

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2021.04.005

某火焰雷管传爆序列的失效机制及优化改进^{*}

唐 科^① 吴锦涛^① 吴立志^② 沈瑞琪^②

①北京宇航系统工程研究所(北京,100076)

②南京理工大学化学与化工学院(江苏南京,210094)

[摘 要] 研究了某传爆序列中火焰雷管燃烧转爆轰(DDT)过程失效的问题。通过分析高能烟火药剂点火器的输出特征,获得了冲击波、燃烧波与传播距离的关系,发现点火器和火焰雷管距离越近,冲击波越先于火焰燃烧波到达火焰雷管端面,继而对火焰雷管结构强度产生影响。增大引爆距离和缩小传爆通道孔径,均能有效地衰减冲击波对火焰雷管结构强度的影响,从而保证传爆序列在火焰作用后形成正常的 DDT 过程。

[关键词] 火焰雷管;燃烧转爆轰;冲击波;传爆失效

[分类号] TJ4;V19

Failure Mechanism and Optimization Improvement of Detonation Sequence of a Flame Detonator

TANG Ke^①, WU Jintao^①, WU Lizhi^②, SHEN Ruiqi^②

①Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering (Beijing, 100076)

②School of Chemistry and Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

[ABSTRACT] Termination of deflagration to detonation (DDT) process in a flame detonator was studied. By analyzing the output characteristics of high-energy pyrotechnic igniter, the relationship between shock wave, combustion wave and propagation distance was obtained. It is found that the closer the distance between igniter and flame detonator is, the more the shock wave reaches the end face of flame detonator before the combustion wave, which affects the structural strength of the flame detonator. The influence of shock wave on the structure of flame detonator can be effectively attenuated by increasing the detonation distance or reducing the diameter of detonation passage, so as to ensure the normal DDT process of detonation sequence after the action of flame.

[KEYWORDS] flame detonator; DDT; shock wave; detonation failure

引言

燃烧转爆轰(deflagration to detonation transition, DDT)是含能材料的一个重要特征,是系统由燃烧发展成为稳定爆轰过程中出现的一个极其复杂的物理、化学反应。DDT 在火箭推进剂的燃烧、爆破器材的起爆以及炸药的生产、储存和使用等过程中广泛存在^[1]。

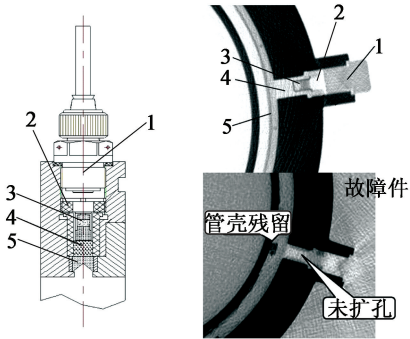
某聚能切割索分离装置传爆序列由点火器、火焰雷管、传爆药柱和聚能切割环形装药等组成;工作原理是当电点火器通电后,输出高温、高压燃气,引爆火焰雷管,发生 DDT,引爆下级传爆药柱,进而引

爆聚能切割环形装药,实现对结构部段的切割分离。在研制过程中,出现了火焰雷管未正常工作的现象,造成 DDT 过程终止、传爆序列被破坏等问题。产品传爆序列和故障现象如图 1 所示。分析检查残骸时发现,点火器可以轻易拆下,说明安装螺纹未变形;CT 检查时,在故障件传爆通道发现了火焰雷管管壳残留,且没有出现传爆管安装孔扩孔的现象;上述现象均说明传爆序列未正常形成爆轰波,DDT 作用过程发生异常。

国内学者对于 DDT 过程的影响因素开展了研究,发现点火强度、约束条件等因素都会影响 DDT 的作用过程^[2]。研究表明,点火强度越弱,诱导爆轰长度相对越长。点火强度越弱,需要的点火

^{*} 收稿日期:2021-02-18

第一作者:唐科(1982-),男,高级工程师,主要从事火工系统及装置的研究。E-mail:88326970@qq.com



1 - 点火器; 2 - 雷管上套; 3 - 火焰雷管;
4 - 传爆药柱; 5 - 聚能切割环形装药。

图 1 点火传爆序列及故障现象

Fig. 1 Ignition and detonation sequence
and fault phenomenon

时间越长,导致需要更多的气体进入 DDT 过程,引起压缩燃烧;但点火强度较大时,在 DDT 的初始阶段产生初始冲击波,增大了装药端部的密度,点火气流会使药床产生着火前的动态压缩,并对前期的对流燃烧产生影响。初始装药密度越低,那种压缩和影响就会越大^[3-5]。对于管壳强度,由于壳体材料、厚度不同,对装药产生的约束也不同,这在 DDT 过程中起着重要的作用。壳体越薄,爆轰就越难形成;原因是弱约束条件下容易发生侧向膨胀,从而产生稀疏波,稀疏波对压力梯度有一定影响,从而推迟燃烧向爆轰的转换。但一旦形成稳定爆轰,爆轰波将不再受约束条件的影响^[6-8]。

为了获得点火初始环节引起 DDT 异常的原因,围绕点火器输出能量特征和壳体强度的约束条件展开研究。通过试验,采集了点火器的输出特征,获得了高能烟火药的输出特性;通过对火焰雷管的结构强度进行仿真分析,发现了 DDT 终止的原因;根据故障原因,从工程应用角度提出改进措施,并进行了试验验证。

1 点火器输出特征及失效机制

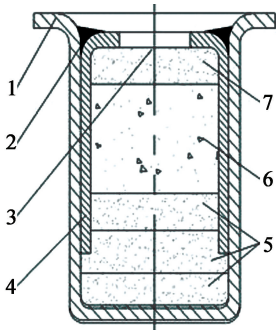
1.1 点火器与火焰雷管装药参数

点火器采用了高能点火药 Al/KClO_4 作为主装药,药量为 150 mg。点火器的装药参数见表 1。由于点火器含有 Al,增加了点火药的爆热,其平衡时的温度可达 6 000 K 以上,爆热高达 9 952 J/g。氧化剂 KClO_4 反应后产生大量气体,使点火药的做功能力大幅提高^[9-11]。

火焰雷管结构见图 2。管壳材料为 0.5 mm 厚的白铜带,多层装药结构,装药分别是沥青斯蒂芬酸

表 1 点火器的装药参数
Tab. 1 Charge parameters of igniter

装药参数	数值
第一层起爆药量(斯蒂芬斯铅)/mg	16
第二层起爆药量(斯蒂芬斯铅)/mg	16
主装药量(Al/KClO_4)/mg	150
点火器到火焰雷管的 设计点火距离/mm	≈ 12.5
点火室容积/ cm^3	≈ 1.67
雷管上套孔径/mm	6



1 - 管壳; 2 - 虫胶漆; 3 - 绸垫; 4 - 加强帽; 5 - 黑索今;
6 - 糊精氮化铝; 7 - 沥青斯蒂芬酸铅。

图 2 火焰雷管 LH-3 结构示意图

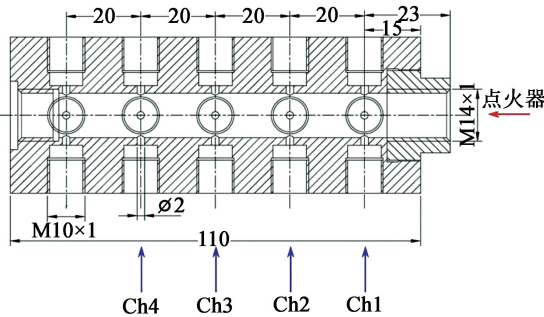
Fig. 2 Structure diagram of flame detonator LH-3

铅、糊精氮化铝和黑索今。

1.2 点火器输出能量特性

为了研究 DDT 失效过程机制,参考 DDT 管道结构形式^[12],设计了点火器输出产物特征采集试验,对可能存在的冲击波和燃烧波进行测试采集,捕捉点火器输出的压力和火焰(光)产物。设计了固定管道腔体,腔体的螺纹端安装点火器,在腔体 3 个侧面分别装 4 个压力传感器、温度传感器和光电传感器,分别测试点火器的输出压力、火焰温度和燃烧速度。每种传感器的 4 个通道依次命名 Ch1、Ch2、Ch3 和 Ch4,上述通道到点火器端面的距离依次为 12.5、32.5、52.5 mm 和 72.5 mm。综合压力、温度、光信号的测试结果,对电点火器的点火物理过程进行分析,得到电点火器的输出能量特征。在固定管道轴向输出端设置果冻,用于收集点火器输出残渣产物。试验装置如图 3 所示。

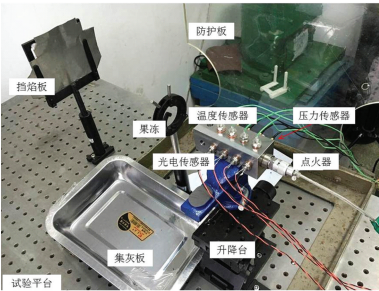
试验在 50 ℃ 和 107 ℃ 两种工况下进行。50 ℃ 为我国运载火箭火工品飞行热环境包络的高温温度,107 ℃ 为 GJB344A 中规定的电点火器高温保温温度。数据采集时,根据放大器设置倍数,计算出压力;根据热电偶电路参数,计算出温度曲线;根据光电二极管的电压曲线可以分析电点火器的燃烧速



(a)测试管道装置原理图(单位:mm)



(b)测试管道装置实物



(c)试验平台实物

图 3 试验装置

Fig. 3 Test device

度。综合压力、温度、光信号的测试结果,对电点火器的点火物理过程进行分析,统计每发点火器试验 4 个通道的光、压力信号的起始时间差 Δt ,获得电点火器的做功过程。

在 50 ℃ 时,进行了 3 次测试;在 107 ℃ 时,进行了 4 次测试。试验时,记录压力信号的起始时间 t_p 和光信号的起始时间 t_L ,如表 3 和表 4 所示。

计算二者之间的时间差。

$$\Delta t = t_p - t_L。 \tag{1}$$

式(1)表明,当 $\Delta t > 0$,光信号先于压力信号到达传感器界面;反之,压力信号先于光信号。

在 50 ℃ 和 107 ℃ 温度下,统计每发试验 4 个通道的压力信号与光信号的起始时间差 Δt ,结果如图 4 和图 5 所示。由于通道 Ch1、Ch2、Ch3、Ch4 到点火器端面的距离呈等距离增大,图 4 和图 5 表征了 Δt 与传爆距离的关系。从 Ch1 到 Ch4,随着各通道

表 3 50 ℃ 时光信号与压力信号的起始时间

Tab.3 Starting time of light signals and pressure signals at 50 ℃

ms			
试验组次	通道	t_L	t_p
1 [#]	Ch1	3.886	3.812
	Ch2	3.887	3.825
	Ch3	3.888	3.837
	Ch4	3.888	3.856
2 [#]	Ch1	3.730	3.720
	Ch2	3.731	3.732
	Ch3	3.733	3.735
	Ch4	3.735	3.756
3 [#]	Ch1	3.634	3.616
	Ch2	3.635	3.631
	Ch3	3.637	3.643
	Ch4	3.639	3.662

表 4 107 ℃ 时光信号与压力信号的起始时间

Tab.4 Starting time of light signals and pressure signals at 107℃

ms			
试验组次	通道	t_L	t_p
4 [#]	Ch1	3.522	3.502
	Ch2	3.523	3.517
	Ch3	3.525	3.521
	Ch4	3.526	3.540
5 [#]	Ch1	3.616	3.613
	Ch2	3.618	3.633
	Ch3	3.619	3.634
	Ch4	3.621	3.650
6 [#]	Ch1	4.337	4.350
	Ch2	4.339	4.362
	Ch3	4.341	4.370
	Ch4	4.341	4.386
7 [#]	Ch1	3.672	3.685
	Ch2	3.674	3.698
	Ch3	3.675	3.704
	Ch4	3.677	3.722

到点火器端面距离的增加, Δt 不断增加,但总的趋势而言,距离越近,冲击波越靠前;温度越高,燃烧速度越快,燃烧波与冲击波达到 Ch1 通道的时间差异越小。同时,重点对比了 Ch1 通道的压力峰值。如图 6 所示,温度越高,采集到的压力峰值越高。

1.3 冲击波对火焰雷管影响

点火器与火焰雷管之间的能量存在 3 种匹配形式:匹配不足、匹配和匹配过度。匹配不足表现在上

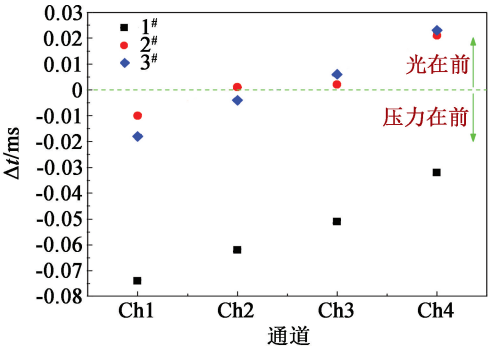


图 4 50 °C 时压力信号与光信号的起始时间差
Fig. 4 Starting time difference between pressure signals and light signals at 50 °C

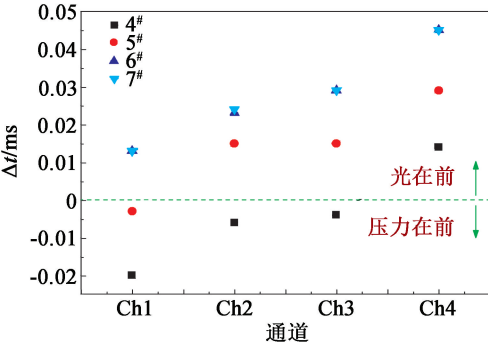


图 5 107 °C 时压力信号与光信号的起始时间差
Fig. 5 Starting time difference between pressure signals and light signals at 107 °C

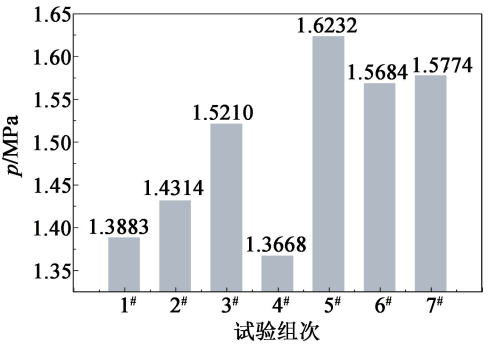


图 6 50 °C 和 107 °C 下 Ch1 通道压力峰值对比
Fig. 6 Pressure peak comparison of channel Ch1 at 50 °C and 107 °C

一级点火器输出的能量小于下一级火焰雷管发火的临界值,导致传爆失效;匹配表现在上一级点火器输出的能量超过下一级火焰雷管的发火临界值,并且不会对火焰雷管造成结构性损伤;匹配过度表现在上一级点火器输出的能量过大,造成了下一级火焰雷管结构破坏,导致传爆失效。

从故障件残骸检查来看,火焰雷管结构破坏,存在点火器与火焰雷管匹配过度的现象。点火器输出产物管道试验发现,点火器输出的冲击波先于火焰(光)产生的燃烧波到达火焰雷管端面。因此,仿真

分析点火器输出的冲击波对火焰雷管壳体的破坏模式,以获取该失效过程的破坏趋势。

基于 ANSYS/LS-DYNA 数值计算软件,采用流固耦合方法计算火焰雷管的冲击起爆过程,分析初始压力对火焰雷管起爆的影响。计算过程中,该分离结构的尺寸与真实状态比例为 1 : 1,但由于材料参数的缺乏,主要是点火器和火焰雷管内部装药的性能参数、火焰雷管管壳等力学性能参数的缺乏,导致不能准确获得火焰雷管起爆过程与输入端管壳受损导气的竞争关系,只能通过调整某些结构的具体尺寸获得失效过程作用的趋势。装药采用流体弹塑性模型,并选用基于 JWL 的 Lee-Tarver 点火增长模型来描述炸药反应物和终产物压力变化。根据 JWL 状态方程,两相物质内压力的数学表达式为:

$$p = Ae^{-R_1V} + Be^{-R_2V} + \omega c_v \frac{T}{V} \quad (2)$$

式中: p 、 V 和 T 分别为材料单元的压力、体积和温度; ω 是 Gruneisen 系数; c_v 为材料的比热容; A 、 B 、 R_1 和 R_2 均为材料常数。

通常情况下,点火器发火后应当引爆火焰雷管,但是若点火器输出压力过大,超过了火焰雷管管壳材料的强度,使得雷管输入端结构破坏并断裂,点火器起爆形成的高压气体会穿过火焰雷管与传爆器套之间的空隙,作用于传爆药柱,并损坏传爆药柱,甚至损坏装药环的完整结构,最终致使火焰雷管不能起爆下一级结构;另一方面,点火器点火所形成的高压气体会推动火焰雷管运动,在火焰雷管向下运动的同时,必然加剧了上述作用过程。这一作用过程即火焰雷管的起爆传爆过程与输入端管壳受损导气过程的竞争机制,如图 7 所示。

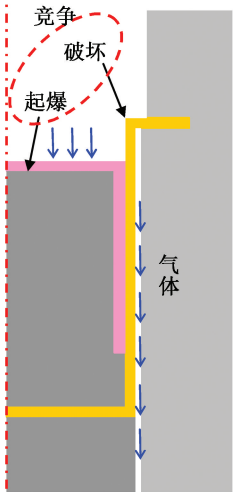


图 7 起爆与破坏的竞争机制
Fig. 7 Competition mechanism of initiation and destruction

通过设置不同的火焰雷管管壳厚度,计算了火焰雷管输入端结构损坏情况(图8)。考虑到火焰雷管管壳的设计厚度为0.5 mm,因而将火焰雷管管壳厚度分别设定为0.1、0.2、0.3、0.4 mm和0.5 mm,获得点火器起爆后火焰雷管输入端的结构损伤的相对趋势。计算表明:冲击波到达火焰雷管后,输入端管壳发生明显的破坏变形,并且当管壳较薄时,管壳会完全破裂,导致上下分离,高压气体进入火焰雷管与传爆器套之间的空隙,从而可能在正常DDT作用前发生结构强度破坏,导致产生DDT过程弱约束条件,发生侧向膨胀,从而产生稀疏波;稀疏波对压力梯度有一定影响,可推迟燃烧向爆轰的转换^[6,13-14],导致DDT终止。仿真分析说明,DDT作用过程中,管壳强度约束与爆轰波成长直接相关。由于LH-3火焰雷管采用“翻边+分体管壳”结构,当点火器初始点火强度较大时,火焰雷管悬臂固定结构在冲击波作用下,更容易发生失稳,从而导致DDT作用过程出现弱约束情况,发生DDT终止。

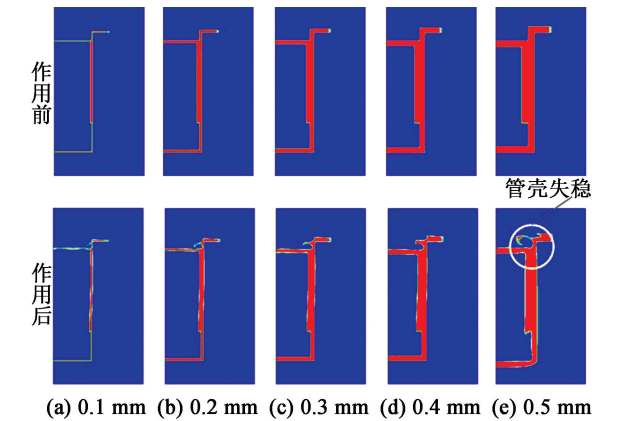


图8 管壳结构强度影响分析

Fig. 8 Analysis on the influence of shell structure strength

2 改进措施分析

点火器输出冲击波能量较大、火焰雷管结构强度不足等都是导致故障发生的因素。为了提高DDT初始环节的点火可靠性,在工程上,点火器采用相对柔和的装药、增大引爆距离抑制冲击波影响、增大火焰雷管管材壳体强度、削减到达火焰雷管端面的能量等都是提升DDT初始环节可靠性的措施。考虑到工程更改的可行性,在不改变点火器和火焰雷管这两种制式产品的前提下,从增大引爆距离和削减到达火焰雷管端面的能量两方面开展工作。

2.1 增大引爆距离

在点火器到火焰雷管端面的引爆距离分别设置

为0、3、6 mm和9 mm的条件下,计算了点火器点火后火焰雷管输入端的结构损伤情况,结果如图9所示。计算时,雷管上套的内径取6 mm。计算表明:点火器到火焰雷管端面的引爆距离越小,火焰雷管输入端管壳的损伤程度越大。因此,为了减小火焰雷管输入端管壳的损伤,在保证可靠引爆的前提下,引爆距离应越大越好;但考虑到火焰雷管的起爆感度,引爆距离应该在合理的范围之内。根据文献,采用 Al/KClO_4 点火药的点火器工作时产生的压力峰值随容腔的增大而减小,在小容腔($V < 5 \text{ mL}$)范围内,空腔容积增加1倍,压力峰值下降约40%^[15]。因此,为了减少冲击波影响,在保证可靠起爆和结构空间允许的前提下,可适当增大引爆距离。

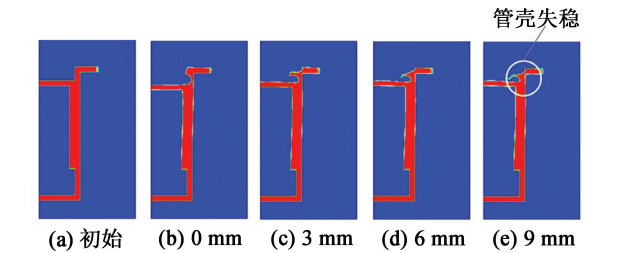


图9 引爆距离对火焰雷管管壳损伤的影响

Fig. 9 Effect of detonation distance on shell damage of flame detonator

2.2 雷管上套孔径影响因素

雷管上套孔径设计为6 mm,考虑到点火器输出威力过强,需要对其进行适当衰减。故改变雷管上套孔径分别为2、3 mm和4 mm,计算点火器起爆后火焰雷管输入端的结构损伤情况,结果如图10所示。计算时,雷管上套高度取3 mm,引爆距离取3 mm。计算结果表明:当雷管上套内径为2 mm时,管壳损伤程度最小;而当雷管上套内径为3 mm和4 mm时,损伤相差不大。因此,为了减小管壳的损伤程度,雷管上套的内径应小于火焰雷管管壳的内径,并且越小越好。但考虑到火焰雷管起爆的需要,雷

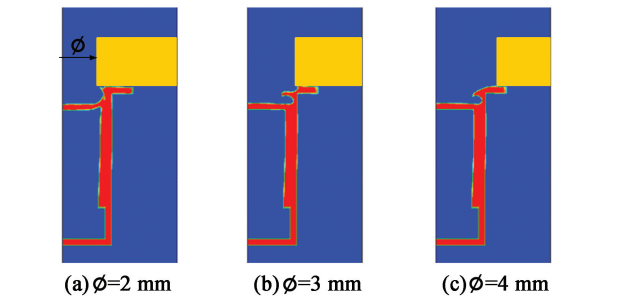


图10 雷管上套内径对火焰雷管管壳损伤的影响

Fig. 10 Effect of inner diameter of detonation channel on shell damage of flame detonator

管上套必须存在最小临界内径,只有当雷管上套的内径大于该最小临界内径时,火焰雷管才能被起爆。综合上述研究发现,在对产品进行结构设计时,雷管上套的内径应大于最小临界内径,并且小于火焰雷管管壳的内径。

3 改进措施及验证

根据仿真分析结果,由于点火器安装空间限制,无法进一步拉大传爆距离。因此,采用了缩小雷管上套内径的方案进行改进并验证。将雷管上套 6 mm 大孔更改为 1 mm 小孔结构,以削减冲击波的影响。更改为小孔后,传火通道的通气面积减小,为大孔状态的 1/36,大大减轻了冲击波对火焰雷管结构的影响,如图 11 所示。

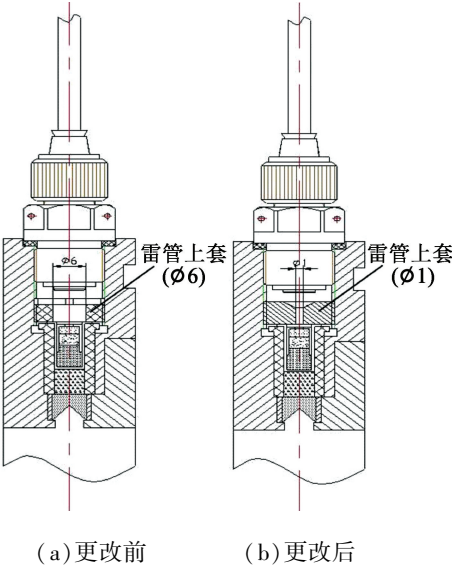


图 11 雷管上套更改方案(单位:mm)

更改后的传爆序列通过了 GJB1307A 规定的裕度试验考核,试验件和点火器装配后,高温 107⁵℃保温 1 h,低温 -400⁰₋₅℃保温 1 h,试验结果如表 5 所示。裕度试验仅调整了点火器的主装药量,火焰雷管和传爆药柱均为设计状态。发火后,输出端在标准铝块上形成了正常凹坑,说明传爆序列形成了稳定爆轰输出,正常完成了 DDT 过程,改进方案有效,满足国军标裕度要求。

4 结论

以某型号传爆序列为研究对象,分析了高能烟火药点火器对火焰雷管 DDT 过程的影响。通过试

表 5 裕度试验结果
Tab. 5 Margin test results

试验状态	药量/ mg	数量/发		试验结果
		高温	低温	
点火器主装药 75%,小药量	112	3	3	均正常起爆, 形成稳定爆轰, 铝块凹坑深度 范围为 5.02 ~
点火器主装药 120%,大药量	180	3	3	5.48 mm

验验证,获得了点火器输出的冲击波和燃烧波的关系,明确了设计状态下冲击波先于燃烧波到达火焰雷管端面的作用过程,并通过仿真分析,发现了火焰雷管结构强度的破坏趋势,进而可能影响 DDT 过程发展。在保证火焰雷管和点火器结构不变的前提下,增大引爆距离和缩小传爆通道孔径均能有效地衰减冲击波对火焰雷管结构的影响,从而保证传爆序列不被冲击波破坏,确保在燃烧波作用后形成正常的 DDT 过程。对新型点火器以及传爆序列的研发提供参考。

参 考 文 献

[1] 张超,马亮,赵凤起,等. 含能材料燃烧转爆轰研究进展[J]. 含能材料,2015,23(10):1028-1036.
ZHANG C, MA L, ZHAO F Q, et al. Review on deflagration-to-detonation transition of energetic materials[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2015, 23(10): 1028-1036.

[2] 张垒. 分离式点火-起爆序列设计研究[D]. 南京:南京理工大学,2010.
ZHANG L. The design method of the separate dignition-detonation train [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology,2010.

[3] 冯晓军,赵娟,田轩. 四种典型炸药燃烧转爆轰试验研究[J]. 火炸药学报,2018,41(1):72-76.
FENG X J, ZHAO J, TIAN X. Experimental study of the deflagration to detonation transition for four kinds of typical explosives[J]. Chinese Journal of Explosive & Propellants, 2018, 41(1): 72-76.

[4] 赵同虎,张新彦,李斌,等. 颗粒状 HMX、RDX 的燃烧转爆轰实验研究[J]. 含能材料,2003,11(4):187-190.
ZHAO T H, ZHANG X Y, LI B, et al. Experimental study on the deflagration to detonation transition for granular HMX, RDX[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2003, 11(4): 187-190.

[5] LUEBCKE P E, DICKSON P M, FIELD J E. An experimental study of the deflagration-to-detonation transition in granular secondary explosives[J]. Proceedings of

The Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences, 1995, 448(1934):439-448.

[6] 赵同虎,张寿齐,张新彦,等. DDT 管材料对颗粒状 RDX 床燃烧转爆轰(DDT)影响的实验研究[J]. 高压物理学报,2000,14(2):99-104.

ZHAO T H, ZHANG S Q, ZHANG X Y, et al. An experimental study of the effects of DDT tube materials on the deflagration to detonation transition in granular RDX bed[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2000,14(2):99-104.

[7] 张小兵,袁亚雄,金志明. 粒状火药床的压力波特性研究[J]. 火炮发射与控制学报,1995(3):39-43.

[8] 贾祥瑞,黄风雷,浣石,等. 模型 NEPE 推进剂燃烧转爆轰实验研究[J]. 北京理工大学学报,1995,15(4):377-380.

JIA X R, HUANG F L, HUAN S, et al. An experimental study of deflagration-to-detonation transition on a model NEPE propellant[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 1995, 15(4):377-380.

[9] 李玉平,刘玉存,于雁武,等. 烟火药做功能力测试研究[J]. 含能材料,2010,18(4):402-404.

LI Y P, LIU Y C, YU Y W, et al. Power test of pyrotechnics by lead black method[J]. Chinese Journal of Energetic Materials,2010,18(4):402-404.

[10] 李玲霞,丁茂元,白伟利,等. Al/KClO₄ 点火药爆热测定的影响因素[J]. 火工品,2012(6):40-43.

LI L X, DING M Y, BAI W L, et al. Study on factors influencing on explosion heat test of Al/KClO₄ ignition powder[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2012(6):40-43.

[11] 崔庆忠,焦清介,彭晨光. 铝粉形态学特征对 Al/KClO₄ 燃烧性能的影响[J]. 兵工学报,2011,32(11):1327-1330.

CUI Q Z, JIAO Q J, PENG C G. The influence of morphology of Al powder on combustion performance of Al/KClO₄ composition[J]. Acta Armamentarii, 2011, 32(11):1327-1330.

[12] 董树南,王世英,朱晋生,等. 含 ACP 改性双基推进剂的燃烧转爆轰实验研究[J]. 火炸药学报,2007,30(2):17-20.

DONG S N, WANG S Y, ZHU J S, et al. The experimental study on deflagration-to-detonation transition in modified double-base propellant with ACP[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2007,30(2):17-20.

[13] 文尚刚,王胜强,黄文斌,等. 高密度 B 炸药的燃烧转爆轰实验研究[J]. 爆炸与冲击,2007,27(6):567-571.

WEN S G, WANG S Q, HUANG W B, et al. An experimental study on deflagration-to-detonation transition in high-density composition B[J]. Explosion and Shock Waves, 2007, 27(6): 567-571.

[14] 董聪慧. 一种燃烧转爆轰无起爆药雷管的研究[D]. 淮南:安徽理工大学,2016.

DONG C H. The research of non-primary detonator based on DDT theory[D]. Huainan:Anhui University of Science and Technology, 2016.

[15] 梁晓爱,聂建新,王帅,等. 密闭爆发器中 Al/KClO₄ 点火器的输出性能研究[J]. 兵工学报,2017,38(8):1513-1519.

LIANG X A, NIE J X, WANG S, et al. Research on output performance of Al/KClO₄ igniter in closed bomb[J]. Acta Armamentarii, 2017,38(8):1513-1519.



(上接第 22 页)

with high solids loadings[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2019, 37(3):3135-3142.

[8] 王景龙. 3DP 炸药油墨配方设计及制备技术[D]. 太原:中北大学,2015.

WANG J L. 3DP explosive ink formulation and preparation technology[D]. Taiyuan: North University of China, 2015.

[9] 邢宗仁. 含能材料三维打印快速成形技术研究[D]. 南京:南京理工大学,2012.

XING Z R. Research of three-dimensional printing for energetic materials[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology,2012.

[10] 陈永进. 光固化 3D 打印异型含能药柱及性能研究[D]. 沈阳:沈阳理工大学,2020.

CHEN Y J. Study on 3D-printed shaped energetic grain and its properties [D]. Shenyang: Shenyang Ligong University,2020.

[11] 王泽山. 含能材料概论[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2006:1-11.

[12] 李凤生. 特种超细粉体制备技术及应用[M]. 北京:国防工业出版社,2002:1-9.

[13] 李凤生. 固体推进剂技术及纳米材料的应用[M]. 北京:国防工业出版社,2008:12-97.

[14] 彭网大,翁武军,曹传新,等. 高氯酸铵比表面积对推进剂热稳定性的影响[J]. 火炸药,1996(4):6-8.