处理卡钻事故

八十多年以来，震击器一直在钻井行业中得到广泛应用，是节省钻机时间并在出现卡钻情况下保护钻柱和井筒不受损害非常经济有效的应急方法。随着技术的发展以及对震击器动力学认识的不断深入，震击器的应用已经扩展到水平井和大斜度井中。然而，如何优化使用震击器依然是我们面临的难题，震击器技术将会不断得到发展。

Bob Costo
Larry W. Cunningham
Glenn Joseph Martin
José Mercado
Brian Mohon
Liangjun Xie
美国得克萨斯州休斯敦

《油田新技术》2012 年春季刊：24 卷，第 1 期。
©2012 斯伦贝谢版权所有。
在编写本文过程中得到休斯敦的 Eric Wilshusen 的帮助，谨表谢意。
Accelerator AP，AP Impact，Hydra-Jar AP 和 Jar-Pact 等是斯伦贝谢公司的商标。

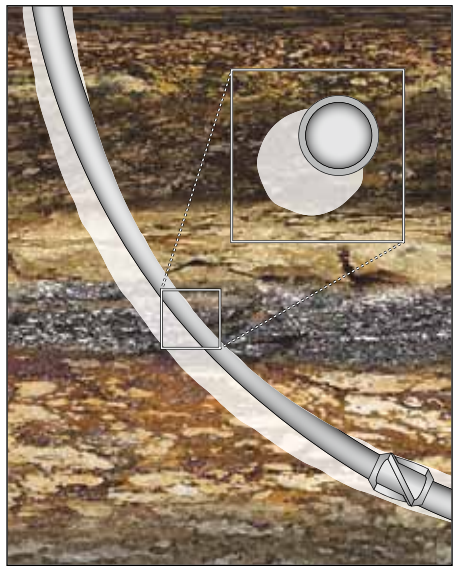
1. Shivers RM III 和 Domangue RJ：“Operational Decision Making for Stuck-Pipe Incidents in the Gulf of Mexico：A Risk Economics Approach”，*SPE DRILLING & COMPLETION*，8 卷，第 21 期（1993 年 6 月）：125-130。
2. Bradley WB，Jarman D，Plott RS，Wood RD，Schofield TR，Auflick RA 和 Cocking D：“A Task Force Approach to Reducing Stuck Pipe Costs”，SPE/IADC 21999，发表在 SPE/IADC 钻井会议上，阿姆斯特丹，1991 年 3 月 11-14 日。
3. Bowes C 和 Procter R：*1997 Drillers Stuck Pipe Handbook*。休斯敦：斯伦贝谢（1997 年）：13。
4. Clausen J，Rebellon J，Blanc J 和 Barton S：“Novel Drilling Technology Delivers a Step Change in Challenging Deepwater Operations”，SPE 142501，发表在 SPE 中东油气展览会与大会上，巴林麦纳麦，2011 年 9 月 25-28 日。

使用震击器的目的只有一个：释放被卡钻杆。震击是将钻柱储存的应变能迅速转换成动能，震击器再将动能传递到钻柱卡点上的过程。大多数作业者都会在井下钻具组合中安装震击器，作为可能出现卡钻事故的预防措施。据估计，平均每钻三口井就会出现一次卡钻事故，每年由此会给作业者增加数亿美元的成本[1]。大约 50% 的卡钻事故发生在起下钻的过程中，20% 发生在扩眼和修套管过程中，10% 发生在钻进过程中[2]。震击解卡是应对停工时间、昂贵的打捞作业、侧钻或弃井的最后防线。尽管勘探与生产公司会尽一切努力避免卡钻造成的成本，但是一般情况下，钻井人员对于震击器的力学和动力学原理缺乏了解，并且在如何优化操作震击器方面缺乏必要的培训。因此，作业者制订的应急计划并不能得到彻底贯彻，从而可能导致额外增加数百万美元的成本。

服务公司正在与作业公司进行合作，对钻井人员进行培训，并且鼓

缩径卡钻

键槽卡钻



压差卡钻

^ 卡钻机理。多种原因会造成卡钻，使钻柱在井中不能上下移动或旋转。当非固结地层的岩石颗粒、碎石或砾石落到井筒中时，就可能发生缩径卡钻（*左*）。当地层钻屑或碎石在 BHA 周围堆积时，也有可能发生缩径卡钻。当钻杆围绕井壁上某一点旋转时，就会在该处切出一个凹槽或键槽（*插图*），这时就有可能发生键槽卡钻（*中*）。当将钻柱从井中起出时，工具接头部分或 BHA 外径大于钻柱外径的部分就可能无法通过键槽，造成卡钻。在这种情况下，钻柱可以向下移动或旋转，但是无法上提，因此被卡在井中。当钻井液产生的静液压力大于渗透性地层的孔隙压力时，就可能会发生压差卡钻（*右*）。当钻柱静止或移动非常缓慢并且接触到渗透性地层或过厚的泥饼时，这一过平衡压差就会将钻柱推向井壁，造成卡钻。

励及时恰当地使用震击器分析程序（这些程序已经成为震击器应急计划预防措施的组成部分），旨在显著降低作业风险、停工时间和成本。对于地质情况、井眼和 BHA 几何形态以及震击器应用的深入了解，有助于钻井工程师更好地设计 BHA，从而优化机械钻速和井眼轨迹，最大程度防止出现影响钻井作业的井下事故。

本文对造成卡钻的原因和现有震击器的类型进行了回顾，并对震击作用力以及在钻柱中使用震击器的重要性进行了讨论。加拿大、阿曼和美国等地的应用实例说明了成功使用震击器的益处。

卡钻的原因和类型

当移动钻柱所需的静态力超过了钻机的能力或钻杆的拉伸力时，就会发生卡钻，此时钻杆不能上下移动或旋转。在钻进、接单根、测井或测试过程中，或是设备在井内进行任何作业的过程中都有可能发生卡钻事故。卡钻主要有两种基本类型：机械卡钻和压差卡钻。

当钻柱移动并遇到障碍或阻碍时，通常会发生机械卡钻。这种卡钻有三种机理：缩径卡钻、砂桥卡钻和井眼几何形状卡钻（上图）。当非固结地层岩石、岩屑或碎石沉积在 BHA 周围并充填钻柱和井眼之间的环空时，就会发生缩径卡钻。泥浆泵停泵时间过长（如起钻作业过程中）经常发生缩径卡钻。当中等或较大的岩石碎片、水泥或杂物掉落井中将环空堵塞时，就会发生砂桥卡钻。

当井眼形状或尺寸和 BHA 不一致时，就会因井眼几何形状造成卡钻。这种卡钻通常是由于井眼倾斜导致键槽卡钻造成的。键槽切入地层的凹槽，钻柱外径较大的部分例如钻铤连接处和底部钻具组合，就可能会卡在键槽中。其他原因包括缩径、刚性钻具、塑性地层、井筒内的台肩、狗腿度以及套管损坏等。

当钻杆静止或移动非常缓慢时，可能发生压差卡钻。这种卡钻由钻井液的过平衡所致，即泥浆柱的静态压力大于渗透性地层的孔隙压力，这一压差就会将钻杆推入井壁，从而导致卡钻 [3]。导致情况更加严重的因素包括过平衡压力较高、泥饼过厚、钻井液密度较高以及泥浆固相含量较高等。

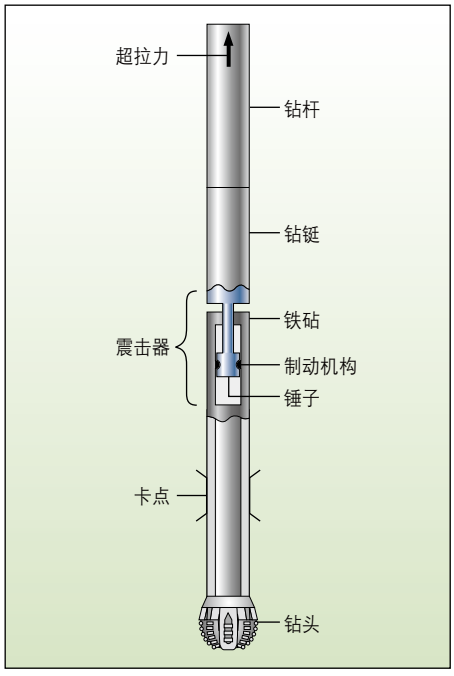
当工程师对卡钻的机理和原因有了正确的认识后，就会在设计过程中预先优化安装震击器，从而最大限度发挥震击器的作用。一旦出现卡钻，掌握这方面知识的操作者就可能根据井眼状况选择合适的震击力与持续时间。

震击器工作原理

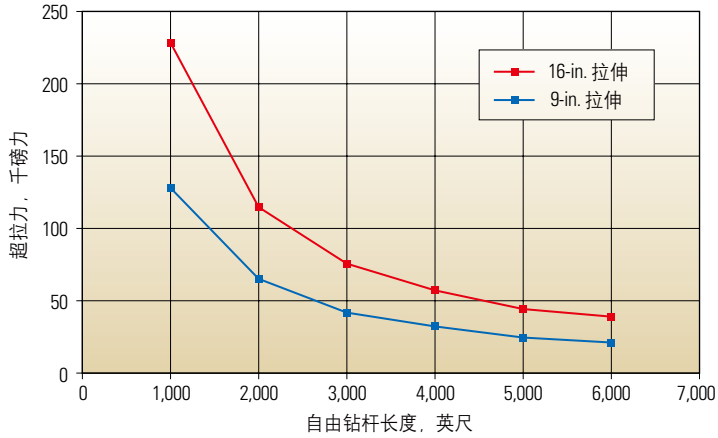
尽管震击器早在 19 世纪就开始应用，但是现代震击器直到 20 世纪 30 年代才开始出现。1931 年，工程师设计了一款由机械式闩锁装置固定的伸缩式心轴震击器。从那时起，震击器经过了无数次改进，使其能够不断应对更加复杂井的挑战 [4]。

如今的震击器由一个在套筒内滑动的心轴和一个内制动机构组成，内制动机构能够在释放心轴之前短暂延缓其运动[5]。心轴通常被称为锤子，而套筒常被称为铁砧。这种叫法可以帮助说明能量是如何从钻柱中释放并传递到卡点上（下图）[6]。

震击器的工作原理是基于其储存的势能。震击器的势能来自于从地面施加的超拉力或下放力[7]。震击器可向上、向下或上下冲击，在钻柱中处于拉伸或者压缩状态。如果处于拉伸状态，心轴完全打开，如果处于压缩状态，则心轴则完全关闭。无论处于哪种状态，心轴都不能运动，直到需要进行震击作业，司钻对钻柱施加额外的拉伸力或压缩力[8]。



^ 震击器系统。典型的震击器系统由一个可以在套筒（铁砧）内滑动的心轴（锤子）和一个制动机构组成。制动机构能够在释放心轴之前暂时限制其运动。时间延迟使得钻杆能够储存势能。突然释放制动机构使得心轴在撞击套筒之前加速运动 25 到 50 厘米（10 到 20 英寸），突然释放能量，将冲力传递到卡点上。心轴向上运动使得锤子撞击铁砧，在钻柱上产生向上的冲力。心轴向下运动产生相反的效果。



^ 储存应变能量。震击器的能量来自地面施加给钻杆的拉伸力。钻杆的类型和长度影响其拉伸量和所能储存的能量。本图对 5 英寸、19.5 磅 / 英尺钻杆两种拉伸长度所产生的不同超拉力进行了比较，其中超拉力是卡点以上自由钻杆长度的函数。对于给定的拉伸长度，自由钻杆越长，超拉力和储存的能量越小。

司钻通过在钻柱顶部缓慢施加超拉力而 BHA 保持静止来实现上击震击器。震击器中的制动机构在短时间内限制了心轴的运动，使钻杆发生物理拉伸，从而储存应变能量（上图）。这一阶段通常称为加载阶段，一般仅持续几秒钟，但如果司钻使用液压震击器，那么延迟时间就会较长，加载阶段可能会持续几分钟[9]。

下一阶段有时被称为冲击前阶段，开始于制动机构释放时，结束于震击器冲击时。这一阶段通常持续 50 到 200 毫秒。心轴加速，储存在拉伸钻柱中的能量突然释放，从而击发震击器上部钻杆和钻铤或厚壁钻杆（HWDP）的运动。钻柱在自由运动过程中获得动量。

当运动停止时，就会传递一个冲力，类似于锤子敲击铁砧。这一冲击阶段通常持续 10 到 50 毫秒。并且冲力会产生冲击波沿钻柱上下运动。这一过程能够将能量突然释放到卡点上。

冲击后阶段持续几秒钟，之后钻柱恢复到完全放松的状态。在下一个阶段即复位阶段，下放钻柱直到给震击器施加一个压缩力，使震击器复位以便进行下一次震击。

当震击器下击时，施加在钻杆上的不是超拉力，而释放的是工具串重量，将压缩力传递到卡点从而通过向下推动被卡工具将其释放。重复震击过程，某些情况下需要重复数百次，直到解卡。如果震击作业没有成功，作业者就会考虑采取其他办法。

震击过程中产生冲力和冲量，两者结合来克服卡钻阻力从而解卡。冲力是由锤子击打铁砧产生的峰值力。冲量是在冲击阶段发生的动量变化，可以由载荷 - 时间关系曲线之下的面积进行计算（下一页，上图）。冲力和冲量主要受震击器以上钻铤数量的影响。

5. 制动机构是一个使某机械部件的位置相对于另一个部件保持不动的机构，这样，当向其中一部件施加力时可以释放该装置。雨伞中的打开机构就是制动机构的一个例子。

6. Kalsi MS，Wang JK 和 Chandra U：“Transient Dynamic Analysis of the Drillstring Under Jarring Operations by the FEM”，*SPE Drilling Engineering*，2 卷，第 1 期（1987 年 3 月）：47-55。

7. 超拉力是施加在移动钻杆上且超出钻杆在空气中或流体中重量的拉力。下坐重量也叫下放时钻具重量，等于钻杆可自由活动时钻柱和 BHA 在卡点或井底的重量。

8. Schmid JT Jr：“Designing BHAs for Better Drilling Jar Performance”，*World Oil*，195 卷，第 5 期（1982 年 10 月）：100-104。

9. Aarrestad TV 和 Kyllingstad Å：“Loads on Drillpipe During Jarring Operations”，*SPE Drilling & Completion*，9 卷，第 4 期（1994 年 12 月）：271-275。

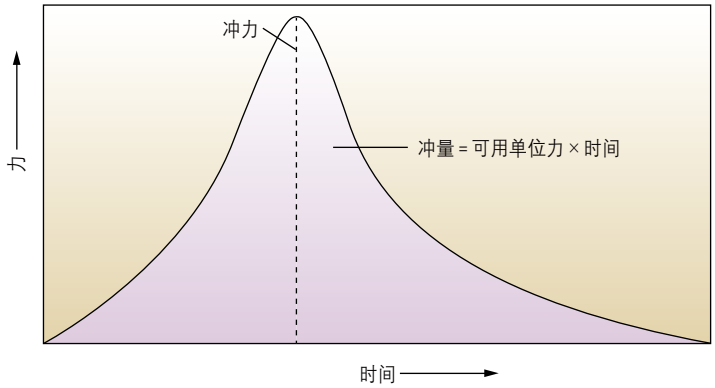
10. Newman KR 和 Procter R：“Analysis of Hook Load Forces During Jarring”，SPE/IADC 118435，发表在 SPE/IADC 钻井会议暨展览会上，阿姆斯特丹，2009 年 3 月 17-19 日。

钻铤数量越少，产生的冲力越大，但钻铤数越多，产生的冲量越大。在成功的震击作业中，通过在恰当的位置安装震击器、调整钻铤数量，以最大限度地利用冲力和冲量来解卡。

震击器产生冲力的大小由超拉力或下放时钻具重量所限制。设计合理的震击器组合上击时施加的力要大于下击时的力，因为司钻可以对钻杆施加高达 90% 钻杆屈服强度的力。然而下放时钻具重量及所能产生的压缩力远小于整个钻柱的重量，这是由于受到震击器以上的钻柱弯曲、钻铤长度配置以及钻铤和震击器之间相对位置的限制[10]。当钻柱被卡时，在与钻杆移动相反的方向进行震击效果最佳，也就是说，当钻柱在下井过程中被卡时，向上震击效果最好，如果在起钻过程被卡，向下震击效果最佳。

有两种阻力可能会影响震击效果。震击器内外较大的压差作用在心轴全密封横截面积上，可能会产生一个足够大的力将震击器打开并且上提钻柱。这个力叫做震击器泵开力或震击器拉伸力。当向上震击时，作业者必须将地面超拉力加上泵开力才能得到震击器上实际的拉伸力。当向下震击并且处于循环状态时，司钻必须在地面释放更多重量来克服反方向作用的泵开力。

有时候泵开力可以帮助上击作业。在压差卡钻或阻力非常严重的情况下，超拉力无法打开震击器或从液压震击器中诱发足够大的冲力。震击器有时候是通过增加泥浆泵排量（以此提高泵力）或增加泵压与拉伸钻柱同时作用来开启的。作用在钻杆上的阻力增加了超拉力的需要。在直井中，阻力可以忽略不计，但是在定向井中，阻力经常会使打开震击器所需的超拉力增加 10%。

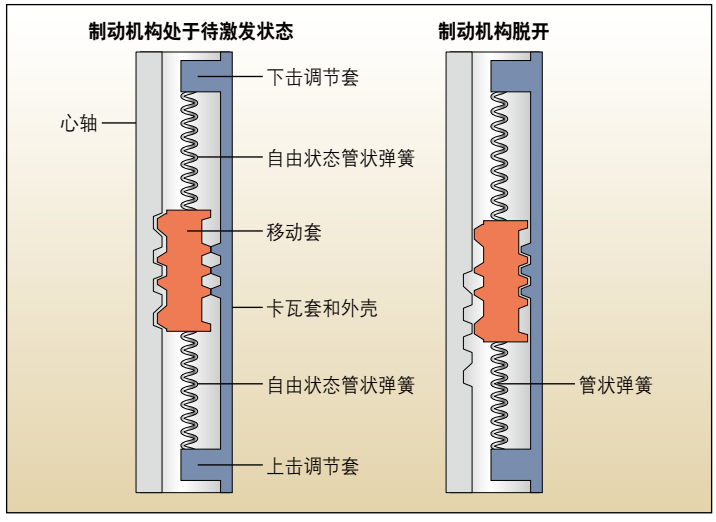


^ 冲力和冲量。震击器被激发后，目标就是产生冲力来解卡。冲量就是单位力 × 时间，必须足够大才能移动钻柱。冲力和冲量都主要受到震击器以上钻铤的数量和震击器安装位置的影响。

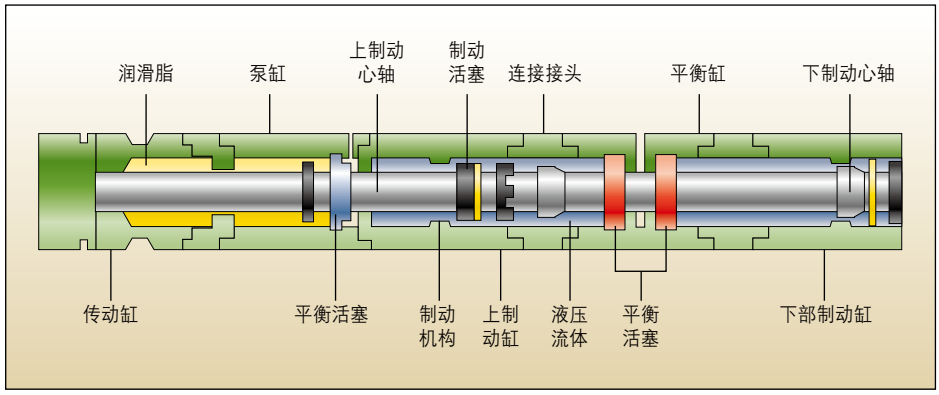
震击器的类型

震击器按照功能和激发方法分类。钻井震击器和打捞震击器具有类似的设计，并且传递的冲力大致相等，但是它们的制造方法同、功能不一样。钻井震击器的长度是标准钻杆的长度，并且能够承受钻井中的应力，作为BHA的组成部分下入。此外，钻井震击器还可能在一次震击作业中进行多次激发和复位。打捞震击器比标准钻杆短，不能承受钻井中的各种应力，只能在卡点以上钻柱断开并从井眼中起出时使用。它们通常只能向上震击。

机械式震击器和液压式震击器的功能相似，但是制动机构不同。机械式震击器通过使用一系列的弹簧、锁紧机构和配有释放机构的滚轴来激发。机械式震击器在预定拉伸力时向上震击，在预定压缩力时向下震击，这些力通常大于钻井过程中所达到的拉伸力和压缩力。震击器的激发只与载荷有关，与时间长短无关。在钻井过程中，机械式震击器不是处于待激发状态，就是处于完全拉伸或完全压缩的状态（下图）。尽管机械式震击器在某些情况下更为常用，例如在高压井中，但是在大多数应用中许多工程师更加倾向使用液压式震击器技术。



^ 机械式震击器。当机械式震击器制动机构处于待激发时（*左*），管状弹簧将移动套压紧在心轴上，防止震击器激发。通过保持一定的拉伸力或压缩力（低于启动管状弹簧的力），震击器可以在井眼中自由下入、起出，而不必担心误激发震击器。当施加的拉伸力大于预定弹簧力时，移动套被迫向上或向下移动，使得心轴可以自由滑动（*右*），从而激发震击器。



^ 双向作用液压 Hydra-Jar AP 工具。传动缸的一部分允许震击器心轴在轴向上自由伸缩，并将扭矩传递到工具上。上部液缸和平衡活塞与井眼压力保持平衡。上部制动缸包括一个限制装置，叫做制动机构。施加超拉力时，制动活塞被拉向制动机构，计量通过制动活塞的液压流体，并使拉伸在钻柱上累加。制动活塞在缸内低速缓慢移动，直到撞击制动机构、启动震击器并且向上冲击。下部制动心轴和制动缸与上部的功能一样，只是产生的冲力是向下的。

20 世纪 40 年代业界推出液压震击器来增加冲击载荷，机械式震击器的锁定结构限制了冲击载荷的大小。因此，液压震击器的设计使其不在预定门限震击。相反，它们利用活塞穿过制动机构中液压腔内的方式进行操作。当给处于设定位置的工具施加拉力或压力时，腔内液体通过小孔从高压端被压缩并推向低压端。小孔限制了流体流动，导致时间延迟，以将势能储存在钻杆中。改变通过小孔的流体流速可影响施加在卡点上的冲力大小。

计量行程是液压震击器和流体运动经过的总距离[11]。当行程达到一定距离，活塞从限制区域移动到较大区域，使得压缩液体围绕活塞自由流动。此时震击器激发，两侧的压力相等。震击器的激发时间和压力决定了所需施加拉伸力和压缩力的大小[12]。司钻能够影响施加在震击器上的超拉力，从而影响流体通过小孔的流量以及震击器激发的速度和力量。产生冲力的大小与超拉力成正比。超拉力越大，震击器激发得越快，冲力也越大。任何施加的力都可激发震击器，司钻可改变最终作用在卡点上的力的大小。

扩大液压震击器的应用范围

油气勘探开发逐步发展至更深水域、更恶劣的井下环境和更复杂的井眼几何形状，因此要求包括震击器在内的各种工具能够在更高的井下应力条件下稳定、高效、安全地工作。震击器生产商已经生产出能够在各种钻井环境下稳定工作的工具，包括陆上、海上、直井、水平井或定向井、超深井或高温高压(HPHT)井等环境。

与机械式震击器相比，液压震击器具有明显的性能和作业优势，但是也有一定的限制。流体通过限制区域所产生的摩阻会提高震击器的温度。当震击器温度过高时，作业者必须停止震击作业让流体冷却下来。为了尽量减小温度升高的影响，休斯敦的工程师研发了 Hydra-Jar AP 双向作用液压钻井震击器（上图）。该工具具有独特的温度补偿设计和高温密封。

震击器可在压缩或拉伸状态下运行，并且可以灵活优化震击器在钻柱中的安装位置。此外，因为工具在工作时不施加扭矩，所以在震击作业时钻柱不旋转，因此定向钻井工具的方位保持不变。为确保 Hydra-Jar AP 震击器能够在特定情况下高效、稳定运行，工程师研发了 Jar-Pact BHA 安装分析软件。该软件可模拟 AP Impact 高级性能系统的安装位置，使用作业者建井计划中的数据，包括井眼参数和 BHA 参数，并且推荐工具的最优安装位置，避免将工具安装在钻柱的中和点或过渡区域或其附近[13]。该软件还可确保井眼和工具直径的比例在推荐范围内。

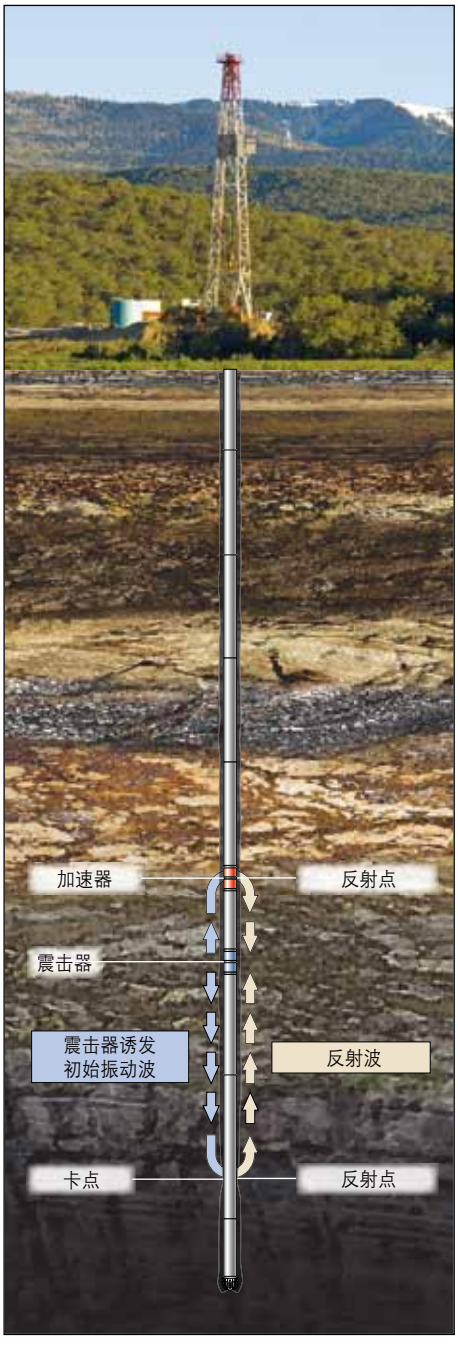
尽管作业者努力使用尽量少的震击次数来尽快释放被卡钻柱，但是加拿大西部一口井的经验说明了先进的液压钻井震击器的强度和可重复性。阿帕奇加拿大公司在加拿大艾伯塔省的 Keg River 白云岩 - 碳酸盐地层钻井时，在钻柱中安装了一个Hydra-Jar AP工具作为防卡措施。钻井过程中，在泵入几次堵漏丸以阻止井漏之后，钻柱上碳酸钙堆积，导致发生缩径卡钻[14]。通过综合倒划眼和使用 Hydra-Jar AP 工具进行冲击成功将钻柱解卡。在 7 个小时的时间内，震击器激发 200 多次，没有发生冲力损失。钻杆解卡后继续钻进到总井深而没有进行打捞作业，将停钻时间和钻机费用降到了最低。

震击器加速工具

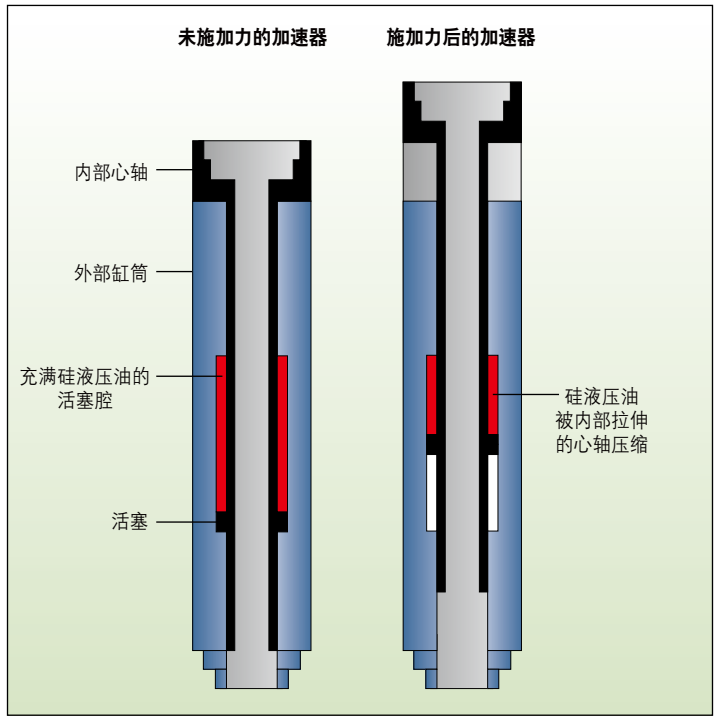
为了使震击器在任意给定载荷时都能传递最大冲力，心轴必须在撞击套筒时依然处在加速状态。如果在冲击之前就达到最终速度，那么震击器的冲力将受到限制。因为在许多 BHA 中钻铤已经被较轻的厚壁钻杆代替，所以经常会出现工作重量不足以产生足够的震击冲力或冲量的情况。在 BHA 中安装震击加速器显著增加了震击器的冲力和冲量，并且将冲击波向下反射到卡点上（下一页，左图）。同时还可以减轻钻柱和地面设备承受的应力，从而保护顶驱免受磨损。

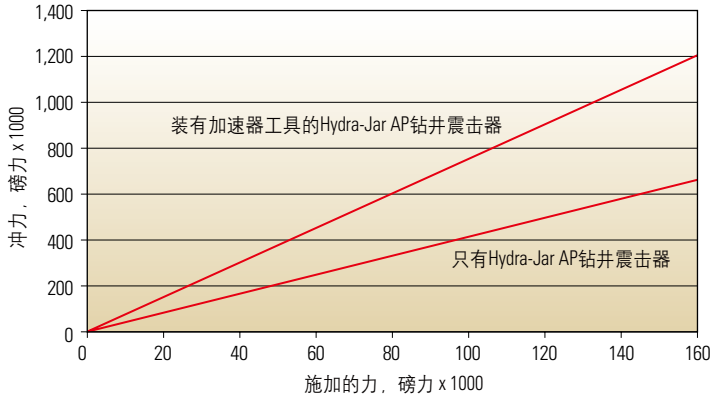
斯伦贝谢 Accelerator AP 冲击工具是一种震击加速器工具。它是一个坚固、高负载的弹簧工具，直接

安装在震击器和厚壁钻杆之上。向震击加速器工具的冲击系统施加载荷后，压缩加速工具内的流体、气体或弹簧，从而在工具中储存势能。震击器和加速器配合使用，因此当震击器释放时，加速器中储存的势能也同时释放。加速器中储存势能的释放效率远高于钻柱中储存能量的释放效率，因为它消除了数百米钻杆上的井筒摩阻。使用加速器工具能够使震击器的冲力有效倍增（下图）。



^ 停止振动。震击器激发后，会产生沿着钻柱上下传播的初始振动波。向下的振动波在卡点处向上反射。为增加震击器的效率，加速器在钻柱中的作用相当于液压切断机构，从而有效防止初始波和反射波到达钻台。





^ 增大震击器的冲力。加速器工具由一个外部缸筒和一个内部心轴组成，两者通过充满硅液压油的活塞腔连接（*左上*）。向加速器工具施加压力后（*右上*），移动的活塞压缩硅液压油，将能量储存起来，并使钻柱产生更大拉伸。当压力释放，硅液压油膨胀，就像弹簧一样将活塞移动到其原始位置。这一运动通过将储存在加速器中的能量增加到钻杆中储存的能量，来增加震击器最终的冲力和冲量（*下*）。

11. Adelung D，Askew W，Bernardini J，Campbell AT Jr，Chaffin M，Hensley R，Kirton B，Reese R 和 Sparling D：“Jars，Jarring and Jar Placement”，*Oilfield Review*，3 卷，第 4 期（1991 年 10 月）：52-61。

12. Adelung 等人，参考文献 11。

13. 过渡区是指钻柱中和点和处于拉伸或压缩状态点之间的区域。在钻井过程中，过渡区的位置是变化的。

14. Cook J，Growcock F，Guo Q，Hodder M 和 van Oort E：“稳定井眼防止井漏”，《油田新技术》，23 卷，第 4 期（2011 年冬季刊）：26-35。

与阿帕奇加拿大公司的经历不同，Arbaj 能源服务公司的工程师通过使用加速器工具成功实现了迅速解卡。在阿曼的一口井中，从 957 米（3140 英尺）钻到总井深 3590 米（11800 英尺）之后，上提钻柱以便进行流量检测，上提 16 米（53 英尺）之后发生了缩径卡钻事故。无法循环钻井液、旋转以及上提或下放钻柱。在几次 BHA 解卡尝试之后，作业者用 Hydra-Jar AP 和 Accelerator AP 冲击工具替换了失效的震击器，并且进行了 Jar-Pact 安装分析，以优化施加在卡点处的冲力和冲量。

根据 Jar-Pact 分析结果，位于卡点以上的 BHA 在顶部稳定器以上逆转一个钻铤的距离，深度为 3536 米（11601 英尺），然后将钻柱从井中起出。Hydra-Jar AP 和 Accelerator AP 工具作为打捞组合下入井中，在被卡的 BHA 周围啮合。尽管根据最初计划需要向下震击八小时，然后再向上震击八小时，但是在向下震击仅一小时后，被卡的 BHA 就开始移动。在六个小时内就完成了一个 14 米（46 英尺）长的口袋，使作业者能够重新建立循环并且旋转 BHA。这次成功的解卡作业避免了昂贵的侧钻作业，帮助 Arbaj 能源服务公司节省了 130 多万美元。

尽管在所有类型的井中都推荐使用震击加速器，但是它们在大斜度井、水平井、塑性盐膏层段、极易发生压差卡钻的地区、钻柱阻力大的井以及向下震击作业中的应用效果尤为明显。美国得克萨斯州西部一口井中的应用经验进一步说明了上述观点。工程师在工具串中安装了 Hydra-Jar AP 双向作用液压钻井震击器和 Accelerator AP 工具，旨在减少在震击作业中顶驱所受到的潜在损坏影响，提高成功解决钻穿 Akota 页岩 $8^1/_2$ 英寸层段时发生卡钻事故的可能性。在接单根过程中，页岩的坍塌造成 BHA 被卡，无法建立循环。需要立即开始震击解卡。加速器工具中储存的能量加上已储存在钻柱中的能量能够在卡点施加了两倍于不使用加速器时的冲力。由于加速器是一个可伸缩部件，它吸收了在其他方式下可能会通过钻柱传递到地面设备的力。采用震击器和加速器的组合，仅用 45 分钟便成功解卡，且未对顶驱造成损坏。钻井得以继续进行，作业者避免了可能需要的侧钻作业。

震击器安装指导原则

震击器的设计和安装位置是能够成功进行震击作业的最主要决定因素。然而，自从有了震击器以来，它们的安装更多取决于司钻的经验和常规实践而不是进行工程分析，部分原因是由于业内专家对于震击器设计和动力学原理的了解不足。由于震击器和钻铤一样看起来是实心的，所以使用者经常认为它们与钻铤一样坚固。然而，与钻铤不同，震击器的内部工作部件非常复杂，具有大量接头和内部薄弱点。此外，震击器内部接头的丝扣也没有连接钻杆的 API 规范丝扣的强度大。

虽然震击器解卡的成功率有差异，但斯伦贝谢的工程师认为 65% 的作业失败与不恰当的震击器安装位置有关。恰当与不恰当安装位置的区别在于前者为当今的作业者每年节省数亿美元，而后者则每年造成数亿美元的损失。震击器安装位置的复杂性常常被错误理解和忽视，并且很难找到基于现场成功应用经验出版的震击器安装位置推荐指南 [15]。

定向钻井公司及其客户经常提前几个月开始设计 BHA，以确保顺利从起点钻到总井深。然而，工程师在安装震击器时侧重考虑的问题是不要影响钻井，而不是考虑如何使得对成功解卡最为关键的冲力和冲量最大化，因此震击器在 BHA 中的作用并未受到足够重视。如果要进行震击器安装分析的话，工程师一般都是在即将起下钻前进行，这就大大降低了优化震击器位置的可能性。

工程分析在确定合适的震击器安装位置方面的作用越来越大，对于在井规划早期进行震击器安装分析的需求也越来越强。钻柱对于与震击相关的各种力的响应非常复杂，因此业界越来越需要功能强大、简单易用的震击器安装分析软件。简单计算公式对于震击器的安装和使用可能会有所帮助，但是使用简单工程工具不能解决更为复杂的问题。这些问题最好是通过有限元分析来解决，而有限元分析正是现代震击器安装与分析软件的组成部分。这些软件能够帮助司钻调查和评价震击器在 BHA 中不同安装位置上震击作业的有效性（下一页图）。

在没有震击器安装分析软件的情况下，业界制订了震击器安装的一些指导原则。第一步是考虑以下几个基本问题：

- 最有可能导致卡钻的机理是什么？
- 震击器将处于拉伸还是压缩状态？
- 钻井过程中，与震击器相关的中和点在哪里？
- 泵压对震击作业会产生怎样的影响？
- BHA 设计和钻井参数是否在震击器与加速器设计限定的范围之内？
- 目标井段是直井、斜井还是水平井？
- 井下钻井工况是否恶劣？例如温度或压力是否极高？使用的泥浆固相含量是否很高？是否存在或可能存在硫化氢 [H_2S]？

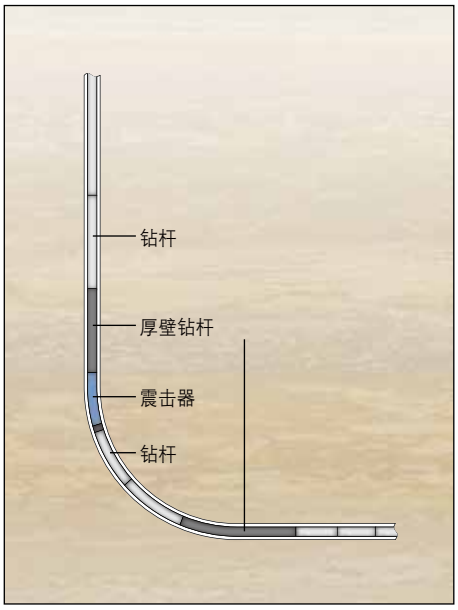
除上述基本问题外，还有四个基本指导原则能够帮助优化震击器安装位置。第一是最少施加预计超拉力的 10% 到 20% 作为震击器以上的锤击重量，以确保具有足够的重量，能够产生最优冲力。在这个锤击重量范围内能够提供理想的质量，保持足够的速度，从而向卡点传递最优冲力。

第二个指导原则是不要把震击器安装在距离中和点太近的位置。

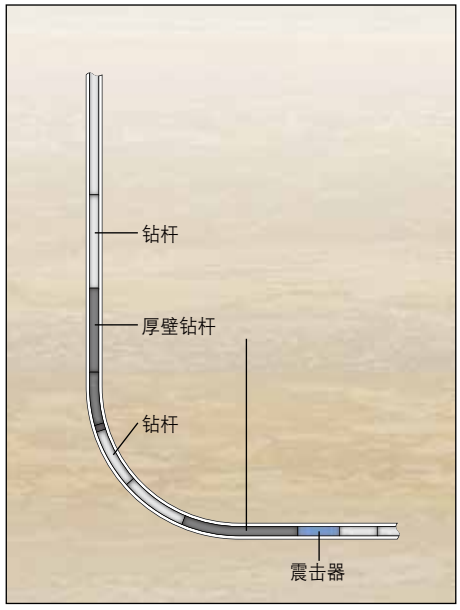
15. Bouaziz S，Cummings J，Rebellon J，Barton S 和 Yankow A：“Advancements in Downhole Drilling Tool Placement for Highly Deviated Wells and ERD Applications”，SPE 144030，发表在 SPE 北美非常规天然气大会暨展览会上，美国得克萨斯州 Woodlands，2011 年 6 月 14-17 日。

16. Askew WE：“Computerized Drilling Jar Placement”，IADC/SPE 14746，发表在 IADC/SPE 钻井大会上，达拉斯，1986 年 2 月 10-12 日。

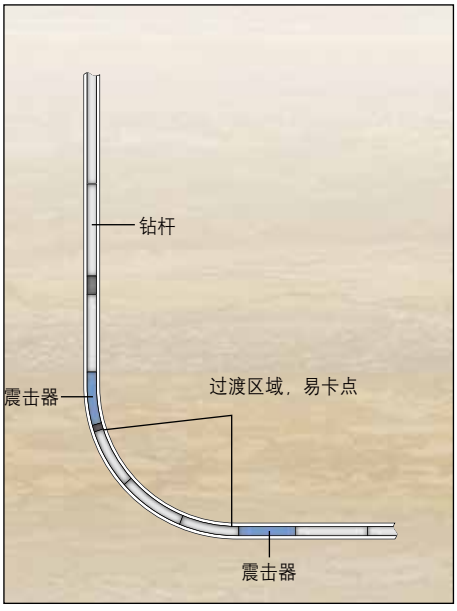
水平井安装位置，上部井段单震击器



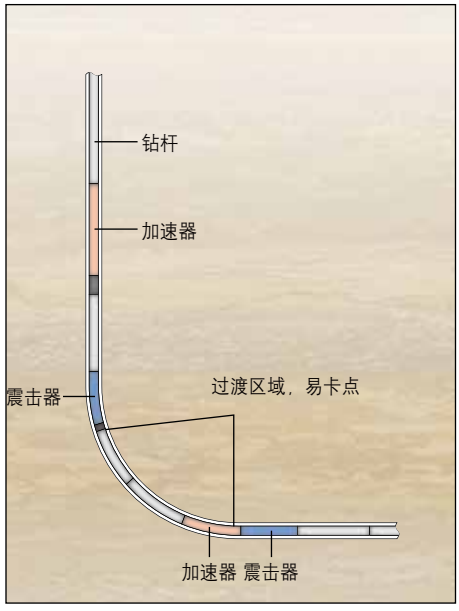
水平井安装位置，水平井段单震击器



水平井安装位置，双震击器



水平井安装位置，双震击器和双加速器



^ 震击器安装位置。大斜度井和大位移井给多年来直井震击器安装位置的常规经验和实践带来了极大的挑战。例如在水平井中，震击器既可以安装在上部直井段（*左上*），也可以安装下部水平段（*右上*）。将单个震击器安装在上部直井段能够保护下部 BHA，并可降低因不能获得足够重量或超拉力而无法操作震击器的风险。然而，震击器安装在水平段的震击效果相对较差，并且施加在卡点上的冲力通常达不到要求。将震击器安装在水平段会造成由于无法克服井眼阻力而不能激发震击器的巨大风险。最近，作业者通常使用两个震击器并分别安装在直井段和水平段（*左下*）。双震击器既可保护直井段和水平段，又能够在卡点处传递更大冲力。在两个震击器前各安装一个加速器（*右下*），能够减小由于阻力造成的速度损失、增加下部震击器的效率，从而使得两个震击器的冲力加倍。选择双震击器方案时，须在两者之间保持足够的距离，以避免上部震击器产生的冲力对下部震击器产生破坏性影响。

因为中和点处的横向振动更加严重，所以钻杆大多都会在中和点附近出现故障。此外，将震击器安装在距离中和点太近的位置还会导致震击器在压缩和拉伸状态之间连续反复转换，从而加速震击器的疲劳损坏，降低作业寿命，并且还会导致震击器意外激发。在震击器和中和点之间保持 20% 的钻压将会确保震击器处在中和点过渡区域之外。当改变钻压或 BHA 之后，也应当重新考虑改变震击器的安装位置。

第三和第四个指导原则是不要在震击器上部安装其外径大于震击器外径的稳定器或其他 BHA 组件，并且要确保稳定器距离震击器至少 28 米（92 英尺）。震击器不能用作钻铤和厚壁钻杆或者两种不同尺寸钻铤之间的接头。这些位置上会产生非常高的弯曲应力，从而增加了工具损坏的风险。

未来的发展

与深水作业相关的大斜度井和大位移井的激增，以及页岩气储层的勘探与开发，给钻井作业带来了更多新的挑战，包括钻杆可能在同一井眼的两个不同井段遇卡等情况。诚然，油田打捞人员在打捞作业方面的技能与经验具有极高的价值。然而，考虑到今天钻井作业的需求、风险和成本，仅有经验是远远不够的。经验往往基于地面测量结果，因此并不一定能反映真实的井下状况 [16]。对震击器安装的传统认识和经验可能不适用于这些新的钻井环境。

卡钻会造成井眼损坏、停工时间以及增加成本，在 BHA 中安装震击器可作为预防卡钻的措施，但必须对震击器安装位置进行仔细研究分析才能充分实现其应用价值。随着司钻对于震击作业复杂性认识的不断深入，以及在井眼设计过程中，震击器供应商和钻井公司开始加强战略合作，震击器作业的成功率将不断提高，卡钻事故造成的损失和成本将不断降低。 — JF