

文章编号: 1003-1480 (2022) 04-0027-04

小直径柔性导爆索爆速一致性的影响因素研究

汪 涛, 刘 涛, 蒋 琳, 张 迪

(中国人民解放军空军勤务学院, 江苏 徐州, 221005)

摘 要: 为了提高小直径柔性导爆索传爆速度的稳定性, 采用探针法测量技术研究了银管装药压力、导爆索外径、拉制工艺、弯曲度等对小直径导爆索爆速一致性的影响, 并对试验结果进行了分析。结果表明: 银管的装药压力过大或过小都会对导爆索的爆速稳定性产生影响, 较为合适的装药压力为 80MPa; 导爆索外径越大爆速一致性越好, 但是随着外径的增大, 外径对爆速一致性的影响会减弱; 导爆索的拉制次数越多, 爆速一致性越好, 但超过一定次数后影响较小; 导爆索的弯曲度在一定范围内对爆速的一致性影响不大, 但弯曲直径过小且弯曲度过大会导致导爆索断爆, 从而影响传爆可靠性。

关键词: 导爆索; 爆速; 装药直径; 传爆; 稳定性

中图分类号: TJ45+7 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2022.04.006

Research on Influencing Factors of Detonation Velocity Consistency of Small Diameter Flexible Detonating Cord

WANG Tao, LIU Tao, JANG Lin, ZHANG Di

(PLA Air Force Logistics University, Xuzhou, 221005)

Abstract: In order to improve the stability of detonation velocity of small-diameter flexible detonating cord, the effects of silver tube charge pressure, detonating cord outer diameter, drawing process and curvature on the consistency of detonation velocity of small-diameter detonating cord were studied by using probe measurement technology, and the test results were analyzed. The results show that if the charge pressure is too high or too low, the detonation velocity stability of the silver detonating cord would be affected, the more appropriate charge pressure is 80MPa; The larger the outer diameter of the detonating cord, the better the consistency of detonation velocity, however, with the increase of the outer diameter, the influence of the outer diameter on the consistency of detonation velocity will be weaken; The more pulling times for the detonating cord, the better the consistency of detonation velocity, but the influence is small after exceeding a certain number of times; The curvature of the detonating cord has little effect on the consistency of detonation velocity within a certain range, but the small curvature diameter and excessive bending will lead to the breakage of the detonating cord, which will affect the reliability of detonation transmission.

Key words: Detonating cord; Detonation velocity; Charge diameter; Detonation transmission; Stability

小直径柔性导爆索主要由金属外壳和内芯组成, 金属外壳材料通常为银、铝、铅等, 药芯是猛炸药, 多为六硝基芪、黑索今、太安等^[1]。其中小直径的银导爆索占用空间小、可弯曲且爆速高, 常用于延时机构中, 利用爆轰波在导爆索中的传播时间来实现精确

延时^[2]。因此, 导爆索的爆速一致性对延期精度有重要影响。由于导爆索爆速的一致性受到其自身参数、使用环境及制造工艺的影响, 为了提高小直径导爆索的延期精度, 笔者采用探针法测量技术开展了各影响因素研究。

收稿日期: 2022-02-23

作者简介: 汪涛 (1986-), 男, 硕士研究生, 从事火工品技术研究。

1 试验

1.1 试验样本

试验用导爆索采用外径为 14mm、内径为 8mm 的银管内装猛炸药,经多次拉制而成,猛炸药采用常用的 HNS-2 传爆炸药,粒径为 250~300 目。

1.2 试验仪器

爆速测量仪采用湖南奇博矿山仪器厂生产的 BQ-2ZD 智能爆速测量仪,如图 1 所示。高温试验采用重庆银河试验仪器厂生产的防爆型高低温试验箱。



图 1 导爆索爆速测试仪

Fig.1 Detonating cord velocity tester

1.3 试验方法

采用探针法对导爆索的爆速进行测量^[3],将由同一根银管拉制而成的导爆索切成若干小段作为样本,每段样本长 240mm,在距离样本两端 20mm 处,各粘接 2 根铜靶线,2 根靶线处于断开状态,靶线两端与爆速测量仪的 2 个接口连接,将爆速测量仪中的靶距长度 L 设置为 200mm,如图 2 所示。

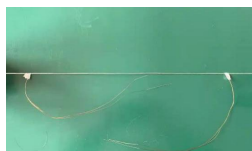


图 2 待测银导爆索

Fig.2 Silver detonating cord to be tested

导爆索引爆时产生金属等离子体,使两端断开的靶线导通,爆速测量仪分别记录 2 根靶线导通的时间 t_1 、 t_2 ,利用公式 $v=L/(t_1-t_2)$ 计算出导爆索的爆速并将结果显示在显示屏上。

2 试验结果与分析

2.1 银管装药压力对导爆索爆速一致性的影响

装药压力不同,银管内装药的总药量不同,导爆索内猛炸药的密度也不同,因此银管的装药压力是影响

导爆索爆速的重要因素。通常装药压力越大,导爆索药芯密度越大,爆速越快^[4],但装药密度过大会影响导爆索拉制过程中药剂在银管内的流动,进而影响导爆索的爆速一致性。不同装药压力下外径 1.4mm 导爆索的爆速测试结果见表 1。

表 1 不同装药压力下导爆索的爆速
Tab.1 Detonation velocity of detonating cord under different charge pressures

序号	外径/mm	装药压力 P /MPa	样本量/根	平均爆速 $v/(m \cdot s^{-1})$	标准差 δ
1	1.4	10	15	6 628	87.1
2	1.4	40	15	6 763	64.4
3	1.4	80	15	6 891	56.4
4	1.4	120	15	6 972	57.9
5	1.4	160	15	7 021	67.3
6	1.4	200	15	7 056	71.5

由表 1 可以看出,随着装药压力的增加导爆索爆速逐渐增大,这是由于导爆索药芯密度增加的缘故。但装药压力达到 80MPa 以后,随着装药压力继续增大,爆速增加减缓,这说明装药压力达到 80MPa 以后,随着装药压力的增大,装药密度的增加幅度减小;另一方面,在装药压力为 10MPa 时,爆速的标准差 $\delta=87.1$,分析认为装药压力小,药芯密度小,银管内炸药空隙较大,导爆索拉制成型后腔内炸药密度均匀性差。随着银管装药密度的增加,拉制成型后的导爆索内炸药密度均匀性变好,导爆索爆速标准差 δ 减小,爆速逐渐稳定。但是当银管的装药压力继续增加至 200MPa 及以上时,导爆索在拉制过程中,炸药的流动行变差,成型后的导爆索装药密度不均匀,导致爆速标准差 δ 增大。

2.2 导爆索外径对导爆索爆速一致性的影响

导爆索的直径越小,柔性越好、占用空间越小,强度也越小。实际使用过程中,在保证导爆索强度的条件下,尽量使用直径较小的导爆索,因此,需要考察导爆索直径对爆速一致性的影响^[5]。由于导爆索的外径容易直接测量,故以导爆索的外径作为结构参数。试验共分为 7 组,每组导爆索外径不同,同一组样本数仍为 15 根,均取自同一根银管拉制而成的导爆索,爆速试验结果见表 2。由表 2 的试验结果可知:小直径导爆索的爆速随着外径的增大而增大,且外径越小爆速波动越大,当外径大于或等于 1.0mm 爆速趋于稳定。这是因为外径小于 0.9mm 时药芯直径过小,接近临界直径,因而爆速低;外径为 0.8mm 时导爆索外壳厚度薄,强度低、约束能力差,因此在部

分段出现了不能传爆的现象。外径达到 1.0mm 后标准差 δ 趋于稳定,这是因为随着导爆索外径的增加,药芯密度趋于稳定,因而爆速趋于稳定。

表 2 不同外径导爆索的爆速

Tab.2 Detonation velocity of detonating cord with different outer diameters

序号	外径 /mm	装药压力 /MPa	样本量/根	平均爆速 $\bar{v}$ / (m·s ⁻¹)	标准差 δ	备注
1	0.8	80	15	6 436	103.4	发断爆
2	0.9	80	15	6 580	77.2	
3	1.0	80	15	6 701	62.7	
4	1.2	80	15	6 784	57.5	
5	1.4	80	15	6 891	56.4	
6	1.6	80	15	6 876	53.9	

2.3 拉制工艺对导爆索爆速一致性的影响

2.3.1 拉制次数对导爆索爆速一致性的影响

小直径导爆索需要经过专用模具多次拉制成型,拉制过程中导爆索外径依次递减。拉制次数过多会造成生产成本增加,耗时变长;拉制次数过少,则会对导爆索的爆速产生影响^[6]。试验仍采用外径为 14mm、内径为 8mm 的银管,且各样本使用银管的装药参数均相同,不同拉制次数下导爆索的爆速测试结果见表 3。拉制次数与爆速、爆速标准差的变化关系如图 3~4 所示。

表 3 不同拉制次数导爆索的爆速

Tab.3 Detonation velocity of detonating cord under different drawing times

序号	外径 /mm	拉制次数	样本量 /根	平均爆速 $\bar{v}$ / (m·s ⁻¹)	标准差 δ
1	1.0	6	15	6 670	97.7
2	1.0	8	15	6 681	74.5
3	1.0	10	15	6 721	62.7
4	1.0	12	15	6 693	56.4
5	1.0	14	15	6 707	53.6
6	1.4	6	15	6 793	105.4
7	1.4	8	15	6 816	69.5
8	1.4	10	15	6 821	56.4
9	1.4	12	15	6 837	47.1
10	1.4	14	15	6 840	43.3

由表 3 及图 3~4 可知:随着拉制次数的增加,导爆索爆速平均值变化不大,但爆速的标准差明显减小,拉制次数达到一定值后,再增加拉制次数,爆速的标准差变化幅度减小。这是因为拉制次数过少会导致药芯密度不均匀,随着拉制次数的增加,药芯密度分布更加均匀,到达一定的拉制次数后,拉制次数对导爆索药芯密度均匀性的影响会逐渐减弱。由试验结果可知,外径为 1.0mm 和 1.4mm 的导爆索需要拉制

10 次以上,爆速才相对稳定。

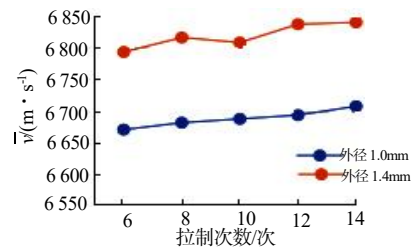


图 3 拉制次数与导爆索爆速的关系

Fig.3 Relationship between drawing times and detonation velocity of detonating cord

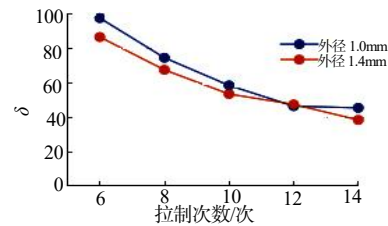


图 4 拉制次数与爆速标准差的关系

Fig.4 Relationship between drawing times and standard deviation of detonation velocity

2.3.2 高温处理对导爆索爆速一致性的影响

试验仍采用外径为 14mm、内径为 8mm 的银管,采用专用模具拉制 14 次,形成外径为 1.0mm 的导爆索,在拉制前对银管进行高温烘烤^[7]。由未经高温烘烤与经过 110℃烘烤 24h 后的银管拉制的导爆索爆速测试结果见表 4。

表 4 高温处理后的导爆索爆速

Tab.4 Detonation velocity of detonating cord treated under high temperature

序号	外径 /mm	温度 /℃	样本量 /根	烘烤时间 /h	平均爆速 $\bar{v}$ / (m·s ⁻¹)	标准差 δ
1	1.0	常温	15	0	6 707	53.6
2	1.0	110	15	24	6 711	45.5

由表 4 可以看出,银管在拉制前进行高温烘烤 24h 后,爆速标准差明显减小。这是因为高温烘烤可以去除银管在拉制过程中产生的部分应力,有利于拉制过程中银管内装药的流动,使药芯密度更加均匀。

2.4 弯曲角度对导爆索爆速一致性的影响

在实际使用中,受使用、安装环境的限制,柔性导爆索需弯曲安装及工作^[8]。试验前将外径 1mm、长度为 240mm 的导爆索在中点处,分别围绕半径为 1.0mm、1.5mm、2.5mm 的圆柱弯曲 30°、60°、90°,如图 5 所示。不同弯曲角度的导爆索爆速测试结果见表 5,导爆索弯曲度与爆速、爆速标准差的关系如图 6~7 所示。

由表5和图6可知,导爆索弯曲会降低爆速,弯曲度达到90°时,爆速达到最低,外径为1mm的导爆索在弯曲半径为1mm、弯曲度为90°时出现了断爆。分析认为:外径1mm的导爆索药芯直径接近临界直径,在弯曲半径为1mm、弯曲度为90°时,药芯受到挤压,直径变小,可能会低于临界直径,加之爆轰波传波的拐角效应,导致出现3发断爆的现象。

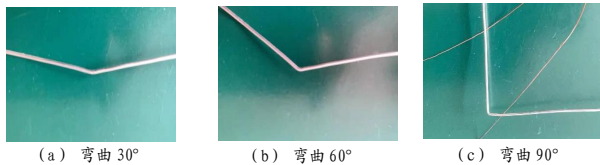


图5 不同弯曲角度后的导爆索

Fig.5 Detonating cord bender at different angles

表5 不同弯曲角度下的导爆索爆速

Tab.5 Detonation velocity of detonating cord with different bending angles

序号	外径/mm	圆柱半径/mm	样本量/根	弯曲度/°	平均爆速 $\bar{v}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	标准差 δ
1	1.0	-	15	0	6 711	45.5
		1.0	5		6 643	51.5
2	1.0	1.5	5	30	6 692	43.8
		2.5	5		6 687	47.7
3	1.0	1.0	5	60	6 609	81.3
		1.5	5		6 637	49.4
4	1.0	2.5	5	90	6 651	47.8
		1.0	5		3 发断爆	103.6
	1.0	1.5	5		6 517	61.2
		2.5	5		6 559	54.2

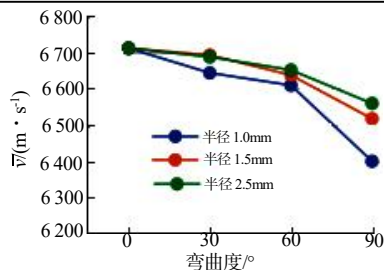


图6 弯曲度与导爆索爆速的关系

Fig.6 Relationship between curvature and detonation velocity of detonating cord

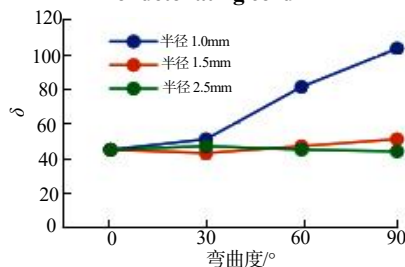


图7 弯曲度与爆速标准差的关系

Fig.7 Relationship between curvature and standard deviation of detonation velocity

由表5和图7可知,导爆索的弯曲度对爆速的一致性影响不大。但弯曲半径为1mm时,因药芯直径过小导致爆速出现了较大的波动,说明导爆索弯曲半

径过小,会使导爆索爆速不稳定。

3 结论

为提高小直径柔性导爆索爆轰速度的一致性,试验研究了装药压力、导爆索外径、拉制工艺、弯曲度对小直径导爆索爆速及爆速一致性的影响。得到以下结论:(1)导爆索的银管装药压力过大或过小都会导致导爆索药芯密度不均匀,从而导致爆速不稳定。外径1.4mm的银导爆索较为合适的装药压力约80MPa。(2)采用HNS-2装药的银导爆索外径需大于0.9mm才能可靠传爆,外径大于或等于1.0mm爆速趋于稳定。考虑到导爆索的柔性问题,实际使用的导爆索直径可以选择约1.0mm。(3)导爆索的拉制次数越多,成型后的导爆索爆速越稳定,考虑到成本,实际使用中可以根据延时要求的精度,制定合适的拉制工艺。(4)在银导爆索拉制前进行高温处理,可以提高导爆索爆速一致性。(5)导爆索弯曲会降低爆速,使爆速一致性变差,为了保证延期时间和延期精度,应尽量避免导爆索受到较大弯曲。

参考文献:

- [1] 陈雨,件和平,杨旗.铝导爆索性的研制[J].火工品,2014(6):9-12.
- [2] 赵凯.SY装药柔导爆索爆轰特性研究及工程应用[D].南京:南京理工大学,2016.
- [3] 薛鹿生.导爆索爆速测试可靠性方法研究[J].国防技术基础,2011(1):40-41.
- [4] 黄寅生,杨贵华,臧小为.铝壳金属导爆索性能研究[J].爆破器材,2008(3):22-24.
- [5] 王凯民.火工品工程[M].北京:国防工业出版社,2014.
- [6] 李冰.提高油气井用导爆索爆速检测结果的一致性[J].石化技术,2019,26(6):67,69.
- [7] 卢勃勃,程涛,张玉若.某型限制性导爆索高温适应性研究[J].火工品,2020(4):1-4.
- [8] 白颖伟,王可喧,任西,奥成刚.柔性导爆索输出性能测试及传爆规律[J].含能材料,2010,18(3):351-355.