

工业雷管殉爆安全距离的试验研究和分析

侯海周, 胡毅亭, 卫延安

南京理工大学化工学院, 南京 210094

摘要 为研究工业雷管生产线中皮带传输系统的殉爆问题, 通过试验确定了 100 发 DDNP 起爆药纸壳雷管、100 发 DDNP 起爆药铝壳雷管、100 发无起爆药纸壳雷管、100 发无起爆药矿用纸壳雷管的殉爆安全距离。根据经验公式估算了 100 发 DDNP 起爆药铝壳雷管爆炸的入射超压, 并于实际测量的入射超压进行了比较, 对两者数据存在差异的原因进行了分析。结果表明, 主发雷管爆炸产生的冲击波和热爆炸气体是被发雷管发生殉爆的直接原因。

关键词 安全工程; 工业雷管; 殉爆; 升降法

中图分类号 X932

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.22.008

Experimental Investigation and Analysis on the Safe Distance of Propagation Blast for Industrial Detonators

HOU Haizhou, HU Yiting, WEI Yan'an

School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China

Abstract The safe distance of propagation blast for industrial detonators is tested. The lift-descending method is used in the experiment. The safe distances of propagation blast for 100 DDNP primary explosive carton detonators, 100 DDNP primary explosive aluminum detonators, 100 non-primary explosive carton detonators, and 100 non-primary explosive carton detonators for mining use are obtained. For DDNP primary explosive detonators, the safe distance of propagation blast for aluminum detonator is greater than that for the cardboard detonator. The safe distance of propagation blast for DDNP primary explosive detonator is greater than that for non-primary explosive detonator. The safe distance of propagation blast for non-primary explosive carton detonator for mining use is less than that for non-primary explosive carton detonator. The overpressure measurement in the blast field of detonator is carried out. There is a major difference between calculated results for the pressure field with the experiment results for that. The reason for the difference is analyzed. The ability of detonator initiation is a complex issue. The experimental results indicate that the major factor of detonation for one detonator is the shock wave of the main detonator, however, for the 100 detonators, the shock wave and explosive gases sent by main detonators explosion are the direct cause for propagation blast by rest of detonators.

Keywords safety engineering; industrial detonator; propagation blast; lift-descending method

0 引言

工业雷管(半成品)自动化装填生产线是国家提倡发展的,其所具有的生产线人机分离、自动添加药、自动在线检测、自动剔除废品、自动安全报警、自动安全连锁是工业雷管生产的发展方向,而皮带传输是自动化雷管装填生产线必不可少的工艺过程。工业雷管是一种爆炸危险品,本身具有殉爆的特性。一旦传输皮带上某盒雷管意外爆炸或者其他工序发生爆炸,在皮带输送的雷管容易引起传爆和殉爆,造成重大恶性事故。

雷管被殉爆是由于雷管的装药受到了主发雷管爆炸发生的作用,因此采取防殉爆措施的基本思路就是弱化主发雷管爆炸产生的冲击载荷,使得被发雷管的装药接受的能量小于其临界起爆能。雷管皮带传输的防殉爆措施,就是增加皮带上雷管之间的距离,弱化主发雷管产生的冲击载荷,从而达到雷管防殉爆的目的。如果在实际生产过程中,皮带上的雷管之间距离小于殉爆安全距离,雷管爆炸输出的冲击波、破片和爆炸气体作用在被发雷管上,当冲击能量大于雷管装药的临界起爆能,必然导致皮带上的雷管发生殉爆。

收稿日期: 2011-03-03;修回日期: 2011-07-11

作者简介: 侯海周,博士研究生,研究方向为系统安全,电子信箱:houhaizhou99@163.com;胡毅亭(通信作者,中国科协所属全国学会个人会员登记号:E520001617M),讲师,研究方向为民爆器材产品开发与安全评价,电子信箱:huyiting@hotmail.com

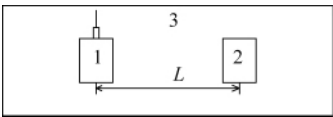
陈网桦等^[1]利用殉爆试验求出了 8# 纸雷管在空气以及在硬质聚氨酯泡沫塑料中的半爆距离,并根据测试结果,用插值的方法求出了这两种介质中雷管在冲击波作用下的冲击起爆压力。张华^[2]研究了单发工业电雷管的轴向殉爆规律,分别进行了主爆雷管头部对着被爆雷管头部或尾部及主爆雷管尾部对着被爆雷管头部或尾部的殉爆试验,并找到了它们的殉爆安全距离。朱顺管等^[3]对不同起爆药的试验雷管,在改变装配条件和试验状况下,测得了相应的殉爆距离,并由此得到了一些主要的影响因素和发生殉爆的简单规律。赵耀辉等^[4]对包装件中雷管的防殉爆问题进行了分析,并从包装材料 and 包装结构上进行考虑,提出了几个防殉爆措施,并进行了一定的分析。以上研究均是针对 1 发雷管的殉爆问题进行的,并未对多发雷管特别是工业雷管生产线中的雷管殉爆问题进行试验或者研究。

本文通过试验确定了 100 发 DDNP 起爆药纸壳雷管、100 发 DDNP 起爆药铝壳雷管、100 发无起爆药纸壳雷管、100 发无起爆药矿用纸壳雷管的殉爆安全距离,并对其殉爆机理进行了初步的探索,对提高工业雷管生产线自动化、连续化生产,提高工业雷管生产线的本质安全条件具有重要的现实意义。

1 试验

1.1 殉爆试验

试验装置如图 1 所示,其中, L 为纸盒包装的 100 主发雷管与纸盒包装的 100 被发雷管的水平距离。试验采用升降法进行,即当主发雷管被一发电雷管从中心引爆后,如果被发雷管被引爆则按一定的步长增加主发雷管与被发雷管之间的距离 L ,反之,按一定的步长减小两者之间的距离 L 。先计算被发雷管 50%殉爆概率所对应的距离值 $X_{0.5}$,再计算发生殉爆概率为 99.99%时的距离值 $X_{0.9999}$ 作为殉爆距离,计算发生殉爆概率为 0.01%时的距离值 $X_{0.0001}$ 作为殉爆安全距离。结果见表 1。



1—采用纸盒包装的 100 主发雷管,2—采用纸盒包装的 100 被发雷管,3—空气介质

图 1 雷管殉爆试验装置示意

Fig. 1 Sketch for the propagation blast test of detonators

表 1 殉爆试验结果

Table 1 Results of propagation blast test of detonators

序号	雷管品种	$X_{0.5}/\text{mm}$	$X_{0.9999}/\text{mm}$	$X_{0.0001}/\text{mm}$
1	DDNP 起爆药纸壳雷管	700	418	984
2	DDNP 起爆药铝壳雷管	904	735	1072
3	无起爆药纸壳雷管	439	296	583
4	无起爆药矿用纸壳雷管	398	307	489

由表 1 可知:(1) 对于 DDNP 起爆药雷管,铝壳雷管的殉爆安全距离大于纸壳雷管的殉爆安全距离。这是因为在一定的装药量条件下,铝壳管体限制了热爆炸气体和热量的侧向损失,使炸药柱爆炸的全部能量完全用来促进和维持爆轰波的成长和稳定传播,保证雷管具有足够的冲量。雷管的整体输出威力就大,致使侧向对被发雷管有较大的起爆能力,测到的殉爆安全距离也就大一些。(2) DDNP 起爆药雷管的殉爆安全距离大于无起爆药雷管的殉爆安全距离。无起爆药雷管内全部装填猛炸药,引起其殉爆的能量要大于引起 DDNP 起爆药雷管殉爆的能量,因此,无起爆药雷管的殉爆安全距离小于 DDNP 起爆药雷管的殉爆安全距离。(3) 无起爆药矿用纸壳雷管的殉爆安全距离小于无起爆药纸壳雷管,这是由于无起爆药矿用纸壳雷管的猛炸药柱中加入了消焰剂,降低了猛炸药柱的感度,因此其殉爆安全距离比无起爆药纸壳雷管更小。

1.2 压力测试

在试验中对纸盒包装的 100 发 DDNP 起爆药铝壳雷管爆炸时在 0.735m 处产生的超压进行了测量。起爆方式还是将 1 发电雷管插入 99 发雷管中心,然后起爆。将纸盒包装的 100 发 DDNP 起爆药雷管放在地面上,控制雷管装药中心与传感器的面同一高度,所测信号称为爆炸波的人射波,进行数据处理后,所得平均值 0.385MPa 即为此点的超压值,0.385MPa 也就是 100 发 DDNP 起爆药铝壳雷管的临界殉爆超压。

1.3 试验结果理论分析

1.3.1 理论计算及分析

根据文献[5]中装药在刚性地面爆炸时的冲击波峰值超压计算公式估算盒装 100 发 DDNP 起爆药铝壳雷管发生爆炸的人射超压。其表达式如下:

$$\bar{r} = \frac{r}{\sqrt[3]{W_e}} \tag{1}$$

$$\Delta p = 1.06 \left(\frac{\sqrt[3]{W_e}}{r} \right) + 4.3 \left(\frac{\sqrt[3]{W_e}}{r} \right)^2 + 14 \left(\frac{\sqrt[3]{W_e}}{r} \right)^3$$

$$1 \leq \bar{r} \leq 15 \tag{2}$$

其中, r 为测点距爆源中心的距离,m; W_e 为装药的 TNT 当量,kg; $\bar{r}$ 为对比距离, $\text{m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$; Δp 为测点处入射波的最大超压, kg/cm^2 。

将 100 发 DDNP 起爆药铝壳雷管等效为 119.6g TNT^[6],利用式(1)、式(2)计算出在 0.735m 处产生的超压为 0.686MPa,大于试验测量的 0.385MPa。造成这种结果的原因分析如下。

(1) 雷管的起爆能力的研究是一个复杂的问题。通常可将雷管的能量输出简化为 3 个要素,即冲击波、碎片和热爆炸气体。具体条件下各要素的作用各有侧重。比如,雷管与炸药直接接触以冲击波为主,有间隙时以碎片为主。而爆炸气体只在破壳后才对起爆对象有压缩(冲击波)和热作用。雷管凹底有金属流形成,但只在一定距离外,才能有起爆作用。对于起爆雷管而言,引火头点燃起爆药,起爆药产生自加速反应,由燃烧到爆轰,并以较弱冲击波和燃烧气体引爆传爆药。

传爆药爆速变化快,在爆轰成长阶段,以较强冲击波引爆主装药。主装药经过极短时间的爆轰成长阶段,达到自身稳定的高速爆轰。起爆雷管产生的强冲击波引爆起爆雷管周围雷管中装填的起爆药、传爆药、主装药,使爆轰传播下去,直到100发雷管全部爆炸。这也从实际测量的压力-时间曲线图中予以了体现,如图2所示。可见,实际测量的入射超压并不是100发雷管一次性爆炸产生的超压,因此,测量的入射超压小于计算出的入射超压。

(2) 雷管的输出并不是空间均匀分布的。雷管起爆能力的空间分布见图3^[7]。由图3可知,轴向起爆能力比侧向更强些。因此,采用理论计算的模型与实际雷管爆炸时的起爆能力存在差异,这样造成计算的侧向冲击波超压比实际测量的大很多。

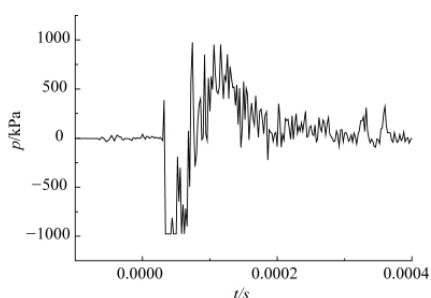


图2 试验中典型的 $p-t$ 曲线

Fig. 2 Typical $p-t$ curve of detonator experiment

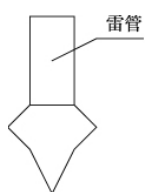


图3 雷管爆炸时的起爆能力分布

Fig. 3 Output effect of detonator

1.3.2 主发雷管产生的热爆炸气体的影响

根据文献[1],雷管在空气中的冲击起爆压力约为4.0MPa,大于本文试验测量的雷管起爆冲击压力0.385MPa,原因分析如下:DDNP起爆药雷管中装填的起爆药为DDNP,主装药为黑索今,根据文献[5],DDNP的5s延滞期和5min延滞期爆点分别为315℃和330—340℃,黑索今的5s延滞期和5min延滞期爆点分别为260℃和215—230℃。利用High的火球最大直径和火球持续时间方程^[5]:

$$D=3.86M^{0.320} \quad (3)$$

$$t^*=0.299M^{0.320} \quad (4)$$

$$D_1=\frac{D}{\left(\frac{T}{3600}\right)^{1/3}} \quad (5)$$

$$t_1=\frac{t^*}{\left(\frac{T}{3600}\right)^{10/3}} \quad (6)$$

其中, D 为火球最大直径,m; M 为爆炸物的质量,kg; t^* 为火球持续时间,s; D_1 为具有不同燃温的火球直径,m; t_1 为具有不同燃温的火球持续时间,s; T 为具有的不同燃温,K。

对于高能炸药,其火球温度 T 约为5000K,将100发DDNP起爆药铝壳雷管等效为119.6g TNT,利用式(3)—式(6)计算出火球直径为1.65m,火球的持续时间为0.05s。很明显,火球直径1.65m大于殉爆距离0.735m。将文献[1]中的1

发雷管等效为1.196g TNT^[6],利用式(3)—式(6)计算出火球直径为0.38m,火球直径小于文献[1]中的殉爆距离0.43m。因此,对于文献[1]中的情况来说,被发雷管产生殉爆的主要因素是主发雷管爆炸产生的冲击波,而对于本试验来说,被发雷管发生殉爆是主发雷管爆炸产生的冲击波和热爆炸气体的综合作用。这就造成了本试验测量的被发雷管发生殉爆的临界入射超压0.385MPa小于文献[1]中的4MPa。

2 结论

由于目前没有从理论上精确地定量描述殉爆这种复杂现象的模型^[9],本文通过试验以及对试验结果的分析,可以得出以下结论。

(1) 对于100发DDNP起爆药纸壳雷管其安全殉爆距离取1000mm,100发DDNP起爆药铝壳雷管其安全殉爆距离取1100mm,100发无起爆药纸壳雷管其安全殉爆距离取600mm,100发无起爆药矿用纸壳雷管其安全殉爆距离取500mm,是合理的。

(2) 雷管殉爆安全距离主要决定于雷管中装填的起爆药种类,其次决定于雷管中装填的猛炸药柱装药。

(3) 对于100发DDNP起爆药铝壳雷管来说,主发雷管爆炸产生的冲击波和热爆炸气体是被发雷管发生殉爆的直接原因。可见对于生产线上的整盒雷管殉爆问题,不仅要关注雷管爆炸产生的冲击波,同时应研究雷管爆炸产生的热爆炸气体的影响。

参考文献 (References)

- [1] 陈网桦,彭金华,乔小玲,等.雷管在不同介质中冲击起爆压力的研究[J].弹道学报,1999,11(1):44-47.
Chen Wanhua, Peng Jinhua, Qiao Xiaoling, et al. *Journal of Ballistics*, 1999, 11(1): 44-47.
- [2] 张华.工业电雷管轴向殉爆安全性研究[J].矿业快报,2003,19(12):23-24.
Zhang Hua. *Express Information of Mining Industry*, 2003, 19 (12): 23-24.
- [3] 朱顺管,牟景艳,吴幼成.雷管侧向殉爆效应特点研究[J].火工品,2004(2):33-35.
Zhu Shunguan, Mu Jingyan, Wu Youcheng. *Initiators and Pyrotechnics*, 2004(2): 33-35.
- [4] 赵耀辉,焦清介,臧充光,等.雷管包装中防殉爆措施的分析[J].工业安全与环保,2006,32(2):46-47.
Zhao Yaohui, Jiao Qingjie, Zang Chongguang, et al. *Industrial Safety and Environmental Protection*, 2006, 32(2): 46-47.
- [5] 王泽涛,郑志良.爆炸及其防护[M].北京:兵器工业出版社,2008.
Wang Zepu, Zheng Zhiliang. *Explosive and protection* [M]. Beijing: Ordnance Industry Press, 2008.
- [6] 陈网桦,彭金华,刘荣海,等.雷管空中爆炸压力分布的理论计算[J].中国安全科学学报,1998,8(4):51-54.
Chen Wanhua, Peng Jinhua, Liu Ronghai, et al. *China Safety Science Journal*, 1998, 8(4): 51-54.
- [7] 蔡瑞娇.火工品设计原理[M].北京:北京理工大学,1999.
Cai Ruijiao. *Design principle of initiators*[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1999.

(责任编辑 代丽)