

DOI:10.16356/j.1005-2615.2015.06.019

基于流固热耦合模型的并行电弧损伤影响分析

孙晶 王莉 孟珍

(南京航空航天大学自动化学院,南京,210016)

摘要:电弧故障可以释放很高的能量,对周围一定距离的物体和导线造成危害,其产生的热量甚至可以引起火灾。首先,理论分析电弧的能量在管路上的分配及其造成的影响,使用流固热耦合的数值计算方法,用于模拟流体和固体之间的实时热量交换。建立了有限元模型,对电弧损伤影响进行数值仿真研究,建立了电弧能量分配方程。最后,分析了直流 28 V 和交流 115 V 供电条件下的电弧损伤影响程度,验证了所建立的电弧能量分配方程的预测能力。仿真结果表明:电弧故障使得金属发生相变,其损伤影响程度与电弧功率系数、能量耗散因数等有关;当电弧功率增大后,管路相变吸收的能量所占电弧总能量的比重就越大;电弧功率系数是一个与管路和电弧位置间距有关的指数函数。

关键词:电弧损伤;流固热耦合;相变;能量分配

中图分类号: TM645 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2015)06-0917-07

Parallel Arc Damage Analysis Based on Fluid-Solid Thermal Coupled Model

Sun Jing, Wang Li, Meng Zhen

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: The arc fault can release high energy, which poses great harm to surrounding objects and wires within a certain distance, and the generated heat can even cause a fire. First of all, the arc energy distribution and its damage to the pipe are analyzed in theory, and the real-time heat exchange between fluid and solid is simulated by the fluid-solid thermal coupled method. Finite element model is obtained, the arc damage is numerically simulated and the equation of arc energy distribution is obtained. The arc damage under the source voltage of DC28 V and AC115 V is studied and the prediction capability of the equation is verified. The simulation results show that; The arc fault can make the metal have phase transformation; The arc damage has a close relationship with the heat dissipation factor and the fraction of arc power, et al; When the arc power increases, the ratio of the energy used for phase transformation to the arc energy increases; The fraction of arc power is an exponential function related to the distance between the arc and the pipe.

Key words: arc damage; fluid-solid thermal couple; phase transformation; energy distribution

多电全电飞机的发展,必将增加飞机上电线的数量。而由于航空电气系统电缆的复杂特殊,增加了发生电弧故障的隐患,当飞机飞行时,振动导致了电线与框架摩擦,造成电线与接头处松动,或者长时间老化导致电缆绝缘层破裂,这些都容易产生

断续的电弧。电弧具有导电性强、能量集中、温度高的特性。大量的事实表明电弧故障是引起飞机故障、部件失灵甚至飞机起火的重要原因^[1]。近年来,在年久的飞机设备上出现了大量的电弧故障,飞机电缆故障问题已经成为多起悲惨事故发生

基金项目:国家自然科学基金(51277093)资助项目。

收稿日期:2014-08-13;**修订日期:**2015-06-21

通信作者:王莉,女,教授,博士生导师,E-mail:liwang@nuaa.edu.cn。

的原因,引起成百上千小时任务时间的损失^[2]。在电弧的作用下,所有固体、液体和气体都会产生强烈的物理及化学变化,造成设备损坏,经济损失严重,并威胁人类生命^[3]。此外,电弧还伴有强光、气浪推力以及爆炸声响等伤害^[4]。

1989年起,美国联邦航空局(Federal aviation administration, FAA)的老化运输系统制定咨询委员会(Aging transport systems rulemaking advisory committee, ATSRAC)开始研究飞机老化问题,主张提高飞机的安全性并定位长期存在的电气导线互联系统(Electrical wiring interconnection system, EWIS)问题。1996年,环球航空800号班机爆炸解体,这起事故的主要原因是燃料箱发生电弧故障,而以此为代表性的事故受到政府高度重视,促进了EWIS的研究^[5]。因此,EWIS已经成为各行各业的一个研究和发展的方面,并且,飞机布线的安全问题更是受到广泛的关注^[6]。EWIS的部件需要进行损伤模式和影响分析,如导线需要考虑断裂、电弧等因素^[7]。

Lectromec公司与FAA共同研究电弧故障对飞机EWIS的影响,从最初研究导线电弧产生的热量对飞机上管路的影响,深入到分析电弧故障对邻近线束的影响等,并在其开发的EWIS风险评估工具中,继续研究电弧故障对邻近结构、部件、易燃品及非EWIS系统结构的影响等^[8-10]。通常EWIS部件,特别是电气布线与易燃液体(燃油、液压、氧气和水/废水等)的管路和设备之间的电弧故障将导致流体泄漏污染或引发火灾,电弧破坏的水管或废水管也可造成液体进入其他飞机系统并引起危险状况。而电弧故障会引起周围材料的熔化和汽化化学反应,同时电弧燃烧释放的能量使得周围空气温度升高,与空气存在热传导和热辐射的热交换^[11]。国内最早是从20世纪90年代开始主要研究开断电弧过程中触头的温度分布,电弧对触头材料的侵蚀作用,电弧对各种材料触头的影响,以及电弧能量对金属摩擦磨损性能的影响等^[12-14]。国内未出现研究电弧故障对飞机EWIS结构的影响。

基于此,本文借助于有限元分析软件,建立了考虑流、固和热三场耦合的数值计算模型,对电弧损伤影响进行量化分析。首先对电弧损伤影响进行了理论分析,包括3部分:电弧数学能量、电弧能量分配和电弧能量影响分析;然后,建立考虑流、固和热三场耦合的有限元模型,并对直流28V及交流115V供电电压下的并行电弧开展故障仿真分析;最后,建立了电弧能量分配方程,在此基础上对

电弧能量影响程度进行了深入量化分析。

1 电弧损伤影响理论分析

1.1 电弧数学能量分析

根据电弧故障发生时电压、电流等参数,确定电弧的功率,考虑布线系统的断路器类型,确定电弧持续的时间,最后确定电弧产生的能量。

本文是对并行电弧进行仿真分析,假设 P_{arc} 为电弧功率, V_{arc} 为电弧电压, I_{arc} 为电弧电流, V 为供电电源电压, I 为发生并行电弧故障后电源输出电流, R_{line} 为线路电阻,则电弧功率可表示为

$$P_{arc} = V_{arc} I_{arc} = (V - IR_{line}) I_{arc} \quad (1)$$

并行电弧相当于一个与负载并联的阻性负载,当并行电弧发生后,负载相当于被短路,此时电弧电流 I_{arc} 接近于电源输出电流 I 。考虑电弧故障发生后最严重的影响,假设线路电阻 R_{line} 为 $0\ \Omega$,则电弧功率等于电源电压 V 与电弧电流 I_{arc} 的乘积。

电弧故障发生后,可能在几微秒的时间内达到 $4\ 000\sim 50\ 000\ K$ 的高温^[15]。飞机上所采用的断路器为热保护断路器,由于并行电弧电流大于额定电流,因此可以采用标准 $25\ ^\circ C$ 时热保护曲线的跳闸保护时间作为电弧燃烧持续最长时间。热断路器过流保护曲线的一个典型方程可表示为^[9]

$$f(x) = \exp\{K \exp[-a \cdot b \ln(x)]\} + F \quad (2)$$

式中: K, a, b, F 为常数; t 为过流时间即电弧燃烧的时间; $f(x)$ 为故障电流与额定电流的比值。其中, $K = 17.036\ 261\ 43, a = 1.012\ 354\ 127, b = 0.106\ 521\ 564, F = 112.566\ 701$ 。在确定 $f(x)$ 后,据式(2)可得出电弧燃烧的时间,则电弧释放的总能量可以由电弧功率和该时间的乘积得到。

1.2 电弧能量分配分析

在此以电缆电弧故障对旁边的管路损伤影响分析为例,示意图如图1所示。考虑电弧故障对旁边的管路损伤影响达到最大,故假设电弧故障位于管路的正下方。电弧故障发生位置与管路之间存在间距,电弧故障发生后,产生大量的热,周围空气温度急剧升高,受热气体上升,冷空气下降,形成浮力驱动流动现象,其中有一部分电弧能量传输到管路中去,使得管路温度升高。

电弧产生的总热量等于热传导、热对流和热辐射的热量之和,但不是所有的热量都传输到管路中。管路吸收的电弧能量与电弧功率、电弧燃烧的时间以及管路与电弧发生位置的间距有关,也与管路的材料性质有关。将电弧释放的总能量乘以电弧功率系数 γ ,对管路吸收的能量进行修正,则该

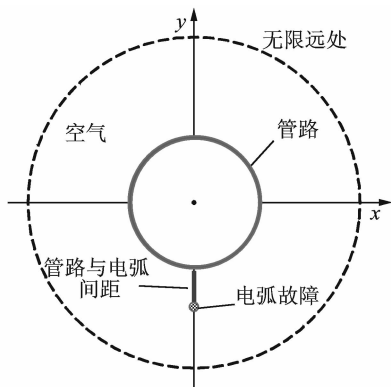


图 1 电弧损伤影响模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of arc damage effect model

能量为

$$E = \gamma P_{\text{arc}} t \quad (3)$$

式中: E 为管路吸收的能量。 γ 的大小与管路和燃弧电缆的位置有关,与电弧的物理现象无关。当 $\gamma=1$ 时,表示电弧燃烧的热量全部被管路吸收。

当管路的温度升高到熔点时,材料就会发生相变,使管路受损。电弧发生后,管路发生相变吸收的能量为

$$E_p = \frac{\gamma P_{\text{arc}}}{\alpha} (1 - e^{-\alpha t}) \quad (4)$$

式中: E_p 为实际使金属管路发生相变的能量; α 为能量耗散因数,大小与管路的几何形状及材料特性等有关。

1.3 电弧能量影响分析

电弧释放的能量使得管路受损,材料发生相变,而材料相变要考虑潜热的影响^[16]。温度达到熔点或沸点后,在此处积累能量,当能量超过潜热时,温度才上升。在此,电弧能量的影响可用电弧发生后材料熔化、汽化的体积表示。材料熔化部分的质量和体积分别表示为

$$M = \frac{E_p}{(T_m - T_a)C + H_{\text{fus}}} \quad (5)$$

$$V_{\text{fus}} = M/\rho \quad (6)$$

式中: M 为管路熔化部分的质量; T_m 为熔化温度; T_a 为周围环境的温度; C 为热容; H_{fus} 为熔化热; ρ 为密度; V_{fus} 为管路熔化部分的体积。

若将式(5,6)中的熔化热、熔化温度换成汽化热、汽化温度,就得到管路汽化部分的质量和体积。

2 电弧损伤影响数值计算

2.1 有限元模型建立

理论分析难以得到 γ 和 α 的具体数值,考虑采用有限元分析进行求解。有限元分析能够利用数学

近似的方法对真实物理情况进行模拟,计算精度高。

电弧燃烧时的能量传输包括了热传递的 3 种方式:传导、对流和辐射。固体管路模型用来模拟热传递和相变。相变是指物质从一种基本相变成另一种基本相,通过定义材料随温度变化的焓来考虑相变吸收的潜热^[17]。当管路发生相变时,相变区域温度保持不变,而额外吸收潜在热量。流体空气模型用来模拟热传导、热辐射和浮力驱动流动。在工程计算中,要充分考虑对流换热和辐射传热的影响^[18],实际中存在着许多流动-传热-变形耦合的问题,流体流动和传热会引起固体结构的变形,反过来,固体结构的变形又会改变流体流动和传热特性的变化^[19],为了简化模型和考虑管路损伤最严重的情况,在仿真之前,做出如下假设

- (1) 不考虑电弧能量传输到导线中去;
- (2) 不考虑绝缘层对电弧能量分配的影响;
- (3) 不考虑管路在相变时受到的重力作用;
- (4) 不考虑相变后气体液体的流动情况;
- (5) 不考虑管路内部的能量分配;
- (6) 电弧位置处于管路的正下方。

表 1 为管路的材料及尺寸,空气域模型的尺寸如表 2 所示。图 2,3 分别为管路和空气域的网格模型。

表 1 管路的材料及尺寸

Tab. 1 Material and size of pipeline

mm			
材料	外径	厚度	长度
AL6061-T6	25.4	2.108	100

表 2 空气域尺寸

Tab. 2 Size of air domain

mm		
内径	外径	长度
25.4	254	100



图 2 管路的网格模型

Fig. 2 Mesh model of pipeline

2.2 数值模拟方法

电弧故障对管路的影响需要考虑固体的热传导,空气的流动与传热及固体与流体之间的传热,这是一个温度场与流场的多场耦合问题。早期人们将固体域和流体域分开求解,一般将流固交界面

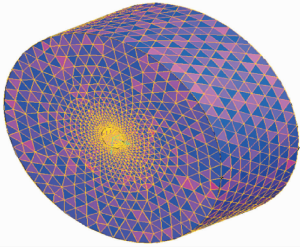


图 3 空气域的网格

Fig. 3 Mesh model of air domain

一侧认为是绝热,或者人为给定热边界条件,虽然有效地避免了二者耦合带来的复杂运算,但同时也牺牲了求解精度^[20]。在此,采用有限元分析软件,运用流、固、热三场耦合的方法对电弧损伤影响进行更为精确的分析研究。

涉及到耦合的问题,其核心是数据、载荷传递的方向问题。流固热耦合问题一般分为两类:流固单向热耦合和流固双向热耦合。双向热耦合的优点是可以实现流体和固体之间的实时热量交换,其仿真分析结果比单向热耦合更加接近实际情况。在此,采用流体分析软件 CFX 与固体分析软件 ANSYS 相结合的方法实现流固热耦合仿真分析。CFX 用于模拟热传导、热辐射和浮力驱动流动模型^[21]。

图 4 为 CFX-ANSYS 的双向耦合框架图。CFX-ANSYS 的基本方法:形成 2 套网格和边界,其中包含了特殊定义的耦合边界、状态和参数,耦合软件通过定义耦合边界来传递耦合参数,并指挥流体、固体求解器计算,依次实现双向耦合分析。管路和空气域耦合边界面上的网格不必保持一致,因为耦合参数是通过插值传递的,所以耦合边界上不要求网格的连续性。除了耦合边界之外,管路的边界为绝热的,空气域的边界为一个开放的边界。固体网格是 ANSYS Mechanical 的前处理文件,流体网格来自于 Gambit 软件。当开始求解时,会同时打开固体模型求解器 ANSYS-Solver 和流体模型求解器 CFX-Solver,按照求解器求解的先后顺序进行求解,分别计算流体和固体的温度场,在每个时间步长的迭代计算完成后,交换数据,再在下一个时间步长内,继续求解,直至仿真结束。

2.3 电弧损伤影响数值模拟结果分析

本文主要对电弧故障位置与管路间距为 1 和 2 mm 的情况进行数值模拟,计算得到了管路熔化和汽化的体积。每种距离下,电源电压分直流 28 V,交流 115 V 两种情况,额定电流分 10,15 A 两种情况,故障电流分 3 种情况,故障电流是根据文

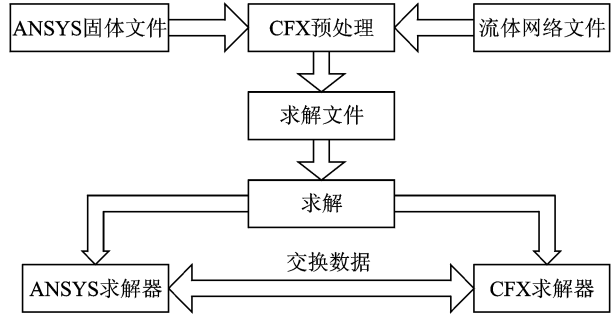


图 4 双向耦合框架图

Fig. 4 Frame diagram of two-way coupling

献^[22]来取值。

图 5~7 分别为某一情况下管路的 3 种温度云图。图 5 为管路的温度云图,图 6 中红色部分表示管路温度上升的区域,图 7 中红色部分表示汽化区域,绿色表示熔化区域。

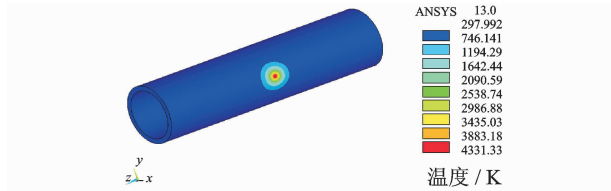


图 5 管路的温度云图

Fig. 5 Temperature contour of pipeline

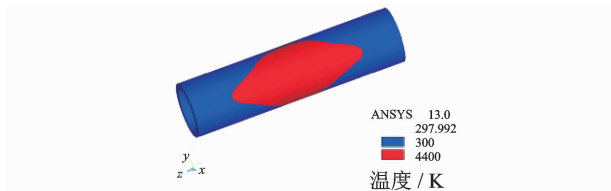


图 6 管路受热区域的云图

Fig. 6 Contour of heated pipeline

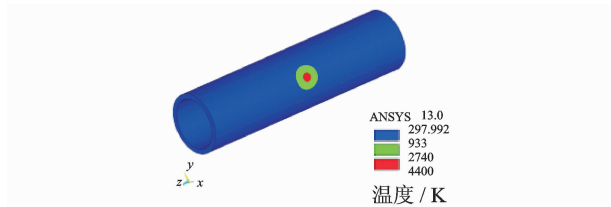


图 7 管路的相变云图

Fig. 7 Phase transformation contour of pipeline

通过仿真计算可得到所有网格单元的体积和温度,再经式(5,6)计算,得到熔化的体积、汽化的体积和管路发生相变的能量。管路损伤体积直方图如图 8 所示。

从图 8 可以看出,在直流 28 V 下,管路没有发生汽化的相变,这是因为电弧发出的功率还不足以在电弧燃烧的时间内使得管路汽化,此时,相变的

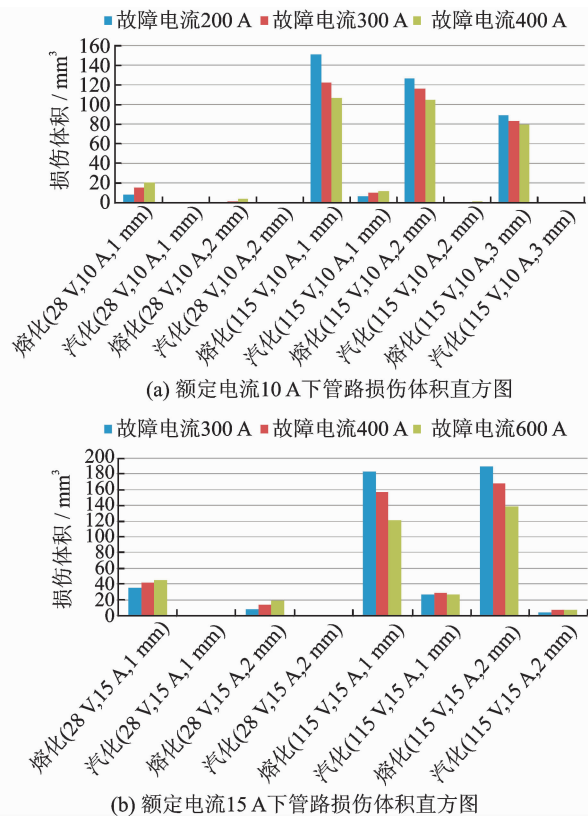


图 8 管路损伤体积直方图

Fig. 8 Histogram of damaged volumn

能量越大,熔化的体积也越大。当只有距离增大时,相变的能量减小,反映了电弧功率系数与距离有关,且距离越大,系数越小。而当距离一定时,由于电弧燃烧的时间是由热保护曲线计算得到的,虽然电弧功率减小,但时间增大很多,电弧产生的总能量也增大。电弧燃烧时间对总能量的影响程度比电弧功率对其影响的程度更大,然而,管路发生相变的能量却随着电弧总能量的增大而减小。由此可见,在直流 28 V 下,管路发生相变吸收的能量主要与电弧功率有关,功率越大,管路相变吸收的能量就越大,熔化的体积也越大。

在交流 115 V 下,同样当只有距离变大时,管路相变的能量变小。当距离一定时,电弧燃烧时间越长,电弧功率越小,电弧产生的总能量越大,管路相变的能量也越大。这是因为在 115 V 电压下,相对于电弧功率而言,电弧燃烧时间对相变能量影响程度更大。由于电弧功率很大,使得管路发生汽化,虽然当电弧功率减小使得管路汽化的体积减小,但电弧燃烧时间变长使得熔化的管路部分体积增大得很多,因此,管路相变的能量也越大。

由上述分析可知,在这两种电压下,管路相变的能量随着电弧总能量的变化趋势不一样,而电弧总能量由电弧功率与电弧燃烧时间的乘积得到,根

据式(4),管路相变的能量也与很多因素有关,因此,管路相变的能量与电弧总能量变化趋势可能不一样。图 9 是统计的管路相变能量所占电弧产生总能量百分比的直方图。从图 9 中看出,无论是直流 28 V,还是交流 115 V,当电弧功率增大后,管路相变吸收的能量所占比重呈增大的趋势,且距离越大,比重就越小。

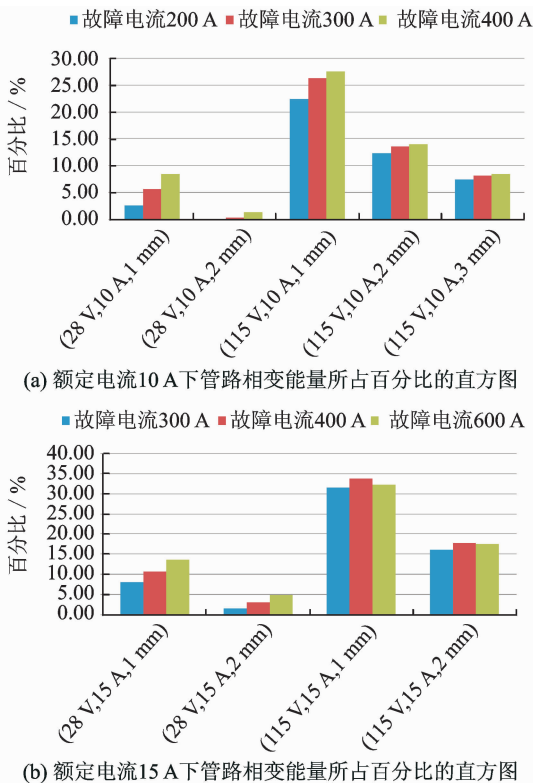


图 9 管路相变吸收的能量占电弧总能量百分比的直方图

Fig. 9 Histogram of ratio of energy used for phase transformation to arc energy

参阅 FAA 的研究报告^[9]中的实验数据,直流 28 V 下,额定电流 10 A,故障电流在 200 A 左右时,管路熔化的体积为 9.3 mm³。而在同样的条件下,仿真得到管路熔化的体积为 7.88 mm³,因为文献[9]中作用对象是平板,不是圆环柱体,几何形状的不同会使得传输的能量不同;而且文献[9]中电弧热源作用在平板上,热源与平板之间没有空气,电弧产生的一部分能量会直接传递给平板,则传输到平板的能量必然比仿真中传输到管路的能量要多。因此,仿真结果比文献[9]的实验结果小是合理的,这就从侧面说明所建立的基于有限元分析的流固热场耦合仿真模型的正确性。

2.4 电弧损伤影响数学方程的建立

利用 MATLAB 软件,按式(4)对管路与电弧间距为 1 mm 的所有仿真数据处理,得到此时的电

弧功率系数 $\gamma=0.3192$, 能量耗散因数 $\alpha=1.2638$ 。同样对间距为 2 mm 的数据处理得到, $\gamma=0.1685$, $\alpha=1.2706$ 。能量耗散因数 α 与管路的形状和材料有关, 在间距 1 和 2 mm 处, α 相差很小, 当管路形状和材料不变时, α 就应该是一个常数。因此, 两次结果中得到 $\alpha=1.27$ 是合理的。

按式(4)计算得到在间距 3 mm 时, 电弧功率系数 γ 的值。经计算, γ 的值依次为 0.084, 0.087 和 0.088, 取平均值, 得到在间距 3 mm 时, $\gamma=0.086$ 。将 3 个距离下的 γ 值汇总到表 3 中。

表 3 γ 值Tab. 3 Values of γ

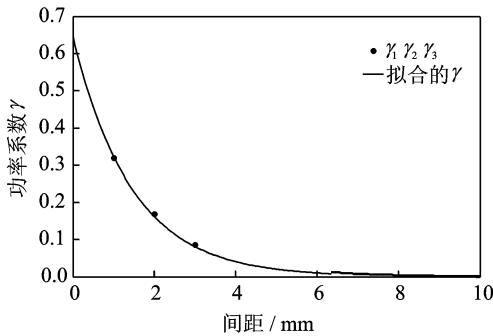
d/mm	1	2	3
γ	0.3192	0.1685	0.0860

由表 3 得到, $\gamma_2/\gamma_1 \approx 0.5$, $\gamma_3/\gamma_2 \approx 0.5$, 其中, $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ 分别为间距 1, 2, 3 mm 时 γ 的值。假设功率系数 γ 是一个底数为 0.5, 与管路和电弧位置间距有关的指数函数, 可表示为

$$\gamma = \lambda \left(\frac{1}{2}\right)^d \quad (7)$$

式中: d 为管路与电弧位置间距; λ 为该函数的系数。利用最小二乘法拟合得到 $\lambda=0.6475$, 而误差的平方和为 0.000902, 说明了假设的合理性。功率系数 γ 随 d 的变化曲线如图 10 所示, γ 可表示为

$$\gamma = 0.6475 \left(\frac{1}{2}\right)^d \quad (8)$$

图 10 功率系数 γ 随间距变化曲线Fig. 10 Curve of fraction γ changing with distance

式(8)在间距 1~3 mm 的范围内有较高的准确度, 而对其余间距范围内的结果及其变化规律有一定的参考价值。将 α 和 γ 代入式(4), 则管路发生相变需要的能量为

$$E_p = \left(\frac{\gamma P_{\text{arc}}}{1.27}\right) (1 - e^{-1.27d}) \quad (9)$$

按式(9)计算得到了管路相变吸收的能量, 再按式(5, 6)等计算这些能量全部用来汽化的体积和

全部用来熔化的体积。在管路相变吸收的能量中, 部分能量使得管路发生汽化, 部分使得管路发生熔化, 而熔化体积和汽化体积多少未知, 但是, 实际管路损伤的总体积应介于全部用来汽化的体积和全部用来熔化的体积之间。在交流 115 V, $I=10$ A, $d=2$ mm 情况下, 仿真结果与计算结果的对比如图 11 所示。由图 11 比较可知, 计算得到的汽化体积和熔化体积曲线在三维有限元模型仿真得到的管路损伤体积的两侧, 可见所建立的电弧损伤影响数学方程是合理的, 使用它可以快捷方便的预测出电弧故障对周边的管道的损伤程度。

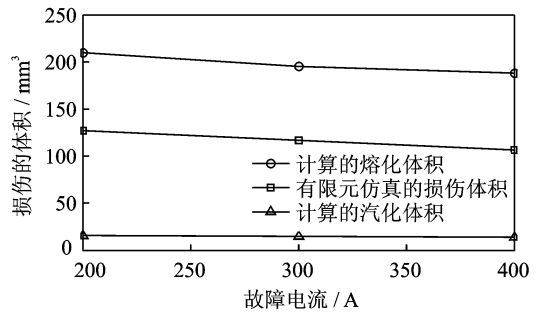


图 11 仿真结果与计算结果的比较

Fig. 11 Comparison of simulation results and calculation results

根据式(9), 可以确定电弧发生后管路吸收的相变能量。假设电源电压为 115 V, 额定电流为 10 A, 故障电流为 200 A, 间距 d 为 3 mm, 则可通过式(9)计算得到此时的相变能量为 264 J。在同样条件下, 利用 ANSYS 软件采用流固热耦合方法仿真分析得到的结果为 274.912 J。由此可见, 所建立的电弧能量分配方程可以预测出电弧损伤对管路的损伤影响程度。

3 结 论

本文采用流固热耦合的方法, 分析了直流 28 V 和交流 115 V 供电条件下的电弧损伤对金属管路损伤的影响, 建立了电弧能量分配方程, 可以用来预测电弧损伤对金属管路损伤的影响程度。由分析结果可得如下结论:

(1) 电弧能量分配方程与电弧功率、电弧燃烧时间、电弧功率系数和能量耗散因数有关。

(2) 电弧功率增大, 管路相变吸收的能量占电弧总能量的比重也增大, 距离越长, 比重越小。

(3) 电弧功率系数 γ 是与管路和电弧位置间距 d 有关的指数函数, d 越大, γ 越小, 金属相变的损伤也越小。能量耗散因数 α 与管路的形状及材料

有关,而与电弧本身的性质无关。

参考文献:

- [1] Spyker R, Schweickart D L, Horwath J C, et al. An evaluation of diagnostic techniques relevant to arcing fault current interrupters for direct current power systems in future aircraft[C]// Proceedings of Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Expo. [S. l.]: IEEE, 2005: 146-150.
- [2] Furse C, Haupt R. Down to the wire[J]. IEEE Spectrum, 2001, 2(2): 34-39.
- [3] Charles J K. Electromagnetic radiation behavior of low-voltage arcing fault[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(1): 416-423.
- [4] 诸然, 李晓光. 电弧风险分析研究[J]. 电气应用, 2013(15): 43-47.
Zhu Ran, Li Xiaoguang. Analysis of arc risk[J]. Electrotechnical Application, 2013(15): 43-47.
- [5] Moffat B G, Desmulliez M P Y, Brown K, et al. A micro-fabricated current sensor for arc fault detection of aircraft wiring[C]// Electronics System-Integration Technology Conference (ESTC). Greenwich, England: IEEE, 2008: 299-304.
- [6] Desai C, Brown K, Desmulliez M, et al. Selection of wavelet for de-noising PD waveforms for prognostics and diagnostics of aircraft wiring[C]// Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Quebec, Canada: IEEE, 2008: 17-20.
- [7] Moffat B G, Abraham E, Desmulliez M P Y. Failure mechanisms of legacy aircraft wiring and interconnects[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(3): 808-822.
- [8] Potter T E, Lavado M P E. Arc fault circuit interruption requirements for aircraft applications[R]. [S. l.]: Texas Instruments, 2003.
- [9] Linzey W G, Traskos M G, Mazzuchi T A. Development of the electrical wiring interconnection system risk assessment tool[R]. DOT/FAA/AR-09/47, 2010.
- [10] Kurek J, Bernstein R, Etheridge M, et al. Aircraft wiring degradation study[R]. DOT/FAA/AR-08/2, 2008.
- [11] Zhang X, Pietsch G, Zhang J, et al. Fundamental investigation on the thermal transfer coefficient due to arc faults[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2006, 34(3): 1038-1045.
- [12] 荣命哲, 王其平. 电弧作用下触头的温度分布及材料侵蚀的计算[J]. 江苏电器, 1990(3): 22-29.
Rong Mingzhe, Wang Qiping. Contact temperature distribution and material erosion calculations under the action of arc[J]. Jiangsu Electrical Equipment, 1990(3): 22-29.
- [13] 李靖, 马志瀛, 李建明, 等. 50 Hz 和 400 Hz 下 Ag 基合金电触头材料的电弧侵蚀[J]. 电工技术学报, 2010, 25(8): 1-5.
- Li Jing, Ma Zhiying, Li Jianming, et al. Arc erosion of silver-based alloy electrical contact materials at 50 Hz and 400 Hz[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(8): 1-5.
- [14] 王海涛, 王景芹, 朱艳彩. Bi 对 AgSnO₂ 触头材料接触电阻的影响[J]. 电工技术学报, 2014, 29(5): 265-270.
Wang Haitao, Wang Jingqin, Zhu Yancai. Influence of Bi to AgSnO₂ material's contact resistance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(5): 265-270.
- [15] 王其平. 电器电弧理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.
- [16] 王立军, 贾申利, 刘宇, 等. 纵磁下真空电弧阳极热过程的仿真[J]. 电工技术学报, 2011, 26(3): 65-73.
Wang Lijun, Jia Shenli, Liuyu, et al. Simulation of anode thermal process in vacuum arc under axial magnetic field[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(3): 65-73.
- [17] 吴细秀, 李震彪. 电器电极材料喷溅侵蚀的理论计算[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 96-101.
Wu Xixiu, Li Zhenbiao. Theoretic analysis on sputter erosion of electrode[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(6): 96-101.
- [18] 张勃, 吉洪湖, 张晶, 等. 燃烧室多斜孔壁传热特性一维数值分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2013, 45(5): 647-651.
Zhang Bo, Ji Honghu, Zhang Jing, et al. One-dimensional numerical analysis of heat transfer characteristics in effusion cooling combustor[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2013, 45(5): 647-651.
- [19] 李娜, 吉洪湖. 基于 CBS 有限元的流动-传热-变形耦合计算方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2008, 40(5): 622-626.
Li Na, Ji Honghu. Finite element method based on CBS for fluid-thermal-structure interaction[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2008, 40(5): 622-626.
- [20] 尹钊, 方祥军, 刘思永, 等. 超跨音内冷涡轮流热耦合数值模拟研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(14): 114-120.
Yin Zhao, Fang Xiangjun, Liu Siyong, et al. Conjugate heat transfer analysis of transonic internally cooled turbine blade[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(14): 114-120.
- [21] 谢龙汉, 赵新宇, 张炯明. ANSYS CFX 流体分析及仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012: 4-5.
- [22] Linzey W G, Traskos M G, Bruning A. M. et al. Progress in developing a software based arc damage modeling[C]// 10th Aging Aircraft Conference. Phoenix, USA: [s. n.], 2008: 1-17.

