

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2017.01.007

电流对灼热桥丝式电雷管点头发火时间的影响^{*}

高文乐^{①②} 周奥博^{①②} 朱常胜^③ 杨 磊^{①②} 罗衍涛^{①②}
①山东科技大学土木工程与建筑学院(山东青岛,266590)
②山东省土木工程防灾减灾重点实验室(山东青岛,266590)
③中国电子科技集团公司第四十一研究所(山东青岛,266590)

[摘 要] 选用某雷管厂批量生产的刚性雷管点火头,采用 LGS-2A 型毫秒雷管测试仪,研究在 1.0~4.0 A 电流范围内灼热桥丝式电雷管点头发火时间随电流强度的变化规律。对试验数据分析发现,灼热桥丝式电雷管点火头的发火时间随着试验电流强度的增大而减小,并逐步趋于稳定;同时,不同电雷管点火头在同一电流强度下的发火时间差异也逐渐减小。确定了电雷管点火头的稳定发火时间为 0.7 ms。
[关键词] 电流强度;电雷管点火头;发火时间
[分类号] TJ45

Effect of Current Intensity on the Ignition Time of Hot Bridge-wire Electric Fusehead

GAO Wenle^{①②}, ZHOU Aobo^{①②}, ZHU Changsheng^③, YANG Lei^{①②}, LUO Yantao^{①②}
①College of Architecture and Civil Engineering, Shandong University of Science and Technology (Shandong Qingdao, 266590)
② Shandong Provincial Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention and Mitigation (Shandong Qingdao, 266590)
③41st Institute, CETC (Shandong Qingdao, 266590)

[ABSTRACT] A rigid detonator fusehead and a LGS-2A millisecond detonator tester were chosen to study the effect of current intensity (1.0-4.0 A) on the ignition time of hot bridge-wire electric fusehead. Experimental results show that the ignition time of hot bridge-wire electric fusehead decreases with the increase of current intensity at first, and then tends to be stable. Meanwhile, the ignition time difference for different detonator fuseheads at same current intensity reduces gradually. The stable ignition time of electric fusehead is confirmed as 0.7 ms.
[KEYWORDS] current intensity; fusehead of electric detonator; ignition time

引言

灼热桥丝式电雷管主要通过电阻丝的电热效应来引燃或引爆含能材料,它的起爆输入一般有直流电流和电容放电两种方式^[1]。而点火头是电雷管和电子雷管发火机构的核心部分,它的发火可靠性是决定雷管能否爆炸的主要因素^[2-3]。国标^[4]规定,国产普通电雷管的发火冲能上限为 7.9 A²·ms。灼热桥丝式电雷管制造完成后,每发电雷管的发火冲能是一个定值,但不同电雷管之间的发火冲能是有差异的。因此,在一定的电流条件下,不同电雷管的点燃时间存在一定的差异,即电雷管点火头的发火时间存在一定的差异;随着电流的增大,这种

差异逐渐减小,当电流增大到一定程度,这种差异甚至可以忽略不计。因此,只有作用于电雷管的电流达到一定值,才能保证电雷管的点燃时间的一致性,减少电雷管之间的点燃时间的差异,做到发火精准、可靠,保证达到预期的爆破效果。

国内外学者针对电流对电雷管的影响展开试验研究,并取得了一定的成果。Austing^[5]对 6#商用电雷管进行了恒流源起爆试验,在 4.43~7.26 A 范围内研究了起爆时间 t 与输入电流 I 的关系式为 $t = 33.088\ 35\ I^{-1.85711}$;同时,Austing 还提出,电雷管的起爆性能是由发火能量的大小来控制的,因此,研究电雷管的点燃时间受电流影响的变化规律即可评估电雷管的性能。赵勇等^[6]通过对毫秒电雷管点火头进行试验研究,发现在 0.7~1.6 A 电流范围内,

^{*} 收稿日期:2016-06-01
作者简介:高文乐(1966-),男,教授,主要从事岩土力学和爆破安全技术的教学与科研工作。E-mail:wenlegao@163.com

随着电流强度逐渐增大,药头发火时间逐渐减小,当电流大于 1.2 A 后,发火时间保持在 4 ms 左右,变化趋势不再明显。管延义^[7]研究了电源输出功率对雷管发火性能的影响,试验电流在 0.45 ~ 1.20 A 之间时,电源输出功率越高,雷管的发火时间越小,并且发火精度越高。赵勇与管延义关于雷管发火时间的试验研究选取电流范围较小,在 0.45 ~ 1.60 A 之间。

本文中,采用电雷管点火头作为试验材料进行相关的试验研究,研究灼热桥丝式电雷管点燃时间(即点火头的发火时间)在 1.0 ~ 4.0 A 范围内随电流的变化规律,并确定该类电雷管点火头的稳定发火时间。

1 电雷管发火机理

电雷管的发火是靠桥丝通电后发热,将自身的热能经过热传导传递到电雷管点火头,使点火头的点火药达到燃点点燃实现的。电雷管的发火过程包括桥丝的预热阶段和点火药的起爆阶段;电雷管脚线通电后,桥丝的温度逐渐地升高,桥丝温度升高的快慢取决于桥丝本身,包括桥丝的长度、桥丝的截面大小以及通电电流的强度等;桥丝升温后,将自身的热能传递给电雷管点火头的点火药,加速点火药的发火^[8]。

电雷管通电后的能量转化过程相当复杂,这一过程包括输入的电能、桥丝升温的热能、火药化学反应释放的能量以及散失的热能,如下式^[9]所示:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = -\nabla^2 T + P(t) + \rho Q Z e^{-\frac{E}{R_0 T}} \omega。$$

(1)

式中: ρ 为材料的密度, g/cm^3 ; c 为桥丝材料的热容, $\text{J}/(\text{g} \cdot ^\circ\text{C})$; T 为桥丝温度, $^\circ\text{C}$; t 为时间, s ; ∇^2 为拉普拉斯算子; $P(t)$ 为输入电功率, J/s ; Q 为单位质量药剂的反应热, J/g ; Z 为频率因子; E 为活化能, J/mol ; R_0 为气体常数, J/mol ; ω 为药剂反应分数。

式(1)比较复杂,难以求解,因此很多学者提出了简化公式,其中较为典型的如式(2)所示,忽略桥丝热能的损失,桥丝的升温公式^[7]为:

$$T = \frac{I^2 R}{c} t。$$

(2)

式中: T 为桥丝温度, $^\circ\text{C}$; I 为电流强度, A ; R 为桥丝电阻, Ω ; c 为桥丝热容, $\text{J}/(\text{g} \cdot ^\circ\text{C})$; t 为时间, s 。

当恒流源放电时,恒定电流经过桥丝,根据楞次定律有:

$$q_1 = I^2 R t。$$

(3)

式中: q_1 为电流热效应产生热量, J 。

桥丝通电后,点火药头发火所需热量为 q_2 ,此时桥丝从初温 T_0 升温至 T_1 ,则有:

$$q_2 = V \rho c (T_1 - T_0)。$$

(4)

式中: V 为桥丝体积, cm^3 ; T_0 为桥丝初温, $^\circ\text{C}$; T_1 为通电使桥丝达到的温度, $^\circ\text{C}$ 。

电雷管的发火是一个很快的过程,桥丝升温过程中的热量损失可以忽略不计,即 $q_1 = q_2$,则有:

$$I^2 R t = V \rho c (T_1 - T_0)。$$

(5)

将式(5)进一步整理得:

$$T_1 \approx 1.62 \frac{\rho'}{\rho d^4} I^2 t。$$

(6)

式中: ρ' 为桥丝电阻率, $\Omega \cdot \text{cm}$; d 为桥丝直径, cm 。

式(6)中, t 反映了桥丝升温的快慢, T_1 是桥丝加热到点火药发火时所需的桥丝的温度,对于电雷管点火头的点火药来说,点燃所需热量全部来源于桥丝传导的热量。为了提高点火药头的发火可靠性,在点火药剂一定的情况下,桥丝的温度 T_1 越高,点火药剂越易被激发,电雷管发火越可靠。

2 试验研究

为研究灼热桥丝式电雷管点火头发火时间随电流的变化规律,选用某雷管厂批量生产且工艺条件严格控制一致的刚性雷管点火头作为试验材料。该点火头桥丝两只脚为冲床预冲,桥距固定,误差小于 20 μm ,焊桥丝采用点焊机全自动焊接,焊帽均匀,桥丝松紧一致,确保桥丝电阻均匀、稳定;刚性雷管点火头各项性能稳定可靠,桥丝电阻控制在 1.2 ~ 1.5 Ω ,2 m 钢芯爆破脚线全电阻控制在 3 ~ 4 Ω ,刚性电点火元件桥丝电阻稳定,极差小,抗振性能、抗静电性优于弹性电点火元件^[10-12]。相比直接使用电雷管进行试验,排除了电雷管传导时间的差异对试验结果的影响;此外,刚性电雷管点火头电阻值相近,减少了因桥丝电阻值不同而造成的试验误差。

2.1 主要仪器

试验采用 LGS-2A 型毫秒雷管测试仪对电雷管点火头在不同电流下的发火时间进行测定。LGS-2A 型毫秒雷管测试仪由门控电路、计数器、时标电路、译码显示、恒流源控制电路等组成,各种参数的测量通过控制面板上的开关按键完成。测量电雷管点火头发火时间时,按下“起爆”按键,仪器输出电信号,仪器内部通过感应电脉冲信号取得开门信号;电雷管点火头爆炸时,关门信号通过压电信号器取得,这个从输出电信号到接收到关门信号的延时时

间经过门控电路,通过计数器记录,经过译码后通过 LED 显示屏读取数据。LGS-2A 型毫秒雷管测试仪标准频率为 10 MHz,由石英振荡器给出,频率稳定,保证了仪器的测量精度,其工作原理如图 1 所示。

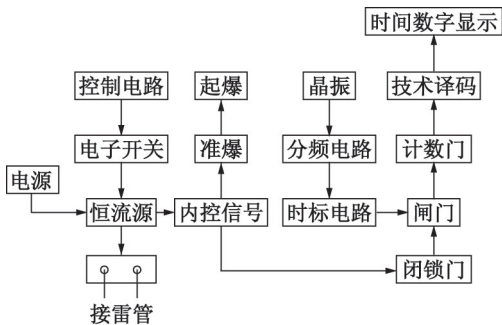


图 1 LGS-2A 型毫秒雷管测试仪工作原理
Fig. 1 Working principle diagram of LGS-2A millisecond detonator tester

2.2 结果与分析

选用全电阻在 3.4 ~ 3.5 Ω 之间的电雷管点火头,研究其发火时间在 1.0 ~ 4.0 A 电流之间的变化规律。电流强度分别为 1.0、1.5、2.0、2.5、3.0、3.2、3.4、3.5、3.8、4.0 A,共取得 76 组数据。根据所得试验数据作 t - I 变化曲线,如图 2 所示。

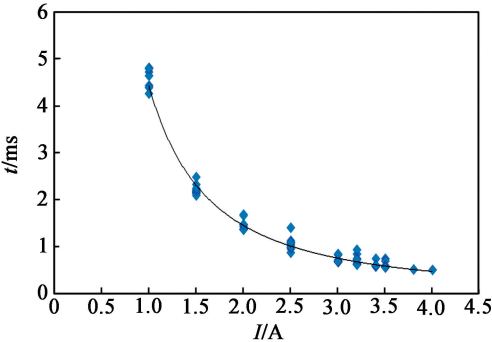


图 2 不同电流强度下电雷管点火头的反应时间
Fig. 2 Ignition time of electric fusehead at different current intensities

根据图 2 中的试验数据,对不同电流下电雷管点火头反应时间变化曲线进行拟合:

$$t = 4.441I^{-1.60}, R^2 = 0.979. \tag{7}$$

变化曲线拟合优度 $R^2 = 0.979$,拟合精度高,理论拟合曲线与实际变化趋势十分接近,相似程度高。

由图 2 可知,当电流小于 3.0 A 时,反应时间曲线斜率变化较大,虽然同一电流下,数据相差不大,数据分布也较为集中,但电雷管点火头反应时间随电流变化明显;当电流达到 3.0 A 后,反应时间曲线越来越平缓,电雷管点火头发火时间趋于稳定,并且这一段的试验数据较前一段更加集中、极差更小,电雷管点火头个体之间的差异越来越小,甚至可以忽

略不计;电流大于 3.0 A 后的试验数据可确定为电雷管点火头的稳定发火时间,即电雷管点火头的稳定发火时间为 0.7 ms。统计分析 76 组试验数据如表 1 所示。

表 1 不同电流强度下电雷管点火头起爆反应时间分析

Tab. 1 Average ignition time of electric fusehead at different current intensities			
I/A	试验点火头个数	\bar{R}/Ω	\bar{t}/ms
1.0	7	3.446	4.6
1.5	10	3.453	2.2
2.0	9	3.446	1.5
2.5	10	3.444	1.1
3.0	10	3.428	0.7
3.2	10	3.440	0.7
3.4	8	3.449	0.7
3.5	10	3.500	0.7
3.8	1	3.460	0.6
4.0	1	3.420	0.5

根据图 2、表 1 相关数据,分别作试验数据的标准差和极差变化曲线,如图 3、图 4 所示。

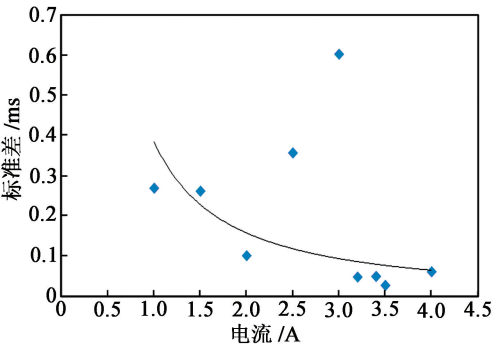


图 3 标准差变化曲线
Fig. 3 Standard deviation curve

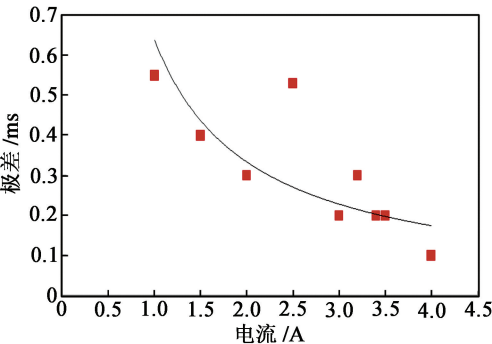


图 4 极差变化曲线
Fig. 4 Range curve

由图 3 可以看出,试验数据标准差曲线逐渐趋于平稳,随着电流的增大,试验数据越来越集中,离散程度越来越小,电雷管点火头个体之间发火时间

的差异越来越小。电流为 3.0 A 时,相对来说试验数据离散程度较大,但数据波动范围较小,在 0.7 ~ 0.9 ms 之间。电雷管点发火头加工工艺精细,点火药质量高,同一电流下点发火头反应时间较集中,从整体趋势来看,3.0 A 时数据离散性相对较大是由于偶然因素造成的。

由图 4 可以看出,随着电流的变化,不同电流下电雷管点发火头反应时间的差异呈现逐渐减小的趋势。电流大于 3.0 A 后,电雷管点发火头反应时间的差异逐渐趋于稳定,极差控制在 0.3 ms 之内。

当试验电流达到 3.0 A 后,平均反应时间均为 0.7 ms 左右,所有反应时间数据均小于 0.9 ms,大于 0.5 ms,选用这一段的电雷管点发火头平均反应时间 0.7 ms 作为电雷管点发火头稳定发火时间,误差可以控制在 ± 0.2 ms 之内,准确性较高。

3 结论

1) 在 1.0 ~ 4.0 A 电流范围内,随着电流的增大,电雷管点发火头的反应时间逐渐减小,并在电流达到 3.0 A 后,反应时间逐步趋于稳定。

2) 随着电流的增大,电雷管点发火头个体之间的发火时间差异逐渐减小,并且逐步稳定在 0.3 ms 的范围内,可以忽略不计。

3) 当电雷管点发火头电阻在 3.4 ~ 3.5 Ω 之间时,在 1.0 ~ 4.0 A 电流范围内,电雷管点发火头发火时间随电流变化规律为 $t = 4.441 I^{-1.60}$ 。

4) 确定了电雷管点发火头的稳定发火时间为 0.7 ms,稳定发火电流大于 3.0 A。

参 考 文 献

- [1] 董海平,蔡瑞娇,穆慧娜,等.灼热桥丝式火工品发火可靠性设计方法[J].含能材料,2008,16(5):560-563.
DONG H P, CAI R J, MU H N, et al. Firing reliability design of hot bridge-wire electro-explosive device[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2008, 16(5): 560-563.
- [2] 杜伟兰,彭文林,聂祥进,等.以硝酸胍镍为基药的电点火头的制备及性能[J].爆破器材,2016,45(5):35-38.
DU W L, PENG W L, NIE X J, et al. Preparation and properties of a new electric fusehead based on nickel hydrazine nitrate[J]. Explosive Materials, 2016, 45(5): 35-38.
- [3] 付占达,张素平,孙晓妮,等. LDNP 生产工艺改进对其电点火头性能的影响[J].爆破器材,2016,45(5):39-41.
FU Z D, ZHANG S P, SUN X N, et al. Process improvement of LDNP and its influence on performances of the electric fusehead[J]. Explosive Materials, 2016, 45(5): 39-41.
- [4] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.工业电雷管:GB 8031—2005[S].北京:中国标准出版社,2005.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Industrial electric detonator: GB 8031—2005[S]. Beijing: China Standard Press, 2005.
- [5] 金序兰.6#商业电雷管的特性:单个雷管的恒定电流起爆[J].爆破器材,1988,17(4):33-35.
- [6] 赵勇,王金柱.电点火元件对毫秒延期电雷管秒量的影响[J].火工品,2002(4):16-17.
ZHAO Y, WANG J Z. The Influence of fusehead on delay-time of MS-detonator[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2002(4): 16-17.
- [7] 管延义.电源输出功率对雷管发火性能的影响[J].煤矿爆破,2002(2):25-26.
- [8] 裴晓红.电引火药头对雷管电参数的影响因素分析[M]//吕春绪.民用爆破器材理论与实践.北京:兵器工业出版社,2012:301-305.
PEI X H. The electricity ignite a medicine head to the thunder tube electricity parameter of impact factor analysis[M]//LÜ C X. Theory and practice of industrial explosive materials. Beijing: Weapon Industry Press, 2012: 301-305.
- [9] 王文斌.电子雷管用电子引火元件研究[D].淮南:安徽理工大学,2015.
WANG W B. Study on fuse head of electronic detonator[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2015.
- [10] 刘绍瑜.新型电引火元件研究[D].淮南:安徽理工大学,2013.
LIU S Y. The preliminary study of electric fusehead[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2013.
- [11] 王川.论刚性电引火药头技术的优势[J].爆破器材,2007,36(1):29-30.
WANG C. Technology advantages of rigid fusehead[J]. Explosive Materials, 2007, 36(1): 29-30.
- [12] 雷京荣.刚性电引火头生产过程简介[J].爆破器材,2002,31(2):17-19.
LEI J R. Introduction of fuse head manufacture[J]. Explosive Materials, 2002, 31(2): 17-19.