

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2018.05.008

磁电雷管结构及生产工艺的优化设计*

秦卫东 刘文生 张艳 张东平
江西新余国泰特种化工有限责任公司(江西新余,338000)

[摘要] 为解决当前磁电雷管生产工艺复杂、成本较高的问题,设计了一种新型磁电雷管。首先,阐述了磁电雷管的设计原理。在此基础上,分析了感应电流 I_2 与次级绕组匝数 n_2 、次级端脚线及桥丝电阻 R_2 、磁导率 μ 、电流频率 f 的关系,确定了 n_2 、 R_2 、 μ 和 f 等的取值。生产中,采用了磁环、脚线定位注塑措施;确定了磁电雷管的磁环材料、初、次级绕组匝数和电线材质;优化了点火药配方和桥丝的直径,点火药选择 m (苦味酸钾): m (高氯酸钾)=47.30:44.65的零氧配方,桥丝直径为0.03 mm,解决了规模生产的一致性问题。结果表明:本产品生产工艺简单,能够实现大批量生产,同时具有很强的可靠性,满足了行业的需求。

[关键词] 磁电雷管;电感量;磁环;引火药头

[分类号] TD235.2+2

Optimum Design of Structure and Production Process of Magnetic Electric Detonator

QING Weidong, LIU Wensheng, ZHANG Yan, ZHANG Dongping
Jiangxi Xinyu Guotai Specialty Chemicals Co., Ltd. (Jiangxi Xinyu, 338000)

[ABSTRACT] A new kind of magnetic electric detonator was designed with respect to the challenges of complex production process and high cost in current production of magnetic electric detonator. Design principle of the magnetic electric detonator was introduced at first. Based on this, relationship between inductive current I_2 and number of secondary winding turns n_2 , inductive current I_2 and bridge wire resistance R_2 , induced current I_2 and magnetic conductivity μ , inductive current I_2 and current frequency f were analyzed and the value of n_2 , R_2 , μ and f were determined. Magnet ring, wire positioning and mold injection were used in the production. Magnet ring material, number of primary or secondary winding turns, and wire material were also determined. Ignition formula and diameter of bridge wire were optimized. Zero oxygen balance was chosen in the ignition, in which m (potassium picrate): m (potassium hyperchlorate)=47.30:44.65. Diameter of bridge wire was 0.03 mm. Consistency of scale production has been solved. All the results show that this production process is simple and could achieve large scale production, and it has a high reliability. It could meet the needs of various industries simultaneously.

[KEYWORDS] magnetic electric detonator; inductance; magnet ring; fuse head

引言

磁电雷管是工业电雷管的一种,其作用原理是通过高频电-磁-电的转换实现雷管的选频起爆^[1],被广泛应用于矿山、水利、道路隧道、建筑物拆除等爆破工程中,用于起爆工业炸药^[2]。磁电雷管解决了普通电雷管抗杂散电流、抗干扰能力差等难题,具有良好的安全性和适用性^[3]。

但相对普通工业雷管,磁电雷管生产工艺比较复杂,生产成本较高,加之磁电引火头桥丝通断情况及桥路电阻检测比较困难,使得单发磁电雷管的电性能质量难以检测和判定。目前,国内只有少数企业少量生产磁电雷管,阻碍了该类产品的大量推广和应用^[4]。因此,研制一种新型磁电雷管及其专用检测、起爆系统对于提高我国民爆器材技术水平很有必要,对提升企业核心竞争力,促进企业发展 also 具有重要意义。

* 收稿日期:2018-04-11
作者简介:秦卫东(1968-),男,工程师,主要从事火工品及工装的设计。E-mail:13879004023@163.com

1 磁电雷管的结构设计

磁电雷管发火单元由安全元件和磁电引火头等组成^[5]。安全元件由一个磁环和连接磁环的完整封闭导线构成,连接磁环的完整封闭导线作为初级线圈,一般称之为电源线(或母线)。设计长度为 4 m,计算初级线圈(电源线)电阻 R_1 为 $0.36\ \Omega$ 。磁电引火头脚线缠绕在磁环的另一侧作为次级线圈。

图 1 是磁电雷管的结构和等效电路图。

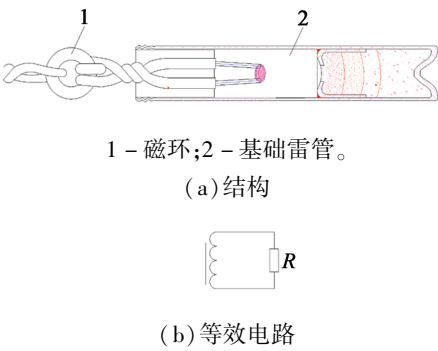


图 1 磁电雷管的结构和等效电路

Fig. 1 Structure component and equivalent circuit of magnetic electric detonator

1.1 电磁感应起爆系统理论分析

将电磁感应起爆系统转换成图 2 等效电路图。

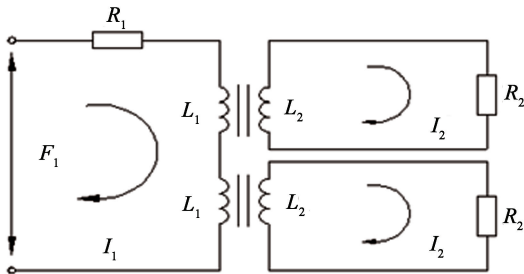


图 2 电磁感应起爆系统的等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of electromagnetic induction initiation system

根据法拉第电磁感应定律和克希霍夫第二定律,可以推导感应电流 I_2 的表达式及感应电流 I_2 与初级电流 I_1 的关系式,分别如式(1)和式(2)^[6]。

$$I_2 = \frac{\omega L_1 \frac{n_2}{n_1} E}{\sqrt{(R_1 R_2)^2 + (\omega L_1)^2 \left[R_1 \cdot \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2 + N R_2 \right]^2}}; \quad (1)$$

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{\omega M}{\sqrt{R_2^2 + (\omega L_2)^2}}. \quad (2)$$

式中: N 为单个磁环并联磁电雷管个数,取 $N = 1$; L_1 、 L_2 分别为初级自感线圈和次级自感线圈的感抗, H ; M 为互感系数, H ; R_1 为初级端等效电阻, Ω ; R_2 为次级端脚线及桥丝的电阻, Ω ; ω 为角速度, $\omega = 2\pi f$, f 为交流信号频率, Hz ; E 为电压的有效值, V ; n_1 为初级绕组匝数; n_2 为次级绕组匝数。

通过给定某些参数(见表 1),分析式(1)中感应电流 I_2 与次级绕组匝数 n_2 、次级端脚线及桥丝的电阻 R_2 、磁导率 μ 、电流频率 f 的关系。本项目产品选用新余国泰特种化工责任有限公司设计的 GT-1 型磁电雷管起爆器点火。根据产品说明书介绍,该起爆器输出 70 kHz 方波,输出电流 $\geq 7\text{ A}$ (峰值),是饱和磁感应电流,在外接电阻不大的情况下(数百欧姆内),外接电阻(初级端等效电阻)变化对输出电流大小影响不大。

表 1 初始参数

Tab. 1 Initial parameters	
因素	数值
E/V	2.52
n_1	1
N	1
R/Ω	$R_1 = 0.36$

1.1.1 感应电流理论值 I_2 与次级绕组匝数 n_2 的关系

取 $I_1 = 7\text{ A}$; $R_2 = 3.3\ \Omega$; $f = 70\text{ kHz}$; $L_1 = 4.13 \times 10^{-5}\text{ H}$ 。将表 1 参数代入式(1),计算感应电流理论值 I_2 与次级绕组匝数 n_2 的关系,见式(3)。

$$I_2 = \frac{45.7518 n_2}{\sqrt{1.4113 + 329.6215(0.36 n_2^2 + 3.3)^2}}. \quad (3)$$

感应电流 I_2 与次级绕组匝数 n_2 为非线性关系,对于给定的参数,计算结果见表 2。

表 2 感应电流 I_2 与次级绕组匝数 n_2 关系的理论值

Tab. 2 Theoretical value of the relationship between inductive current I_2 and number of secondary winding turns n_2	
n_2	I_2/A
1	0.69
2	1.06
3	1.16
4	1.11
5	1.02

从表 2 可以看出,初级绕组匝数为 1、次级绕组

匝数为 3 时,感应电流最大,为 1.16 A。但考虑到 $n_2=3$ 时,生产相对复杂,所以选择 $n_2=2$ 。因此,设计中选定初级绕组匝数为 1,次级绕组匝数为 2,感应电流 I_2 理论最大值 1.06 A。

1.1.2 感应电流理论值 I_2 与次级端桥丝电阻 R_2 的关系

将表 1 参数代入式(1),计算感应电流 I_2 与桥丝电阻 R_2 的关系,见式(4)。

$$I_2 = \frac{91.503\ 6}{\sqrt{(0.36R_2)^2 + 329.621\ 5 \times (1.44 + R_2)^2}} \text{。} \quad (4)$$

计算结果见表 3。表 3 中, $I_1=7\text{ A}$; $f=70\text{ kHz}$; $L_1=4.13 \times 10^{-5}\text{ H}$; $n_2=2$ 。

表 3 感应电流 I_2 与桥丝电阻 R_2 关系的理论值
Tab.3 Theoretical value of the relationship between inductive current I_2 and bridge wire resistance R_2

R_2/Ω	I_2/A	R_2/Ω	I_2/A
2.0	1.47	5.0	0.78
2.4	1.31	9.0	0.48
3.1	1.06	15.0	0.31
3.8	0.96	30.0	0.16

从表 3 可以看出,感应电流 I_2 与磁电引火头桥丝电阻 R_2 负相关。本项目选用制式电引火头点火药配方和生产工艺,药头发火冲能在 $2.0 \sim 7.9\text{ A}^2 \cdot \text{ms}$ 范围内,单发药头的最小发火电流不大于 0.45 A。根据表 3,保证磁电引火头发火所对应的桥丝电阻范围很宽,为 $2 \sim 30\ \Omega$,有利于生产。

1.1.3 感应电流理论值 I_2 与磁导率 μ 的关系

对于环形铁磁质,电感、感抗与磁导率的关系为:

$$L_1 = 4\pi\mu Sn_1^2 \times 10^7 \text{。} \quad (5)$$

式中: μ 为磁导率; S 为横截面积。

将式(5)和表 1 参数代入式(1),计算感应电流 I_2 与磁导率 μ 的关系,见式(6)。

$$I_2 = \frac{0.001\ 143\ 9\mu}{\sqrt{1.411\ 3 + 1.159\ 025 \times 10^{-6}\mu}} \text{。} \quad (6)$$

计算结果见表 4。表 4 中, $I_1=7\text{ A}$; $R_2=3.1\ \Omega$; $f=70\text{ kHz}$, $n_2=2$ 。

从表 4 可以看出,感应电流 I_2 随磁环磁导率 μ 的增大而增加,当磁导率达到一定值(临界磁导率)时,感应电流基本处于恒定状态。磁环材料选用铁基纳米晶比较合适。

1.1.4 感应电流理论值 I_2 与电流频率 f 的关系

将表 1 参数代入式(1),计算感应电流 I_2 与电

表 4 感应电流 I_2 与磁导率 μ 关系的理论值
Tab.4 Theoretical value of the relationship between inductive current I_2 and magnetic conductivity μ

材料	μ	I_2/A
铁氧体 Mn-Zn	3 000	1.71
铁基非晶	5 000	2.00
坡莫合金 50Ni	6 000	2.07
坡莫合金 80Ni	40 000	2.25
铁基纳米晶	80 000	2.26

流频率 f 的关系,见式(7)。

$$I_2 = \frac{0.001\ 307\ 2f}{\sqrt{1.411\ 3 + 1.511\ 39 \times 10^{-6}f^2}} \text{。} \quad (7)$$

计算结果见表 5。表 5 中, $I_1=7\text{ A}$; $R_2=3.1\ \Omega$; $L_1=3.54 \times 10^{-5}\text{ H}$; $n_2=2$ 。

表 5 感应电流 I_2 与电流频率 f 关系的理论值
Tab.5 Theoretical value of the relationship between inductive current I_2 and current frequency f

f/Hz	I_2/A
500	0.49
2 500	1.67
10 000	2.20
70 000	2.26

从表 5 可以看出,感应电流 I_2 随电流频率 f 的增大而增加,当电流频率达到一定值(临界电流频率)时,感应电流基本处于恒定状态。

1.2 方案验证情况

为了验证 I_2/I_1 与 n_1/n_2 的关系是否符合变压器原理,将表 1 参数代入式(2),计算 I_2/I_1 与 n_1/n_2 的关系,见式(8)。

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{\omega M}{\sqrt{R_2^2 + (\omega L_2)^2}} = \frac{36.310\ 96}{\sqrt{R_2^2 + 5\ 273.943}} \text{。} \quad (8)$$

计算结果见表 6。表 6 中, $I_1=7\text{ A}$; $f=70\text{ kHz}$; $L_1=3.540 \times 10^{-5}\text{ H}$; $L_2=1.416 \times 10^{-4}\text{ H}$; $M=7.08 \times 10^{-5}\text{ H}$ 。

表 6 I_2/I_1 与 n_1/n_2 的关系
Tab.6 Relationship between I_2/I_1 and n_1/n_2

R_2/Ω	I_2/A	I_2/I_1
2.0	2.58	0.500
2.4	2.45	0.500
5.0	1.86	0.498
10.0	1.27	0.490
50.0	0.36	0.485

理论计算结果表明, $I_2/I_1 = (0.485 \sim 0.500) \approx$

$n_1/n_2=0.5$,与上述分析结果一致,符合变压器工作原理。

2 生产工艺优化

如上所述,解决磁电雷管的大批量生产工艺,降低生产成本、提高产品质量一致性是推广使用本项目的技术关键。由于铜的良好导电率,电线材料选用铜芯线。与普通电雷管相比,磁电引火头增设了安全件(磁环),电极塞注塑容易出现偏心,容易产生露金属、脚线破皮及偏心等质量问题,既影响产品性能又影响产品美观^[7]。通过反复设计修改注塑模,采用磁环、脚线定位注塑措施后,相关质量问题得到了较好的解决;并且可以用储能焊机焊桥,解决了磁电引火头大批量生产的工艺问题^[7]。

另外,为了达到民爆行业进步指导意见的要求,点火药不使用 DDNP,选用先进实用的高氯酸钾(KClO₄) + 苦味酸钾点火药配方^[8]。由于磁电引火头的点火电源是高频感应电流,点火药热敏感度要求较高,试制过程中曾经出现少量瞎火问题^[9]。为此,在试验的基础上,通过调整并采用零氧平衡配方,增加点火药球磨时间,以提高药剂热敏感度,解决了磁电引火头的发火可靠性问题^[10]。

2.1 配方优化

为了解点火药氧平衡配方对药头发火性能的影响,进行了点火药氧平衡对药头发火性影响的验证试验。试样必须烘干;用 $\varnothing 0.03\text{ mm}$ 桥丝,机器焊桥;胶液在使用前过筛;其他要求按工艺执行。采用2种点火药配方。配方1[#](未加胶时正氧配方)为 m (苦味酸钾): m (高氯酸钾): m (聚乙烯醇): m (羧甲基纤维素)=36.24:55.64:7.60:0.52;配方2[#](未加胶时零氧配方)为 m (苦味酸钾): m (高氯酸钾): m (聚乙烯醇): m (羧甲基纤维素)=47.30:44.65:7.60:0.45。

试验结果见表7。

表7 点火药氧平衡对药头发火性能的影响

Tab.7 Effect of ignition oxygen balance on firing performance of fuse head

配方	百毫秒发火电流/mA	发火冲能/(A ² ·ms)
1 [#]	519	14.4
2 [#]	386	5.5

配方1[#]的磁电引火头发火时有药块飞出,配方2[#]的磁电引火头发火正常。因此,选择配方2[#]为磁电引头的点火药配方。

2.2 桥丝直径优化

为了解桥丝直径对药头发火性能的影响,进行了桥丝直径对药头发火性影响的验证试验。磁电引火头点火药配方(零氧配方)为 m (苦味酸钾): m (高氯酸钾): m (聚乙烯醇): m (羧甲基纤维素)=46.30:45.15:8.10:0.45。200发磁电引火头串联。试验结果见表8。

表8 桥丝直径对药头发火性能的影响

Tab.8 Effect of diameter of bridge wire on firing performance of fuse head

桥丝直径/mm	百毫秒发火电流/mA	发火冲能/(A ² ·ms)	结果
0.035	478.0	5.7~6.9	4发瞎火
0.030	386.0	5.5~6.1	全部发火
0.028	356.3	5.3~5.9	全部发火

综合质量和成本考虑,磁电引火头的桥丝直径选择0.03 mm。

由于选用普通电雷管制式电引火头点火药配方和生产工艺。磁电引火药头发火试验结果表明,桥丝电阻2.8~3.8 Ω ^[11],高氯酸钾(KClO₄) + 苦味酸钾点火药的磁电引火头的发火可靠性能满足设计要求^[12]。另外,按上述设计方案试制了1 500发产品,分别做了产品发火试验、市电安全性试验和20发串联起爆试验^[13],试验结果表明,产品对380 V、50 Hz市电安全,20发串联起爆全部可靠作用。试验结果与分析结果完全一致^[14]。

3 结论

通过理论分析及计算,确定了磁电雷管的磁环材料(铁基纳米晶)、初次级绕组匝数(圈数)、电线材质(铜芯线)等;经试验,优化了点火药配方和桥丝的直径,解决了大规模生产的一致性问题。磁电雷管电感量的正常值范围,是使引火药头可靠发火的技术保证。

经各项性能试验均符合技术要求,点火药头能可靠发火,点火药发火能量完全满足引爆基础雷管。该磁电雷管产品性能稳定、安全可靠。

参 考 文 献

[1] 赵国钧,杨国华. 电磁雷管起爆技术 [J]. 云南冶金, 1991(5):6-8.
[2] 王海东,孙新波,梁纯,等. 磁电雷管输出特性测试

- 技术研究[J]. 测井技术, 2006, 30(3): 285-287.
- WANG H D, SUN X B, LIANG C, et al. On magneto-electric detonators output characteristic test technology[J]. Well Logging Technology, 2006, 30(3): 285-287.
- [3] 汪旭光, 沈立晋. 工业雷管技术的现状和发展[J]. 工程爆破, 2003, 9(3): 52-57.
- WANG X G, SHEN L J. The state-of-the-arts of industrial detonators[J]. Engineering Blasting, 2003, 9(3): 52-57.
- [4] 李明勇. 磁电雷管检测仪的研制[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
- LI M Y. Development of magnetic detonator detector[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015.
- [5] 张一博. 新型磁电雷管起爆器的开发及研制[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2009.
- [6] 王秀芝, 惠宁利. 电磁雷管的稳健性设计[J]. 爆破器材, 1993, 22(5): 1-6.
- WANG X Z, HUI N L. Robust design of electro-magnetic-detonator[J]. Explosive Materials, 1993, 22(5): 1-6.
- [7] 牟金东, 路利军, 慕光华, 等. 液体拒传安全磁电雷管的研制及应用[J]. 测井技术, 2010, 34(2): 196-199.
- MU J D, LU L J, MU G H, et al. Development and application of fail-safe water magneto electric detonator[J]. Well Logging Technology, 2010, 34(2): 196-199.
- [8] 刘琦. 一种新型工业电雷管起爆药[J]. 现代矿业, 2014(6): 129-130.
- [9] 夏建才, 刘丽梅. 火工品制造[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2009.
- [10] 王海东. 磁电雷管轴向输出压力测试技术[J]. 火工品, 2006(2): 44-45, 53.
- WANG H D. Measuring method for axiel-output pressure of magnetolectric detonator[J]. Initiator & Pyrotechnics, 2006(2): 44-45, 53.
- [11] 刘自镛, 蒋荣光. 工业火工品[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2003.
- [12] 王凯民, 张学舜. 火工品工程设计与试验[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- WANG K M, ZHANG X S. Engineering design and test technology of initiators & pyrotechnics[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2010.
- [13] 李国新, 程国元, 焦清介. 火工品实验与测试技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1998.
- [14] 李锦荣. 电火工品射频发火机制及其射频感度的应用简介[J]. 火工品, 1999(1): 51-53.
- LI J R. Initiation mechanism and application for RF sensitivity of EEDS[J]. Initiator & Pyrotechnics, 1999(1): 51-53.

《爆破器材》入编 2017 年版《中文核心期刊要目总览》

2018 年 9 月,《爆破器材》编辑部接到通知:依据文献计量学的原理和方法,经研究人员对相关文献的检索、统计和分析,以及学科专家评审,《爆破器材》入编《中文核心期刊要目总览》2017 年版(即第 8 版)之“武器工业”类的核心期刊。该书由北京大学出版社出版。书中按《中国图书馆分类法》的学科体系,列出了 78 个学科的核心期刊表,并逐一核对核心期刊进行了著录。著录项目包括:题名、并列题名、主办单位、创刊时间、出版周期、学科分类号、ISSN 号、CN 号、邮发代码、编辑部地址、邮政编码、电话、网址、电子邮箱、内容简介等。

评选核心期刊的工作,是运用科学方法对各种刊物在一定时期内所刊载论文的学术水平和学术影响力进行综合评价的一种科研活动,研究工作量浩大。北京地区十几所高校图书馆、中国科学院文献情报中心、重庆维普资讯有限公司、中国人民大学书报资料中心、中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、中国科学技术信息研究所、北京万方数据股份有限公司、国家图书馆、中国社会科学院评价研究院等相关单位的百余名专家和期刊工作者参加了研究。

项目组对核心期刊的评价理论、评价方法等问题进行了深入研究,进一步改进了核心期刊评价方法,使之更趋科学合理,力求使评价结果符合客观实际。对于核心期刊的评价,仍采用定量评价和定性评审相结合的方法。定量评价指标体系采用了被摘量(全文、摘要)、被摘率(全文、摘要)、被引量、他引量(期刊、博士论文、会议)、影响因子、他引影响因子、5 年影响因子、5 年他引影响因子、特征因子、论文影响分值、论文被引指数、互引指数、获奖或被重要检索工具收录、基金论文比(国家级、省部级)、Web 下载量、Web 下载率 16 个评价指标,选作评价指标统计源的数据库及文摘刊物达 49 种,统计到的文献数量共计 93 亿余篇次,涉及期刊 13953 种。参加核心期刊评审的学科专家近 8 千位。经过定量筛选和专家定性评审,从我国正在出版的中文期刊中评选出 1981 种核心期刊,《爆破器材》杂志有幸成为其中之一。

《爆破器材》编辑部