

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2014.05.009

导爆管式无起爆药雷管装药条件的试验研究*

李 瑞 黄寅生 李锦涛 郑军强

南京理工大学化工学院(江苏南京,210094)

[摘 要] 使用外径 $\varnothing 6.0$ mm, 内径 $\varnothing 3.5$ mm, 长度分别为 30 mm、25 mm、20 mm 的钢内管, 装填结晶太安(PETN)作为起爆元件代替起爆药, 利用硼系高能点火药点燃, 研究导爆管式无起爆药雷管的装药条件。试验研究表明, 30 mm 钢内管装药密度为 $0.88 \sim 1.45$ g/cm³, 25 mm 钢内管装药密度为 $1.27 \sim 1.41$ g/cm³, 内管中 PETN 能够可靠地发生燃烧转爆轰(DDT)。在装药压力为 3.06 MPa 时, 内管 PETN 发生燃烧转爆轰的点火药极限药量为 76 mg。

[关键词] 无起爆药雷管; 燃烧转爆轰; 装药条件; 硼系点火药

[分类号] TJ45+3

引言

导爆管雷管是 20 世纪 70 年代发展起来的一种新型起爆器材, 由于具有抗水、抗杂散电流、抗静电、抗射频等优点, 受到世界各国的普遍重视^[1]。我国现有的工业导爆管雷管中一般含有起爆药 DDNP, 在生产、运输、使用、贮存中存在着安全隐患, 且起爆药在生产制造过程中产生废水, 净化处理困难^[2]。为解决此问题, 研究无起爆药导爆管雷管是有必要的。沈兆武等^[3]发明了一种简易飞片式无起爆药雷管, 马志钢等^[4]发明了使用一端开口一端闭口的钢内管装填猛炸药实现燃烧转爆轰的无起爆药雷管。苏俊等^[5]采用自制金属管装填超细太安(PETN)作为起爆元件, 研究内管装药密度对燃烧转爆轰的影响。

为了研究导爆管式无起爆药雷管的装药条件, 笔者利用外径 $\varnothing 6.0$ mm, 内径 $\varnothing 3.5$ mm 的钢管装填平均粒径为 55 μm 结晶 PETN 进行试验研究。

1 试验药品及设备的准备

1.1 硼系点火药的制备

硼系点火药是用 B 粉/硝酸钾/酚醛树脂按质量比 26 : 70 : 4 混合均匀后在 45 $^{\circ}\text{C}$ 的烘箱中放置 10 h, 然后用 40 目筛子进行湿混造粒, 混合前 B 粉过 100 目筛, 硝酸钾(分析纯)过 200 目筛^[6]。

1.2 其他试验药品及设备

试验药品: 钝化 RDX(黑索今); RDX; 结晶 PETN 平均粒径为 55 μm , 粒径分布图见图 1; 黑火药, 3 号小粒黑火药磨细过 100 目筛。

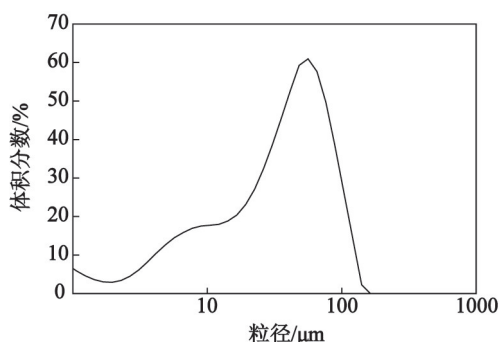


图 1 PETN 的粒径分布

Fig. 1 Particle diameter distribution of PETN

试验设备: 电子分析天平、游标卡尺、压药设备、卡口机、压药模具、烘箱、外径 $\varnothing 6.0$ mm 且内径 $\varnothing 3.5$ mm 的 45# 钢管。

2 试验结果与讨论

2.1 内管 PETN 装填密度试验

在 8# 雷管壳中压入一遍药和二遍药, 在二遍药上端放入装有结晶 PETN 的钢内管, 在钢内管上端放置装有硼系点火药的加强帽, 再放入塑料塞, 在塑料塞中插入导爆管, 在卡口机上进行卡口, 完成导爆管式无起爆药雷管制作。其装置如图 2。

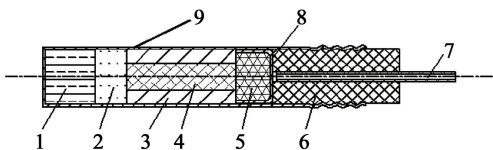
一遍药为钝化 RDX, 质量为 400 mg, 压药压力为 39.1 MPa。二遍药为 RDX, 质量为 200 mg, 压药压力为 22.8 MPa。加强帽的长度为 6 mm, 传火孔直径为 2 mm, 加强帽中硼系点火药采用松装。

试验中使用厚度为 5 mm 的铅板对导爆管式无起爆药雷管是否完全爆轰进行验证, 表 1 列出了钢

* 收稿日期: 2013-12-22

作者简介: 李瑞(1987 ~), 男, 硕士研究生, 主要从事猛炸药燃烧转爆轰研究。E-mail: lirui_89@126.com

通信作者: 黄寅生(1962 ~), 男, 博导, 教授, 主要从事点火与起爆技术、爆炸技术的研究。E-mail: huangyinsheng@sina.com



1—一遍药;2—二遍药;3—钢内管;
4—结晶 PETN;5—硼系点火药;6—塑料塞;
7—导爆管;8—加强帽;9—普通雷管壳

图 2 导爆管式无起爆药雷管试验装置

Fig. 2 Test device for nonel non-primary explosives detonator

内管中 PETN 装药在不同的压药压力下铅板穿孔的试验情况。

从表 1 中可以看出,钢内管中结晶 PETN 在压药压力为 0~12.24 MPa,即装药密度为 0.88~1.45 g/cm³ 时,内管中 PETN 能够完全、可靠地实现燃烧转爆轰(DDT 即 deflagration to detonation transition),使 5 mm 厚的铅板穿孔直径均在 10 mm 以上。当内管中的结晶 PETN 的压药压力大于 14.28 MPa,装药密度大于 1.49 g/cm³ 时,管中的 PETN 不能实现 DDT 的转变,雷管发生半爆。图 3 为不同内管压药压力下雷管爆轰后铅板穿孔效果。

多孔体系药柱的 DDT 机理认为^[7-8]:炸药燃烧后,燃烧气体产物向点火具附近的未燃药柱渗透,产生一系列压缩波,压缩波加速炸药的燃烧反应。反过来,加速燃烧使压力累积形成更强的压缩波,压力累积使压缩波发展为强冲击波,冲击波发展并达到临界强度后诱发爆轰。对于多孔药柱的起爆机理,普遍认为由于冲击波对炸药的不均与加热,形成热点,然后逐渐发展为爆轰波,热点的温度、质量燃耗率直接决定着多孔药柱的 DDT 成长性。当内管 PETN 装药的密度增大,相应的初始孔隙度就越小,



图 3 不同内管压药压力下铅板穿孔效果

Fig. 3 Punch effect of lead plate under different charge pressure in steel tubes

已燃的气体产物不易向未燃药柱渗透,不能形成有效的对流燃烧,不利于已燃区压力的增长,很难形成爆轰。因此,当钢内管中 PETN 的压药压力大于 14.28 MPa 时,不利于药柱燃烧和压缩波、冲击波的形成。从而内管中 PETN 不易发生 DDT 转变,雷管半爆。

2.2 不同装药密度下内管 DDT 试验

钢内管中的结晶 PETN 在压药压力 0~12.24 MPa 下,能够可靠地发生 DDT 转变,使得雷管发生爆轰。对此在相同的压药压力条件下,做了另一组试验,对 PETN 爆轰后的钢内管进行收集,图 4 为不同压药压力下内管的变形结果。

从图 4 中可以看出,内管中装填的结晶 PETN 在不同的压药压力下发生 DDT 过程后,内管都有一段没有破裂。对爆轰后没有破裂的钢内管进行统计,如表 2 所示。

从图 4 和表 2 中可以看出,随着内管装填 PETN 的压药压力增大,即装药密度的增大,钢内管没有破

表 1 不同内管压药压力下铅板穿孔试验

Tab. 1 Punching test of lead plate under different charge pressure of steel tubes

序号	一遍药量/ mg	二遍药量/ mg	内管长度/ mm	内管药量/ mg	内管装药密度/ (g·cm ⁻³)	内管压药压力/ MPa	点火药药量/ mg	铅板穿孔直径/ mm
1	401	200	30.60	260	0.88	0.00	105	11.22
2	399	204	30.66	330	1.12	1.02	106	10.09
3	400	200	30.60	356	1.21	2.04	98	11.66
4	402	202	31.70	389	1.28	3.06	99	11.34
5	401	198	30.70	386	1.31	4.08	118	11.04
6	401	203	29.62	386	1.35	6.12	108	11.21
7	401	205	30.49	399	1.36	8.16	107	11.76
8	400	198	30.72	417	1.41	10.20	105	10.08
9	401	200	30.36	422	1.45	12.24	115	11.78
10	401	202	30.60	439	1.49	14.28	98	半爆
11	401	203	30.30	448	1.54	16.30	90	半爆

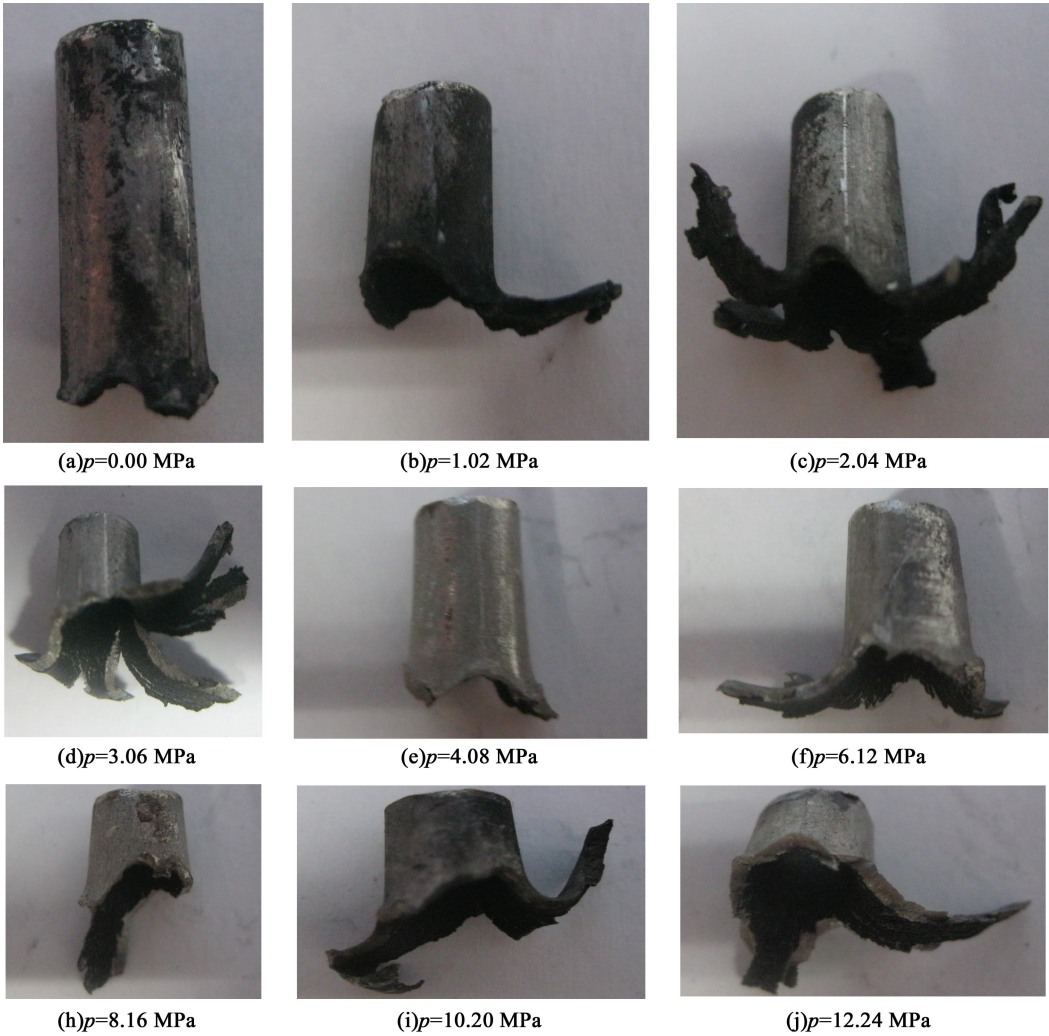


图 4 不同压药压力内管变形结果
Fig. 4 Deformation in steel tube under different charge pressures

表 2 不同压药压力下发生爆轰后内管剩余长度

Tab.2 The remaining length of steel tube after detonation at different charge pressures

序号	一遍药量/ mg	二遍药量/ mg	内管长度/ mm	内管药量/ mg	内管装药密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	内管压药压力/ MPa	点火药药量/ mg	剩余内管长度/ mm
1	400	203	30.06	273	0.94	0.00	84	15.30
2	400	204	31.32	340	1.12	1.02	105	10.34
3	400	203	30.66	354	1.20	2.04	115	8.48
4	403	199	31.04	380	1.27	3.06	94	6.88
5	402	201	30.70	402	1.36	4.08	98	8.94
6	400	203	30.78	409	1.38	6.12	102	7.36
7	400	198	30.90	419	1.41	8.16	114	5.18
8	401	205	30.60	410	1.39	10.20	107	5.70
9	399	202	30.90	431	1.45	12.24	115	4.74

裂段距离减短。这可以从影响多孔体系药柱 DDT 成长性的另一重要因素介质的质量燃耗率^[7]解释。

药柱质量燃耗率可表示为:

$$\dot{m} = n_p \dot{r}_p s_p \rho_0 \quad (1)$$

式中: n_p 为单位体积内药粒个数; \dot{r}_p 为线燃烧速率, m/s ; s_p 为单个药粒燃烧表面积, m^2 。

对于同一粒径的 PETN 结晶颗粒,由式(1)可以看出,装填密度越大,单位体积内的药粒个数就越

多,药柱的质量燃耗率也越大,这使得单位体积内产生的能量与压力梯度增大。DDT 机理^[7]认为炸药点燃后,在点火具附近能量释放缓慢,压力随时间呈线性增长,在点火区下游、离爆轰点很近的地方,能量突然释放、压力急剧上升。当内管中的 PETN 燃烧过程产生的压力大于内管的剪切屈服极限时,内管就会发生破裂。内管中 PETN 装填密度越大,单位体积内产生的压力越大。因此,随着内管装药密度增加,使得内管发生破裂所需装药量体积减少,内管未被破坏段长度就越短。

2.3 25 mm 和 20 mm 钢内管 PETN 装填密度试验

对钢内管长度为 25 mm 和 20 mm 的情况进行 DDT 研究。同样,一遍药采用钝化 RDX,质量为 400 mg,压药压力为 39.1 MPa。二遍药为 RDX,质量为

200 mg,压药压力为 22.8 MPa。点火药采用松装的硼系点火药。试验过程采用厚度为 5 mm 的铅板对雷管爆轰进行验证。试验结果见表 3、表 4。

从表 3、表 4 看出,随着钢内管长度的减小,钢内管中的 PETN 能够发生 DDT 装药密度范围减小。25 mm 钢内管中的 PETN 装药密度低于 1.21 g/cm³ 或高于 1.41 g/cm³ 时都不能形成燃烧转爆轰,雷管发生半爆。在 2.04 ~ 10.20 MPa 压药压力下,装药密度为 1.27 ~ 1.41 g/cm³,钢内管中的结晶 PETN 容易实现 DDT 转变。20 mm 钢内管中的 PETN 在任何压药压力下,雷管都发生半爆,内管中的 PETN 不能实现燃烧转爆轰。

药床装填密度合适时,气体产物容易渗透,燃烧表面积增加,气体释放速率加快,有利于爆轰的形成;药床装填密度过小时,单位体积内的药量太小,

表 3 25 mm 钢内管在不同压药压力下铅板穿孔试验

Tab.3 Punching test of lead plate under different charge pressures for 25 mm steel tube

序号	一遍药量/ mg	二遍药量/ mg	内管长度/ mm	内管药量/ mg	内管装药密度/ (g·cm ⁻³)	内管压药压力/ MPa	点火药药量/ mg	铅板穿孔直径/ mm
1	401	202	25.72	229	0.92	0.00	107	半爆
2	402	197	25.32	297	1.21	1.02	106	半爆
3	401	196	25.54	311	1.27	2.04	106	11.18
4	401	204	25.50	326	1.33	3.06	115	12.04
5	400	198	24.86	336	1.41	4.08	114	12.34
6	402	196	25.76	345	1.39	6.12	106	11.62
7	404	199	25.74	340	1.37	8.16	115	12.30
8	401	204	26.10	348	1.38	10.20	114	11.58
9	401	198	25.02	357	1.48	12.24	122	半爆
10	400	199	25.62	366	1.49	14.28	105	半爆
11	399	203	24.92	372	1.55	16.30	109	半爆

表 4 20mm 钢内管在不同压药压力下铅板穿孔试验

Tab.4 Punching test of lead plate under different charge pressures for 20 mm steel tube

序号	一遍药量/ mg	二遍药量/ mg	内管长度/ mm	内管药量/ mg	内管装药密度/ (g·cm ⁻³)	内管压药压力/ MPa	点火药药量/ mg	铅板穿孔直径/ mm
1	401	202	19.96	183	0.95	0.00	108	半爆
2	401	202	20.70	225	1.13	1.02	990	半爆
3	396	197	20.50	242	1.23	2.04	108	半爆
4	401	196	19.98	234	1.22	3.06	112	半爆
5	401	198	19.44	263	1.40	4.08	113	半爆
6	402	204	19.92	278	1.45	6.12	105	半爆
7	402	197	20.84	273	1.36	8.16	114	半爆
8	399	196	20.82	277	1.38	10.20	104	半爆
9	400	199	20.60	291	1.47	12.24	122	半爆
10	399	200	20.36	298	1.52	14.28	107	半爆
11	401	202	19.90	299	1.56	16.30	108	半爆

降低了气体产物的释放速率,药床内不形成足够的压力,不利于爆轰的形成;装填密度过大时,药床不易渗透,不能形成有效的对流燃烧,气体产物的释放速率很低,不利于已燃区压力的增长,很难形成爆轰。25 mm 钢内管在装药密度过高或过低时都不易实现管内结晶 PETN 的 DDT 转变。气体平衡的破坏是燃烧转爆轰的主要原因,20 mm 钢内管由于长度较短,钢内管内的 PETN 燃烧产生的气体在钢管下端迅速释放而难以形成压力累积,导致管内的 PETN 没有形成 DDT 转变。

2.4 黑火药作为点火药的试验

试验选用较弱点火能力的黑火药作为点火药,对钢内管中结晶 PETN 的燃烧转爆轰进行试验研究。同样,一遍药为 400 mg 的钝化 RDX,压药压力为 39.1 MPa;二遍药为 200 mg 的 RDX,压药压力为 22.8 MPa。钢内管中结晶 PETN 压药压力为 3.06 MPa。试验使用 5 mm 铅板对雷管是否完全爆轰进行验证。试验结果见表 5。

表 5 黑火药点火铅板穿孔试验

Tab. 5 Punching test of lead plate with black powder ignition

内管长度/mm	30.80	26.28
内管药量/mg	365	319
点火药药量/mg	151	158
铅板穿孔直径/mm	11.12	11.60

试验表明,在黑火药点火作用下,内管中的结晶 PETN 可以发生燃烧转爆轰。黑火药的比容较大,但燃烧热较低,点燃一些钝感药剂是困难的。硼系点火药燃烧热很大,但比容较小,难以迅速点燃药剂^[9]。双帽式无起爆药雷管^[10]点火药使用 K₁K 点火药,K₁K 点火药主要由苦味酸钾和高氯酸钾组成,具有较大的燃烧热和比容,它的起爆力较大,能够直接引爆太安炸药。黑火药和硼系点火药相比于 K₁K 点火药,点火能力较弱。试验中的导爆管雷管使用

厚度为 1.35 mm 钢内管装填结晶 PETN,代替起爆药,在较弱点火能力点火药点火作用下,使导爆管雷管能发生完全爆轰,笔者认为能够点燃 PETN 的点火药都能够使钢管中的结晶 PETN 发生 DDT 转变,雷管完全爆轰。相比于双帽式无起爆药雷管,这种装有强约束的钢内管的导爆管雷管的点火药选择范围更广。相比于马志钢等^[4]采用一端开口一端闭口的钢内管先装填点火药、再装填猛炸药压入装有猛炸药的雷管壳中,试验利用钢内管装填猛炸药,加强帽装填点火药,分别压装,更有利于安全装配。

2.5 硼系点火药极限药量试验

试验发现硼系点火药量都接近 100 mg,为此研究硼系点火药极限药量。同样,一遍药采用钝化 RDX,质量为 400 mg,压药压力为 39.1 MPa。二遍药为 RDX,质量为 200 mg,压药压力为 22.8 MPa。硼系点火药采用松装,试验数据如表 6,其中铅板厚度为 5 mm。

从表 6 中可知,在钢内管的 PETN 压药压力为 3.06 MPa,使得雷管发生完全爆轰时,硼系点火药的极限药量为 76 mg。

3 结论

1) 利用厚度为 1.25 mm,长度为 30 mm 的钢内管装填平均粒径为 55 μm 的结晶 PETN,在压药压力为 0 ~ 12.24 MPa,装填密度为 0.88 ~ 1.45 g/cm³ 时,内管中的 PETN 能够可靠地进行 DDT 转变,铅板穿孔直径在 10 mm 以上。长度为 25 mm 的钢内管中的结晶 PETN 的压药压力为 2.04 ~ 10.20 MPa,装填密度为 1.27 ~ 1.41 g/cm³ 时,内管中的 PETN 能够可靠地进行 DDT 转变。长度为 20 mm 钢内管在任何压药压力下,都不能发生 DDT 过程。

2) 利用钢内管装填结晶 PETN,代替起爆药,利用点火药点燃,相比于前人研究点火药选择范围更广,装配安全。试验表明不必对 PETN 进行细化处理,且细化的 PETN 易产生静电,不安全。

表 6 不同点火药量下铅板穿孔试验

Tab. 6 Punching test of lead plate with different dosage of ignition compositions

序号	一遍药量/ mg	二遍药量/ mg	内管长度/ mm	内管药量/ mg	内管装药密度/ (g · cm ⁻³)	内管压药压力/ MPa	点火药药量/ mg	铅板穿孔直径/ mm
1	401	204	28.64	348	1.26	3.06	100	11.92
2	399	201	30.91	361	1.21	3.06	91	11.72
3	401	205	30.00	352	1.22	3.06	83	11.58
4	403	199	31.04	380	1.27	3.06	76	11.01
5	402	198	31.94	386	1.25	3.06	63	不爆

3) 要使得 30 mm 钢内管的结晶 PETN 的压药压力在 3.06 MPa 下发生完全可靠燃烧转爆轰, 硼系点火药的极限药量为 76 mg。

参 考 文 献

- [1] 刘自镛, 蒋荣光. 工业火工品[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2003.
Liu Zitang, Jiang Rongguang. Industrial pyrotechnics [M]. Beijing: Ordnance Industry Press, 2003.
- [2] 江道友, 白青, 隋湘滨, 等. 半秒延期导爆管雷管的研制[J]. 爆破器材, 2008, 37(6): 27-29.
Jiang Daoyou, Bai Qing, Sui Xiangbin, et al. Research on half-second delay detonator with shock-conducting tube [J]. Explosive Materials, 2008, 37(6): 27-29.
- [3] 沈兆武, 郑慧娟, 胡企强. 冲击飞片式无起爆药雷管: 中国, CN89218986. X [P]. 1989-11-08.
- [4] 马志钢, 王瑾, 颜事龙, 等. 一种非起爆药雷管: 中国, CN201110244519. 0 [P]. 2011-08-24.
- [5] 苏俊, 刘玉存, 王建华, 等. 无起爆药雷管内管装药密度对燃烧转爆轰的影响研究[J]. 中国安全科学学报, 2012, 22(1): 82-87.
Su Jun, Liu Yucun, Wang Jianhua, et al. Study on effect of charge density of inner tube on transition of deflagration to detonation in non-primary explosive detonator[J]. Chi-

nese Journal of China Safety Science Journal, 2012, 22(1): 82-87.

- [6] 荣光富, 沈建根, 袁冬琴, 等. 硼系高能点火药对太安燃烧转爆轰的影响[J]. 爆破器材, 2007, 36(2): 13-15.
Rong Guangfu, Shen Jian'gen, Yuan Dongqin, et al. A study on the combustion of B-based high-energy ignition composition transformed to the detonation of PETN [J]. Explosive Materials, 2007, 36(2): 13-15.
- [7] 段宝福. 新型钝感工业炸药的燃烧转爆轰研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
- [8] 章冠人, 陈大年. 凝聚炸药起爆动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1991.
- [9] 成一, 陈守文. 点火药点火性能的研究[J]. 火工品, 2001(4): 21-22.
Cheng Yi, Chen Shouwen. Study on ignition characteristics of ignition compositions [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2001(4): 21-22.
- [10] 成一, 秦志春, 王年云, 等. 双帽式无起爆药工业雷管的研究[J]. 爆破器材, 1991(4): 23-26.
Cheng Yi, Qin Zhichun, Wang Nianyun, et al. A study of non-primary detonator with two caps [J]. Explosive Materials, 1991(4): 23-26.

Experimental Study of Charge Conditions of Nonel Non-primary Explosive Detonator

LI Rui, HUANG Yinsheng, LI Jintao, ZHENG Junqiang

School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

[ABSTRACT] Steel tubes with outer diameter of 6.0 mm, inter diameter of 3.5 mm and lengths of 30 mm, 25 mm and 20 mm filled up with crystal PETN (pentaerythritol tetranitrate) as detonation device to replace the detonating powder were ignited by B-based high-energy ignition composition to study the charge conditions of nonel non-primary explosive detonator. The testing results show that the PETN within the steel tube can reliably trigger deflagration and later transition to detonation (DDT) at a packed pressure density of 0.88-1.45 g/cm³ for 30 mm tube charge and a packed pressure density of 1.27-1.41 g/cm³ for 25 mm tube charge, respectively. The minimum charge of ignition power for the DDT occurrence of PETN was found to be 76 mg at packed pressure of 3.06 MPa.

[KEY WORDS] non-primary explosives detonator; deflagration to detonation transition; charge conditions; B-based ignition compositions

民爆专利信息

专利名称: 用于工业炸药包装线的自动蘸蜡机

专利申请号: CN200620052213. X 公开号: CN200968829

申请日: 2006.09.14 公开日: 2007.10.31

申请人: 湖南金能自动化设备有限公司

本实用新型提供了一种用于工业炸药包装线的自动蘸蜡机, 该蘸蜡机包括熔蜡池、储蜡池、蜡液提升机构、蜡液涂敷机构, 储蜡池为蜡液涂敷机构提供蜡液, 其中: 蜡液提升机构具有驱动缸、蜡液缸、提升管, 提升管下接熔蜡池, 上接储

蜡池, 中间连有两个交替开关的单向阀, 蜡液缸的缸口连在两单向阀之间, 蜡液缸靠驱动缸驱动, 通过缸口抽吸熔蜡池的蜡液进而向储蜡池中注入; 蜡液涂敷机构具有两个带海绵芯的涂蜡盒、驱动缸、铰链, 铰链两端分别连接两涂蜡盒, 驱动缸带动一个涂蜡盒, 通过铰链使两涂蜡盒作相反移动来完成药包的封蜡。本实用新型工作效率高, 操作简单, 具有很好的安全性能。

(王元荪)