

油、气井聚能射孔器

242.9

燃料化学工业出版社

油、气井聚能射孔器

黄定邦 译 谭廷栋 校

燃料化学工业出版社

目 录

第一章 聚能药柱装置和作用的基本原理	1
聚能爆炸效应	1
聚能药柱的装置和作用	5
聚能射孔器的药柱	11
不形成流芯堵塞射孔眼的聚能药柱	23
第二章 聚能射孔器	28
有外壳聚能射孔器	33
多次使用的射孔器	34
多次使用的特种射孔器	47
外壳可起出的、一次使用的射孔器 ПКО 和 ПКOT	51
用油管下井的射孔器	58
外壳全部被破碎的 ПСК 射孔器	60
无外壳聚能射孔器	62
板带式射孔器 ПКС	63
破碎性非张开式射孔器 КНР 和 КНРУ	70
张开式破碎射孔器 ПКР	88
第三章 井眼射孔方法和使用聚能射孔器的特点	102
不起油管的井眼射孔	102
调节压力的气井射孔完井法	105
利用油管下井的射孔器射开油层	105
聚能射孔器的应用特点	106
参考文献	112

第一章 聚能药柱装置和作 用的基本原理

聚 能 爆 炸 效 应

端头有凹穴的炸药柱,其聚能爆炸的效应如下:假如,在放起爆药饼(传爆药饼)相反方向上和在对着障碍物的药体端头上做成半球形、喇叭形、圆锥形或某种其他形状的对称轴线的凹穴,则聚能药柱爆炸对障碍物的局部作用就显著提高。这是因为移向聚能药柱凹穴中心并作用于障碍物较小面积上的爆炸生成物的集中作用所致。为了对比起见,我们研究两个一样大小的圆柱体炸药柱的作用,其中一个具有圆锥形的聚能凹穴(图1)。

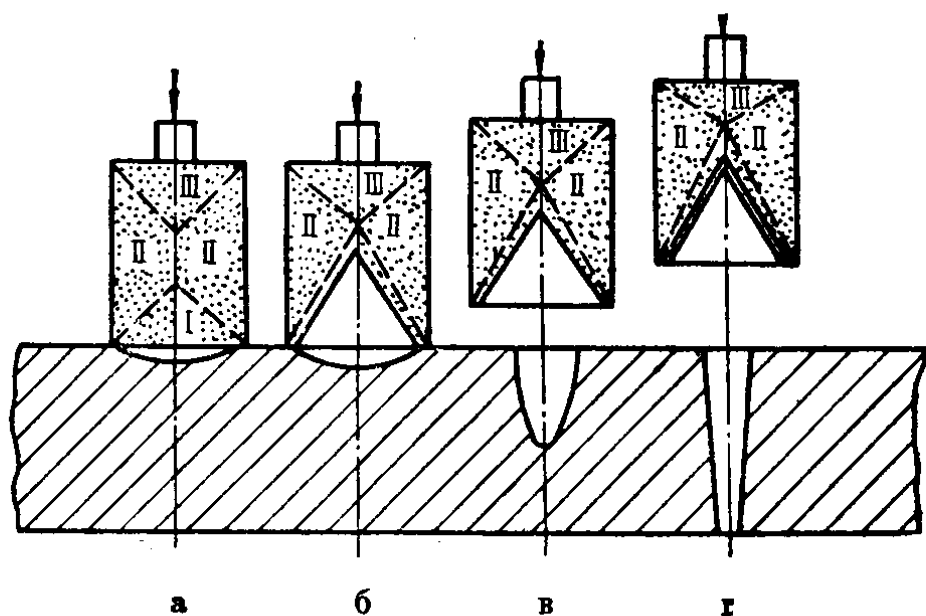


图1 炸药柱爆炸作用

a-无凹穴; б 和 B-未镶聚能药形罩; Г-镶有聚能药形罩; I-药柱
活性部分; II 和 III-药柱非活性部分

由于没有聚能凹穴(图1, a)炸药柱爆炸作用于钢板的结果,只造成直径与药柱直径相等的不深的凹陷。只有端头对着障碍物

有聚能凹穴(图 16)炸药柱爆炸作用于钢靶,才形成比药柱直径稍小而较深的凹陷。如果这种药柱与障碍物放置相隔一定的距离(图 1, б),则在钢板上会形成更深的凹陷。

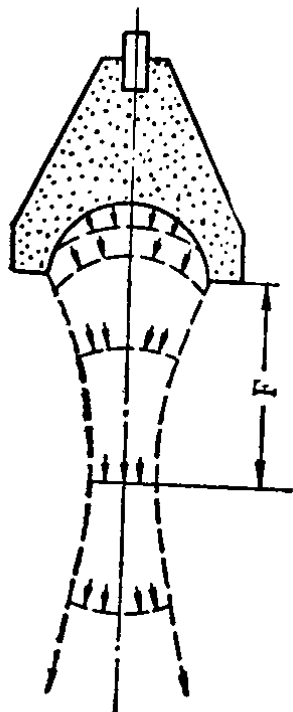


图 2 聚流的形成
(F-聚焦距离)

具有聚能凹穴的药柱穿透威力之所以提高,是因为爆炸生成的气体波移向聚能穴的轴心,并聚积成一股强大的射流,这股射流就称为聚能流(以下简称聚流)。聚流形成的过程如图 2 所示。

在距聚流凹槽底部的某一距离内具有最大的密度。这个距离 F 称为聚焦距离或焦距。

聚流的密度在其最大集中处,即在焦距内的密度近似炸药柱的密度。聚流穿过金属障碍物的深度,不超过药柱直径。

聚能药柱(无药形罩①)穿透深度,取决于凹穴形状和药柱其它参数。但是,如果在聚能凹穴内盖上一层薄的金属药形罩,特别是盖上紫铜罩(图 1, в),聚能药柱的穿透作用就能增加几倍,这时聚能效应才具有实际意义。当这种药柱爆炸挤压聚能罩时,只是一部分爆炸生成物破坏障碍物。造成挤压聚能罩的爆炸生成物的那部分药柱炸药形成聚流,并称为聚能药柱的活性部分。这部分(参看图 1, I 部分)一方面作用于聚能凹穴的表面,另一方面作用于具有取决于药柱大小和炸药爆速^[10]那个角度的圆锥表面。

药柱活性部分的炸药体积 V_a 近似地从下列公式得出:

$$V_a = \frac{\pi r_0^3}{3} \quad (1)$$

式中 r_0 ——凹穴半径。

从这个公式中得出,随着聚能凹穴底部直径增大,而聚能爆炸效应也显著提高。

① 亦可译为“锥形漏斗”或“漏斗”,本书均译为“罩”。——编者

药柱其余(非活性)部分(参看图 1, II、III 部分), 以较慢的速度飞散出去, 并很快地消散在空间。在 II、III 部分的界面上, 爆炸生成物的飞散速度等于零。药柱的非活性部分起到特殊的“堵塞”作用, 以防药柱活性部飞散到外面去。炸药的这一部分就可用在爆炸时不会破坏的金属壳来取代^[14]。

镶有金属罩的聚能药柱作用的增强, 是因为这种药柱在爆炸时具有很大密度的金属流作用于障碍物之故。

在正确选择参数的条件下, 把凹穴内镶有铜罩的聚能药柱, 放到隔障碍物的最佳距离上, 在钢靶上射的孔眼直径为药柱凹穴直径的 $1/2 \sim 1/3$, 射入的深度等于凹穴直径的 $4 \sim 5$ 倍。

金属聚流破坏钢的障碍物, 是因为障碍物的材料变形和将其挤到自由表面上所造成的(图 3)。聚流破坏岩石是由于岩石变形和被击碎微粒的分离(冲掉)所致。聚流穿进障碍物质的过程与水流射入土壤内相类似。障碍物质在受到冲击的地方, 向四面八方高速飞溅。在障碍物上形成的孔径远大于射流直径。

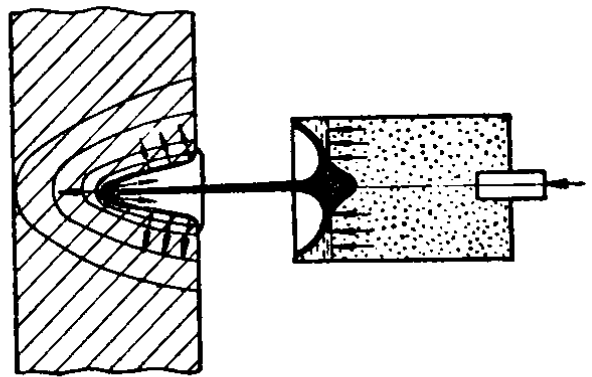


图 3 聚流钻进障碍物材料的过程示意图

对镶有金属锥形罩的聚能药柱作用进行理论的、认真的

试验研究工作, 还是在第二次世界大战期间才开始的。目前, 由聚能凹穴^[27]所形成聚流的某些理论已经清楚了。

流体动力学理论说明, 当药形罩内表面受到压缩时, 便形成聚流, 而且速度很高, 这时, 药形罩外表面便形成移动速度较慢的流芯。

根据塑性变形原理, 大部分聚流是由罩的底部内表面形成的, 而后部聚流则由中心部分的表面形成的。

在这一点上, 聚流球形收敛理论对罩作为造成聚流的球面部分作了研究, 尤其对罩内表面形成前部的聚流和外表面形成后部

的聚流。

根据对罩破成最小微粒时聚流形成的理论,罩变为粉末,由粉末形成聚流,由微粒形成的聚流具有高速度。在文献^[27]①中证明,当设计聚能药柱时,可以利用这些理论中的任何一个理论,并且有足够的试验资料来证实其中的每一个理论。

关于在镶有金属罩的锥形凹穴药柱内形成聚流的作用原理,从流体动力学理论中可得到最有说服力的解释。

根据这种理论,金属聚流是因为金属罩成分受到四面八方向药柱轴心的挤压作用,加上由凹穴顶部到凹穴底部的压挤作用所造成的(图4)。因此,在压缩金属罩上产生的压力约达百万,甚至几百万大气压。在这种压力作用下,罩内表面的金属层具有极高轴向速度,变成流体状态,并形成具有速度8000~10000米/秒从罩中心处喷射出来的高密度细金属流。这股流动的金属流,当碰到障碍物时,便产生约300000公斤/厘米²的压力,并击穿一个很深的孔^[12]。

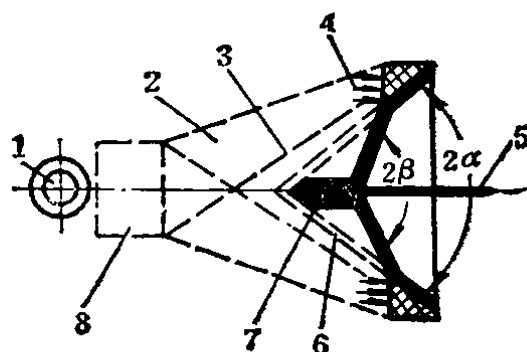


图4 压缩聚能凹穴锥形罩的示意图

1-导爆索; 2-药柱; 3-活性部分的界面; 4-爆炸波前沿; 5-聚流; 6-压缩前的罩; 7-流芯; 8-起爆药饼; 2α -凹穴张开角;
 2β -罩受压缩的方向角

变成聚流大约仅占罩全部质量的30%。罩其余部分变成“雪茄烟式”的称为流芯的铜心或成碎片,以较低速度(500~1000米/秒)在聚流后面移动,并经常堵塞所射障碍物的孔眼。

① 详见本书后面的“参考文献”,下同。——编者

聚能药柱的装置和作用

普通聚能药柱(图 5), 是一个端头做成凹穴的、并且在其相反方向上装有起爆药饼(助爆药)的炸药体。聚能凹穴药柱的形状可以是半球形的、抛物面形的、双曲面形的、梨形的、锥形的以及其它形状的。试验证明^[21], 虽然在作用效果上有一定的差异, 但在上述药柱内, 无论任何一种聚能凹穴形状与其它形状相比, 都没有显著的优点。因此, 目前较广泛地采用锥形凹穴的聚能药柱。

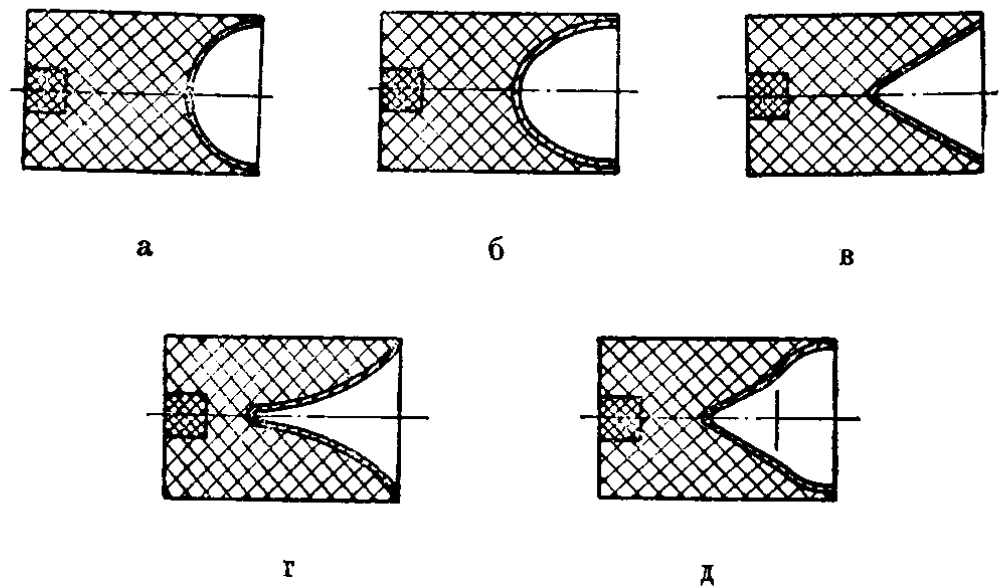


图 5 聚能凹穴的形状

a-半球形的; б-抛物面形的; в-喇叭口形的(双曲面形的); г-锥形的; д-梨形的

药柱具有圆柱体、截面圆锥体等形状。药柱外貌取决于它的重量和长度, 半径和凹穴的开口角度(凹穴张开角)。在对着聚能凹穴的药柱端头上装有起爆药饼。整个药柱可装在外壳内(金属的、塑料的或者用其它材料做成的)。锥形凹穴镶有金属罩的圆柱形聚能药柱, 其作用原理见图 6^[10]。

当对着凹穴起爆这种药柱时(图 6, a), 由于爆炸波推向聚能凹穴(图 6, б), 便引起炸药物质的爆炸分解, 从而产生了压力, 在这种压力作用下, 聚能凹穴罩在药柱轴心上接着由顶部到其底部受到挤压(图 6, в 和 г)。由于金属罩受到挤压, 部分金属从其内

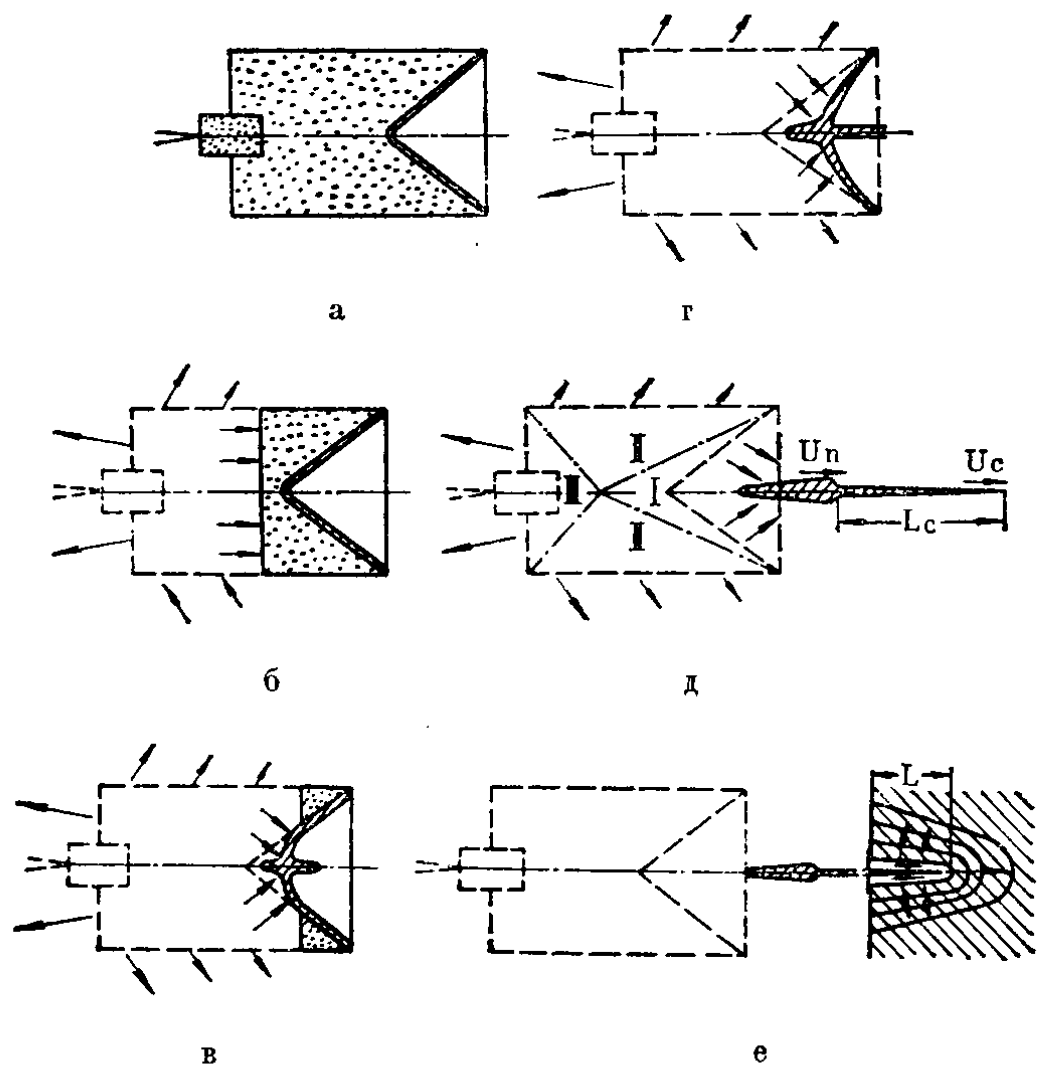


图 6 装有锥形罩的药柱爆炸时聚流形成阶段

a-爆炸前的药柱；б-爆炸波前沿接近凹穴顶部；в-爆炸波 前沿推进到凹穴深度的中间；凹穴罩由于爆炸波 前沿变形开始形成聚流和流芯；г-药柱爆炸分解完毕，金属罩在气体作用下继续变形，同时形成聚流和流芯；д-聚流和流芯形成后，但聚流还继续延伸；e-聚流穿透障碍物； U_n -流芯的速度； U_c -聚流的速度； L_c -聚流的长度； L -聚流穿透障碍的深度

表面开始流动，并以高密度的细金属流（图 6, в 和 б）沿着被挤压的金属罩轴心喷出，这种金属流速度高、压力大、穿透障碍物深（图 6, e）。

对于具有带锥形锐角的锥形凹穴的药柱以及带半球形和双曲面形凹穴的药柱聚能效应的理论，是完全可以建立的。

为了合理的形成聚流和更深地穿进障碍物，合理选择材料、金属罩尺寸，以及罩的对称性等，则有重大意义。

姆·阿·拉夫连齐耶夫聚能效应的流体动力学理论得出了凹穴形状、金属罩厚度及其压挤速度的聚流参数的定量关系。在该理论中，还得出了穿透深度与聚流参数（长度、密度等）之间的关系。

假如障碍物认为是理想的固体，则聚流在障碍物上的压力，可根据计算流体动力学的伯努利公式来确定：

$$p_c = \frac{\rho_c v_B^2}{20g} \quad (2)$$

式中 p_c ——压力，公斤/厘米²； ρ_c ——等于金属罩密度的聚流起始密度； v_B ——聚流与障碍物相碰的速度（这个速度由聚流速度 v_c 与聚流穿透障碍物速度 v_{np} 之差来确定）； g ——等于 9.81 米/秒² 的重力加速度。

姆·阿·拉夫连齐耶夫确定了锥形凹穴的药柱聚流速度 v_c 与罩变形速度 v_0 成比例关系，并且取决于形成聚能凹穴的倾角 α 等，

$$v_c = v_0 \frac{1 + \cos \alpha}{\sin \alpha} \quad (3)$$

流芯的速度

$$v_{nc} = v_0 \frac{1 - \cos \alpha}{\sin \alpha} \quad (4)$$

聚流与流芯的质量，由下列公式确定：

$$m_0 = \frac{m_0}{2} (1 - \cos \alpha) \quad (5)$$

$$m_{nc} = \frac{m_0}{2} (1 + \cos \alpha) \quad (6)$$

式中 m_0 ——金属罩的质量。

聚流射进障碍物的深度，可按姆·阿·拉夫连齐耶夫公式求出：

$$L = l_c \sqrt{\frac{\rho_c}{\rho_n}} \quad (7)$$

式中 L ——聚流穿进障碍物的深度； l_c ——大致等于形成凹穴锥

体长度的聚流长度； ρ_{π} ——障碍物的密度。

公式(7)只是在下述情况下才是正确的：即射流在其整个作用过程中是稳定的；射流与障碍物相碰所形成的压力远大于障碍物的强度；射流和障碍物的材料是不可压缩的流体。实际上，药柱聚能凹穴罩的压缩速度是不固定的，因为在药柱爆炸时，传给顺着形成锥体的罩的冲击也是不固定的。这样就改变了顺着聚流的速度并破坏其连续性。此外，拉夫连齐耶夫理论未能考虑到金属罩张开角的变化，这种变化是在压缩罩成分和由其组成相应的射流成分时所发生的，同时也未考虑到罩和障碍物金属强度的特性。

聚流长度和穿透能力实际上取决于下列很多因素：药柱炸药的起爆能量和速度，药柱活性部分的尺寸（它取决于药柱形状和尺寸，金属罩的质量和药柱外壳的质量），药柱与聚能凹穴轴心的对称性，凹穴顶部与起爆药饼之间的距离，起爆药饼的大小以及其它等等。药柱的聚流长度并不是一个常数值：由于在喷射时，射流离开药柱而延伸，其长度便随之而增加。聚流越延长，其头部和尾部速度比就越大，聚流离爆炸了的药柱的喷射就越远。

聚能药柱的穿透能力，取决于它碰到障碍物时的聚流长度。当聚流射进障碍物时平均深度 L 便开始增加，然后，达到最大值，接着随药柱与障碍物之间距离 F 增加则穿透深度 L 却减少（图 7）。由上所述得出的结论是，在确定变化的（散）聚流穿透深度时，必须把考虑到的随着药柱与障碍物之间距离变化的聚流延长系数列入

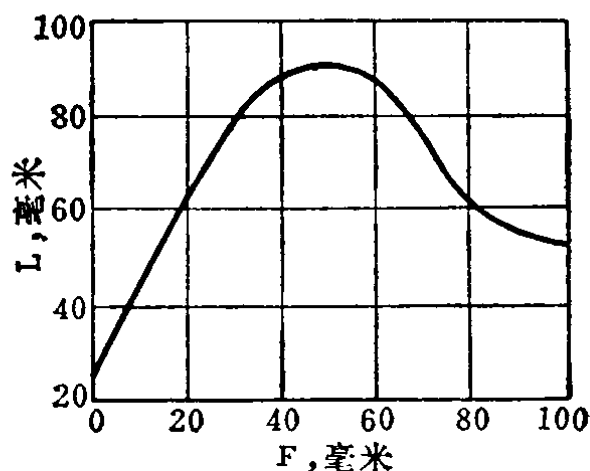


图 7 穿透深度 L 与药柱到靶之间距离 F 的关系曲线

公式(7):

$$L = l_0 \psi \sqrt{\frac{\rho_c}{\rho_n}} \quad (8)$$

式中 l_0 ——形成锥体的长度; ψ ——系数, 取决于罩材料和凹穴张开角, 对于非连续性的(散)聚流等于 1, 对于连续性的聚流等于 2~3。

例如, 夫·阿·巴乌姆和克·波·斯坦纽科维奇确定了软铁 $\psi = 3$ 。此外, 他们还确定了聚流射进障碍物的深度还取决于障碍物的强度特性:

$$L = l_0 \psi \sqrt{\frac{\rho_c}{\rho_n} \frac{\sigma_c}{\sigma_n}} \quad (9)$$

式中 σ_n 和 σ_c ——障碍物和罩(聚流)材料压缩的极限强度。

勒·勒·图罗克试验确定: 即使改变药柱高度、直径和凹穴张开角, 仍可取得同样的聚流穿透深度(图 8)。同时, 还取决于凹穴张

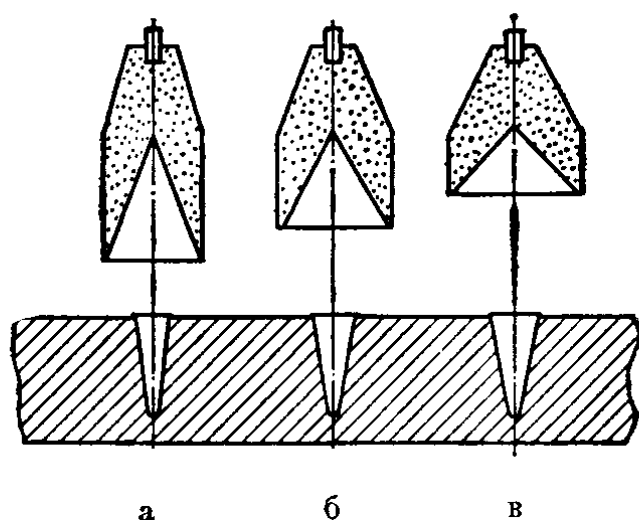


图 8 取决于药柱参数的穿靶深度

开角的系数 ψ 在很大范围内变化: 具有锐角的凹穴 $\psi = 2 \sim 2.5$, 具有钝角的凹穴 $\psi = 5 \sim 6$ 。施兰贝尔公司试验证明, 穿透深度可等于形成凹穴长度的 2~4 倍^[35]。

这样, 多次试验证明, 聚流长度越长及其穿透威力越大, 则聚能凹穴面也越宽, 即凹穴底部直径 d_0 和形成锥体长度 l_0 越大和越

长, 以及罩和障碍物的密度和强度比也越大。

聚流直径按下式来确定:

$$d_c = 2 \sin \alpha \sqrt{\frac{\delta r_0}{\psi}} \tag{10}$$

式中 d_c ——聚流直径; α ——为凹穴张开角的二分之一; δ ——罩的厚度。

流芯直径可由以下公式求出:

$$d_{nc} = 2 \cos^2 \alpha \sqrt{2 \delta r_0} \tag{11}$$

由于聚流的极大径向(横向)压力和障碍物材料部分的挤压作用, 聚流射进障碍物的孔径比聚流直径大好几倍。射流射穿的孔径愈大, 单位长度内的射流能量也愈大, 而障碍物的阻力也就愈小。

根据文献[36], 聚流射入障碍物的孔径, 可由下列关系式求出:

$$d_{BX} = d_c \frac{v_c}{\sqrt{2H}} \frac{\sqrt{\rho_c \rho_1}}{\sqrt{\rho_c} + \sqrt{\rho_1}} \tag{12}$$

式中 d_{BX} ——障碍物上的进口直径; v_c ——聚流速度; H ——障碍物的强度特性; ρ_c 和 ρ_1 ——射流和障碍物的密度。

在软钢上击穿孔眼直径约为凹穴直径的 $1/3 \sim 1/2$ 。

试验确定, 射进障碍物的孔径取决于射流直径和密度、射流射进障碍物的横向压力以及障碍物的物理机械性质(表1)^[10]。

表 1 各种材料 d_{BX}/d_c 的比值

材 料	d_{BX}/d_c
钢和致密岩石	4
中等硬度的岩石	5
水泥	6
粘土, 铅	10~20

水泥孔径可达三倍于套管的孔径。

在岩石中的孔道型式取决于岩石的性质。一般孔道为圆锥形, 则孔道直径随穿透深度

就减小。在砂岩中, 孔道直径和深度数值要比在软钢中孔道直径和深度数值大 $1.5 \sim 3$ 倍。

聚能射孔器的药柱

制造某种类型的聚能射孔器和聚能药柱时，必须考虑套管直径和厚度，套管强度特性，井筒直径，管外水泥环的厚度，射孔器与套管间的间隙，生产层地质的和储集层的性质，还有完井方法，井内液体性质，液体密度、粘度，在射孔过程中液体运移方向等。

通常，射孔时井里都有液体（水、泥浆、原油）或气体。在射孔器的部件上承受着静水压力，其数值取决于井深、井里液面和液体比重。目前，井内液压值达 1000 公斤/厘米² 和更多。深井井底测量温度达 150~180°C 或更高。

在聚能射孔器内使用的聚能药柱尺寸和装置，必须符合上面所指出的井内特殊条件所确定的要求。在大多数情况下，药柱外部尺寸决定于套管内径，射孔器外壳或者药柱外壳的壁厚以及套管壁与射孔器之间的间隙。必须考虑的是，10~15 式变数值，影响着镶有聚能凹穴罩的聚能药柱的作用。欲确定其影响程度则是相当困难的。如果改变一个变数^[27]，那就必须同时改变其它变数。但是，在设计聚能射孔器的药柱时，必须考虑到某种顺序和起爆波沿的形状，聚流形成的特性和在某一口井里此聚流应造成的孔道深度和直径。

设计聚能药柱最合理的是首先要考虑到药柱炸药的重量、套管内的入口直径以及在套管和水泥环壁外面击穿岩石的深度和孔道体积。

在聚能射孔器内一般采用尺寸小的、重量轻的药柱，而这些药柱具有穿过由多次使用的有外壳射孔器孔眼内的钢垫、胶垫或其它零件，或者一次使用的射孔器内的外壳壁，或者无外壳射孔器内的药柱外壳；泥浆层；套管壁；管外水泥环；岩层的泥浆浸入部分，生产层所组成的较厚障碍层而足以打开地层的穿透能力。

聚流在井壁内射穿孔道的深度、直径和形状，对于从地层内获得的油或气流到井里起着重大的作用。

为了打开地层和建立地层与井眼之间可靠的连通性，必须使

通道的深度大于套管壁、水泥环和泥饼的总厚度。按射孔孔道的形状，在整个延伸中应尽可能地具有较大直径。孔道的深度不仅决定于聚流的特性，而且还决定于岩石强度及其硬度和密度。聚能药柱在相当致密的岩石中，例如在石英中，一般射穿孔道的深度与在软钢上所射孔道深度相同，尽管钢的密度两倍于石英的密度。看来，障碍物材料的硬度对聚流的制动有影响，例如，钨的碳化物就是聚流不易击穿的障碍物^[27]。

为了获得从地层中的油、气最大量地流到井里，需要使孔眼直径足够地大，而沿整个深度的孔道不应急剧缩小。

聚流射穿套管的孔眼直径，不仅取决于射流的特性，而且还取决于射孔器与管壁间的距离以及套管的钢号。

孔眼直径随着套管材料屈服点增大而减小。屈服点为 65~75 公斤/毫米²，最硬套管的孔眼直径比屈服点达 32 公斤/毫米² 的 C 级套管的孔眼直径小 30%。试验证明，套管孔眼直径的最佳数值是 8~12 毫米。小于该直径的孔眼在大多数情况下很快就被流芯和泥浆所堵塞。

从地层中的油、气流到井里，还取决于一米内所射的孔数，即射孔密度。最佳射孔密度(在其它各种条件下)，决定于射孔器的效能，即其形成孔道的直径如何和深度多少，同时还决定于生产层的地质和储集层的特性。甚至在一个地区内，射孔密度也可能是不一样的。对一些地层，6~10 孔/米就足够了，而对另外的地层则需要 20 孔/米和更多。

重量轻的药柱不仅节约炸药，而更重要的是减少了药柱爆炸生成物对射孔器外壳、套管和管外水泥环的破坏作用。

这就证明，当聚流击穿水泥环时，不形成裂缝，因为这时在水泥环内发生褶皱变形。但是，如果在水泥环上，特别在水泥环与井壁之间存在空隙的时候，受到过于强烈的爆炸波作用，在它上面就会形成裂缝。在类似条件下，与在套管内即使爆炸波不够强烈，也可能产生破坏井眼密封性的裂缝。

为了减低散逸到各方去的爆炸生成物的作用，药柱外部形状

应做成圆柱-圆锥形的或者半椭圆形的,从而增加了(百分比上)药柱活性部分的质量。

当在聚能射孔器药柱爆炸时, 不应形成堵塞射穿孔眼的流芯或者大的金属碎粒。正如研究确定, 堵塞射穿孔眼会减少流入井里的油流或气流。

表 2 列举了苏联油、气井射孔所采用的聚能药柱的技术特性。在制造这些药柱的过程中, 对影响药柱穿透威力的聚能凹穴罩的材料、厚度和凹穴张开角, 聚能凹穴上部的炸药层厚度和其它参数曾作过研究。

表 2 苏联采用的聚能射孔器炸药柱药体的技术特性

药 柱 代 号	外 径	尾	凹	凹	底 部 圆 柱 体 高 度	带 起 爆 药 饼 总 高 度	加 上 起 爆 药 饼 的 重 量	凹 穴 顶 部 到 起 爆 药 饼	炸 药 层 的 厚 度	密 度	在钢上的 穿透能力	
		部 直 径	穴 直 径	穴 张 开 角							入 口 直 径	深 度
	毫米	毫米	毫米	度	毫米	毫米	克	毫米	毫米	克/厘米 ³	毫米	毫米
ЗПК103, ЗПК089-1, ЗПКС80, ЗКПР100, ЗКПР80, ЗКПР55	33	12	31	75	3	48.5	22.5	20.5	1.58		8~10	85
ЗПК85, ЗКПР65	28	13.6	26	60	9	34	14	6	1.58		7~8	60
ЗПК65ДУ	22	12	20	75	8	23	8	4	1.58		6~8	50
ЗПК65, ЗКПР50, ЗПК060	22	12	20	75	8	29	7	8	1.58		6~8	50
ЗПКС160	74	22	68	60	23	81	205	18	1.58		25~30	170
ЗПКС105	46	22	44	60	52	52	51	10	1.58		18~20	130
ЗПК089-2, ЗПК0Т89	46	22	44	60	15	47	47	6	1.58		18~20	130
ЗПК073, ЗПК0Т73	36	17	34	60	13	37	29	6	1.58		15~20	95
ЗКПР45	30	12	28	60	7	46	18	16	1.58		8~10	70
ЗКПРУ65-4	33	15	31	75	10	34	21.5	4	1.58		10~12	85
ЗКПРУ65-5	36	17	34	75	13	36	31.0	4	1.58		15~20	95
ЗПКС65	32	17	30	60	13	37	20	4	1.58		10~12	75

罩的材料 药柱聚能凹穴罩的材料应具有很高的密度使聚流的能量更大,但同时它应该是极韧性的,使聚流能很好地延伸,即

使可能长时间作用于障碍物也不致于爆裂。

正如试验所证明的^[36]，形成具有良好穿透能力的聚流的一个条件是：

$$\frac{\rho_0}{2}v_0^2 \geq R$$

(13)

式中 ρ_0 ——罩的材料密度，克/厘米³； R ——屈服点，公斤/厘米²； v_0 ——顶部具有 2α 角度的罩的变形速度， $v_0 = v_c \cos \alpha$ （米/秒）。

符合这些要求的是铜、银和其它材料，它们本身具有所需的可塑性和密度。铜是最可以达到上述要求的，因此被广泛地用来制造药柱聚能凹穴的罩。

在制造聚能射孔器时，对钢的、铝的、黄铜的、铜的和其它的药柱罩进行了研究。研究结果确定，相同尺寸的药柱和镶有由各种材料做成形状相同的罩的重量，具有不同的穿透能力。例如，镶有用各种材料做成尺寸相同的锥体罩的 9 克重的药柱，在 45 号钢靶上，射出了不同的孔眼（表 3）。

表 3 罩的材料对聚能药柱穿透能力的影响

材 料	穿 透 能 力	
	入口直径, 毫米	深 度, 毫 米
铝	10	16
钢	10	36
黄 铜	8	40
铜	12	60

装有软铜罩的药柱取得了较大的穿透深度。同时确定，罩的材料应该是均质的（M-2，M-3 号铜最好），制成的罩在机械处理后不应有冷作硬化。冷作硬化减少了聚流的韧性，从而使聚流爆裂，这样就会降低穿透能力。因此，罩在机械处理后应该退火。

聚能凹穴的张开角 聚能凹穴的张开角是聚能药柱的基本参数之一。如果凹穴镶以金属，则它的数值与聚流质量及其长度有