

高压喷射式熔断器的温升试验与仿真实验验证

徐广令¹, 翁颖蕾², 翁剑清²

(1. 厦门理工学院 电气工程与自动化学院, 福建 厦门 361024;
2. ABB(中国)有限公司中压产品技术中心, 福建 厦门 361006)

摘要 由于高压喷射式熔断器是靠发热元件熔体来开断电路的, 其发热计算对于熔断器的研发设计和性能改进都具有重要的意义。高压喷射式熔断器各部分的温升是兼具发热和散热的一个复杂过程, 很难建立一个能考虑所有影响因素的解析公式, 通过高压喷射式熔断器的温升试验和仿真研究, 验证了各部分的温升特点及温升值最高点。

关键词: 喷射式熔断器; 温升; 试验标准; 仿真

中图分类号: TM563.2

文献标识码: A

文章编号: 1671-5322(2017)02-0026-06

温升试验是高压开关设备验证其载流能力的重要试验, 用于考核导电回路通以额定电流并持续一段时间后的发热状况(温度升高), 是高压开关类国家标准规定的型式试验项目^[1], 也是产品改型、材料更新、新产品定型的主要考核项目, 更是生产过程中工厂定期或周期性检查产品的必试项目^[2]。高压喷射式熔断器的工作原理就是靠熔体的发热、升温、熔化来开断电路的, 其温升试验尤其重要。

当高压喷射式熔断器通过正常工作电流时, 由于电阻损耗、铁磁损耗、介质损耗^[3], 使电能转变为热能, 其中一部分散失到周围介质中, 一部分加热载流导体使其温度升高^[4]。载流导体温度升高的多少由发热和散热两方面因素决定, 同时也与载流体通过的电流大小、载流回路截面和材料、机械结构、零部件接触面的接合质量和产品装配质量等因素有关^[5]。目前国内外有关喷射式熔断器研究的文献资料还比较少, 本文将从熔体发热本质、温升试验方法、仿真等方面对其进行分析探讨。

1 喷射式熔断器温升试验

1.1 熔体发热的本质

对于熔断器温升试验而言, 最关注的温升测

试点就是熔体的温升, 因为熔体的性能决定熔断器的开断性能。由于熔体发热的实质就是热平衡的过程^[6], 为了从热平衡的角度分析熔体熔断的特征, 可把熔体看成形状均匀, 由无穷多个等阻值的小电阻串联组成, 如图1所示。

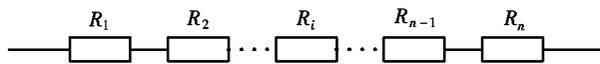


图1 等效示意图

Fig. 1 The equivalent schematic

熔断器通额定电流 I_n 正常运行时, 由于 I_n 小于熔断器的最小熔化电流 I_R , 熔体将长期工作, 不会熔断, 电流在任一段小电阻上产生的热量为:

$$Q_i = I_n^2 R_i t$$

任一小电阻的热平衡方程为:

$$Q_i = cm \Delta \tau_i + Q_x$$

式中: c 为熔体材料的比热, 为常数, $J/(kg \cdot K)$; m 为任意小电阻的质量, 为常数, kg ; Q_x 为任意小电阻散失的热量, J ; $\Delta \tau_i$ 为任一小电阻的温升, K 。

由于 $R_1 = R_2 = \dots = R_{n-1} = R_n$, 则电流在各个小电阻上产生的热量相等, 即 Q_i 为一常数, 因此由 $\Delta \tau_i = (Q_i - Q_x)/(cm)$ 可知, 任一小电阻的温升取决于其散失热量的多少, 从而不同品牌不同材质的

熔体在同样条件下,温升会差别很大。另外,对各个小电阻而言,热量也会从温度高的电阻向温度低的电阻传递,由于两端向外传热的路径比较短,所以整个熔体中间部分的温度会比较高。

1.2 试验方法

(1) 试验条件: 试验电流最大偏差不得超过 +2%; 电流波形为正弦波; 电源频率偏差 -5% ~ 2%; 在试品端子 1 m 处导线的温升与相应端子的温升差不超过 5 K; 试验环境温度 0 ~ 40 °C; 试验环境风速对户内产品不大于 0.15 m/s, 对户外产品不大于 0.5 m/s。当试验条件符合以上规定且温升测试符合标准, 则认为试验有效。

(2) 试验线路: 用一调压变压器和大电流变压器组成试验回路, 给试品供给所需的工作电流。试品的安装接线方式与在实际电力系统中工作的情况相同, 并且要处于最不利的位置上。图 2 为试验回路的原理图。

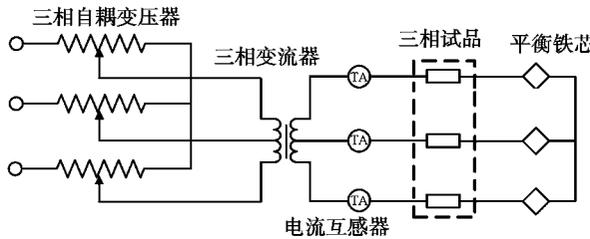


图 2 温升试验回路原理图

Fig. 2 The schematics of temperature test circuit

(3) 温度测量: 温度的测量一般采用铜—康铜热电偶法进行, 铜—康铜热电偶以其灵敏度高、稳定性好、可靠性高、价格低廉和自动控制等优势, 适用于远距离测温。目前, 高压电器产品大部分都采用这类热电偶, 其原理如图 3 所示。采用铜—康铜热电偶丝测试温升点时, 测试端要可靠接触(固定)在被测试点, 一般采用将电偶丝粘贴、锡焊、绑扎或钻孔固定到被测试处。通常粘贴多用于壳体表面等部位测试, 有些较小的测试点不方便粘贴就绑扎, 而钻孔则会对设备本身造成一定的损坏。

(4) 温升测试点的布置及埋线方法: 对高压电器进行温升实验时, 应按照相应的标准规定的温升限值进行。对重要关键零部件布置测量点时, 要注意各零部件允许的温升限值有不一样的要求, 比如, 触头和接线端子不一样, 镀银和镀镍不一样, 在空气中与油中不一样。另外还要注意给定的限值是温度还是温升, 两者是完全不同的概念。

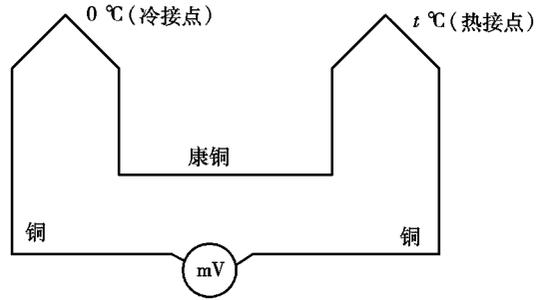


图 3 铜—康铜热偶原理图

Fig. 3 The schematics of copper-constantan thermocouple

在温升试验中, 有以下部件需要布点:

- (1) 相应的标准中提到有温升限值的所有部件, 如出现在被测的产品上, 都需要布置测试点;
- (2) 如没有出现在标准中, 但元器件本身有 T-mark 的, 也需要布置测量点;
- (3) 在某些实验中涉及到材料测试, 并且要参考其温升值以获得其温升特性的地方, 也要布置测量点, 如熔断器的熔体。

在布置测量点的过程中要注意, 电器关键零部件的进出线端、母线连接处, 电源进线端、手柄、外壳等都是必须布置测量点的地方。另外, 在温升试验中往往都要求把测量点布置在最恶劣的位置, 也就是温升可能最高的位置, 但对于该位置的选择是一个比较难以把握的问题, 实验经验是一方面, 对于被测量部件的了解、丰富的背景知识也是关键。

图 4 是高压喷射式熔断器的温升试验测试点, 图 5 为 3 个高压喷射式熔断器样机并连接线示意图。

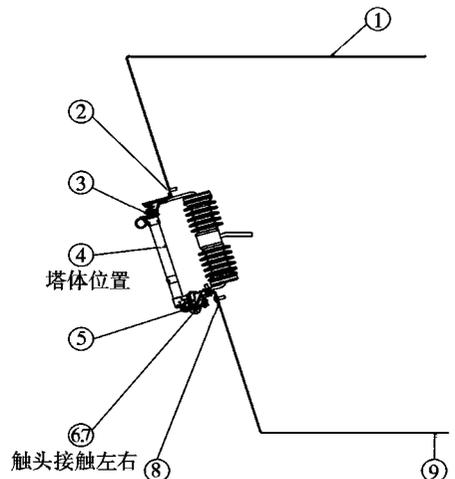


图 4 高压喷射式熔断器温升测试点
Fig. 4 The temperature test point for high-voltage expulsion fuse

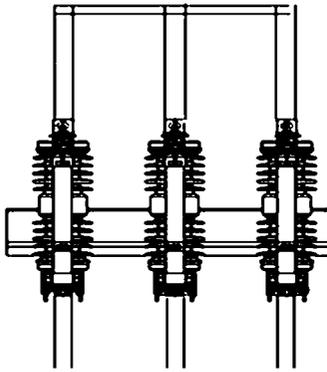


图 5 温升试验接线示意图

Fig. 5 The diagram of wiring for temperature rise test

表 1 各测试点允许温升值及说明

Table 1 Allowable temperature rise and illustration of each test point 单位:K

测试点	测温部位	材质	镀层	允许温升	说明
1	连接铜排 1 m 处	铜		-	
2	接线端子	铜	银	65	螺栓连接铜排
3	上触头	铜	银	65	连接熔管的触头
4	熔体	-		-	
5	接线端子	铜	银	65	紧固铜辫子
6	左下触头	铜		50	熔管下动触头连接处
7	右下触头	铜		50	
8	接线端子	铜	银	65	螺栓连接铜排
9	连接铜排 1 m 处	铜		-	

对某型号的高压喷射式熔断器,采用 3 种不同品牌不同材质的熔体(1、2、3 号样机熔体材料的主要成分分别为银、铜、锡),三相并联后同时做温升试验,各测试点的温升值如表 2 所示,测试前后回路电阻及其变化见表 3。

表 2 18.8 °C 时样机各测试点温升值

Table 2 The temperature rise of each test point of the prototype at 18.8 °C 单位:K

测量点编号	1 号样机	2 号样机	3 号样机	允许温升
1	7.5	7.5	9.6	
2	11.7	12.3	12.0	65
3	24.7	23.3	24.8	65
4	84.0	94.2	113.0	
5	22.0	26.9	26.4	65
6	19.7	23.4	23.7	50
7	20.7	22.8	23.4	50
8	9.6	9.5	8.8	65
9	5.9	6.6	6.0	

由表 2 可以看出,3 种不同熔体的熔断器在同样的试验条件下,除 4 号测试点熔体的温升较高外,其他各测试点温升较低,且差别不是特别

1.3 温升试验分析

根据国标 GB/T 15166.3—2008^[1]、GB/T 11022—2011^[7],高压喷射式熔断器各温升测试点允许值及说明如表 1 所示。

某型号的高压喷射式熔断器是依靠熔体发热熔断来开断电路的,熔体是主要的发热元件,故对熔体必须设置测试点。由于不同品牌的熔体材质不一样,所以标准中没有具体考核熔体温升的上限值。表 1 中 1、9 号的测试点设置在连接铜排的 1 m 处相当于参考点,虽然标准中也没有规定温升上限值,但是 1 号和 2 号、8 号和 9 号之间的温差不能超过 5 K。

大;4 号测试点中,3 号样机的熔体温升值最高,达 113.0 K。

表 3 18.8 °C 时样机温升测试前后回路电阻及其变化
Table 3 The loop resistance and its change before and after temperature rise of prototype at 18.8 °C

项目	1 号样机	2 号样机	3 号样机
实际通电流/A	109	110	109
实验前回路电阻/ $\mu\Omega$	1 360	1 691	1 457
实验后回路电阻/ $\mu\Omega$	1 295	1 640	1 467
实验前后回路电阻变化值/ $\mu\Omega$	-65.00	-51.00	10.00
实验前后回路电阻变化率/%	-4.78	-3.01	0.60

2 仿真分析

从温升试验结果看,熔体处的温升是所有测试点温升最高的。为了试验的正确性,利用多物理场耦合软件 COMSOL Multiphysics,对高压喷射

式熔断器熔体的筒三维模型进行热电耦合有限元仿真分析。

COMSOL Multiphysics 是一款基于有限单元

法的数值仿真软件,它以一般偏微分方程或偏微分方程组为基础建立模型,具有较强的计算性能

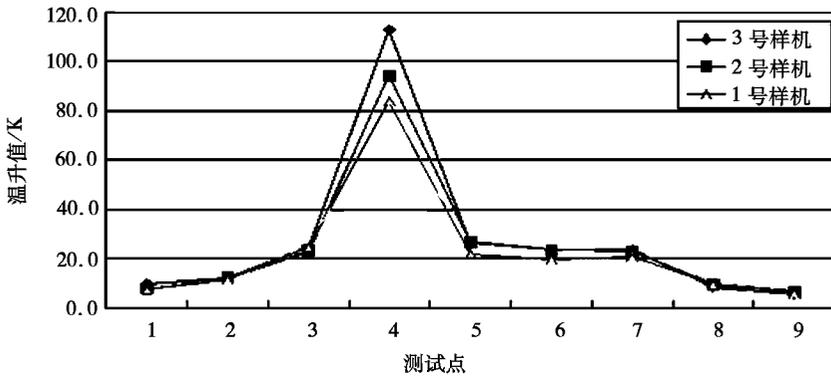


图 6 各样机测试点温升折线图

Fig. 6 Temperature rise line chart of each test point of prototype

和多物理场直接耦合能力,是目前比较流行的多场耦合计算平台。本文利用 COMSOL Multiphysics 传热模块中的焦耳热,来求解电流产热达到稳定状态后的温度分布,其建模步骤如下:

(1)由 SolidWorks 软件导入熔断件的三维几何模型;

(2)在焦耳热模块下设定熔断件上端为电流流入端,通入 1.1 倍额定电流 110 A,将铜辫子末端连接外部接线端子设置为接地端;

(3)以熔断件表面与周围空气的自然对流换热系数为边界条件,环境温度设置为 20 °C,3 种熔断件熔体材料的主要参数如表 4;

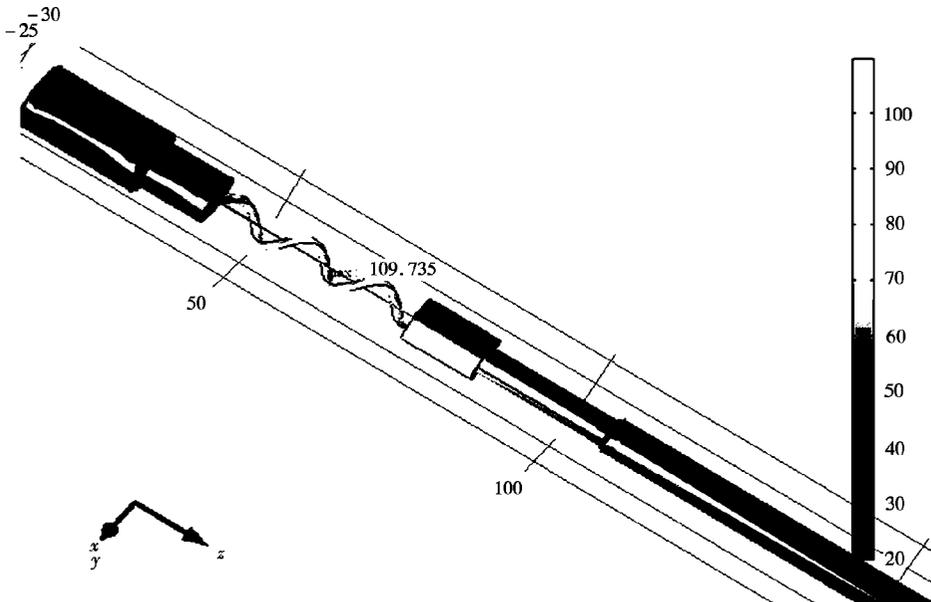
表 4 3 种熔体材料的主要参数

Table 4 The main parameters of 3 melt materials

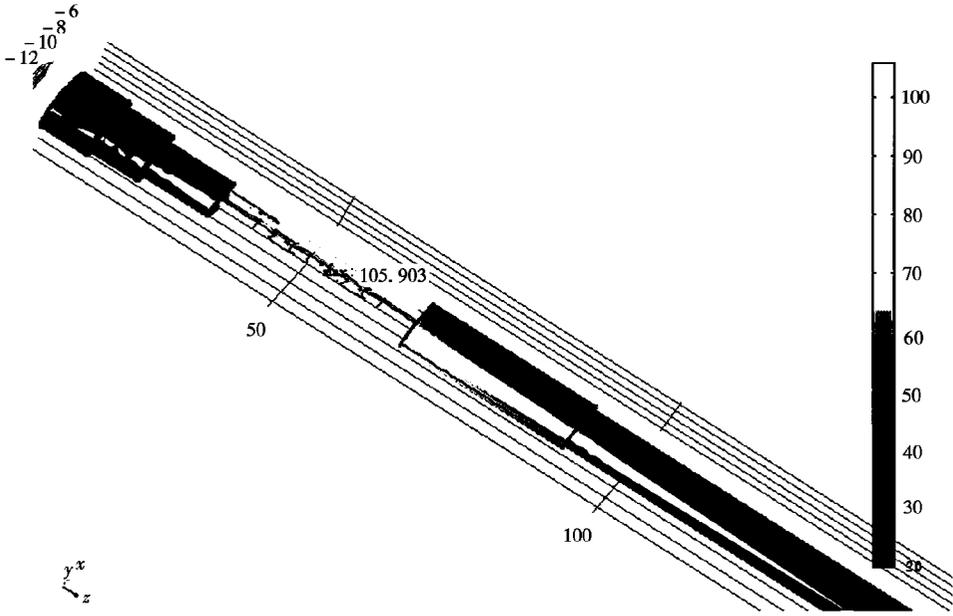
物理量	银	铜	锡
热导率/(W · m ⁻¹ · K ⁻¹)	429	401	67
比热容/(J · kg ⁻¹ · K ⁻¹)	232	385	230
密度/(kg · m ⁻³)	10 490	8 700	7 160
熔点温度/°C	960	1 087	232

(4)对熔断件的三维几何模型进行自由四面体网格划分;

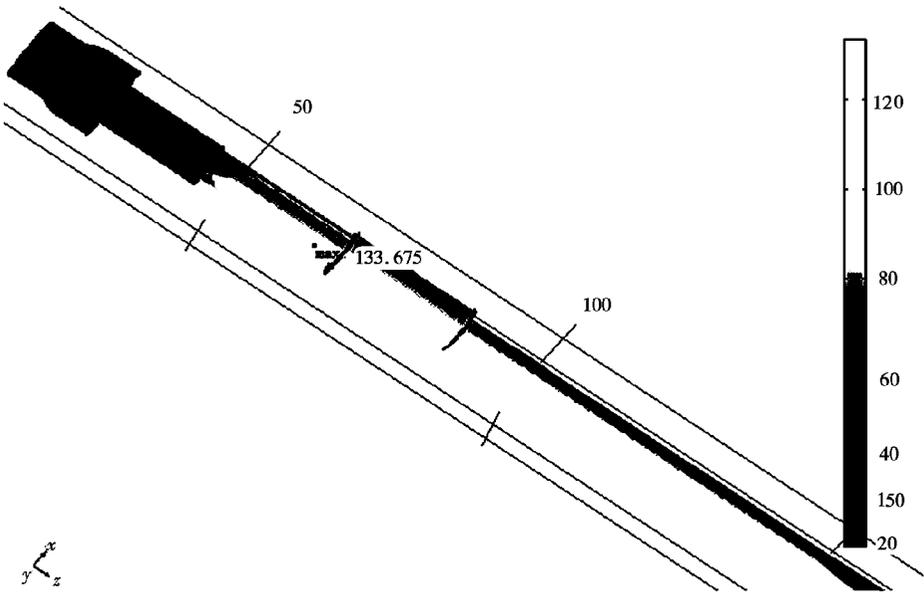
(5)利用稳态求解器进行全耦合计算,得到 20 °C 的环境温度下,熔断件稳定状态下的温度分布,如图 7 所示(图中温度单位为 °C)。



a 1 号样机(最高点 109.73 °C)



b 2号样机(最高点 105.96 °C)



c 3号样机(最高点 133.65 °C)

图 7 样机熔体温度分布云图

Fig. 7 Distribution nephogram of melt temperature of prototype

从图 7 可以看出,仿真结果的温度分布与温升试验结果基本吻合;温度最高点基本在熔体的中间位置,验证了本文 2.1 节提出的熔体发热本质模型的正确性。

3 结论

高压喷射式熔断器的温升一直是其研发设计

过程中的一个重要指标。本文对高压喷射式熔断器温升试验进行了描述,并通过对相关标准的分析,从试验方法和操作注意事项 2 方面简单介绍了温升试验;最后通过仿真验证了喷射式熔断器熔体的温度分布,确认熔体中间部位确实为熔断器温升的最高点。

参考文献:

- [1] 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. 高压交流熔断器 第3部分:喷射式熔断器;GB/T 15166.3—2008[S]. 北京:中国标准出版社,2008.
- [2] 陈娟. 对温升试验分析的探讨[J]. 科技传播,2012(8): 66-67.
- [3] 孙鹏,马少华. 电器学[M]. 北京:科学出版社,2012.
- [4] 贾一凡,王博,陆瑶,等. 开关柜温升试验方法研究[J]. 高压电器,2013,49(8):87-91.
- [5] 赵焕敏,姚永其. 高压开关温升试验方法浅谈[J]. 科技视界,2012(27):237-238.
- [6] 周会高,杨陶莉,赵端庆,等. 浅议高压开关设备的温升和机械试验[J]. 高压电器,2002,38(5):60-61.
- [7] 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. 高压开关设备和控制设备的共用技术要求;GB/T 11022—2011[S]. 北京:中国标准出版社,2011.

The Temperature Rise Test and Simulation Verification of High Expulsion Fuse

XU Guangling¹, WENG Yinglei², WENG Jianqing²

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Xiamen University of Technology, Xiamen Fujian 361024, China;
2. ABB(China) Limited Power Products Medium Voltage Technology Center, Xiamen Fujian 361006, China)

Abstract: As the high-pressure jet fuse is by the heating element melt to break the circuit, the heat calculation for the fuse design and performance improvements are of great significance. The temperature rise of each part of a high pressure jet fuse is a complex process of heating and heat dissipation. It is difficult to establish an analytical formula which can take into account all the factors. In this paper, the temperature rise test and simulation of high pressure jet fuses are used to verify the temperature rise characteristics and the highest value of temperature rise.

Keywords: expulsion fuse; temperature rise; testing standard

(责任编辑:李华云)

(上接第25页)

Durability Analysis of Crank and Connecting Rod Mechanism of ZW Compressor

FAN Hengliang, CHEN Xingqiang, LI Dasheng

(Department of Mechanical and Vehicle Engineering, Bengbu University, Bengbu Anhui 233030, China)

Abstract: The kinematics and dynamics performance of the crank connecting rod mechanism have important influence on the target parameters of the compressor. Based on Solidworks and Adamas, a kinematic and kinetic durability analysis model of crank connecting rod mechanism is proposed to predict the fatigue life of the mechanism. That is, when the compressor is continuously operating 205 d, the vibration frequency increases gradually. After continuous operation 240 d, the vibration frequency reaches the maximum, and the compressor will lose its working ability. Then, the fatigue durability of the theoretical model and the physical model is verified by double tests, which shows that they are in good agreement. So as to provide reference for the optimization and innovative design of compressor crank connecting rod mechanism.

Keywords: compressor; kinematics simulation; dynamics; durability

(责任编辑:李华云)