

文章编号: 1003-1480 (2024) 03-0030-06

冲击片雷管换能界面轴向距离能量耗散失效分析

牛犇, 张玉若, 梁车平, 何强, 吴琴钟

(陕西应用物理化学研究所, 陕西 西安, 710061)

摘要: 为提高冲击片雷管作用的一致性和可靠性, 针对因材料表面小型突起导致接触面不平整的装配问题, 从换能界面能量耗散的角度对装配结构中两种轴向距离所产生的影响进行了探究。通过不同电压下的发火试验及感度试验, 验证和分析两种轴向距离对冲击片雷管作用过程的影响。结果表明: 加速膛-桥箔轴向距离会导致电爆能量的径向散失, 进而影响了飞片冲击药柱端面能量的大小并引起聚酰亚胺薄膜的撕裂拉伸, 随着轴向距离的持续增加, 爆炸桥箔逐渐失效; 加速膛-药柱轴向距离会影响飞片飞行的平稳程度以及撞击药柱速度, 随着轴向距离增加, 飞片飞行距离增长, 到达药柱端面的速度降低且不一致, 导致起爆药柱的稳定性降低, 轴向距离应控制在 0.3 mm 以内。

关键词: 冲击片雷管; 换能界面; 轴向距离; 感度试验; 发火试验; 飞片速度

中图分类号: TJ450.2 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2024.03.005

Failure Analysis of Energy Dissipation by Axial Distance at the Energy Exchange Interface of Slapper Detonator

NIU Ben, ZHANG Yu-ruo, LIANG Che-ping, HE Qiang, WU Qin-zhong

(Shaanxi Applied Physics and Chemistry Research Institute, Xi'an, 710061)

Abstract: In order to improve the consistency and the reliability of the slapper detonator, based on the assembly problems of uneven contact surface caused by small protrusions on the material surface, the influence of two axial distances in the assembly structure in view of the energy dissipation of the energy exchange interface were studied. Through the firing test and the sensitivity test at different voltages, the effect of two axial distances on the function process of detonator was verified and analyzed. The results show that the axial distance between accelerated chamber and bridge foil will cause radial loss of electric explosion energy, then the impact energy of the flyer on the end surface of charge is affected and the polyimide film will be torn and stretched, with the continuous increase of axial distance, the exploding bridge foil will gradually fail. Axial distance between accelerated chamber and charge will affect the flight smoothness of the flyer and the impact speed on the charge, as the axial distance increasing, the flight distance of flyer increases, the flyer speed reaching to the end of charge is lowered and inconsistent, which make it difficult to initiation the charge, therefore, the axial distance should be controlled within 0.3 mm.

Key words: Slapper detonator; Energy exchange interface; Axial distance; Sensitivity test; Firing test; Flyer speed

冲击片雷管 (Slapper Detonator) 是直列式起爆系统的重要组成部分, 其因高可靠性、高瞬时性、高安全性的特点被广泛应用于武器系统。随着冲击片雷管的工程化应用^[1-4], 对其批量化制造和装配异常造成产品失效的关注越来越多, 但关于装配工艺精度不足或

材料表面特性产生的轴向距离对飞片形成乃至发火感度的影响研究却少有报道, 而桥箔、加速膛以及药柱之间存在的轴向距离会对桥箔的剪切、飞片的形成、加速过程中飞片飞行的平稳性以及飞片到达药柱端面的最终速度产生影响。在此背景下, 本文结合冲击

收稿日期: 2023-12-12

作者简介: 牛犇 (2000-), 男, 在读硕士研究生, 主要从事爆炸箔安全点火技术研究。

通讯作者: 张玉若 (1977-), 男, 研究员, 主要从事爆炸箔安全点火技术研究。

基金项目: 十四五共用技术项目 (90903060201)。

引用本文: 牛犇, 张玉若, 梁车平, 等. 冲击片雷管换能界面轴向距离能量耗散失效分析[J]. 火工品, 2024(3): 30-35.

片雷管装配过程,研究了加速膛-桥箔轴向距离、加速膛-药柱轴向距离对冲击片雷管失效的影响,并通过发火试验及感度试验进行了验证及分析,为提高冲击片雷管的作用一致性及可靠性提供依据。

1 冲击片雷管轴向距离影响分析

1.1 冲击片雷管装配结构分析

冲击片雷管的结构如图1所示,主要包括电极塞、基片、桥箔、飞片、加速膛、药柱、密封片以及壳体等。其作用原理为在窄脉冲大电流作用下,金属桥箔快速发生电爆炸而产生高温高压等离子体,剪切并驱动飞片通过加速膛,飞片高速撞击内装炸药而形成爆炸输出。

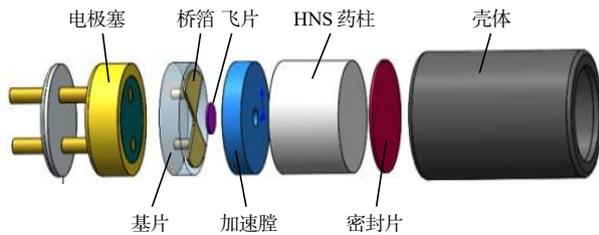


图1 冲击片雷管结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of slapper detonator structure

加速膛是冲击片雷管中的关键元件,它是飞片在桥箔电爆能量驱动下加速过程中的飞行通道,在结构上位于桥箔和药柱之间。加速膛的主要作用有两个:一是在桥箔电爆产生等离子体的膨胀压力下,加速膛孔边缘剪切作用形成飞片,飞片在加速膛内腔加速前进;二是加速膛可以消除桥箔4个角上很高的电压梯度,以此提高飞片与钝感炸药撞击时的动能^[5]。倘若没有加速膛的作用,飞片撞击药柱的动能将会很小,产生的压力也不足,难以将钝感药柱引爆。

飞片是冲击片雷管的重要部件,在能量转换过程中主要起起爆能量传递、爆炸桥箔和钝感装药隔离的作用。由赵彦^[6]、Osher等^[7]人给出的驱动飞片有效电功率模型可知,在爆炸之前桥箔所吸收的电能主要转化为内能,爆炸后等离子体迅速膨胀,同时伴有热能和电磁辐射,这意味着桥箔所吸收的电能很大部分以其他形式散失掉,只有小部分转化为飞片动能。飞片的完整形成,加速过程中的初始速度、飞行姿态、速

度增长的平稳性以及撞击药柱的过程是否顺利,决定了产生的热点数是否达到预期^[8],会对炸药产生不同的冲击起爆效果。

在装配过程中,由于材料表面粗糙度、零件加工精度和装配配合度的问题,会导致其中各零部件装配出现不紧密的情况。本文着重针对冲击片雷管换能界面,即爆炸桥箔与加速膛之间、加速膛与药柱之间的轴向距离所产生的失效影响进行分析和验证。换能界面结构如图2所示。

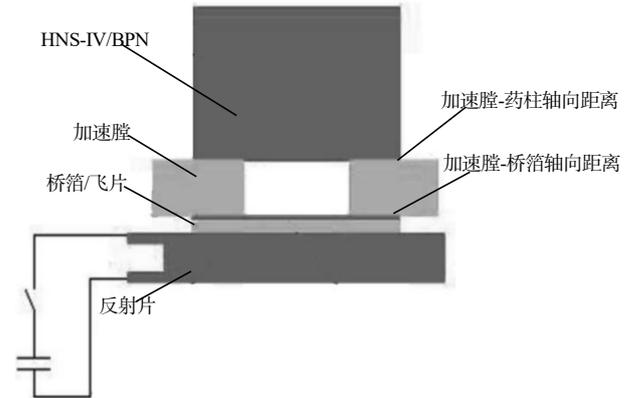


图2 换能界面结构示意图

Fig.2 Structural schematic of energy exchange interface

结合实际装配工艺,对冲击片雷管轴向距离所产生的影响进行可能出现的失效形式分析。其中金属桥箔与加速膛之间的轴向距离主要影响飞片的剪切过程以及飞片形成时的初始速度^[9],而加速膛与药柱之间的轴向距离主要影响飞片随后的加速、冲击起爆过程中的平稳性与准确性以及到达药柱端面的最终速度,无论何种原因最终体现的是冲击片雷管发火感度受到影响。

1.2 加速膛-桥箔轴向距离的影响分析

根据冲击片雷管结构特点及飞片形成过程中的能量变化可知,加速膛和桥箔之间的轴向距离可能造成的影响有以下几种:

(1) 飞片由桥箔发生电爆炸经加速膛剪切形成,加速膛-桥箔轴向距离可能会使电爆炸能量沿平行间隙径向扩散逸出,进而影响形成飞片的初始速度。

(2) 加速膛对飞片的剪切不到位,由于存在角度倾斜的可能性,导致剪切出来的飞片形状和预设有出入,进而影响飞片的初始速度以及飞片飞行过程的平稳性。

(3) 由于飞片材料本身具备剪切性能和弹性性能, 加速膛-桥箔轴向距离会影响飞片形成后在高压等离子体推动下是否保持平面。

1.3 加速膛-药柱轴向距离的影响分析

加速膛与药柱之间的轴向距离可能会产生以下几种影响:

(1) 由于飞片的飞行距离加长, 桥箔 4 个角的高压梯度消除不完全, 导致飞片初始动能变小^[10];

(2) 飞片在加速膛中飞行的平稳性下降, 最终对药柱的撞击角度发生变化, 从而造成撞击压力下降和能量的损失;

(3) 飞片对药柱的撞击并非正中心, 导致起爆钝感炸药热点位置发生变化。加速膛的设计应以飞片达到最大速度时恰好到达药柱端面为基准, 随着轴向距离的产生, 飞片的飞行距离变长, 到达药柱端面的速度可能会减小。

2 试验

以某型冲击片雷管为研究对象, 进行加速膛-桥箔轴向距离、加速膛-药柱轴向距离对冲击片雷管作用的影响分析。针对加速膛-桥箔轴向距离, 通过在不同电压下的发火试验来观察其对飞片形成及对发火作用产生的影响; 针对加速膛-药柱轴向距离, 则通过感度试验来观察其对冲击片雷管所产生的影响。

2.1 加速膛-桥箔轴向距离试验

为了验证加速膛-桥箔轴向距离对冲击片雷管作用的影响, 确定最优轴向距离区间, 将 12.5, 25.0, 50.0 μm 的聚酰亚胺薄膜安装于爆炸桥箔上方, 以精确控制加速膛与桥箔之间的距离, 薄膜内有小孔, 孔径大于加速膛内径, 试验样品如图 3 所示。

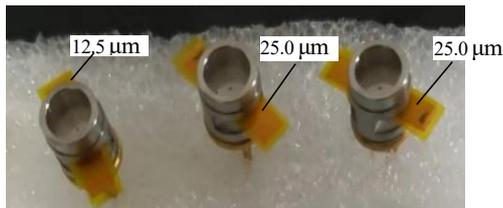


图3 不同加速膛-桥箔轴向距离的冲击片雷管

Fig3 Slapper detonator with different axial distances between accelerated chamber and bridge foil

使用电压调控装置及高压盒, 测量、记录在不同电压状态下的发火情况, 并观察作用前后桥箔及药柱状态, 分析加速膛-桥箔轴向距离对冲击片雷管作用的影响, 试验结果如表 1 所示。

表 1 不同加速膛-桥箔轴向距离的发火试验结果

Tab.1 Firing test results of different axial distances between accelerated chamber and bridge foil

序号	轴向距离/ μm	施加电压/V	发火情况
1	标准爆炸箔	1 000	未发火
2	标准爆炸箔	1 100	正常发火
3	标准爆炸箔	1 200	正常发火
4	标准爆炸箔	1 300	正常发火
5	标准爆炸箔	1 400	正常发火
6	标准爆炸箔	1 500	正常发火
7	12.5	1 400	未发火
8	12.5	1 450	正常发火
9	12.5	1 500	正常发火
10	25.0	1 400	未发火
11	25.0	1 500	未发火
12	25.0	1 600	未发火
13	25.0	1 700	未发火
14	25.0	1 800	正常发火
15	50.0	1 400	未发火
16	50.0	1 500	未发火
17	50.0	1 600	未发火
18	50.0	1 700	未发火
19	50.0	1 800	未发火
20	50.0	1 900	未发火
21	50.0	2 000	未发火

由表 1 可以看出: 当轴向距离控制在 12.5 μm 时, 发火感度略有下降但仍能正常发火; 轴向距离控制在 25.0 μm 时, 发火电压达到 1 800 V 时才发火。当轴向距离为 50.0 μm 及以上时, 冲击片雷管失效, 无法在额定电压范围内发火。

对试验中未发火的冲击片雷管进行拆解, 观察其桥箔剪切痕迹及药柱状态, 并进行对比分析。标准冲击片雷管的飞片剪切痕迹如图 4 所示。

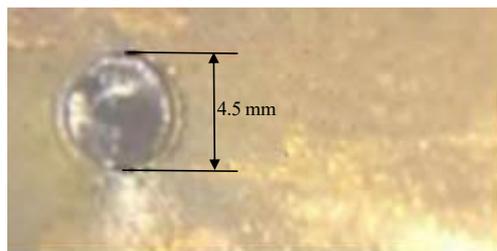


图4 标准冲击片雷管飞片剪切痕迹

Fig.4 Flyer shear marks of standard slapper detonator

由图4可见,因为标准冲击片雷管的加速膛压紧于桥箔之上,所以压紧状态下飞片圆孔剪切更锋利,圆周度更好,曲率更加规则,冲击片雷管能够正常发火。

加速膛-桥箔轴向距离为 $12.5\ \mu\text{m}$ 时的飞片剪切痕迹及局部毛刺如图5所示。由图5可见聚酰亚胺薄膜所剪切出的飞片并非规则圆形,飞片圆周明显地被拉伸撕裂为椭圆状,飞片圆周剪切并不平整,有少量毛刺。

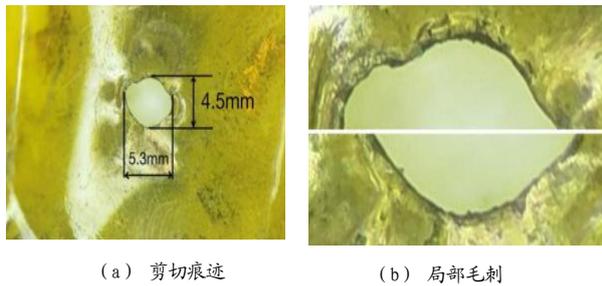


图5 轴向距离为 $12.5\ \mu\text{m}$ 冲击片雷管飞片剪切痕迹和局部毛刺

Fig.5 Flyer shear marks and localized burrs of slapper detonator with axial distance of $12.5\ \mu\text{m}$

加速膛-桥箔轴向距离为 $25\ \mu\text{m}$ 时的飞片剪切痕迹如图6所示。由图6可见聚酰亚胺薄膜所剪切出的飞片尺寸略微变大,直径为 $4.7\ \text{mm}$,圆孔周围有较深等离子体能量痕迹,聚酰亚胺薄膜贴近加速膛一侧有明显拉伸突出,经测量长度约 $0.8\ \text{mm}$ 。

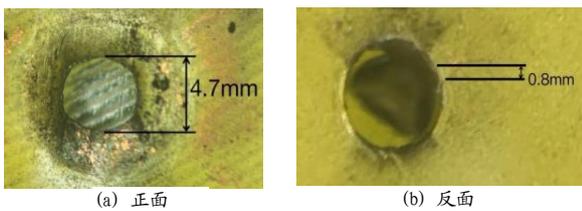


图6 轴向距离为 $25\ \mu\text{m}$ 冲击片雷管飞片剪切痕迹
Fig.6 Flyer shear marks of slapper detonator with axial distance of $25\ \mu\text{m}$

加速膛-桥箔轴向距离为 $50\ \mu\text{m}$ 时的飞片剪切痕迹如图7所示,此距离下冲击片雷管未发火,可看到聚酰亚胺薄膜所剪飞片并未飞出撞击药柱,飞片表面有明显的拉伸凸出现象,飞片中心点能量最为集中,所形成凸出最高为 $0.6\ \text{mm}$,由中心往四周,随着能量的减小凸起程度逐渐减小。

综上,从试验结果可以看出,随着加速膛-桥箔

轴向距离由 $12.5\ \mu\text{m}$ 增大到 $25.0\ \mu\text{m}$ 时,聚酰亚胺薄膜剪切飞片形状逐渐不规则,所剪飞片直径从标准冲击片雷管的 $4.5\ \text{mm}$ 逐渐膨大,飞片圆周逐渐变得不光滑;当轴向距离为 $50\ \mu\text{m}$ 时,聚酰亚胺薄膜所剪飞片未飞出撞击药柱,在飞片中央形成 $0.6\ \text{mm}$ 的不规则凸起。这表明随着加速膛-桥箔轴向距离的增加,加速膛对聚酰亚胺薄膜的剪切作用逐渐减弱,所形成飞片的形状也逐渐不规则、圆周不平整。

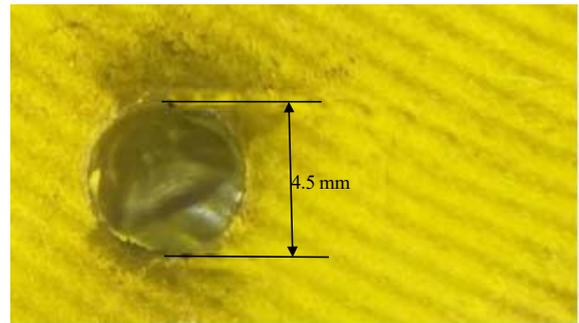


图7 轴向距离为 $50.0\ \mu\text{m}$ 冲击片雷管飞片剪切痕迹

Fig.7 Flyer shear marks of slapper detonator with axial distance of $50\ \mu\text{m}$

由表1可知,当电压为 $1\ 400\ \text{V}$ 时,3个具有轴向距离的冲击片雷管均未正常发火。拆解其药柱,如图8所示。

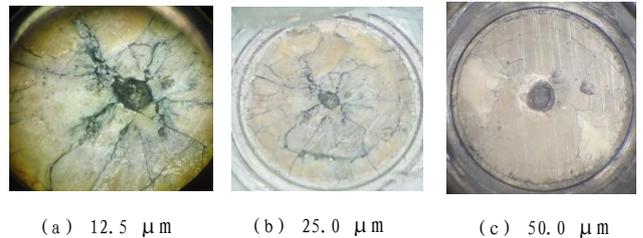


图8 $1\ 400\ \text{V}$ 发火电压下轴向距离 $12.5, 25.0, 50\ \mu\text{m}$ 未发火药柱状态对比

Fig.8 Comparison of unfired charge with axial distances of $12.5, 25.0, 50.0\ \mu\text{m}$ at $1\ 400\ \text{V}$ firing voltage

由图8可见,当轴向距离为 $12.5\ \mu\text{m}$ 时,飞片撞击药柱形成较为明显的凹痕,药柱端面有较大范围的裂痕扩散,但未成功发火;当轴向距离为 $25.0\ \mu\text{m}$ 时,形成的凹痕更浅、裂痕扩散范围更小;当轴向距离为 $50.0\ \mu\text{m}$ 时,飞片撞击药柱后只在药柱端面留下很浅的凹坑。对比表明随着加速膛-桥箔轴向距离的增大,飞片撞击药柱的强度逐渐减小,即飞片到达药柱端面的动能逐渐减小。

针对上述试验现象,结合冲击片雷管金属桥箔电爆换能过程,分析其原因如下:

(1) 当药柱处于与加速腔压紧状态(标准冲击片雷管)时,桥箔发生电爆炸产生的能量主要沿着加速腔轴向释放,能量均用于驱动飞片形成动能,基本无扩散逸出,且随着起爆电压增大,爆炸箔产生的发火能量逐渐增大,形成的飞片规则、平整。

(2) 随着加速腔与金属桥箔之间的轴向距离逐渐增大,所需起爆电压也逐渐增大,当轴向距离增大至 $50.0\ \mu\text{m}$ 时,出现无法起爆的现象。产生这种现象的原因在于:当桥箔与加速腔之间存在轴向距离时,金属桥箔电爆时产生的等离子体,一部分会沿着径向方向散失,导致沿轴向驱动飞片的能量减少,且随着轴向距离的增大,径向能量损失越严重。当轴向距离达到某一极限时,即便桥箔发生完全电爆炸,所产生的能量也无法驱动飞片起爆药柱。根据未发火爆炸箔在药柱端面所形成的凹痕,也可见随着轴向距离增大,飞片到达药柱端面能量减小,进而形成的凹痕深度变浅、作用范围变小。

(3) 当桥箔与加速腔之间存在轴向距离时,飞片剪切后聚酰亚胺薄膜贴近加速腔一侧有明显的拉伸现象,这是由于加速腔对聚酰亚胺薄膜存在径向束缚,等离子体对聚酰亚胺薄膜剪切过程中的径向能量分布并不均匀,致使材料受力不均,桥箔四角电压梯度消除不完全,进而出现圆周边缘沿着飞片运动方向拉伸突起。

2.2 加速腔-药柱轴向距离试验

加速腔与药柱之间的轴向距离大多是由于药柱未压紧,以及材料表面有毛刺、凸起导致的,数量级在毫米级别。为了分析加速腔-药柱轴向距离对冲击片雷管作用的影响,采用不同加速腔-药柱距离的冲击片雷管分别进行感度试验,通过观察感度以及不同电压下作用前后桥箔及药柱状态来判断其对冲击片雷管发火的影响。

感度试验以加速腔-药柱之间的轴向距离作为变量,其余参数均相同。试验发火电容为 $0.4\ \mu\text{F}$,开关为冷阴极触发管,型号为 RQ8001 (3 kV),额定工作电压为 2.2 kV,试验装置如图 9 所示。

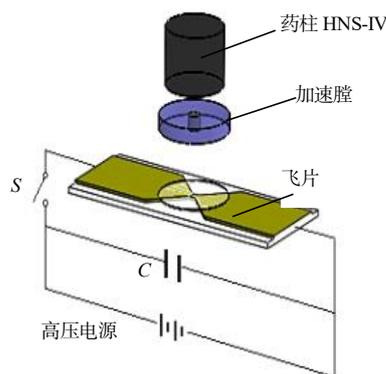


图 9 发火感度试验装置示意图

Fig.9 Schematic diagram of firing sensitivity test device

按照 GJB 377-87 感度试验用升降法对冲击片雷管发火感度进行表征,观察未发火的冲击片雷管药柱、桥箔状态,试验结果如表 2 所示。

表 2 不同加速腔-药柱轴向距离冲击片雷管的发火感度试验结果

Tab.2 Firing sensitivity test results of slapper detonator with different axial distances between accelerated chamber and charge

轴向距离 /mm	试验数量/发	初始电压/V	步长 /V	50%发火电压/V	标准差 /V
0	30	1 500	50	1 289	21.5
0.25	30	1 500	50	1 295	22.3
0.50	30	1 500	50	1 352	35.6
0.75	30	1 500	50	1 415	45.8
1.00	30	1 500	25	1 615	50.6

由表 2 感度试验结果可以看出,当轴向距离为 0.25 mm 时,50%发火电压和标准冲击片雷管相比差距不大,说明对冲击片雷管发火感度无影响;当轴向距离大于 0.25 mm,分别为 0.50, 0.75, 1.00 mm 时,50%发火电压逐渐升高,均大于标准冲击片雷管发火电压。

针对感度试验中未发火情况,推测可能是因距离因素飞片飞行至药柱端面时撞击速度低于常规稳定起爆速度,导致无法激发药柱完成发火。因此,通过光子多普勒测速仪,针对标准冲击片雷管、加速腔-药柱轴向距离分别为 0.25, 0.50, 0.75 mm 的冲击片雷管进行 PDV 测速,对速度曲线进行对比分析。PDV 测速结果如图 10 所示。

由图 10 可以看出,标准冲击片雷管产生的飞片速度为 3 800 m/s,达到最高速度的时间为 21.4 μs ,

换算成飞行距离为 0.5 mm, 飞行速度随距离基本无变化。但实际情况中, 飞片速度会随着飞行距离的加长而逐渐衰减。由于加速膛另一端紧密压有药柱, 所以飞片飞行途中会压缩前段空气柱, 飞片受到来自压缩空气柱的反作用阻力, 实际速度在 3 500 m/s 左右。因此, 达到理想状况下撞击药柱稳定起爆的最高速度对应的飞行距离随之增加, 飞行距离大约为 0.55 mm。

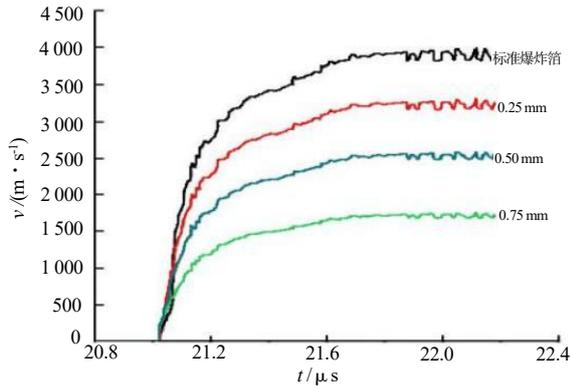


图 10 PDV 测速结果比对

Fig.10 Comparison of PDV speed measurement results

经过对比感度试验结果与飞片测速结果, 可以看出飞片在正常的冲击过程中经 21.4 μs 速度达到峰值, 之后会逐渐降低, 并且速度呈上下震荡不稳定的状态。即随着飞行距离加长, 飞片到达药柱端面的速度从稳定的峰值区间至振荡、不稳定的区间, 导致对药柱激发作用的稳定性大大降低。因此当加速膛-药柱距离大于 0.50 mm 时, 飞片飞行的最终速度以及起爆作用的稳定性将会下降, 当加速膛和药柱距离继续增大至一定数值时, 额定工作电压下难以撞击药柱完成发火。

3 结论

结合冲击片雷管具体结构, 通过对飞片形成及加速过程进行理论分析, 测试不同发火电压下冲击片雷管起爆情况及感度试验结果, 以及对未发火冲击片雷管进行拆解, 观察其桥箔、药柱状态, 并结合飞片速

度曲线分析其未发火原因, 得出如下结论:

(1) 加速膛-桥箔轴向距离会导致电爆能量径向散失, 进而影响飞片冲击药柱端面能量大小并引起聚酰亚胺薄膜撕裂拉伸, 随着加速膛-桥箔轴向距离的增大, 冲击片雷管无法在额定电压范围内正常发火;

(2) 加速膛-药柱轴向距离会影响飞片飞行的平稳程度以及撞击药柱速度。随着距离增大, 飞片飞行距离增长, 飞行平稳度降低, 到达药柱端面速度降低, 难以激发药柱。

参考文献:

- [1] 张玉若, 梁车平, 等. 爆炸箔换能元失效模式分析[J]. 火工品, 2018(4): 6-7.
- [2] 韩志伟, 褚恩义, 王可喧, 等. 爆炸箔厚度与其电爆性能和冲击片雷管感度的关系研究[J]. 火工品, 2009(6): 8-10.
- [3] 张玉若, 梁车平, 等. 冲击片雷管电烤爆安全性研究[J]. 火工品, 2018(2): 6-7.
- [4] MIL-DTL-23659F Detail specification initiators, electric general design specification for[S]. NPFC, 2010.
- [5] 王云鹏, 郭晋, 等. 飞片参数及冲击角度对能量激发的影响研究[J]. 火工品, 2023(1): 22-27.
- [6] 赵彦, 曾庆轩, 等. 爆炸箔起爆系统能量转换模型的研究[J]. 火工品, 2009(4): 5-8.
- [7] J.E.Osher, G.Barnes, et al.. Operating characteristics and modeling of the LLNL 100kV electric gun[J]. JEEE Transactions on Plasma Science, 1989, 17(3): 392-402.
- [8] 杨振英, 马思孝, 等. 爆炸箔起爆器的设计及影响因素实验[J]. 火工品, 1999(4): 18-22.
- [9] 尹强, 耿春余. 冲击片雷管研究与发展[J]. 探测与控制学报, 2005, 27(4): 8-11, 15.
- [10] 杨振英, 党瑞荣, 等. 冲击片雷管作用时间的估算与测定[J]. 火工品, 2002(3): 18-20.