

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2018.04.010

高温环境对普通导爆管雷管点火可靠性的影响^{*}

倪 磊 唐 胜 况荣高 赵鹏飞 曾晓渝 廖 帆

重庆顺安爆破器材有限公司(重庆北碚,400713)

[摘 要] 采用951-000、112A和Q2103种粒料拉制普通导爆管,测试不同环境温度条件下的爆速、抗击穿性能,研究不同环境温度下3种粒料拉制的导爆管对钨系、硅系、锑系及硼系延期体的发火可靠性。研究表明:随着温度的升高,3种粒料拉制的导爆管爆速和抗击穿性能均有不同程度下降,其中,951-000的性能优于112A的性能,112A的性能优于Q210的性能。对4类延期体进行发火可靠性测试:温度 $t\geq 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,钨系和锑系延期体出现拒爆; $t\geq 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,硼系延期体出现拒爆; $t\geq 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,硅系延期体出现拒爆。且拒爆率均有随着温度升高而增加的趋势。同一类延期体,相同环境温度下,Q210的拒爆率最大,951-000的拒爆率最小。

[关键词] 普通导爆管;粒料;温度;爆速;破孔数;拒爆率

[分类号] TJ45⁺⁷

Influence of High Temperature on Ignition Reliability of Ordinary Nonel Detonator

NI Lei, TANG Sheng, KUANG Ronggao, ZHAO Pengfei, ZENG Xiaoyu, LIAO Fan

Chongqing Shun'an Explosion Equipment Co., Ltd. (Chongqing Beibei, 400713)

[ABSTRACT] Detonating tubes were produced by 951-000, 112A and Q210 pellets. Changes of detonation speed and anti wear performance were tested under different temperatures. Ignition reliability of tungsten series, silicon series, antimony series and boron series delay compositions produced by the three pellets were studied at different temperatures. The results show that detonating tubes produced by different pellets have different decrease of detonation velocity and anti wear performance with the increase of temperature. Among them, the superiority of reliability is 951-000, 112A, and Q210 in order. The ignition reliability test was carried out on the four types of delayed bodies; when temperature $\geq 60\text{ }^{\circ}\text{C}$, tungsten and antimony delayed element appeared reject to burst; $\geq 70\text{ }^{\circ}\text{C}$, the boron based delay element reject to burst; $\geq 80\text{ }^{\circ}\text{C}$, the silicon based delayed element reject to burst. And as the temperature increases, rejection rate increases. For the same type of delay element exposing to the same temperature, rejection rate from large to small is Q210, 112A, 951-000.

[KEYWORDS] ordinary detonator; granules; temperature; detonation velocity; holes numbers; reject rate

引言

塑料导爆管是20世纪70年代由Nobel公司发明的一种内壁涂有薄炸药粉、一般采用LDPE(低密度聚乙烯)拉制成的塑料空心软管。塑料导爆管同基础雷管连接组成导爆管雷管,并与其他元件一起组合成非电起爆系统。由于塑料导爆管具有抗水性良好、不受杂散电流及感应电流影响、爆破网路连接形式多样、起爆方法灵活等优点,随着爆破技术的不断发展,被广泛地应用在各项工程爆破中^[1]。

国内外专家学者对导爆管及导爆管雷管从各方

面进行了广泛的研究,但针对它们在高温环境下的性能研究仍不多。而在西南地区的夏季,施工时环境温度可达 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,在此类环境下,偶有使用导爆管雷管点火不可靠的情况发生,而目前国内较多厂家生产的是普通变色导爆管雷管^[2]。因此,研究此条件下普通导爆管雷管的点火可靠性,具有较强意义。

在导爆管雷管的生产、运输使用过程中,部分导爆管中的导爆药易受到震动后脱落,因此,笔者将按照GB19417—2003《导爆管雷管》抗震性能要求对导爆管雷管进行震动模拟,从导爆管管壁材质、环境温度、延期体铅芯类型等方面对导爆管爆速、抗击穿

^{*} 收稿日期:2018-03-14

作者简介:倪磊(1987-),男,工程师,主要从事火工品生产工艺方面的研究。E-mail:nilei19870616@126.com

性能及点火可靠性予以分析研究。

1 试验部分

1.1 样本制备

塑料导爆管,采用上海石化 Q210、广东茂名石化 951-000、燕山石化 112A 3 种类型的 LDPE 粒料,药量 11 ~ 12 mg/m,内径 1.40 mm,外径 3.00 mm,长度 5 m。

HX-2500 循环热风隧道式烘箱,上海宝碟塑料成套设备有限公司,温度范围:10 ~ 150 °C,控温精度:±1 °C;震动试验机,自制,符合 WJ231—1977 要求;BC-1B 型多功能爆速仪,开封市精工仪表厂。

硅系延期体,三芯结构,燃速约 20 mm/ms,切长 10 mm;硼系延期体,三芯结构,燃速约 30 mm/ms,切长 10 mm;钨系延期体,单芯结构,燃速约 80 mm/ms,切长 10 mm;铈系延期体,单芯结构,燃速约 120 mm/ms,切长 10 mm。分别装入 66 mm 长度发蓝管壳中,底部采用 Ø5 mm × 29 mm 实芯铅芯体作为模拟猛炸药装药,卡中腰固定,中腰大小 5.4 mm,采用 Q210、951-000 和 112A 3 种粒料拉制的药量为 11 ~ 12 mg/m、长度为 5 m 的导爆管进行装配,预留消爆空间 600 mm³,卡口为双收印,直径 5.3 ~ 5.4 mm。

1.2 试验方法

将 3 种粒料导爆管分别装配成不同类型延期体的导爆管雷管,在震动试验机震动 10 min,放置在预设好温度的烘箱中加热 10 min,烘箱温度自 20 °C 起,以 10 °C 间隔,直至升温到 80 °C。将爆速仪靶标完全放置于烘箱内,将待测导爆管在烘箱外预留 10 cm 以供起爆器激发用,其余全部内置在烘箱内以保持恒温,测量该温度下的爆速,并记录破孔数;逐发激发后,用解剖刀解剖后判定铅芯点火状况。

2 结果与分析

2.1 导爆管爆速、抗击穿性能与温度的关系

弹性模量是在物体的弹性限度内,应力与应变的比值。弹性模量的大小标志了材料的强度,弹性模量越大,材料越不容易发生形变,强度越好,它与材料性能和所处的环境温度有关。因此,在探究不同温度条件下,不同粒料拉制导爆管的爆速和抗击穿性能时,可用导爆管管材的弹性模量予以表征分析^[3]。

当爆轰波在导爆管内传播时,内腔截面受到冲

击波超压 Δp 的作用,产生变形,使截面面积增加了 ΔA 。将导爆管视为壁薄圆筒,在受冲击波超压 Δp 作用下, ΔA 与 Δp 的关系为:

$$\frac{\Delta A}{A} = \frac{d \Delta p}{\delta E} \quad (1)$$

式中: A 为导爆管内腔截面积; ΔA 为导爆管内腔截面积在 Δp 作用下的增加量; d 为导爆管内径; δ 为导爆管壁厚; E 为管壁材质的弹性模量。

取一小截长 L 的导爆管 ($L = D dt$),管内截面初始压力为 p_0 ,初始密度为 ρ_0 ,由于受到冲击波超压 Δp 作用,导爆管管腔变形,体积增大 $L \Delta A$,相应介质被压缩 $\alpha L A \Delta p$ (α 为介质压缩系数)。

根据质量平衡,介质运动速度 u_1 为:

$$u_1 = D \left(\frac{\Delta A}{A} + \alpha \Delta p \right) \quad (2)$$

当不考虑管腔变形对爆速的影响时, $\Delta A = 0$,则根据式(2),可以得到

$$u_1 = D_0 \alpha \Delta p \quad (3)$$

式中: D_0 为管腔未膨胀时的爆速。

当考虑管腔变形对爆速的影响时,将式(1)代入式(2)可得

$$u_1 = D_1 \Delta p \left(\frac{d}{\delta E} + \alpha \right) \quad (4)$$

式中: D_1 为管腔膨胀时的爆速。

由式(3)、式(4)可得

$$u_1 = D_1 \Delta p \left(\frac{d}{\delta E} + \alpha \right) = D_0 \alpha \Delta p \quad (5)$$

由式(5)可以得出:

$$E = \frac{d}{\left(\frac{D_0}{D_1} - 1 \right) \delta \alpha} \quad (6)$$

在其他条件保持一致时,由式(6)可知,当知道某一温度时的爆速 D_1 和管腔未膨胀时的爆速 D_0 时,即可求得此温度条件下的该材料的弹性模量。但由于管腔未膨胀时的爆速 D_0 不易测量,因此,设定室温 20 °C 时的实测爆速作为管腔未膨胀时的爆速 D_0 ,即可表征在不同温度条件下相对 20 °C 时导爆管壁弹性模量的变化情况。

由式(6)设定函数 $f(E)$ 为相对弹性模量,可以间接表征管壁材质随着温度变化而变化的规律:

$$f(E) = \frac{\delta \alpha E}{d} = \frac{1}{\left(\frac{D_0}{D_1} - 1 \right)} \quad (7)$$

由式(7)可知,当导爆管内径 d 、壁厚 δ 和介质压缩系数 α 不变的情况下,设定函数 $f(E)$ 同弹性模量 E 正相关,同膨胀时的爆速与未膨胀时的爆速比

值负相关。

在不同温度条件下,测量不同粒料导爆管的众数爆速变化情况(样本量 $n=20$),爆速见表1。

表1 在不同温度条件下,不同粒料导爆管的爆速

Tab.1 Detonation velocity of detonating tube with different granular materials and at different temperatures

温度/℃	20	30	40	50	60	70	80
Q210	1 780	1 751	1 740	1 730	1 600	1 580	1 450
951-000	1 775	1 761	1 750	1 745	1 610	1 600	1 551
112A	1 770	1 752	1 741	1 736	1 603	1 590	1 533

将表1 相关数据带入式(5),可以推算出相对20 ℃时的 $f(E)$ 值,见表2。

表2 在不同温度条件下,不同粒料相对于20 ℃时的 $f(E)$

Tab.2 $f(E)$ of different granular materials at different temperatures compared at 20℃

温度/℃	30	40	50	60	70	80
Q210	60.4	43.5	34.6	8.9	7.9	4.4
951-000	125.8	70.0	58.2	9.8	9.1	6.9
112A	97.3	60.0	51.1	9.6	8.8	6.5

由表2 可得 $f(E)$ 与温度变化关系图,见图1。

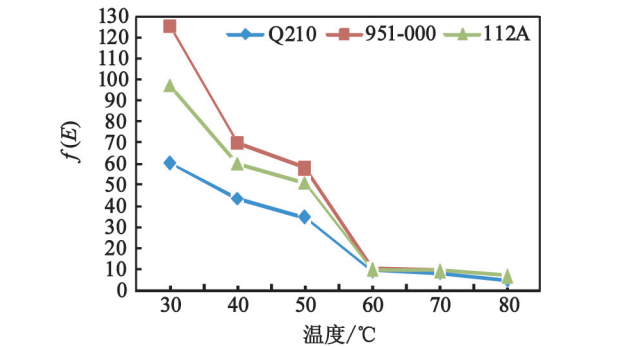


图1 3种粒料的 $f(E)$ 与温度的关系

Fig.1 Relationship between $f(E)$ of the three granular materials and temperature

由图1 可知:在30 ℃时,3种粒料的 $f(E)$ 有明显差异;从30 ℃到40 ℃时,管壁 $f(E)$ 突降,但不同的粒料的曲线斜率不同,说明此温度区间内,管壁受温度变化影响较大;40 ℃到50 ℃时, $f(E)$ 变化不大,说明此温度区间内,管壁受温度变化影响不明显,但 $f(E)$ 较低;从50 ℃到60 ℃时,管壁 $f(E)$ 突降,在60 ℃时已经低于10,说明此温度区间内,管壁受温度变化影响较大,管壁强度大幅降低;60 ℃后,由于管壁强度已经很弱,管壁 $f(E)$ 变化不大,此

温度区间内,管壁受温度变化影响不明显。

由于3种粒料的 $f(E)$ 随着温度升高而不断降低,可以推断,导爆管管壁材料的弹性模量 E 是随着温度升高而降低的。随着温度的升高,导爆管管壁材料弹性模量降低,导爆管强度下降,更易变形与击穿。

在不同温度条件下,测量不同粒料导爆管击穿情况(样本量为20),以每米平均击穿破孔数统计,见表3。

表3 不同粒料、不同温度条件下导爆管每米击穿破孔数

Tab.3 Bursting holes(every one meter) of detonating tube with different granular materials and at different temperatures

温度/℃	20	30	40	50	60	70	80
Q210	0	0	0.2	0.5	2.8	4.7	6.6
951-000	0	0	0	0.5	1.2	2.8	6.4
112A	0	0	0.1	0.6	2.0	3.8	6.5

由表3 可以绘制温度与导爆管平均每米击穿破孔数的关系图,见图2。

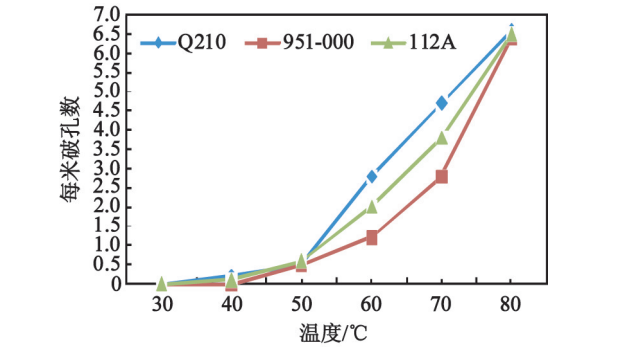


图2 3种粒料击穿破孔数与温度的关系

Fig.2 Relationship between bursting holes and temperature of the three granular materials

从图2 可知:30 ℃之前,3种粒料均未出现击穿破孔;30 ℃到40 ℃时,Q210 和112A 已经出现了击穿破孔;40 ℃到50 ℃时,均已出现击穿破孔,50 ℃到60 ℃时,3种粒料的击穿破孔明显增多;60 ℃以后,3种粒料的击穿破孔情况随温度的升高进一步加剧。

综上可知:虽然管壁材料均为LDPE,但不同生产厂家的生产方式不同,会导致其分子结构、产品密度、熔体流动速率等不同,从而力学性能指标也存有较大差异,即弹性模量差异明显。对于同种粒料,温度越高,击穿破孔情况越明显;同种温度、不同粒料,击穿破孔情况有明显差异, $f(E)$ 越低的粒料,击穿

破孔情况越明显。此 3 种粒料,在抗击穿性能和爆速衰减上,951-000 的性能优于 112A 的性能,112A 的性能优于 Q210 的性能。

2.2 导爆管点火可靠性与温度关系

根据导爆管稳定传爆的物理模型及在该模型下对导爆管有效反应区长度计算方法可知,当炸药的燃速 $D_r=0.006\sim0.010\text{ m/s}$ 、有效反应长度 $l<1\text{ m}$ 、爆速 $D=1\,600\sim2\,000\text{ m/s}$ 时,有效反应区长度公式可以写成^[4-5]:

$$l=\frac{DdQ_v}{6D_rQ_1}。$$

(8)

式中: l 为有效反应区长度; d 为导爆管装药平均粒径; D_r 为炸药燃速; Q_1 为炸药爆热; Q_v 为炸药的有效爆热。

假定导爆管对雷管的点火时间即为导爆管有效反应区反应持续时间,则:

$$t_n=\frac{l}{d}。$$

(9)

由式(8)、式(9)可得:

$$t_n=\frac{D}{6D_rQ_1}Q_v。$$

(10)

对于导爆管来说,在其他条件不变的情况下,爆热随着爆速的增大而增大,因此,导爆管点火持续时间 $t_n\propto$ 爆速 D 。

根据相关理论,延期体能够被点燃所需的最低时间为延期体所需的点火时间 t ,而导爆管能够有效点燃延期体的必要条件是 $t_n>t$ 。对比导爆管点火持续时间 t_n 和铅芯延期所需点火时间 t ,可以预测导爆管对铅芯延期体的点火可靠性, t_n 越短,导爆管的点火可靠性就越差,其导致导爆管雷管拒爆的概率也就越大。

不同系列延期体制备成的导爆管雷管。所需点火时间 t 不同,总体来说,燃速越慢,所需的点火时间 t 越长。而当环境温度不断升高时,导爆管爆速下降,从而导致爆热降低,导爆管的点火持续时间 t_n 也会随之缩短,当爆速下降至使得 t_n 小于延期体的所需点火时间 t 时,铅芯不会被点燃,从而造成雷管拒爆。

目前,雷管生产厂家使用的延期体类型,根据延期时间不同,大多为硅系、硼系、钨系、铈系等。对比分析不同温度条件下,采用 3 种粒料拉制的导爆管点燃不同类型延期体的拒爆情况(样本量 $n=50$),相关数据见表 4^[6-8]。

由表 4,可以绘制不同延期体采用不同粒料在不同温度下的拒爆率曲线,见图 3~图 6。

表 4 不同温度条件下、不同类型导爆管点燃
不同类型铅芯体的拒爆率
Tab.4 Rejection rates of different detonators igniting
different lead-core at different temperatures

温度/℃		20	30	40	50	60	70	80
Q210	钨系延期体	0	0	0	0	4	18	44
	硅系延期体	0	0	0	0	0	0	16
	铈系延期体	0	0	0	0	4	14	30
	硼系延期体	0	0	0	0	0	4	20
951-000	钨系延期体	0	0	0	0	2	14	24
	硅系延期体	0	0	0	0	0	0	6
	铈系延期体	0	0	0	0	2	8	18
	硼系延期体	0	0	0	0	0	2	8
112A	钨系延期体	0	0	0	0	2	16	32
	硅系延期体	0	0	0	0	0	0	10
	铈系延期体	0	0	0	0	2	10	24
	硼系延期体	0	0	0	0	0	4	10

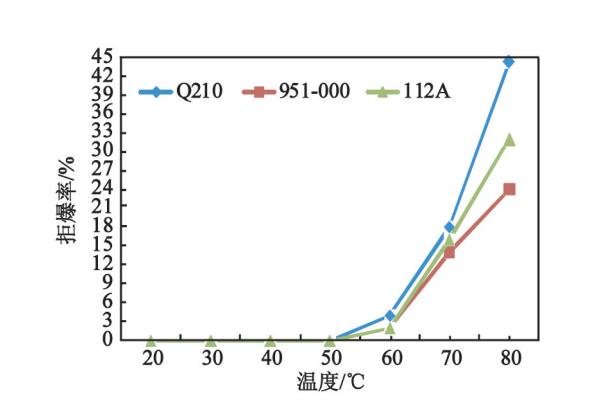


图 3 不同温度条件下 3 种粒料拉制的
导爆管点燃钨系延期体的拒爆率
Fig. 3 Rejection rates of the three granular
materials igniting tungsten-based delay element at
different temperatures

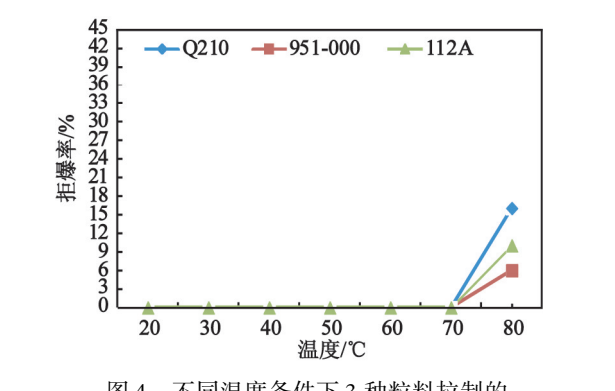


图 4 不同温度条件下 3 种粒料拉制的
导爆管点燃硅系延期体导爆管点燃的拒爆率
Fig. 4 Rejection rates of the three granular
materials igniting silicon-based delay element at
different temperatures

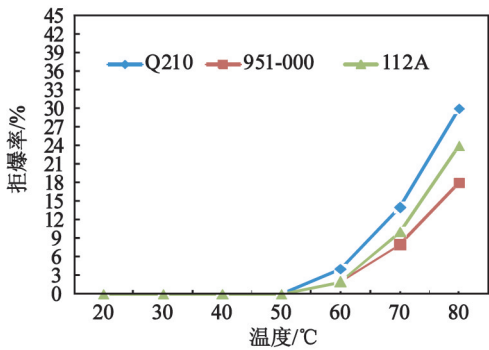


图5 不同温度条件下3种粒料控制的导爆管点燃锑系延期体的拒爆率

Fig.5 Rejection rates of the three granular materials igniting antimony-based delay element at different temperatures

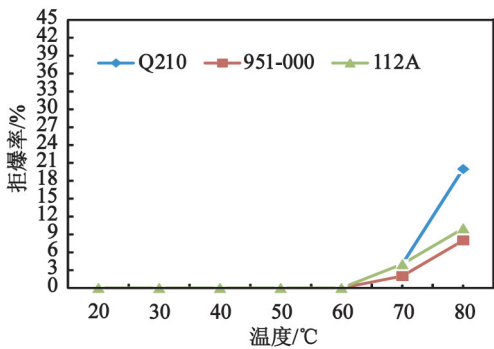


图6 不同温度条件下3种粒料控制的导爆管点燃硼系延期体的拒爆率

Fig.6 Rejection rates of the three granular materials igniting boron-based delay element at different temperatures

从图3~图6可知,环境温度 $\geq 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,燃速较慢的锑系和钨系延期体出现拒爆;环境温度 $\geq 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,燃速适中的硼延期体出现拒爆;环境温度 $\geq 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,燃速较快的硅系延期体出现拒爆。4类延期体均呈现拒爆率随着环境温度升高而明显增加的趋势。对比每种延期体在相同温度条件下的拒爆率,951-000的拒爆率最小,Q210的拒爆率最大。这与2.1所分析的相关数据和结论吻合。

3 结论

综合上述分析,可得到以下结论:

1)随着环境温度不断升高,使用LDPE材料的塑料导爆管管壁强度和爆速明显下降,比较常用的3种粒料951-000、112A和Q210,力学性能指标不同,其强度下降幅度和某温度时相对 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时弹性模量 $f(E)$ 也明显不同,爆速下降和破孔数存有明显差

异。

2)当雷管使用铅芯延期体时,不同类型的延期体出现拒爆时的所需环境温度也不同。 $t\geq 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,钨系和锑系延期体出现拒爆; $t\geq 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,硼系延期体出现拒爆; $t\geq 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,硅系延期体出现拒爆。且随着温度升高,拒爆率均呈现增加的趋势。

3)在用作普通导爆管拉拔用粒料时,951-000的性能优于112A,112A的性能优于Q210。在温度较高时,由于本身材料特性,当温度达到一定范围时,导爆管均点火不可靠。因此在施工环境温度 $\geq 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,不宜使用,宜采用专用的耐高温复合型导爆管或高强度导爆管。

参考文献

[1] 陈嘉琨,范钦文,高耀林. 塑料导爆管[M]. 北京:国防工业出版社,1987.

[2] 吴红梅,宋敬埔. 普通变色塑料导爆管高温性能研究[J]. 火工品,2003(4):28-30.

WU H M, SONG J P. Study on the character of color changeable nonel tube at high temperature[J]. Initiators & Pyrotechnics,2003(4):28-30.

[3] 高耀林,范钦文,陈嘉琨. 温度对塑料导爆管爆速影响的理论分析[J]. 爆破器材,1984,13(6):1-4.

[4] 刘大斌. 塑料导爆管的起爆、传爆及输出性能研究[D]. 南京:南京理工大学,2002.

LIU D B. Study of the initiation, explosion transferring and output character of nonel tube [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology,2002.

[5] 范钦文,高耀林,陈嘉琨. 塑料导爆管稳定传爆的物理模型[J]. 爆破器材,1984,13(2):8-12.

[6] 吴幼成,宋敬埔. 延期药技术综述[J]. 爆破器材,2000,29(2):23-27,39.

WU Y C, SONG J P. Technology of delay compositions:a review[J]. Explosive Materials,2000,29(2):23-27,39.

[7] 倪磊,唐胜,赵鹏飞,等. 一种毫秒导爆管雷管拒爆现象原因分析[J]. 煤矿爆破,2016(3):19-21,24.

NI L, TANG S, ZHAO P F, et al. Analysis of a milli-second detonating tube detonator misfire phenomenon reason[J]. Coal Mine Blasting,2016(3):19-21,24.

[8] 赵祥. 塑料导爆管抗击穿性能相关问题研究[D]. 南京:南京理工大学,2014.

ZHAO X. Reaserch on the related problems about wear performance of plastic detonating tube[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology,2014.