

文章编号: 1001-4888(2015)02-0151-06

膨胀管分离装置分离时间测试研究^{*}

宋保永^{1,2}, 胡振兴², 孙璟², 刘朋朋¹, 汤忠斌¹, 索涛¹

(1. 西北工业大学 航空学院, 陕西西安 710072; 2. 北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

摘要: 本文采用裂纹扩展计和超动态应变测试相结合的方法, 对炸药索的传爆速度及分离结构响应断裂时间进行了实验研究。同时, 还分析了内外分离板分离的同步性、两端起爆的同步性。结果表明: 对于本文测试的分离结构, 其内外分离板分离的同步性较好, 滞后时间仅 $1\mu\text{s}$; 扁平管接收到爆轰信号到分离板断裂的时间差约为 $6\mu\text{s}$; 尽管采用两端起爆, 但是实际中由于火工品的差异, 并不能够实现两端完全同步起爆, 滞后时间长达 $50\mu\text{s}$ 。

关键词: 膨胀管分离装置; 同步性; 测试

中图分类号: O839

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-14-174

0 引言

膨胀管分离装置是指利用金属扁平管在炸药索产生的爆轰能量作用下向外膨胀做功, 使得连接结构在预制削弱槽处断裂, 从而实现两分离体解锁分离的线式分离装置^[1,2], 典型结构如图1所示。它具有无污染、承载能力强、冲击较低等突出的优点, 在多级航天运载器的分离系统中得到了广泛的应用, 特别是在对冲击和污染都严格限制的整流罩分离系统中^[3]。

膨胀管分离装置的工作过程是一个高度非线性的瞬态动力学过程, 涉及三重非线性: 几何、材料及接触非线性^[1]。在炸药索产生的爆炸冲击作用下, 扁平管及分离板材料发生高应变率变形, 周战璇^[5]、Song^[6]等人分别研究了分离板和扁平膨胀管材料的应变率效应。刘朋朋^[7]采用数值模拟的方法研究了膨胀管分离装置的分离过程, 初步揭示了膨胀管分离装置的工作机制。但在实际应用中, 直到分离板在膨胀管膨胀的作用下分离, 是一个复杂的动力学过程。由于膨胀管分离装置常被应用于较大尺寸连接面的分离, 从起爆装置点火, 到炸药索的端头开始爆炸并以一定速度(一般在 7000m/s)沿炸药索传播。由于尚未进行过实测, 目前对分离过程的认识还存在一些问题, 例如: (1) 从金属扁平管在爆炸载荷作用下开始变形到对应位置处分离板完全开裂所用的时间尚不清楚; (2) 由于金属扁平膨胀管夹在内外两个分离板之间, 膨胀管在爆炸载荷作用发生

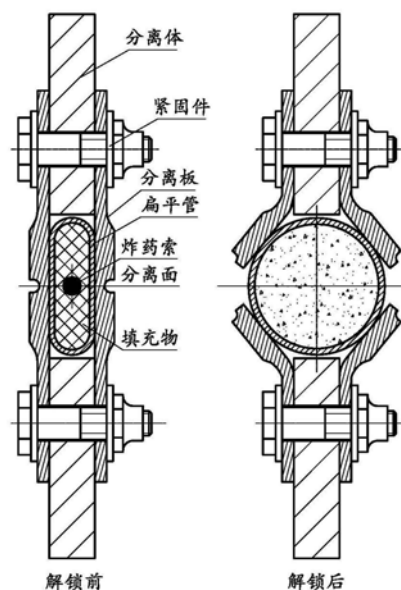


图1 典型的膨胀管分离装置截面示意图

Fig. 1 Sketch illustration of typical expanding tube separation system

^{*} 收稿日期: 2014-09-09; 修回日期: 2014-12-30

基金项目: 国家自然科学基金(No. 11272267, 11102168), 教育部和国家外专局“111”创新引智计划(B07050)资助

通讯作者: 索涛, 男, 教授。主要研究方向为冲击动力学。Email: suotao@nwpu.edu.cn

膨胀使分离板变形并在削弱槽处断裂,这一过程中两侧分离板分离的同步性如何?(3)为了缩短分离时间,通常采用两端起爆的方式。但是由于火工品的差异,很难做到两端分离的同步性。由于未开展过实测实验,在实际应用中两端起爆的时差尚不清楚。

针对上述问题,本文实测了某航天运载器膨胀管分离装置的工作过程,基于实测信号,分析了炸药索的传爆速度、内外分离板分离的同步性、两端起爆的同步性,以及从金属扁平管开始膨胀到分离板完全断开所需的分离时间。

1 分离时间的测试方法

膨胀管分离装置的分离时间是指从起爆器接收到电信号开始,一直到分离板膨胀变形断裂的时间,该参数是航天运载器控制时序、分离分析中非常重要的参数。一般可以将分离时间 T 划分为三个过程,即起爆器工作时间 t_1 ,分离板裂纹传播的时间 t_2 ,扁平管接收到爆轰信号、膨胀变形到分离板断裂的时间(即结构响应断裂时间) t_3 ,如图 2 所示。起爆器工作时间 t_1 可以根据产品的批次验收数据获得,一般在 10ms 以内,本文对此不开展研究工作。

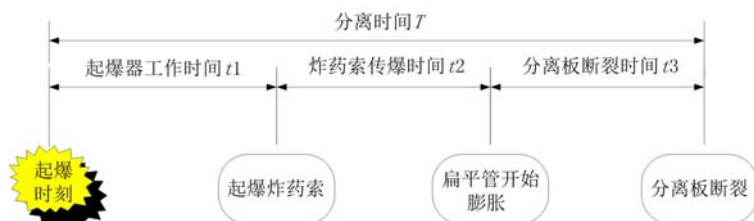


图 2 膨胀管分离装置分离时间分解图

Fig. 2 The decomposition diagram of separation time for the expanding tube separation system

炸药索传爆时间可以根据炸药索的爆速计算获得,爆速是爆轰波在炸药中的传播速度,爆速值的大小与炸药的品种、炸药密度、装药直径、炸药的包覆材料均有关。通常直接测试爆速的方法有:用高速摄像机进行扫描摄影的高速摄影法、用示波器或计时仪的测时法及用已知爆速的炸药索进行对比测试的炸药索法。

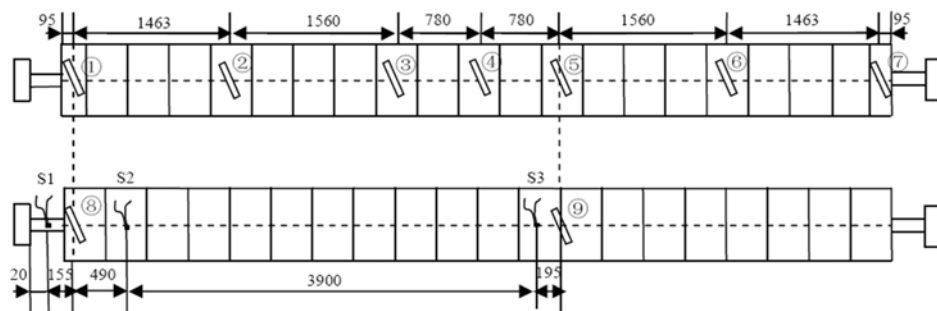


图 3 裂纹扩展计在分离板周向的粘贴位置

Fig. 3 The location of the resistance wire grid along the circumferential direction of the separation shell

电阻丝栅法^[4]是较为常用的一种测定动态裂纹扩展速度的方法,在裂尖沿裂纹扩展方向采用固化或粘贴技术排列一组间隔已知的电阻丝栅,当裂尖穿过电阻丝栅时,会导致电阻丝栅断裂,电阻丝栅两端的电压值随之会发生突变,这样就可以根据电阻丝栅两端的电压变化确定断裂丝栅断裂的时间。本文实验时借鉴了这种测量裂纹扩展速率的方法。实验时,在分离环内侧分离板位置每隔一定距离粘贴裂纹扩展计,每个裂纹扩展计的两端分别粘贴在分离板削弱槽两侧。同时,在 1 号及 5 号裂纹扩展计对应位置的外侧分离板处粘贴 8 号和 9 号裂纹扩展计,用以测试该位置内外分离板断裂的同步性。裂纹扩展计的粘贴位置如图 3 所示。

实验时,每个裂纹扩展计串联一个 100Ω 的分压电阻后,接入 3V 直流电源(如图 4 所示)。同时,将裂纹扩展计的两端也接入高速数据采集器的一个通道。当裂纹扩展计未断开时,该通道的输出电压即为作用于裂纹扩展计上的电压。如果裂纹扩展计完全断开,该通道的输出为电路的供电电压(3V)。分离实验中,由于裂纹扩展计的两端分别粘贴在分离板削弱槽两侧,分离时分离板从削弱槽处断开并分离的过程中,断裂扩展计被拉断。因此,当裂纹扩展计断裂时记录下来的电压突变时刻记为该处分离板的断裂时刻。根据裂纹扩展计之间的距离及断裂时间间隔,可计算出分离板中裂纹的传播速度。根据该速度,进一步可以计算出炸药索接收到起爆器的爆轰信号直至整个分离板完全断开的时 t_2 。此外,在分离环结构外侧的三个位置粘贴电阻应变片。应变测量点的分布如图 3 所示,其中 S1 粘贴于紧邻分离板端头的扁平膨胀管上。根据 S1 应变响应的时间和 1 号裂纹扩展计断裂的时间差,减去炸药索在这段距离内的传爆时间,即为金属扁平管在爆炸载荷作用下开始变形到对应位置处分离板完全开裂所用的时间 t_3 。

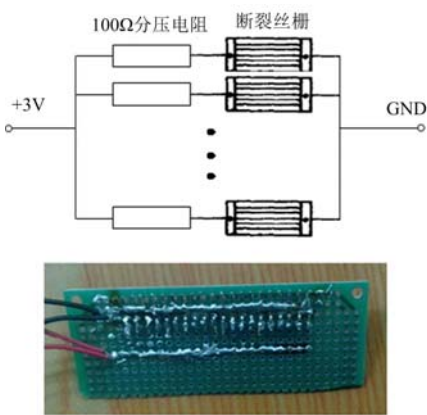


图 4 电路原理示意图及电路板
Fig. 4 The circuit's schematic and its circuit boards

2 测试结果与分析

2.1 炸药索爆速测试结果

本文共进行了三组两端同步起爆实验。为了模拟空间低温环境对分离过程的影响,实验前将整个试验件放入低温环境箱进行低温冷却,保温两小时后再进行实验。表 1 中列出了三组实验中实测到的不同裂纹扩展计的断裂时间。需要说明的是:由于裂纹扩展计是在试验件进入低温箱前采用的是环氧树脂胶粘剂粘贴在分离板上,在低温冷却过程中个别断裂扩展计与分离板脱粘,导致三组实验中只有二号试验件得到的断裂丝栅电压信号最为完整。因此,文中主要以第二组实验为例对爆炸分离的过程进行分析。

表 1 电阻丝栅的断裂时间(μs)
Tab. 1 The fractured time of the resistance wire grid

电阻丝栅编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
一号试验件	0	200	413	406	299	85	—	—	298.5
二号试验件	0	200	415.5	523	468	253	51.7	5	469
三号试验件	0	200	413	415	308	94	—	—	—

其中“—”表示该电阻丝栅未获得实验数据。

图 5 给出了测得的二号试件上不同裂纹扩展计的断裂时刻。这里需要说明的是:为便于观察,绘图时将各组信号的输出沿纵轴进行了不同程度的向上平移。可以看到,每个裂纹扩展计断裂时,其所在通道输出电压均有一个突变,该突变发生的时刻就对应于所在位置分离板的分离时间。从图 5 中可以看到,1 号与 8 号,5 号与 9 号这两对裂纹扩展计的断裂时间分别相差 $5\mu\text{s}$ 和 $1\mu\text{s}$ 。考虑到 1 号与 8 号,5 号与 9 号裂纹扩展计分别粘贴于环向两个不同位置的内外侧分离板上(如图 3 所示),每对裂纹扩展计中两个断裂时间的微小差异意味着环向同一位置内外分离板分离时间同步性较好。此外,还需要注意的是,1 号、2 号和 3 号裂纹扩展计的粘贴位置距离分离板左端的距离分别与 7 号、6 号和 5 号裂纹扩展计距离分离板右端的距离相等。尽管实验中采用的是两端起爆的分离方式,但是实测发现 1 号与 7 号,2 号与 6 号,3 号与 5 号这三对裂纹扩展计的断裂时间分别存在 $51.7\mu\text{s}$ 、 $53\mu\text{s}$ 和 $52.5\mu\text{s}$ 的时差,说明

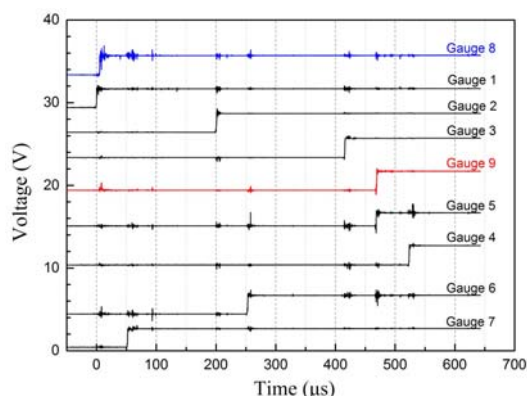


图 5 二号试验件断裂丝栅电压信号

Fig. 5 The voltage signals of the fractured resistance wire on the second sample

过 7000m/s 的速度传爆,使扁平管的膨胀也以该速度沿管轴向传播,从而使分离板上的裂纹以超过纵波波速的速度快速传播。从实测的裂纹扩展速度来看,三次实验测得的分离板上裂纹的扩展速度与该批炸药索出厂抽检的实测爆速 7310m/s 非常接近。这说明:实测到的裂纹扩展速度也反映了炸药索的实际爆速,这与该批炸药索出厂抽检的实测爆速 7310m/s 非常接近,这也间接证明了本文所采用的裂纹扩展计法的有效性。

此外,需要说明的是,实验时尽管沿着分离板的长度方向粘贴了若干个裂纹扩展计,而且分离板采用的是两端同时起爆,4 号裂纹扩展计正好粘贴在分离板长度方向中间位置,因此理论上其断裂对应于整个分离板的断裂。但实际实验中发现,两端起爆存在一定的时间差,并不完全同步,由于右侧起爆略有滞后,因此分离板的完全断裂应该是在 4 号裂纹扩展计断裂之后发生的。由于本实验中粘贴的裂纹扩展计数量有限,因此并不能给出整个分离板完全断裂的准确时间,这也是下一步实验中需要改进的地方。

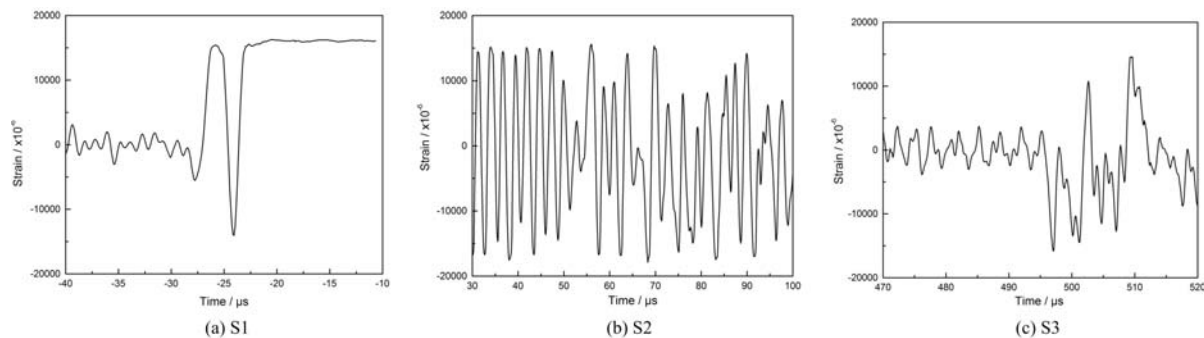


图 6 应变测点的有效应变信号

Fig. 6 The effective strain signals of the strain measure points

2.2 膨胀管装置分离板结构应变测试结果

实验中,为了获得膨胀管的响应与分离板的响应及分离时间,在膨胀管的端部及分离板上分别粘贴了三个应变片(如图 3 所示),将实测得到的三个应变片的电压信号转化为应变信号,如图 6(a)~(c)所示。这里需要说明的是:实验中以第一个裂纹扩展计的断裂时刻作为时间零点,并触发高速数采,而 S1 距离起爆端更近,因此其对应的响应时间为负值。从 S1 应变片实验结果来看,扁平管在爆轰气体的膨胀作用下产生了拉伸变形。而 S2 与 S3 应变片虽位于分离环不同截面的相同位置,但应变信号规律明显不同。其中 S2 的应变一直处于震荡状态,而 S3 则在约 493μs 时出现压缩应变峰值。这是因为在分离过程中,分离板在膨胀管作用下出现向远离膨胀管方向的弯曲变形,而应变片粘贴于分离板外侧,发生的是压缩变形。因此,S2 应变信号震荡应该是实验过程中某些偶然因素造成的干扰。

为了估算金属扁平膨胀管在爆炸载荷作用下从开始变形到对应位置处分离板完全开裂所用的时间 t_3 , 将应变片 S1 采集到的应变响应历程与距离其最近的 1 号裂纹扩展计的信号绘在一幅图中(如图 7 所示)。实验时, 由于数据采集系统采用 1 号裂纹扩展计的断裂信号触发, 而 S1 应变片感受到爆轰信号要早于 1 号裂纹扩展计断裂, 因此 S1 应变响应时间为 $-27\mu\text{s}$ 。根据 S1 应变响应时间, 扣除爆轰信号由 S1 应变测点到 1 号裂纹扩展计之间的传播时间 $21\mu\text{s}$ (S1 应变测点到 1 号裂纹扩展计之间的距离 155mm , 除以测试得到的爆速为 7305m/s), 因此可估算出扁平管接收到爆轰信号到分离板断裂的时间约为 $6\mu\text{s}$ 。

3 结论

针对膨胀管分离装置的分离过程进行了测试, 可以得到以下结论:

- (1) 这种结构的内外分离板分离时间最大差值约 $1\mu\text{s}$, 内外分离板分离的同步性较好;
- (2) 结构响应到断裂的时间约为 $6\mu\text{s}$, 对于直径较大的分离装置来说, 分离时间可以简单地计算为起爆器起爆时间和炸药索传爆的时间之和;
- (3) 尽管采用两端起爆, 但是实际中由于火工品的差异, 并不能够实现两端完全同步起爆。

致谢: 本文的研究得到了国家自然科学基金(No. 11272267, 11102168), 教育部和国家外专局“111”创新引智计划(B07050)的资助, 全体作者在此表示感谢。

参考文献:

- [1] 阳志光. 航天运载器线式火工分离装置结构优化设计[D]. 北京工业大学, 2007 (Yang, Zhiguang. Structural optimization on Linear pyrotechnic separation joint of Spaceflight launcher[D]. Beijing University of Technology, 2007(in Chinese))
- [2] 王江, 李虹. 线性分离装置分离性能仿真[J]. 强度与环境, 2011, 38(2): 28—33 (Wang Jiang, Li Hong. Simulation on the separating performance of linear separation system[J]. Structure & Environment Engineering, 2011, 38(2): 28—33(in Chinese))
- [3] Laurence J Bement, Morry L Schimmel. Investigation of super zip separation joint[R]. NASA/TM-4031, May 1988.
- [4] 徐绯, 刘斌, 刘元镛. 温度和加载速率对 LY12CZ 薄板材料断裂韧性的影响[J]. 航空材料学报, 2001, 21(1): 27—31 (Xu Fei, Liu Bin, Liu Yuanyong. Effect of different temperature and strain rates on thin plate aluminum alloy LY12CZ[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2001, 21(1): 27—31(in Chinese))
- [5] 周战璇, 李玉龙, 索涛, 赵燕. 2A14 板材铝合金动态力学性能及断口分析研究[J]. 机械科学与技术, 2009, 28(11): 1464—1467 (Zhou Zhaixuan, LI Yulong, Suo Tao, Zhao Yan. Microstructure and dynamic mechanical properties of 2A14 Aluminum alloy sheet[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2009, 28(11): 1464—1467(in Chinese))
- [6] Song B, Suo T, Hou B. Study on the dynamic radial tensile test method of thin-walled tube structure with special ring section[J]. Advanced Materials Research, 2012, 415-417: 2202—2205.
- [7] 刘朋朋. 膨胀管爆炸分离装置仿真与试验研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2014 (Liu Pengpeng. The experiment and simulation of explosive release of the super zip equipment[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University,

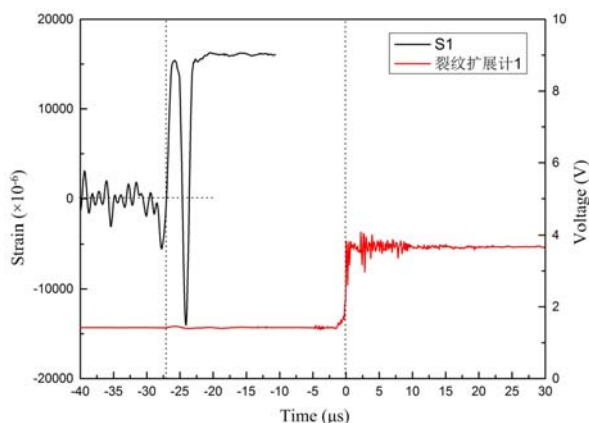


图7 应变片 S1 与 1 号断裂丝栅的电压信号
Fig. 7 The strain gauge S1 and the voltage signals of the first fractured resistance wire

2014(in Chinese))

- [8] Jia Y J, Zhu W P, Li T, Liu B. Study on the mechanisms and quantitative law of mode I supersonic crack propagation[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2012, 60:1447—1461.

On the Measurement of the Separation Time of Expanding Tube Separation Device

SONG Bao-yong^{1,2}, HU Zhen-xing², SUN Jing², LIU Peng-peng¹, TANG Zhong-bin¹, SUO Tao¹

(1. School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China)

Abstract: Explosion velocity of booster explosive and separation structure response rupture time were experimentally studied by using a combining measurement method of resistance wire grid and super dynamic strain gauge. Meanwhile, separation synchronicity of both inner and outer separation plates as well as the synchronicity of explosion at both ends of separation structure were also analyzed based on the experimental results. Experimental results show that both inner and outer separation plates present good separation synchronicity with only $1\mu\text{s}$ lag time. The delay time from the moment of receiving detonation signal to separation plate rupture is about $6\mu\text{s}$. However, it was found that there is $50\mu\text{s}$ lag time in the two ends initiation of separation structure. So, the synchronicity of explosion at both ends of separation structure is poor.

Keywords: expanding tube separation device; synchronicity; measurement