

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2022.05.008

小直径银导爆索爆速波动原因分析及工艺改进^{*}

郭雷明^① 潘少卿^② 孙 斌^① 盛景恺^②

①安徽红星机电科技股份有限公司(安徽合肥,231135)

②空军装备部驻南京地区第二军事代表室(江苏南京,210016)

[摘 要] 在小直径银导爆索制造过程中,常常有 4.9% 的产品不能满足爆速在 6 700~7 100 m/s 范围内的要求,针对此问题进行了分析和试验验证。结果表明,银管初始装药密度梯度是导致银导爆索被拉制成型后爆速波动的主要原因。通过改进工艺参数设置,减少银管初始装药密度梯度差,可以降低密度梯度产生的扰动对爆速的影响,提高银导爆索爆速精度,减少爆速波动,降低生产成本。

[关键词] 小直径银导爆索;爆速;装药;密度梯度

[分类号] TD235.2⁺2;TJ45⁺7

Fluctuation Reason Analysis of Detonation Velocity and the Technology Improvement of Silver Detonating Fuse with Smaller Diameter

GUO Leiming^①, PAN Shaoqing^②, SUN Bin^①, SHENG Jingkai^②

①Anhui Hongxing Electromechanical Technology Co., Ltd. (Anhui Hefei, 231135)

②The Second Military Representative Office in Nanjing Area, Air Force Equipment Department (Jiangsu Nanjing, 210016)

[ABSTRACT] In the manufacturing process of small-diameter silver detonating fuse, 4.9% of the products cannot meet the requirements of detonation velocity in the range of 6 700-7 100 m/s. In view of this problem, the analysis and experimental verification were carried out. Results show that the initial charge density gradient is the main factor causing the detonation velocity fluctuation after the silver detonating fuse is drawn. The measures of improving the process parameters and reducing the initial charge density gradient were put forward. It can reduce the influence of disturbance caused by density gradient of silver detonating fuse on the detonation velocity, improve the detonation velocity accuracy of silver detonating fuse, and reduce detonation velocity fluctuation and production cost.

[KEYWORDS] small-diameter silver detonating fuse; detonation velocity; charge; density gradient

引言

小直径银导爆索(银索)是指直径小于 1 mm 的银导爆索。

近年来,小直径银索因具有柔韧性好、传爆可靠性高、勤务处理安全性高的特点^[1-3],被多个平台选择使用,已经广泛应用到现代装备中;利用银索实现爆速微秒高精度延期,也取得非常好的效果。银索的直径经过适当的调整,可用于新型单兵武器装备,如单兵破甲弹、攻坚弹等特种弹的二级传、扩爆装置上。随着现代军事装备的发展,智能弹药越来越受到青睐,对弹药精度提出更高的要求。多个高精度

装备正从试验阶段向批量装备阶段拓展应用,并且成为未来局部战争不可缺少的武器装备。对银索的要求和认识也从过去的单一传爆可靠性拓展到对爆速的检测控制。

在早期使用中,银索的传爆可靠性能作为主要指标要求可以满足使用需求。但随着微秒级延期精度要求的提高,只考核银索的传爆可靠性并不能达到延期精度的预期目标。所以,在小直径银索的制造过程中增加了爆速测定,间接监测银索的延期精度。从大量试验数据看,爆速测定结果并不乐观,有一定比例的产品不能满足要求,造成生产成本增加。为此,对爆速波动的问题进行了分析、试验和验证,对生产工艺进行了优化。

^{*} 收稿日期:2022-01-20

第一作者:郭雷明(1981-),男,工程师,主要从事火工品设计及工艺研究。E-mail:2274764441@qq.com

1 试验部分

1.1 小直径银索的制备

银索由银管内装填炸药后压制、再经多道工序拉制而成。制备银索的银管也可以根据设计需求定制。本文中所涉及的小直径银索采用的银管初始外径 8 mm、内径 5 mm、长度 270 mm, 单次装药量约 500 mg; 压药压力 70 MPa, 总药量约 7 g。多次装药并压药后, 经过 60 道工序拉制, 再经过多次的应力释放, 最终拉制成一根总长约 12 m、直径 0.97 mm 的银索。

1.2 爆速测定方法

利用猛炸药的爆炸性能^[4], 银索一端被可靠起爆后, 爆轰波沿着银索轴线传播。利用银索的爆轰传播速度实现微秒级延期功能, 且爆轰传播可实现对下一级的可靠起爆。通过调节银索的长度, 进而实现对微秒级延期时间的控制。

按设计指标的需求, 为了检测银索延期精度是否满足要求, 每根银索被拉制成型后都要分别截取首、尾两个部位测定爆速, 每部分截取的长度不少于 700 mm。试验设备为 ZBS9601B 型智能爆速测试仪。采用断通靶^[5]测速方法, 靶距为 400 mm, 靶线采用直径 0.3 mm 的铜芯漆包线。第一个采集点距离爆轰输入点 150 mm, 第二个采集点距离第一个采集点 400 mm。

2 爆速波动现象及结果分析

经过对 3 000 多组 6 000 多发银索的爆速数据分析发现, 有将近 4.9% 的样品爆速不能满足设计指标(6 700~7 100 m/s)的要求。

小直径银索主要由银管和炸药组成。银管中银的质量分数为 99.99%, 内装六硝基芪单体猛炸药。炸药使用前, 要过 150 目筛, 并确保 150 目筛上物中没有异物。

分析认为: 银管的一致性较高, 且机械性能稳定, 应该系统影响银索的爆速, 不会影响单发银索的爆速; 据查, 六硝基芪猛炸药具有稳定的物理、化学性能, 压药和拉索过程也只会系统影响爆速, 不会影响单发银索爆速。所以, 银管和内装炸药对银索爆速的影响不是导致爆速波动的主要原因。

分析小直径银索作用过程可知, 影响爆速波动主要有 4 方面因素: 银索放置时间、起爆能量、测试

方法误差、银索自身引起爆速不稳的因素。

2.1 银索放置时间

取长 12 m 的银索 10 发, 在每一根银索上任意截取 4 段, 每段长 650 mm, 按照拉制方向的顺序标记, 分别放置 48、96、120、240 h 后测试爆速。试验结果见表 1。

表 1 不同放置时间或应力释放后的爆速
Tab. 1 Detonation velocity after different placement time or stress release

序号	时间/h				m/s
	48	96	120	240	
1 [#]	6 834	6 875	6 959	6 896	
2 [#]	6 797	6 754	6 812	6 874	
3 [#]	6 901	6 793	6 851	6 854	
4 [#]	6 794	6 854	6 799	6 862	
5 [#]	6 928	7 015	6 853	6 811	
6 [#]	6 874	6 835	6 883	6 905	
7 [#]	6 790	6 826	6 741	6 859	
8 [#]	6 932	7 019	6 894	6 982	
9 [#]	6 799	6 854	6 884	6 901	
10 [#]	7 013	6 994	6 893	6 893	
极差	223	265	218	171	

从数据统计得出: 不同放置时间对银索爆速波动的影响不同, 48 h 和 96 h 对比、96 h 和 120 h 对比、120 h 和 240 h 对比没有明显的规律; 但是从整体数据分析认为, 随着放置时间变长, 爆速极差有变小的趋势。

2.2 起爆能量

分析认为, 试验用雷管起爆能量不足不是造成银索爆速波动的原因。

1) 试验所测的爆速都在 6 300 m/s 以上, 爆速测定测试的第一点位置在距离起爆点约 150 mm 处^[6], 这个距离远远超出银索内爆轰波成长限制的距离, 所测爆速是成长稳定后所形成的稳定爆轰。

2) 测定 400 发起爆雷管的输出能量^[7], 该起爆雷管外径 8 mm、高 35 mm, 内装炸药 0.4 g。测试钢块凹痕深度^[8]均在 0.50~0.85 mm 之间, 能满足银索稳定起爆的初始能量需求。综上所述, 不存在起爆能量不足的现象。

2.3 测试方法误差

用智能爆速测试仪(型号 ZBS9601B)和双通道智能爆速测定仪(型号 202G)同时测定 70 发产品, 测试结果没有差别。

测试方法误差不是造成银索爆速波动的原因。

2.4 银索自身因素

小直径银索自身是导致爆速波动的主要原因。小直径银索内部密度及炸药成分存在的不均匀性、外界效应以及冲击引爆后介质内部扰动波系的相互作用都可能是影响爆速波动的因素。

1)小直径银索的装药密度。小直径银索是由银管装药压制后拉制而成,初始装药过程采用定压控制,装药压制后,在银管内部形成有规律的密度梯度,再拉制成型。虽然在初始装药压制后、拉制前银管内部存在有规律的密度梯度,但经过 60 多道工序拉制,受模具挤压,最终银索药面直径有所变化,药芯密度趋于一致。所以现工艺条件下,所制得的小直径银索内部炸药密度不是造成爆速波动的原因。

2)六硝基芪炸药。银索使用的是六硝基芪猛炸药,该炸药物理、化学性能稳定,不存在成分不均匀的问题,所以也不是爆速波动的原因。

3)外界力。试验过程中,银索处在自然环境下,不接触任何外力。爆速测定时,每根银索所处的外界环境一致。如果外界环境对爆速有影响,也只会形成系统性爆速差异,不会对个别测试结果造成影响。所以,外界效应也不是造成爆速波动的原因。

4)冲击引爆后介质内部扰动波系的相互作用。在经过多次拉制后,虽然银管内部药剂密度趋于一致,但是银管初始装药后,因为压力的作用,在银管内部形成有规律的密度梯度,这个初始的密度梯度会对后期银索的药面直径造成影响,拉制成型的小直径银索就成为有规律药面直径梯度变化的银索。对于大直径银索,药面直径梯度变化对银索爆速影响要小于密度对爆速的影响;但对于小直径银索,药面直径梯度变化对爆速影响就大。小直径银索直径

梯度变化越大,引爆后银索内部所形成的轴线扰动波对爆速的影响就越大;反之,就越小。因小直径银索药面直径测试不准确,为了掌握药面直径变化情况,应用了理论计算,采用质量法间接反推小直径银索内部药面直径变化。从一根银索上连续截取 200 mm 等长的银索 60 根,标记并称量,结果见表 2。

根据表 2 数据分析可知,银索质量呈规律性变化。变化的原因主要是每一根银索内银含量和药剂含量不一样,外径一致的条件下,测试结果与分析的药面直径变化基本一致。由于银的密度远大于药剂密度,所以银索药面直径与银管初始装药密度的关系是:单位长度银索质量越小,药面直径就越大;质量越大,药面直径就越小。根据质量与密度公式,结合经验计算,得出银索最大质量与最小质量对应的药面直径整体理想变化为 0.53 mm 到 0.60 mm。小直径银索选用的炸药呈粉末状,黏性较大,不利于压力传导,所以实际药面直径变化要比理想计算值偏大。

3 工艺改进

通过上述试验和数据分析可知,银索爆速的波动是冲击引爆后银索内部扰动波系的相互作用所致。银管初始装药密度导致冲击引爆后在银索内部形成较大的轴线扰动波,影响了爆轰传播速度。银管初始装药密度影响拉制成型后小直径银索的药面直径。正是由于银管初始装药密度存在规律梯度变化,导致拉制成型后小直径银索药面直径也是有规律地变化。所以,减少银管初始装药密度梯度差是降低影响小直径银索爆速波动的方法。常规银管装

表 2 工艺改进前整根银索的质量分布
Tab.2 Weight distribution of the whole silver fuse before the technology improvement

序号	质量	序号	质量	序号	质量	序号	质量	序号	质量
1 [#]	1.103	13 [#]	1.231	25 [#]	1.127	37 [#]	1.111	49 [#]	1.109
2 [#]	1.137	14 [#]	1.157	26 [#]	1.187	38 [#]	1.165	50 [#]	1.164
3 [#]	1.164	15 [#]	1.097	27 [#]	1.135	39 [#]	1.219	51 [#]	1.201
4 [#]	1.254	16 [#]	1.156	28 [#]	1.116	40 [#]	1.137	52 [#]	1.154
5 [#]	1.184	17 [#]	1.184	29 [#]	1.147	41 [#]	1.105	53 [#]	1.101
6 [#]	1.109	18 [#]	1.224	30 [#]	1.152	42 [#]	1.147	54 [#]	1.141
7 [#]	1.138	19 [#]	1.157	31 [#]	1.194	43 [#]	1.123	55 [#]	1.212
8 [#]	1.216	20 [#]	1.109	32 [#]	1.107	44 [#]	1.187	56 [#]	1.157
9 [#]	1.223	21 [#]	1.143	33 [#]	1.107	45 [#]	1.117	57 [#]	1.102
10 [#]	1.150	22 [#]	1.135	34 [#]	1.182	46 [#]	1.135	58 [#]	1.152
11 [#]	1.100	23 [#]	1.187	35 [#]	1.217	47 [#]	1.148	59 [#]	1.187
12 [#]	1.197	24 [#]	1.114	36 [#]	1.164	48 [#]	1.121	60 [#]	1.112

药采用振动装药,可以有效地减少密度梯度差。由于本文中所涉及的银索要求密度较大,振动装药实现难度较大,采用了压药方式,所以只对压药方式下的银管装药方式进行了改进。

3.1 压力不变、减少单次装药量

分析认为,装药压力影响银管初始装药密度。增加初始压药压力可以增加装药量,改善拉制成型后小直径银索的药面直径,但是不能从根本上减小拉制成型后银索的药面直径变化,也就是不能从根本上解决银索内部形成的轴线扰动波对爆速的影响;减小初始压药压力可能会减小拉制成型后银索药面直径变化,使得小直径银索的药芯直径变小,这样不利于爆轰传播,同时增加生产成本。

试制 1:压药压力 70 MPa,保压时间 3 s,单次装药量 500 mg。银管内药剂压满后,经过 60 多次的拉制变径,拉制模口径变化梯度从 0.15 mm 减小到 0.03 mm。一根银管拉制成型后,能截成 200 mm 长的小直径银导爆索 60 根。

试制 2:将压药压力减少至 40 MPa,保压时间 3 s,单次装药量 500 mg。银管内药剂压满后,拉制成型,只能截成 200 mm 长的小直径银索 45 根。

根据分析和试验所得,调整压药压力不利于问题的解决,所以不进行压力调整。

综上所述,减少银管装药密度差最有效的方式就是减少单次装药量。所以,工艺改进方面,将单次装药量由原来 500 mg 减少为 300 mg,保压时间 3 s 不变,减小银管内初始密度梯度差。

改进后单次装药量 300 mg,总装药量 7.4 g;压药压力 70 MPa 不变;拉制模口径变化梯度从 0.15 mm 减小到 0.03 mm 不变。经过 60 多次的拉制变径的

工艺,一根银管拉制成型。沿连续拉制方向截取等长 200 mm 的银索 60 根,并按照顺序标记。称量质量,结果见表 3。

对比表 2、表 3 测量结果可以看出,工艺改进后,银索的质量分布波动较改进前减小。改进前,最大质量是 1.254 g,最小质量是 1.097 g,平均质量 1.154 g,标准偏差 0.040;改进后,最大质量是 1.130 g,最小质量是 1.052 g,平均质量 1.092 g,标准偏差 0.021,计算得出银索最大质量与最小质量对应的药面直径整体理想变化从 0.57 mm 到 0.61 mm。对改进后工艺生产的 2 200 发银索测定爆速,最大爆速 7 093 m/s,最小爆速 6 753 m/s。对比工艺改进前、后银索爆速的分布情况,见表 4。

表 4 工艺改进前、后爆速分布情况

Tab.4 Detonation velocity distribution before and after the technology improvement

爆速/(m·s ⁻¹)	产品占比/%	
	改进前	改进后
<6 700	3.9	0
6 701~6 800	27.0	12.0
6 801~6 900	38.0	47.0
6 901~7 000	21.1	36.0
7 001~7 100	9.0	5.0
>7 100	1.0	0

从表 4 可以看出,对于银索爆速分布,改进后较改进前趋于集中,有 83% 的产品爆速稳定在 6 800~7 000 m/s 之间。通过计算这部分爆速,可以有效控制长度 1 m 的银索延期时间精度在 ±2.5 μs 以内。

3.2 控制捻头长度和时机

捻头是银索拉制过程中必不可少的环节。捻头

表 3 工艺改进后整根银索的质量分布

Tab.3 Weight distribution of the whole silver fuse after the technology improvement

序号	质量	序号	质量	序号	质量	序号	质量	序号	质量
1 [#]	1.052	13 [#]	1.099	25 [#]	1.102	37 [#]	1.095	49 [#]	1.095
2 [#]	1.055	14 [#]	1.131	26 [#]	1.086	38 [#]	1.076	50 [#]	1.085
3 [#]	1.093	15 [#]	1.064	27 [#]	1.094	39 [#]	1.114	51 [#]	1.095
4 [#]	1.092	16 [#]	1.103	28 [#]	1.130	40 [#]	1.121	52 [#]	1.122
5 [#]	1.124	17 [#]	1.109	29 [#]	1.074	41 [#]	1.084	53 [#]	1.067
6 [#]	1.092	18 [#]	1.087	30 [#]	1.082	42 [#]	1.092	54 [#]	1.062
7 [#]	1.082	19 [#]	1.128	31 [#]	1.068	43 [#]	1.123	55 [#]	1.087
8 [#]	1.096	20 [#]	1.084	32 [#]	1.092	44 [#]	1.096	56 [#]	1.117
9 [#]	1.124	21 [#]	1.067	33 [#]	1.127	45 [#]	1.085	57 [#]	1.084
10 [#]	1.071	22 [#]	1.096	34 [#]	1.083	46 [#]	1.067	58 [#]	1.092
11 [#]	1.070	23 [#]	1.122	35 [#]	1.095	47 [#]	1.122	59 [#]	1.111
12 [#]	1.068	24 [#]	1.064	36 [#]	1.097	48 [#]	1.072	60 [#]	1.079

长,会增加生产成本;捻头短,又不利于拉制。

经过大量实践摸索得出,捻头长度控制在 2 cm 左右较为合理。针对小直径银索拉制,捻头的时机设置显得更加重要。认为直径大于 1.5 mm 前,每过一道模具捻头一次,较为合理;直径小于 1.5 mm 后,每过 3~4 道模具捻头一次。

3.3 讨论

通过试验数据分析可以得出:对于用六硝基芪炸药制备的小直径银索,在被可靠起爆的前提条件下,银管初始装药密度对小直径银索爆速波动有影响;随着银管初始装药密度梯度减小,爆速趋于稳定,小直径银索的延时精度波动减少。

被测试产品的测试长度、自身形状、增加压药压力、调整拉制模口径变化梯度等因素对爆速波动的影响还需深入研究。增加压药压力和拉制模口径变化梯度有关联,特别是直径越小的银索,变化越明显;还需进一步探究增加压药压力与拉制模口径变化梯度的对应变化。

4 结论

通过对小直径银索爆速波动情况的分析及工艺控制参数改进,得出以下结论:

- 1)48、96 h 放置时间或应力释放对银索爆速波动的影响不明显;放置时间为 120、240 h 时,从整体数据分析认为,随着放置时间增长,爆速极差有变小的趋势。
- 2)针对采用压药方式拉制成型的小直径银索,银管初始装药的密度梯度变化影响银索的爆速。银管初始装药密度梯度变化越大,拉制后对小直径银索的爆速影响越大;反之,越小。
- 3)减少银管初始单次装药量,可以明显降低拉制成型后小直径银索引爆后的轴线扰动波对银索爆速的影响。
- 4)使用外径 8 mm、内径 5 mm、长度 270 mm 规格的银管,银管中银的质量分数为 99.99%,内装六

硝基芪单体猛炸药,单次装药量 300 mg,总装药量 7.4 g,压药压力 70 MPa,经过 60 多次的拉制变径,拉制模口径变化梯度为 0.15 mm 减小至 0.03 mm。所拉制成型的小直径银索的爆速波动小,且能稳定控制在6 700~7 100 m/s 之间。

参 考 文 献

[1] 王凯民,温玉全. 军工火工品设计技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2006.
WANG K M, WEN Y Q. Design of initiators and pyrotechnics for weapon systems[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006.

[2] 龚康平,陈美菱,李玲霞. 一种低能量银导爆索的设计[J]. 火工品, 2008(4): 8-10.
GONG K P, CHEN M L, LI L X. Design on a kind of low energy silver detonating cord[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2008(4): 8-10.

[3] 尤良华. 非电传爆系统振动试验中银管导爆索断裂问题的研究[D]. 南京:南京理工大学, 2005.
YOU L H. Research on the fracture problem of the silver-tube detonating cord during the vibration test of the non-electric detonation system[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2005.

[4] 王泽山. 火炸药科学技术[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2002.

[5] 李国新,蒋建伟,王树有. 爆炸测试技术[M]. 北京:兵器工业出版社, 2008.

[6] 李国新,程国元,焦清介. 火工品试验与测试技术[M]. 北京:北京理工大学出版社, 1998.

[7] 严楠,韩秀凤,蔡瑞娇. 锰铜压阻法测量雷管输出的压力波形分析[J]. 含能材料, 2004, 12(5): 257-264.
YAN N, HAN X F, CAI R J. Analysis on the waveforms of detonator output measured with manganin piezoresistance method[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2004, 12(5): 257-264.

[8] 王凯民,张学舜. 火工品工程设计与试验[M]. 北京:国防工业出版社, 2010.