

# 浅析复杂本质安全电路容性放电引燃特性

甘梅

中煤科工集团重庆研究院有限公司, 重庆 401325

**[摘要]**煤矿智能化飞速发展之下,对于本质安全电路的要求越来越高,电路的复杂性也有了极大地提升,而实际电路运行过程中,放电产生的火花是引燃可燃性气体的主要能源,对于电路运行安全造成了极大的威胁。此次研究的主要目的在于明确复杂本质安全电路容性放电的引燃特性,并以此为基础保障电路运行的安全性和稳定性。对此,简要介绍了容性放电,并分析了复杂本质安全电路的一般形式以及放电原理,通过对放电特性的分析,建立放电电流、放电功率的数学模型,然后以相应模型为基础,通过仿真软件,分析影响电流以及功率的主要因素,结果表明,放电火花的能量主要受到储能元件电容以及电感性抗的影响。

**[关键词]**复杂本质安全电路;放电电流;放电功率

DOI: 10.33142/hst.v5i4.6568

中图分类号: TM13

文献标识码: A

## Brief Analysis of Capacitive Discharge Ignition Characteristics of Complex Intrinsically Safe Circuits

GAN Mei

CCTEG Chongqing Engineering Co., Ltd., Chongqing, 401325, China

**Abstract:** With the rapid development of coal mine intelligence, the requirements for intrinsically safe circuits are becoming higher and higher, and the complexity of the circuit has also been greatly improved. In the actual operation process of the circuit, the spark generated by discharge is the main energy to ignite combustible gases, which poses a great threat to the operation safety of the circuit. The main purpose of this study is to clarify the ignition characteristics of capacitive discharge in complex intrinsically safe circuits, and to ensure the safety and stability of circuit operation on this basis. In this paper, capacitive discharge is briefly introduced, and the general form and discharge principle of complex intrinsically safe circuit are analyzed. Through the analysis of discharge characteristics, the mathematical models of discharge current and discharge power are established. Then, based on the corresponding models, the main factors affecting current and power are analyzed through simulation software. The results show that the energy of discharge spark is mainly affected by the capacitance of energy storage elements and inductive reactance.

**Keywords:** complex intrinsically safe circuit; discharge current; discharge power

### 引言

在实际进行本质安全电路设计的过程中,为满足煤矿运行需求,通常需要设置大电容元件,而在电路实际运行的过程中,若存在触点开闭,或者绝缘损坏情况,就会使得电容释放大量能量,进而引发短路产生火花,造成爆炸事故。尤其是在复杂本质安全电路当中,不仅存在大电容元件,还存在电感元件,根据以往对单纯电感电路或者电容电路的研究和分析,是难以准确分析复杂本质安全电路的性能的,由此对于电路引燃风险的评价也并不准确,相应电路设计仍然存在隐患。因此,针对多种情况下不同电路元件,对于复杂本质安全电路容性放电引燃特性的影响分析和探讨是十分有必要的。

#### 1 容性放电

容性放电通常也成为E型放电,在原理方面容性放电与普通放电之间有着极强的相似性,可以将等离子体视为密封玻璃容器放在电容的两个极板之间。与H型放电相比,容性放电的耦合效率和功率密度都相对更低,而且受到驱

动频率的影响较大,但由于容性放电的稳定性相对较强,因此在煤矿产业智能化发展过程中得到了广泛的应用。但与此同时,煤矿产业本质安全电路设计过程中对于大电容的元件需求量较高,一旦出现电路故障,电容就会释放大能量,出现火花放电情况,进而造成爆炸事故,使得相应电路无法满足本质安全防爆要求。根据电容储存能量公式 $W = 0.5C \cdot U^2$ 可知(式中,W表示电容储存能量,C表示电容,U表示端电压),电容值以及端电压对于火花放电能量有着直接的影响,所以在进行本质安全电路设计的过程中,抑制容性电路放电能量的根本方式,就是加强对于电容值和端电压的控制<sup>[1]</sup>。当然,对于复杂本质安全电路而言也是如此。

#### 2 复杂本质安全电路的容性放电

若电路运行的过程中,出现短路等故障问题,就会使得放电过渡过程急剧缩短,十分容易出现火花放电,而且煤矿生产过程中,存在大量可燃性气体,火花的出现会造成引燃爆炸事故,因此对于电路设计的安全性能有着较高

的要求。而且与纯电容电路不同的是,复杂本质安全电路是电感元件和电容元件同时存在的,其复杂性相对更高,对于放电火花能量的影响因素较多,实际电路设计过程中的难度更大。因此以往对于本质安全电路当中容性放电引燃特性的分析并不适用于复杂本质安全电路。对于复杂本质安全电路而言,在工作状态时,不仅电容元件会储存一定能量,电感元件也会进行能量储存,这就会导致当电路出现故障问题时,电感元件当中的能量也会释放,进而产生火花,发生引燃事故,因此在对复杂本质安全电路进行分析的过程中,应同时考虑电感元件以及电容元件。在实际进行复杂本质安全电路分析的过程中,由于储能元件自身的参数情况等存在较大差异,因此放电的性质、过程以及点燃能力都是不同的。结合复杂本质电路的放电过程,主要存在两种情况:其一,电路当中电感和电容元件参数不满足震荡条件时,可将整个电路视为简单放电形式进行研究,不做讨论,因此复杂本质安全电路的分析以第二种情况为主;其二,当电路当中电感和电容元件参数满足震荡条件时,相应电火花产生过程相对较为复杂,影响火花放电的因素也较多,包括元件参数、初始状态以及运行环境等,相应电路容性放电以及火花产生的过程研究相对更为困难<sup>[2]</sup>。

### 3 基于复杂本质安全电路的容性引燃特性分析

以最简单的电感与电容元件共存电路为例,其中电感元件与泄放二极管回路并联,通过能量等效方法的折算,可将其转换为单一等效电感,以此实现对于电路的简化,有助于提高的复杂本质安全电路容性引燃安全特性分析效率。简化后的复杂本质安全电路一般形式包括等效电感和电容两个储能元件。由于此次研究针对的是电路容性放电引燃特性,因此,分析过程中以大电容为主。

#### 3.1 大电感下的容性放电特性

当复杂元件出现电容性点燃情况时,相应电弧电压处于在最小状态之下,以此为基础进行计算分析,发现当电路处在震荡状态时,若复杂电路的电感较大,基于谐振回路其本身阻抗较高的特点,那么就可以忽略电源对于火花能量的贡献,可将电阻视为无穷大,此时相应电弧放电能量则主要来源于电感元件<sup>[3]</sup>。经过一系列计算分析,得到的谐振条件为:

$$R < 2\sqrt{\frac{L}{C}} \quad (1)$$

式中, R 表示等效电阻; L 表示等效电感; C 表示等效电容。

#### 3.2 大电容下的容性放电特性

当复杂本质安全电路当中电容元件的数值较大时,在出现电路故障时,火花能量主要来源于电容元件。在此情况下,对于电路容性放电特性的分析主要包括电流以及电功率两个方面。

#### 3.2.1 放电电流分析

在发生故障问题之前,电源已经完成对于电容元件的充电,在初始放电的瞬间,则可认为电容上的电压与电源电压相等,而相应电感元件中的火花电流则为 0,整个复杂本质安全电路中的储能元件仅为电容,在此基础上对放电电流公式进行计算,得到的表达式主要由两个部分组成,前一部分与电源电压、内阻以及电路电阻相关,说明电源供电最终转化成为了火花电流,而另一部分则与电容以及电感元件自身的参数情况相关,这也是火花电流的主要组成部分。结合上述分析可知,大电容情况下的复杂本质安全电路,其放电电流及其影响因素分析应主要电源、电容以及电感元件三个部分。

第一,电路电源影响分析。结合相应仿真软件,对复杂本质安全电路放电电流情况进行模拟分析,发现放电电流是从 0 开始急剧上升的,并在达到峰值之后,随着放电时间的延长出现大幅下降的情况,对比峰值前后,不难发现,电流下降的速率相较之前电流上升的速率相对较慢。为明确电源对于放电电流的影响,分别针对电源与储能元件进行仿真分析,忽略电源后,电感和电容元件对于火花放电电流的影响曲线弧度与复杂电路放电电流仿真波形整体趋势、弧度基本保持一致,只不过在只考虑电感和电容元件时,放电电流上升速度较快,下降速度较缓,其峰值要稍高于电源参与分析的情况。由此可见,电源对于放电电流的贡献和影响都相对较小,复杂本质安全电路容性放电过程中,火花放电的能量主要来源于电路当中的储能元件,即电容和电感元件。而且由于此次研究的前提为大电容下的复杂本质安全电路,因此电容元件本身的参数较高,这也使得其本身储存的能量相对较高,因此放电持续时间较长,当只考虑储能元件影响进行仿真分析时,相应火花放电电流峰值较高,电流下降所需要的时间也相对较长。

第二,电容元件影响分析。对此,在进行仿真分析的过程中,应保持电路当中电源以及电感元件的参数不变,仅针对电容元件的电容值进行改变,以此得到相应电容—放电电流关系波形。根据仿真分析后的波形图可知,随着电容量的增加,电路放电电流极具增加,而且峰值也有了进一步提高,二者之间呈现出正比关系。

第三,电感元件影响分析。在以大电容为前提的放电电流分析当中,电容为主要储能元件,在实际应用仿真软件分析电感元件对于放电电流的影响时,保持其他元件参数不变,仅改变电感取值,得到相应仿真结果,发现即使电容的参数不变,随着电感的增加,复杂本质安全电路当中放电电流也会随之发生改变,只不过相比电容影响而言,电感增加下放电电流的上升趋势相对较为缓慢,而且电流峰值也会随着电感的增加而逐渐降低。由此可知,在大电容复杂本质安全电路当中,电感元件能够有效阻止通过其内部电流突然发生变化的效果,而且随着电感参数的增加,

这种作用会不断增强, 以此使得电流最大值有所下降, 电流增加的速率也会随之放缓。

### 3.2.2 放电功率分析

火花的放电功率与放电电流相同, 都是评价复杂本质安全电路安全性能以及电路故障时点燃能力的重要指标。对于复杂本质安全电路而言, 大电容情况下, 电路当中电容作为单一储能元件, 当电路出现故障问题时, 放电过程为瞬变过程, 触点接触到火花形成之间的时间是十分短暂的, 因此在分析过程中, 可认为火花电压是瞬时建立的。火花的瞬时功率表达式为:

$$P = ui \quad (2)$$

式中,  $P$  表示火花瞬时功率;  $u$  表示瞬时电压;  $i$  表示瞬时电流。

在分析电路元件对于火花放电功率的影响分析过程中, 借助仿真软件, 通过控制变量法分别对电容元件以及电感元件的参数大小进行调整, 保持其他元件参数不变, 进而得到相应元件与放电功率之间的关系曲线。从相应仿真结果可以发现, 在进行电容元件影响分析的过程中, 随着电容的增加, 放电功率不断提升, 与电流相似, 相应仿真波形存在峰值, 而且电容越高, 火花瞬时功率峰值越高, 放电功率增加速度越快, 功率下降所需时间越长; 在进行电感元件的影响分析时, 根据相应仿真波形分析发现, 电路容性放电功率随着电感参数的增加, 放电功率峰值不断降低, 电功率上升趋势逐渐变缓, 对于电路放电起到了较为明显阻碍作用<sup>[4]</sup>。

### 3.2.3 总结讨论

经过上述仿真分析可知, 当复杂本质安全电路电容元件参数远大于电感元件时, 电容参数与火花放电电流以及放电功率之间成正比, 随着电容参数的增加, 火花放电电流和功率不断提升, 不仅上升速度较快, 而且峰值也相对较高。相比之下, 电感元件在大电容的复杂本质安全电路当中的作用更接近于电阻元件。

根据电容储存能量公式  $W = 0.5C \cdot U^2$  可知 (式中,  $W$  表示电容储存能量,  $C$  表示电容,  $U$  表示端电压), 电容元件的电容量以及端电压对于电容储能有着直接影响, 经过仿真分析可知, 随着施加在电容元件端电压的不断升高, 电路放电电压、放电电流都有所增加, 导致放电能量越高, 电路引燃风险也就越大。因此, 降低电容端电压也能够有效降低电容储能, 而大电容本安电路当中, 火花能量主要来源于电容元件, 由此可知, 电容储能直接影响着火花放电, 即电容越大、电容端电压越大, 相应火花放电能量越高, 电路引燃危险也就相对越大。但是复杂本安电路当中不仅存在电容元件, 还有电感元件, 经过上述仿真分析可

知, 电感元件在电路容性引燃特性分析当中的角色更加接近于电阻, 电感的存在分走了原本属于电容元件的端电压, 因此, 随着电感元件参数的增加, 电容元件的端电压不断减小, 对于电路当中电流的阻碍作用也会相应增大, 在电流和电压都有所减少的情况下, 电容储能也就会随之下降, 引燃风险也会不断降低<sup>[5]</sup>。

## 4 结束语

综上所述, 在对复杂本质安全电路放电引燃特性进行分析的过程中, 得到了以下研究成果: 第一, 经过对复杂本质安全电路放电过程的研究和探讨, 明确了电路参数不满足震荡条件时可将复杂电路转换为单一元件电路进行放电储能分析, 有助于简化分析过程, 提升分析效率。第二, 当电路元件符合震荡条件时, 需要针对电路当中不同元器件对于电容放电特性的影响分别进行分析和探讨, 经过仿真模拟分析, 发现复杂电路当中火花放电能量主要来源于电感和电容元件, 电源贡献相对较小, 可以忽略不计, 因此相应电路设计过程中, 应加强对于电感和电容元件的重视。第三, 在满足谐振条件时, 复杂本安电路当中火花放电的电流以及功率都会随着电容的增加而增加, 而且电流和功率的增加速度较快, 可见电容参数是影响火花放电的主要因素。第四, 在满足谐振条件时, 电感参数对于放电电流和功率的影响更接近于电阻, 随着电感性抗的增加, 放电电流和功率上升趋势不断放缓, 而且相应峰值也会随之下降, 电感元件对于容性放电引燃能量有着明显的阻碍作用, 通过提升电感性抗能够起到保护电路, 提高电路安全性能的效果。相信随着对复杂本质安全电路容性放电引燃特性的深入分析和探讨, 复杂本安电路的安全性能将会得到进一步提升。

### [参考文献]

- [1] 康骞, 许春雨, 田慕琴, 等. 基于故障电流变化率的本安短路保护电路设计[J]. 煤炭工程, 2022, 54(3): 22-25.
  - [2] 陈锐, 范志磊, 李欣颖, 等. 本质安全电路电感储能抑制分析[J]. 电气防爆, 2022(1): 4-9.
  - [3] 陈国凡, 王俊浩. 矿用本安电源保护电路优化研究[J]. 电子质量, 2021(12): 29-33.
  - [4] 孟庆海, 田媛. 本质安全电路模拟储能元件潜在危险性分析及其本质安全判据[J]. 电工技术学报, 2022, 37(3): 676-685.
  - [5] 王振龙, 吴冬妮. 复杂本质安全电路容性放电引燃特性研究[J]. 煤矿安全, 2019(4): 4.
- 作者简介: 甘梅(1987-)女, 汉族, 重庆人, 本科学历, 现供职于中煤科工集团重庆研究院有限公司, 工程师, 研究方向为本安电气产品技术审查及检验; 防爆电气检测技术。