双摆系列工具工作时是减熵，有问题不工作时是平熵。

随着双摆系列工具不断发展，井下有效工作时间越来越长，近期双摆 I 型有300小时，双摆 II、III型有200小时开泵寿命，远期将有500小时以上开泵寿命。

双摆系列原理简介



成果水平：国际领先

总纲：

双摆系列工具是对钻井系统中在频率维度上的系统解决方案。空间域（长、宽、高三维）、时域、频域，共**五个维度**，现有的钻井的经典力学方案仅有空域和时域的**四个维度**的牛顿第三定律为基础，**缺乏频域维度**，而不能周全井下系统工况（在高等数学上只有5维及以上才能自治），造成钻具事故，破岩难题，井身质量等各种复杂难题。

双摆系列工具的理论基础是傅里叶变换，是波分解及处理的理论。核心思想是用双摆工具主动及被动产生的高频波去分解钻井系统自身产生低频率波的能量积累，这个低频率波在钻铤上就是钻铤的第一自谐振点，在钻头上就是钻头的破岩阻力振荡。分别对应的双摆 I 工具和双摆 II 工具，双摆 III 是 I、II 合体。

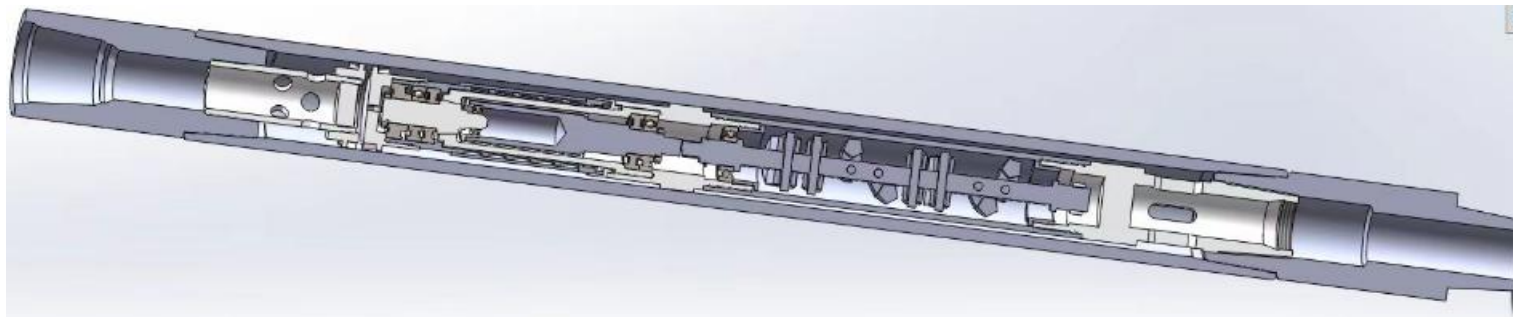
双摆现场经验总结



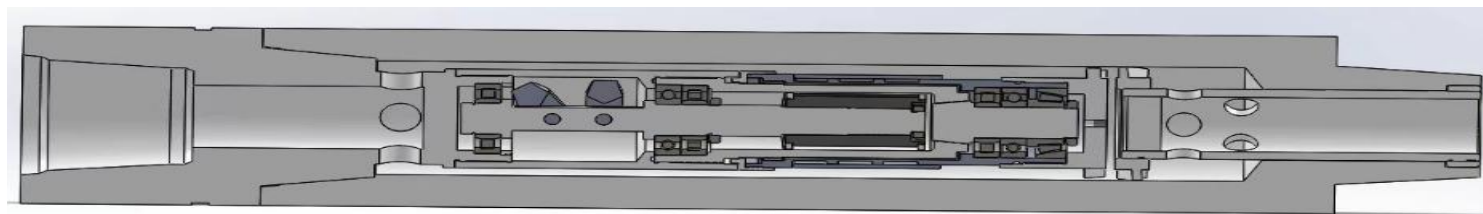
成果水平：国际领先

- **井下高加速度（100~600g）高频率（40Hz左右）振动的触发条件：**
 - ① 井眼越大，越易触发钻铤高频自振。
 - ② 井深越大，越易触发钻铤高频自振。
 - ③ 地层难度越大（高硬、高弹、高塑、高软硬交替），越易触发钻铤高频自振。
- 以上三种情况的混合，是井下钻具事故，井壁事故等各种复杂的主因。
- 这种井下高频振动，来无影去无踪，有激发条件，在地面系统无法模拟（必须实战），用经典力学无法分析。
- 万米深井，管柱随时都可激发井下高频振动，管柱及井壁故障防不胜防，双摆是正解。
- **防住井下钻铤钻杆的高频自振**，钻井就是一简单工程了，符合地面经典力学的预期构想。**万米深井将常规化。**

双摆机械结构示意图



双摆 I、双摆III工具结构图，是本质安全型工具



双摆 II 工具结构图，是本质安全型工具



成果水平：国际领先

双摆系列工具的主动减震功能，是靠高速旋转的摆锤以振动打击振动，以振动抑制振动的初发状态的减震工具。其减震机理在于摆锤的飞舞摆动，不同步摆动是对抗径向的振动，同步上下摆动是对抗轴向的振动，而对所有外来方向上的振动进行收敛。

双摆系列是对钻井系统**减熵**的工具。

技术特点：

双摆I、II、III型工具核心部件在气相下工作，屏蔽井底液相复杂工况干扰。

技术能力：

耐压200MPa，耐温270°C

万米深井管柱设计

- **总纲：防住井下钻头、钻铤、钻杆的高加速度高频率的随机强烈自谐振动。**
- **用双摆II、双摆III克制钻头、钻铤的强谐振。**
 - 双摆II工具是近钻头布置，主要针对钻头。
 - 双摆III是I、II合体，可近钻头布置，也可远离钻头在钻铤第一谐振点附近布置，可布置在单弯螺杆或旋导后，不影响支点。
- **用双摆I克制阻断长钻杆的谐振回路。**
 - 双摆I工具，布置在钻杆的中性点附近，阻断钻杆振动传递。
 - 双摆I工具，布置在超深井的不同口径钻杆的结合部位，阻断钻杆谐振的传递效应。
- 防住地层漏喷的必封点的井身设计，五开井五层套管是基本，留2层井眼备用。
- 井身基础设计：一开22寸，二开17.5寸，三开13寸，四开9.5寸，5开6.5寸。



成果水平：国际领先

井眼26、22寸，井深500~1000米

管柱设计

- ① 钻头+ ϕ 286mm螺杆+11寸钻铤3根+11寸双摆I工具+9寸钻铤3根+常规
- 要点：用双摆I工具的强主动减振抑制大口径钻头的振动，双摆I工具距钻头40米后附近布置。
- 11寸双摆I工具耐温150℃耐压150MPa，长度2.1米，工作排量65~75升/秒，设计额定工作转速3600转/分，瞬间最大减震力8吨，对所有外部振动收敛，内部是全平衡摆锤，具有最大的主动减震功能。

井眼17.5寸，井底深7000米。 （到寒武纪盐上，最好能到寒武纪盐下）

- ① 钻头+ $\phi 286\text{mm}$ 螺杆（单弯 $0\sim 1.25^\circ$ ）+11寸钻铤3根+11寸双摆I工具+9寸无磁+9寸钻铤3根+常规
- ② 钻头+ $\phi 286\text{mm}$ 螺杆（单弯 $1\sim 1.25^\circ$ ）+11寸钻铤3根+9寸无磁钻铤1根+9寸双摆III工具+9寸钻铤2根+常规
- ③ 钻头+11寸钻铤3根+9寸无磁钻铤1根+9寸双摆III工具+9寸钻铤2根+常规
- 要点：9寸双摆I、III工具距离钻头40~50米布置，用双摆调动整个钻铤的质量吸收井下振动，不可离大螺杆及钻头近距布置，大螺杆及大钻头振动太强，双摆打不过会被淹没掉。大螺杆的强烈偏心振动及双摆III的高频振动及对钻铤的被动减振，可大大提高钻井机速。
- 9寸双摆III工具耐温 180°C 耐压 180MPa ，长度2.4米，工作排量 $60\sim 70$ 升/秒，设计额定工作转速3600转/分，瞬间最大减震力7吨，对所有外部振动收敛，径向内部激振力 $60\text{Hz}6\text{KN}$ ，具有主动破岩主动减震功能。

井眼13寸，井底深9000米。 (如果封寒武纪盐下地层，本开次距离将较小)

- ① 钻头+ ϕ 244mm螺杆+9寸无磁钻铤1根+9寸钻铤1根+9寸双摆III工具+9寸钻铤2根+常规6.5寸钻杆
- ② 钻头+9寸双摆III工具+9寸无磁+9寸钻铤3根+常规6.5寸钻杆
- ③ 钻头+9寸钻铤2根+9寸无磁+扶正器+9寸双摆III工具+9寸钻铤1根+扶正器+常规6.5寸钻杆
- 要点：如果井深超过8000米后振动较大，可以在距钻头500米处，钻具中性点附近加1根7寸双摆I工具隔绝钻铤与钻杆的谐振。9寸双摆III工具布置在距钻头30米的最大谐振点附近，不建议近螺杆配置。
- 9寸双摆III工具耐温180℃ 耐压180MPa，长度2.4米，工作排量50~60升/秒，设计额定工作转速3600转/分，瞬间最大减震力7吨，对所有外部振动收敛，径向内部激振力60Hz6KN，具有主动破岩主动减震功能。
- 注意：两根双摆工具同时使用要间隔百米以上钻杆距离，否则他俩打架有干涉。

井眼9.5寸，井底深11000米

- ① 钻头+8寸双摆III工具+8寸无磁+8寸钻铤1根+7寸钻铤3柱（9~12根）+7寸震击器+3000米5.5寸钻杆+7寸双摆I工具（在套管内）+6000~8000米钻杆
- 要点：在套管内，用双摆I稳定上部钻杆，吸收及阻断上下钻柱的谐振。下部用裸眼段用双摆III辅助钻头破岩并兼具减振。
- 主打极简钻具组合，环控顺畅，扶正器都不要。
- 8寸双摆III工具耐温180℃ 耐压180MPa，长度2.4米，工作排量40~50升/秒，设计额定工作转速3000转/分，瞬间最大减震力6吨，对所有外部振动收敛，径向内部激振力50Hz4KN，具有主动破岩主动减震功能。7寸双摆I工具要调整转子叶片角度以适应8寸工具排量。
- 注意：两根双摆工具同时使用要间隔百米以上钻杆距离，否则他俩打架有干涉。

井眼6.5寸，井底深13000~15000米

- ① 钻头+ $\phi 135\text{mm}$ 双摆II工具+无磁+5寸加重钻杆300米+4寸钻杆3000~5000米+7寸双摆I工具+8000米6.5寸钻杆
- 要点：在套管内，用双摆I稳定上部钻杆，吸收及阻断上下钻柱的谐振。下部用裸眼段用双摆II辅助钻头破岩并兼具减振。主打极筒钻具组合不要扶正器。
- 5寸双摆II工具耐温 270°C 耐压 200MPa ，长度1米，工作排量13~18升/秒，设计额定工作转速3000转/分，瞬间最大减震力0.8吨，对所有外部振动收敛，径向内部激振力50Hz1.2KN，具有主动破岩主动减震功能。7寸双摆I工具要增加限流环以适应5寸工具排量。
- 注意：两根双摆工具同时使用要间隔百米以上钻杆距离，否则他俩打架有干涉。

请专家们指教！