

文章编号: 1003-1480(2025)02-0075-07

射孔弹碎屑控制技术研究

王喜¹, 鲁坤¹, 周明¹, 李必红¹, 李尚杰¹, 王浩¹, 李飞²

(1. 物华能源科技有限公司, 陕西 西安, 710061; 2. 中油测井辽河分公司, 辽宁 盘锦, 124010)

摘要: 为了提高油气井射孔孔道清洁度, 降低后续井下作业中与碎屑有关的风险, 以海油常用的114型射孔弹作为研究对象, 采用热塑性高分子复合材料作为卡套, 装配在射孔弹金属弹壳外部, 设计了2种壳体结构的114型高孔密低碎屑射孔弹, 对其模拟装枪穿目标靶性能和碎屑收集能力进行了仿真和试验研究。结果表明: 相较于结构2壳体, 结构1壳体在爆轰波作用下更易形成连续的大尺寸碎块。采用改性热塑性高分子复合材料制作的卡套在射孔时易形成粘性非牛顿流体, 与壳体碎屑充分融合粘结成块。114型低碎屑射孔弹穿钢靶穿深为199.6 mm, 相较于常规深穿透射孔弹提高了10.9%; 掉落碎屑质量为105 g, 碎屑率为0.19%。

关键词: 射孔弹; 碎屑; 仿真; 热塑性高分子复合材料; 穿深

中图分类号: TJ450.3 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1003-1480.2025.02.011

Study on Debris Control Technology of the Shaped Charge

WANG Xi¹, LU Kun¹, ZHOU Ming¹, LI Bi-hong¹, LI Shang-jie¹, WANG Hao¹, LI Fei²

(1. Wuhua Energy Technology Co. Ltd., Xi'an, 710061; 2. PetroChina Logging Liaohe Branch, Panjin, 124010)

Abstract: In order to improve the cleanliness of oil and gas well perforation holes and reduce the risk related to debris in subsequent downhole operations, the commonly used 114 type shaped charge of CNOOC was taken as the research object, and a thermoplastic polymer composite material was used as the sleeve, which was assembled outside the metal shell of the shaped charge. Two types of the 114 type high porosity low debris shaped charge with different shell structures were designed, and their target penetration performance and debris collection ability were simulated and tested. The results show that compared to structure 2 shell, structure 1 shell is more prone to form continuous large-sized fragments under the action of detonation waves. The sleeve made of modified thermoplastic polymer composite material is prone to form viscous non Newtonian fluid during perforation, which fully fuses and bonds with the shell debris into blocks. The penetration depth of the 114 type low debris shaped charge through steel targets is 199.6 mm, which is 10.9% higher than that of conventional deep penetration shaped charges; The mass of fallen debris is 105 g, and the debris rate is 0.19%.

Key words: Shaped charge; Debris; Simulation; Thermoplastic polymer composite materials; Penetration depth

射孔完成后, 上提射孔管柱时射孔枪内的弹壳和弹架碎屑在重力作用下会从射孔枪的孔眼落入井筒中, 造成井下套管管径缩小, 影响后续测试工具和生产管柱的施工作业, 降低油气流动效率, 严重时会造成管柱遇阻或遇卡^[1-2]。尤其是海上油田常采用高孔密

射孔工艺施工作业, 且在役井和预开发井大多数为大斜度井和大位移井, 存在极大的狗腿度和长的水平段, 一次施工管柱长度达几百米, 行程为5 000~8 000 m, 落入到井筒中的射孔碎屑会很多, 严重影响射孔管柱和井下工具的通行。此外, 碎屑沉降在封隔器或

收稿日期: 2024-11-25

作者简介: 王喜(1986-), 男, 高级工程师, 主要从事石油射孔爆破器材技术研究。

通讯作者: 鲁坤(1984-), 男, 正高级工程师, 主要从事石油民用爆破器材技术研究。

基金项目: 11条重点产业链项目(2023SLZDCY-130)。

引用本文: 王喜, 鲁坤, 周明, 等. 射孔弹碎屑控制技术研究[J]. 火工品, 2025(2): 75-81.

工具滑套周围,还会影响其使用效果,甚至造成井下事故。因此,为了保证射孔孔道清洁和油气的高产,同时降低后续井下作业中与碎屑有关的风险,国内外射孔行业一直在努力探索低碎屑射孔技术。国外学者提出替换射孔弹弹壳材料,选用锌或锌铝合金材料代替普通射孔弹弹壳的钢材料,爆炸后可以形成极细的粉末状碎片^[3]。但后续研究表明锌材料弹壳爆炸后的碎屑颗粒会通过流体进入射孔孔道而产生污染,并与井筒流体发生化学反应,形成沉淀物,从而堵塞射孔孔道^[4-8]。此外,C Han^[9]等通过试验测试了锌壳和钢壳装药的爆炸性能,发现锌壳装药的爆轰能量约为钢壳装药的 13 倍,可能会对射孔系统造成破坏,从而增大射孔作业的风险。国内从 20 世纪 90 年代开始研究低碎屑射孔技术,主要通过粉末冶金和预制破片等方式来控制射孔碎屑^[10-12]。其中,粉末冶金虽然能够形成粉末或颗粒状,但仍会对射孔孔道造成污染或堵塞生产管柱;预制破片虽然能在一定程度上将碎屑控制在射孔枪体内,但仍有小部分的小尺寸碎片掉落至井筒中。

为了提高油气井射孔孔道清洁度,降低后续井下作业中与碎屑有关的风险,本文以海油常用的 114 型 40 孔·m⁻¹射孔弹作为研究对象,采用热塑性高分子复合材料作为壳体卡套,设计了 2 种壳体结构的 114 型高孔密低碎屑射孔弹,通过模拟装枪穿目标靶试验和碎屑收集试验对低碎屑射孔弹性能进行了仿真和试验研究。

1 低碎屑射孔弹设计

1.1 射孔弹整体结构设计

射孔弹通常由壳体、药型罩和炸药装药 3 部分组成。其中,壳体以 20 钢、45 钢及 40Cr 等为原材料,采用冲压或机加制造而成。射孔弹的作用过程为:炸药爆炸后形成爆轰冲击波,压垮药型罩;药型罩闭合形成高速射流,击穿地层一定深度,从而形成油气与井筒的连接通道。射孔弹爆炸后,会形成若干不同尺寸的壳体碎片,从射孔枪孔眼掉落至井筒中;同时,装载射孔弹的射孔弹架也会形成射孔碎片,掉落至井

筒中,从而造成污染。因此,射孔碎屑主要来自射孔弹壳体和射孔弹架。

为了控制射孔弹碎屑,基于热塑性高分子复合材料的流变性将其制造成卡套,装配在射孔弹金属弹壳外部。在射孔弹爆炸后的温度场和压力场共同作用下,热塑性高分子复合材料会形成粘流态的流体,呈现出非牛顿流体流动状态,在射孔枪外部液体的吸热作用下快速降温冷却,将金属碎屑凝固在一起,形成大块的柱状体,从而无法从射孔孔眼掉落至井筒中,以保证射孔碎屑基本留到射孔枪枪体内,井筒和射孔孔眼内基本无碎屑。以海油常用的 114 型 40 孔·m⁻¹射孔弹作为研究对象,设计 114 型低碎屑射孔弹,其结构主要由壳体、高能炸药、药型罩和热塑性高分子复合材料卡套组成,如图 1 所示。

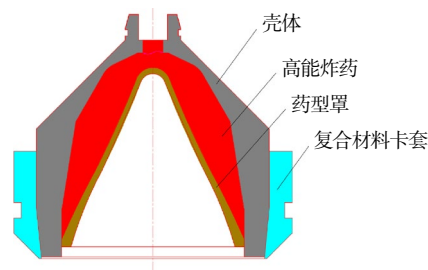


图 1 低碎屑射孔弹结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of low debris shaped charge structure

1.2 壳体结构设计

壳体作为射孔弹的关键部件,和药型罩共同决定了射孔弹的装药结构。除了给炸药和药型罩提供装配空间外,壳体还起到对炸药能量进行约束以及改变爆轰波传播路径的作用,和主装炸药共同决定药型罩压垮的方向和速度,影响射流的形态。为了提高射孔弹的穿深性能,将壳体设计为多锥角结构,该结构可以增大爆轰波入射角度,弹壳内壁折射的爆轰波能量随着距离增大而单调减小,从而提高产品的稳定性。同时,该锥角结构使得顶部药量集中,爆轰时能有效提高射流头部速度。根据破甲理论和前期经验,设计了 2 种不同参数的多锥角结构,如图 2 所示。

起爆后,药柱爆炸形成球面爆轰波,产生超过吉帕的爆轰压力,在此压力下,壳体先发生膨胀,然后产生塑性变形,最后裂解形成碎片。采用 LS-DYNA 2D 对 2 种壳体结构射孔弹侵彻钢靶时的破片形态进

行仿真，仿真结果如图3所示。

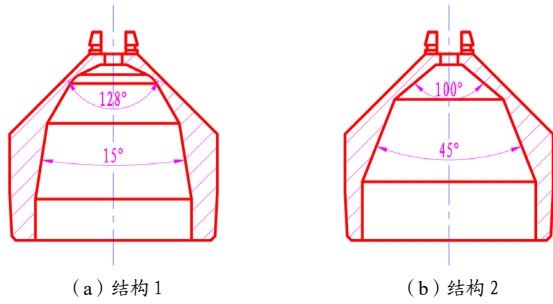


图2 壳体结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of shell structures

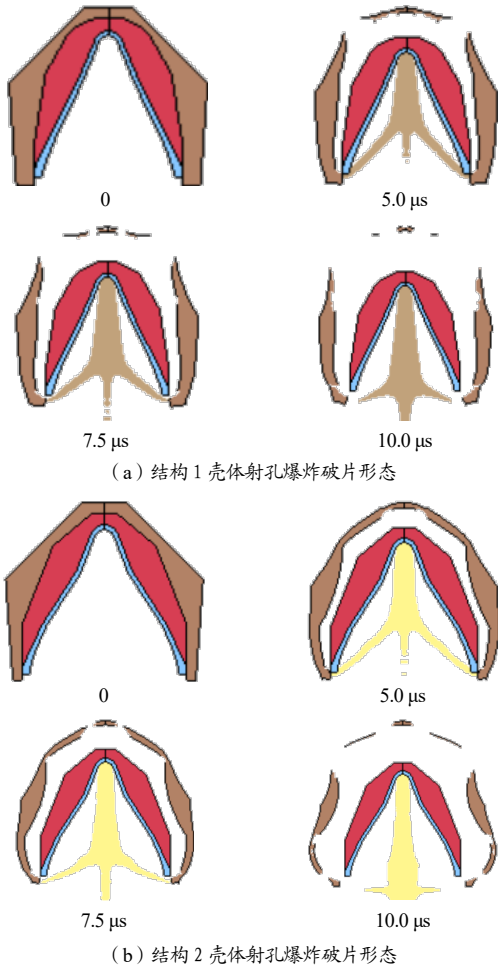


图3 2种壳体结构射孔弹侵彻钢靶时的破片形态

Fig.3 Fragment morphology of two shell structures of shaped charges penetrating steel targets

由图3可见，随着药型罩在高爆压下向轴线上闭合，5.0 μs时，金属射流头部形成，此时，结构1壳体内腔开始从顶部第1段和第2段锥角交点处分开，分析原因是此处内腔的厚度最薄，形成了薄弱点，最先裂解分离。7.5 μs时，结构2壳体从顶部第1段和第2段锥角交点处开始分开。10.0 μs时，结构1壳体内腔第2段、第3段和直边段在爆轰波作用下形成连

续的整段碎块断裂，直径大于12 mm；结构2壳体内腔的第2段锥角和直边段从交点处分开，且直边段在爆轰波的反射作用下弯裂成弧形继续分裂，形成直径小于5 mm的小碎片。相比结构2，结构1断裂后形成的金属碎屑较大，更不容易从射孔枪孔眼中掉落，且更容易被高分子复合材料在高温高压下形成的粘流体粘接成块，从而达到将碎片控制在枪体内的目的。

1.3 复合材料选型

热塑性高分子复合材料是一类应用最广的塑料，以热塑性树脂为主要成分，添加各种助剂配制而成。在一定的温度条件下，热塑性高分子复合材料能软化或熔融成任意形状，冷却后形状不变。这种状态可多次反复而始终具有可塑性，且这种反复只是一种物理变化。利用热塑性高分子复合材料的流变性制造成卡套，装配在射孔弹金属弹壳外部。在射孔弹爆炸后的温度场和压力场共同作用下，热塑性高分子复合材料形成粘流态的流体，呈现出非牛顿流体流动状态，在枪外部液体的吸热作用下快速降温冷却，将金属碎屑凝固在一起，形成大块的柱状体。该柱状体无法从射孔孔眼掉落到井筒中，从而保证了射孔碎屑基本留到射孔枪枪体内，并筒和射孔孔眼内基本无碎屑。

工程上常用的热塑性高分子复合材料包括氟橡胶、聚酰胺、聚氨酯、聚丙烯、聚四氟乙烯、ABS塑料及其它耐热改性阻燃材料。采用以上热塑性高分子复合材料制造的卡套性能对比如表1所示。

表1 不同材料卡套性能对比

Tab.1 Comparison of sleeves made of different materials

材料名称	耐温/°C	机械强度	注塑工艺	1米射孔器爆炸过程产气量
氟橡胶	220	硬度低，易压缩变形	可以	-
聚酰胺	220	抗压强度63 MPa	可以	释放大量的气体
聚四氟乙烯	200	抗压强度25 MPa	不可以	-
聚丙烯	155	抗压强度25 MPa	可以	释放大量的气体
ABS塑料	93	抗压强度96 MPa	可以	释放大量的气体
改性材料	220	抗压强度75 MPa	可以	释放少量的气体

由表1可见，氟橡胶机械强度无法满足卡套强度设计要求；聚四氟乙烯不具备注塑能力，且机加成本

高,无法满足批量生产的要求。聚酰胺、聚丙烯和ABS塑料虽然在耐温、机械强度和注塑工艺上均能满足设计要求,但是在射孔器爆炸产生的800℃以上高温下,会迅速分解气化,无法形成粘流体,因此无法达到粘接碎屑的效果。为了达到阻燃效果,可以在聚酰胺材料中添加阻燃剂,该方法已经被广泛采用且取得了较好效果。阻燃剂主要通过改变高分子材料燃烧的反应过程,或者改变燃烧条件来实现高分子材料的阻燃。其中,硅系阻燃剂是一种新型的阻燃剂,其燃烧生成的产物结构稳定,且可以阻隔火焰^[13]。通过添加硅系阻燃剂对聚酰胺进行改性,可以改善其在800℃以上高温下的阻燃性能。

1.4 卡套结构设计

卡套装配在射孔弹壳体外部,卡套结构设计应能够满足射孔枪的装配要求。114型高孔密射孔枪技术参数如表2所示。由于射孔弹装配孔间距为25.0mm,采用135/45°布弹,弹架管外径为63.5mm,壁厚为1.8mm,为了保证足够的布弹空间,卡套结构设计如图4所示。

表2 114型射孔枪参数

Tab.2 Parameters of type 114 perforation gun

型号	直径/mm	壁厚/mm	通径/mm	孔密/(孔·m ⁻¹)	相位/°
114	114.3	10.0	92.0	40	135/45

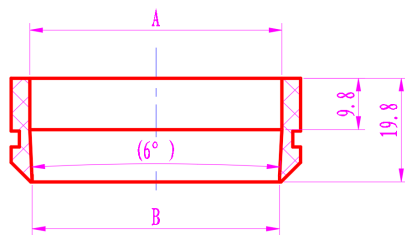


图4 卡套结构示意图

Fig.4 Schematic diagram of the sleeve structure

由图4可见,卡套内腔采用圆柱和圆台相结合的结构,上端口部直径较大,便于射孔弹壳进入至卡套中;下端口部直径较小,保证卡套能够紧固射孔弹壳,装配后牢固可靠。

高孔密射孔弹装配在弹架管内,射孔弹的头部均埋在弹架管内,由于约束作用,射孔弹起爆后,头部形成的金属碎片和弹架一起容易粘接成块,而裸露在弹架外的壳体部分,易从射孔枪的孔眼掉落出来。由仿真结果可知,结构1壳体爆炸形成的破片大,易留在射孔枪内。因此,在结构1射孔弹壳体外部装配卡

套,对模拟装枪条件下卡套的破碎形态进行仿真,结果如图5所示。由图5可见,卡套在炸药爆轰波的作用下,随着壳体的膨胀,在韧性的作用下,拉长变形,15 μs时从薄弱点处发生断裂。断裂后的卡套变为2部分,上部分卡套在高温高热下产生的非牛顿流体将壳体大破片碎屑粘接在一起,下部分卡套产生的流体将壳体口部的碎屑粘接起来,形成大尺寸的碎块,从而实现无碎屑的目的。

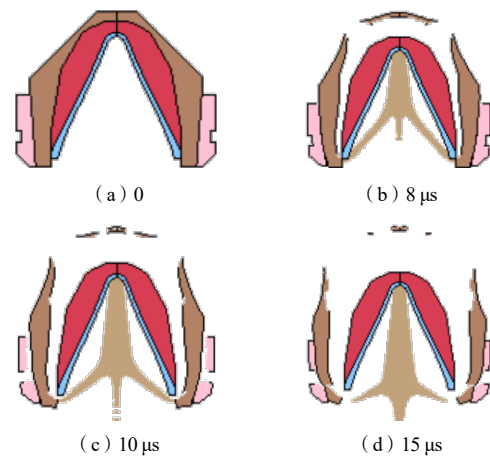


图5 不同时刻卡套破碎形态

Fig.5 Sleeve rupture patterns at different times

2 试验

为了验证设计方案的可行性,对114型低碎屑射孔弹装枪进行地面模拟性能测试,主要开展了模拟装枪穿目标靶试验和射孔器碎屑收集试验。

2.1 模拟装枪穿目标靶试验

114型低碎屑射孔弹模拟装枪穿目标靶试验装配示意图如图6所示,试验参数如表3所示。

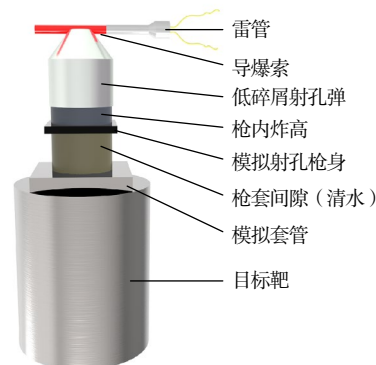


图6 模拟装枪穿目标靶试验装配示意图

Fig.6 Schematic diagram of test assembly for simulated gun penetrating the target

表3 模拟装枪穿目标靶试验参数

Tab.3 Test parameters for simulated gun penetrating the target

序号	枪内 炸高 /mm	枪套 间隙 /mm	模拟枪身 (45#钢) (长×宽×高)/mm	模拟套管 (45#钢) (长×宽×高)/mm	模拟套管 (45#钢) (外径×高)/mm
1	10	20	50×50×5	70×70×10	120×220

2.2 射孔器碎屑收集试验

按照美国标准 API RP 19B-2021 (2023) 4.5 部分试验程序^[14], 进行射孔器碎屑收集试验。首先, 使用电子台秤对载荷的射孔枪, 包括射孔枪、射孔弹、导爆索和接头等, 进行称重, 称重后将 37 发 114 型低碎屑射孔弹装配到弹架的弹孔中, 并将导爆索从射孔弹的导爆索槽内穿过, 使用弹卡固定; 然后, 将装配好的弹架组件从射孔枪上端缓慢平稳地装入射孔枪管内, 装配到位后, 在射孔枪两端分别装配枪头和枪尾; 最后, 在枪头处预留适当长度的导爆索用于引爆。弹架组件与射孔枪装配照片如图 7 所示。



(a)



(b)

图7 弹架组件与射孔枪装配照片

Fig.7 Assembly photo of the shaped charge rack component and perforating gun

将装配好的射孔器放置于套管中, 然后在套管内放水至枪头位置, 盖上防护罩, 接好雷管, 完成射孔器试验井装配, 如图 8 所示。起爆雷管, 进行射孔器碎屑收集试验。

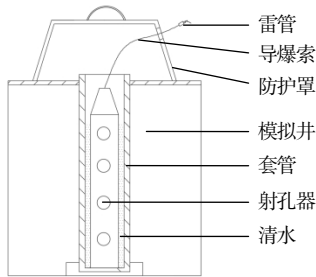


图8 试验井装配示意图

Fig.8 Assembly diagram of the test well

3 试验结果与讨论

3.1 模拟装枪穿目标靶试验结果

3.1.1 钢靶

采用结构 1 壳体, 装配高能黑索今炸药, 装配铜粉 20%、钨粉含量 80%变壁厚药型罩, 压制 114 型低碎屑射孔弹, 进行模拟装枪穿钢靶试验。模拟装枪条件下对钢靶的侵彻深度和孔径数据如表 4 所示。

表4 模拟装枪穿钢靶试验数据

Tab.4 Test datas for simulated gun penetrating the steel target

序号	试验条件		穿孔深度/mm	套管孔径/mm
	枪内炸高/mm	枪套间隙/mm		
1#	10	20	198	9.4
2#	10	20	196	9.6
3#	10	20	205	9.2
4#	10	20	200	9.2
5#	10	20	198	9.2
6#	10	20	200	9.2
7#	10	20	200	9.3

由表 4 可知, 地面模拟装枪穿钢靶套管孔径最大为 9.6 mm, 最小为 9.2 mm, 平均为 9.3 mm; 平均穿孔深度为 199.6 mm, 相较于常规 114 型深穿透射孔弹的穿深 (180.0 mm) 提高了 10.9%。

3.1.2 柱状混凝土靶

同时, 采用柱状混凝土靶代替钢靶进行试验, 结果表明模拟装枪穿混凝土靶的平均穿孔孔径为 9.5 mm, 平均穿孔深度为 982 mm, 试验打靶照片如图 9 所示。



图9 柱状混凝土靶剖开照片

Fig.9 Cross-section photo of cylindrical concrete target

由图 9 可见, 试验后的混凝土靶孔道清晰干净, 未见杵体, 表明该 114 型低碎屑射孔弹装药和罩体结构设计合理, 能量利用率高。

3.2 射孔器碎屑收集试验结果

114 型低碎屑射孔器试验后的最大胀径为 2.63 mm, 满足设计指标小于或等于 5 mm 的要求, 盲孔对位率为 100%。且射孔枪的孔眼处无单侧裂纹, 射孔枪的枪头、枪尾无脱落。射孔后的射孔枪如图 10

所示。



图 10 起爆后的射孔枪

Fig.10 Perforating gun after detonation

收集到的碎屑包括起爆、运输和旋转过程中掉落的碎屑,如图 11 所示。



图 11 试验后掉落的碎屑

Fig.11 Dropped debris after testing

由图 11 可见,试验后掉落的碎屑量少,总质量为 105 g,碎屑率为 0.19%。表明热塑性高分子复合材料卡套在高温下形成的高分子溶胶物质将弹壳碎片紧紧的缠绕在一起,与弹架一起形成团聚物体。

掉落碎屑的目数段质量比例分布如图 12 所示。

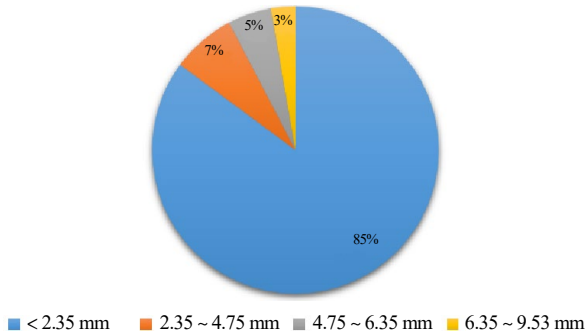


图 12 掉落碎屑目数段质量比例分布图

Fig.12 Distribution diagram of mass proportion of falling debris mesh segments

由图 12 可见,掉落碎屑中,粒度在 2.35 mm 以下的碎屑质量占比为 85%,且掉落碎屑中未发现卡套材料的大块碎片,从而保证了掉落至井筒中的碎屑大部分为粉末状颗粒,不会在抽油作业中造成抽油管线堵塞和孔道污染。

在碎屑收集过程中,未发现复合材料碎片从射孔孔眼窜出,说明复合材料碎片得到了管理,与金属碎片形成整体。射孔枪剖开后的状态如图 13 所示。射

孔后的盲孔孔眼形态如图 14 所示。



图 13 射孔后的射孔枪 1/3 剖开图

Fig.13 The 1/3 cut-away view of perforating gun after perforation



图 14 射孔后的盲孔孔眼

Fig.14 The blind hole after perforation

由图 14 可见,射孔孔眼处存在丝状纤维充填,阻止了枪内弹壳碎片的掉落。

4 结论

(1) 热塑性高分子复合材料具有较好的加工性能和机械强度,是比较理想的卡套材料,在射孔爆炸产生的高温下,能够迅速分解气化,无法形成粘流体;添加阻燃剂改性后,卡套复合材料的阻燃性能得到了改善,易形成粘流体与壳体碎屑充分融合粘结成块,从而将 99%以上的射孔碎屑留在了射孔枪体内。

(2) 结构 1 壳体相较于结构 2 壳体,壳体的内腔第 2 段、第 3 段和直边段在爆轰波作用下形成连续的整段碎块断裂,在爆轰波作用下易于形成大块碎片,提高了碎片体积,有利于碎片粘接成块。

(3) 仿真结果表明,采用圆柱和圆台相结合结构的卡套断裂后变为 2 部分,上部分卡套在高温高热下产生的非牛顿流体可以将壳体大破片碎屑粘接在一起;下部分卡套产生的流体能够将壳体口部的碎屑粘接起来,卡套体积能够满足将壳体粘接成块的要求。

(4) 114 型低碎屑射孔弹穿钢靶穿深为 199.6 mm,相较于常规深穿透射孔弹提高了 10.9%。射孔器试验收集掉落碎屑质量为 105 g,碎屑率为 0.19%,

表明改性复合材料具有较好的碎屑控制能力。

参考文献:

- [1] Paul H. Javora, Jack Sanford, et al. Understanding the origin and removal of downhole debris: case studies from the GOM [C]//SPE International Conference and Exhibition on Formation Damage Control. Louisiana, 2008.
- [2] Zuliani P C M, Ulsen C, Policarpo N A. Well perforating—More than reservoir connection[J]. Upstream Oil and Gas Technology, 2023(11): 100 088.
- [3] Lussier N. Debris from perforating systems: definitions of, and, a comparison of, steel charge cases and zinc alloy charge cases[C]//SPE International Conference and Exhibition on Formation Damage Control. Louisiana, 1994.
- [4] Stephen Zuklic, Bill Myers, et al. Field application study of zinc based, low debris perforating charges [C]//SPE International Conference and Exhibition on Formation Damage Control. Louisiana, 2016.
- [5] F.F. Chang, C. Han, et al. New insights into zinc-case charges enable the development of a true low-debris shaped charge [C]//SPE International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control. Louisiana, 2006.
- [6] Paul McElfresh, Allen Gabrysch, et al. A novel method of preventing perforation damage in high-temperature offshore wells[C]//SPE International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control. Lafayette, 2004.
- [7] P.H.Javora, S.A.Ali, et al. Controlled debris perforating systems: prevention of an unexpected source of formation damage [C]//SPE International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control. Louisiana, 2000.
- [8] F. F. Chang, N. M. Kageson-Loe, et al. Perforating in overbalance—is it really sinful [C]//SPE European Formation Damage Conference. Netherlands, 2003.
- [9] Han C , Du M , Ference B .Effect of shaped charge case materials on perforating guns[C]//International Oil & Gas Conference & Exhibition in China, 2010.
- [10] 徐文新, 李必红, 赵云涛, 等. 预控破片技术在石油射孔弹中的应用研究[C]//中国科协年会含能材料及绿色民爆产业发展论坛, 2014.
- [11] 贺建磊. 一种新型全通径射孔器研制[J]. 技术研究, 2018(7): 134-135.
- [12] 付代轩, 杜明章. 低碎屑高孔密大孔径射孔弹的研制[C]//中国石油学会测井专业委员会射孔分会射孔新技术, 新产品交流展示会, 2001.
- [13] 周艳雪. 磷硅硼阻燃剂的合成及其在聚酰胺6中的应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- [14] API RP 19B-2021(2023), Evaluation of well perforators [S]. USA: American Petroleum Institute, 2023.