

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.08.006

油纸绝缘系统过热故障油面气体产气规律研究

张国治, 刘翔, 黄雅兰, 闫伟阳, 张晓星
(湖北工业大学新能源及电网装备安全监测湖北省工程研究中心, 武汉 430000)

摘要: 油面气体检测法是一种能有效预防油浸式电力变压器绝缘故障进一步劣化导致设备安全事故发生的技术手段, 而关于油浸式电力变压器过热故障油面特征气体变化规律缺失。基于此, 文中搭建了油浸式电力变压器过热故障下油面气体产气规律研究试验平台, 通过大量实验系统研究了不同严重程度过热故障下油面气体的产气规律, 实验结果表明: ①过热故障下油面特征气体以 H_2 、 CH_4 、 CO 和 C_2H_4 为主, 特征气体体积分数和生成速率会随着故障严重程度的加剧而增加, 其中油面上 H_2 体积分数可以达到上万 $\mu L/L$ 。②在低温过热试验初期, C_2H_2 、 C_2H_6 、 CO 未出现在采集到的油面气体中, 但中温过热下7种特征气体均会出现在油面上并被检测到。③中低温过热下, H_2 生成速率远大于其他6种特征气体。④相较于低温过热, 中温过热下 H_2 、 CO 和 CO_2 的生成速率有明显提升。文中研究成果可为基于油面特征气体的变压器内部过热故障诊断、预警提供技术支撑。

关键词: 变压器; 过热故障; 油面气体; 变化规律; 故障诊断

Variation Research on Dissolved Gas Generation of Overheating Faults in Oil-paper Insulation System

ZHANG Guozhi, LIU Xiang, HUANG Yalan, YAN Weiyang, ZHANG Xiaoxing

(Hubei Engineering Research Center for Safety Monitoring of New Energy and Power Grid Equipment, Hubei University of Technology, Wuhan 430000, China)

Abstract: The dissolved gas detection analysis (DGA) is a technical means that can effectively prevent equipment safety accidents caused by the progressive deterioration of insulation failures in oil-immersed power transformers, yet there is a significant lack of study on the variation of characteristic gases specific to overheating fault. Based on this, in this paper a test platform to study the production of dissolved gas under thermal fault of oil-immersed power transformer is setup, and the gas production of dissolved gas under overheating fault of different severity is studied through a large number of experimental systems. The experimental results show that: ①Under overheating fault, the characteristic of dissolved gas is mainly H_2 , CH_4 , CO and C_2H_4 , and the concentration and generation rate of characteristic gas can increase with the severity of the fault, in which the concentration of H_2 in the dissolved gas can reach tens of thousands of $\mu L/L$. ②At the initial stage of low temperature overheating test, C_2H_2 , C_2H_6 and CO do not appear in the collected dissolved gas, but seven characteristic gases would appear on the dissolved gas and can be detected under medium temperature overheating. ③At medium and low temperature overheating, the generation rate of H_2 is much higher than that of other six characteristic gases. ④Compared with low temperature overheating, the formation rate of H_2 , CO and CO_2 under medium temperature overheating is significantly increased. The research results in this paper can provide technical support for the diagnosis and early warning of internal overheating fault in transformer based on dissolved characteristic gas in oil.

Key words: transformer; thermal fault; free gas; variation; fault diagnosis

收稿日期: 2026-02-11; 修回日期: 2026-04-09

基金项目: 国家自然科学基金(52107144); 湖北省教育厅科技项目(Q20211401)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(52107144), Science and Technology Project of Hubei Provincial Department of Education(Q20211401).

0 引言

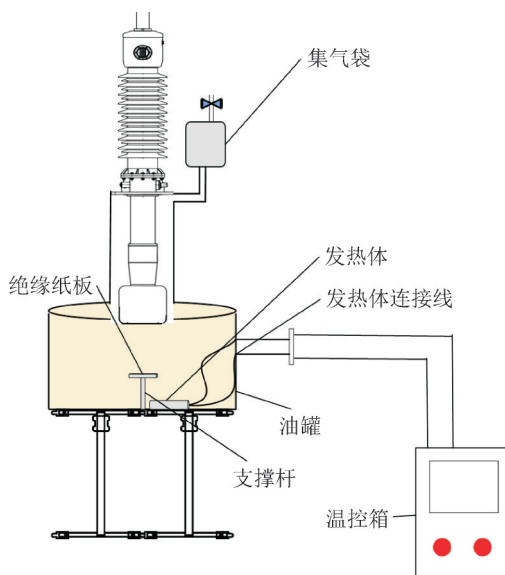
油浸式电力变压器是中国电力系统中最为关键的设备之一,保障其安全运行具有重大的意义^[1-5]。内部故障是引起油浸式变压器损毁的主要原因^[6],变压器的内部故障主要分为过热故障和放电故障两大类^[7],据不完全统计,过热故障是变压器故障中出现几率最高的故障类型^[8-14]。油浸式电力变压器在运行过程中会因负载电流过大、接触不良、油道堵塞等原因造成变压器发热,当变压器内部过热时,会使变压器的变容量受限、加速变压器内部绝缘系统老化、使热缺陷演化为过热故障^[15],严重情况甚至会引起变压器起火爆炸。根据电力行业标准 DL/T 722—2014 可将过热故障分为低温过热(低于 150~300 ℃)、中温过热(300~700 ℃)和高温过热(高于 700 ℃)^[16],对于变压器局部过热故障,由于变压器绝缘结构复杂,可能发生的局部过热典型故障主要有:①变压器在短期急救负载状态下运行;②绕组中油流阻塞;③铁轭夹件中有漏磁;④连接不良导致的过热(如螺栓连接处、选择开关动静触头接触面以及引线与套管的连接不良导致的过热);⑤环流导致的过热;⑥绕组中多股并绕的相邻导线之间绝缘磨损导致的过热;⑦硅钢片之间短路;⑧油箱和铁心上的大环流。过热缺陷会加速变压器内部绝缘系统老化,其产生的热效应会使绝缘油发生裂解,产生氢气、碳氢化合物及烃类等特征气体^[17-22]。目前中国的油绝缘变压器油中溶解气体诊断方法基本沿用了 IEC 三比值法^[23-24],但是,当变压器内部发生过热故障时,产生的特征气体往往来不及全部溶解在油中,一部分特征气体会逸散至气体继电器中并引起瓦斯动作,另一部分特征气体会逸散到油面上^[25],造成用于诊断故障的特征数据流失^[26-27]。针对该问题,有学者提出了基于油面气体信息的变压器故障检测技术:2012年,英国曼彻斯特大学 Imadullah 等人对变压器中不同绝缘介质因故障分解产生的油面气体和油中溶解气体体积分数进行了分析,发现在故障发生的初期就会产生油面气体^[25],但没有对油面气体的生成规律与故障间的关系进行研究;2021年,西安交通大学张玉成等人研究了油浸式变压器放电故障的发展过程与油面气体产气速率的关系,并提出了一种基于油面气体收敛模式的诊断方法^[26]。但是目前的研究成果中缺乏不同严重程度过热故障下油面气体变化特性信息,导致无法采用油面气体变化规律信息开展有效的油浸式电力变压器故障诊断。

基于此,文中对变压器过热故障下油面气体产气规律进行研究,搭建油浸式电力变压器过热故障下油面气体产气规律研究试验平台,通过调节过热故障严重程度系统分析不同严重程度下油面和油中特征气体体积分数、产气速率变化规律,并根据实验结果进行分析总结。

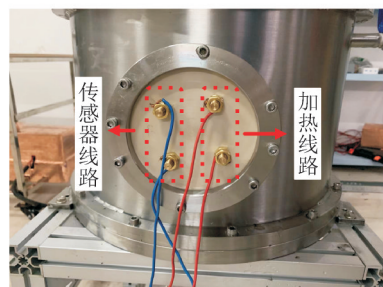
1 变压器突发性严重过热故障油面气体检测模拟实验

1.1 实验平台

通过对油浸式电力变压器故障特征气体逸散路径调研^[28-29],构建了变压器过热故障油面气体检测模拟实验平台,试验平台见图1。



(a) 变压器突发性过热故障油面气体检测模拟实验平台



(b) 加热线路连接图

图1 过热故障油面气体检测模拟实验平台

Fig. 1 Simulation test platform for free gas detection

图1中,绝缘油罐用于模拟变压器油箱,其容积约为70 L,可以承受5个大气压,气密性良好;在绝缘油罐顶部设置有出气口,出气口处通过气密性良好的塑胶软管与集气袋相连,用于收集逸散至油箱顶部的特征气体;发热体功率为650 W,文中采用浸没加热法模拟过热故障,整体放置于油箱中部,通过连接线与温控箱相连;温控箱用于控制和监测发

热体实时温度。

1.2 实验温度的选择及油面与油中特征气体测量

在进行油浸式电力变压器内部过热故障实验时,需选择合理的实验温度,浸没加热法是目前用于模拟热故障最常用的方法,但对于矿物油,浸没加热法能达到的最高温度为330℃,当故障温度超过330℃时,会造成加热元件温度不稳定、实时温度测量不可靠等问题^[30],同时文中在前期实验中进行绝缘油环境中发热体加热实验,由于绝缘油散热平衡原因,加热到310℃后温度无法继续加热,当将加热体放置在空气环境中则可以很快加热至400℃。因此,参照DL/T 722—2014,文中主要对低温过热和中温过热情况下变压器油面气体产气规律进行研究,实验温度分别设置为180℃(低温过热)和300℃(中温过热)。通过制冷机将环境温度控制在20℃,昼夜温差为 ± 0.7 ℃。

试验中需要采集的特征参量有油中溶解气体组分体积分数和油面气体组分体积分数,取气分析过程参照国标GB/T 17623—2017执行。其中,试验后的油中溶解气体组分体积分数及油面气体组分体积分数均测量3次,取平均值,若3次实验结果相差较大,则对此项数据重新进行测量。

1.3 试验流程

试验主要分为两个部分:①不同严重程度过热故障下油面气体及油中溶解气体产气规律试验(为了便于和后文“对照试验”做出明显区分,将该试验简称为“过热试验”)。将绝缘纸经过真空浸油处理后放置在绝缘油箱内发热体上方,在低温过热和中温过热下进行油浸式变压器过热故障试验,每隔30 min进行一次气体采集,一共进行4次采集。对于试验过程中产生的油面气体,每次取样1 mL进行组分体积分数分析;对于试验后的绝缘油,每次取样40 mL,使用物理震荡法使油气分离,取1 mL震荡后所得气体进行组分体积分数分析。过热试验流程见图2(a)。②对照试验,用于探究油面气体是否来自于因油中过热故障分解所产生的特征气体。对照试验条件参数与前面试验保持一致,不同之处在于对照试验过程中不进行油面和油中特征气体体积分数测量,而是在实验结束后需将试品静置一段时间,静置时间根据绝缘油裂解所产生特征气体达到溶解平衡所需要时间设置为72 h^[31]。对照试验流程见图2(b)。

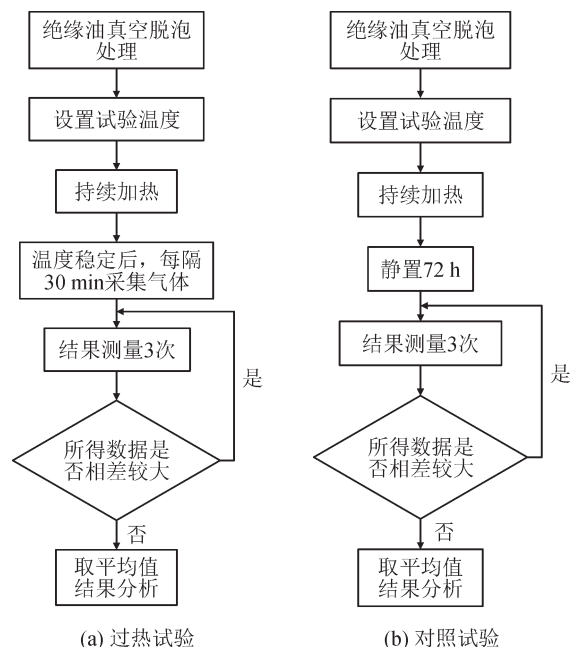


图2 局部过热故障油面气体检测试验流程

Fig. 2 Free gas detection test flow chart for thermal fault

2 试验结果及现象分析

低温过热(180℃)和中温过热(300℃)下油面气体组分体积分数随加热时间变化规律见图3。

从图3可以看出,在过热故障持续30 min时,CO、C₂H₆、C₂H₂的体积分数为0 μL/L,其余特征气体的体积分数比较低,但持续加热60 min后,各种特征气体的体积分数有明显上升。且随着加热时间的增长,各种油面特征气体的体积分数也在逐渐增加,相同的气体在不同的试验温度下体积分数差异明显,中温过热下产生的油面特征气体体积分数明显高于低温过热。

由图3(a)可知,CO在低温过热试验条件下的体积分数与生成速率明显低于中温过热,试验初期低温过热下并未检测到CO,而此时中温过热下能检测到CO;同时对图3(c)进行分析可知,CO₂在低温过热试验条件下生成速率较慢,但与CO不同的是,试验初期CO₂在低温过热与中温过热下均会出现在油面上,在试验后期发现不同严重程度下CO₂生成速率均会下降,对比低温过热和中温过热下的CO₂体积分数变化曲线发现:在试验后期,低温过热下CO₂生成速率会明显变小,但在中温过热下这一趋势并不明显,说明故障严重程度较轻时,CO₂的产气量会较快接近饱和。CO和CO₂作为固体绝缘材料裂解产生的特征气体,其生成速率代表了固体绝缘材料裂解的速度,试验结果说明低温过热下试验初期固体绝缘材料裂解较慢,在试验中期裂解速率加快,在

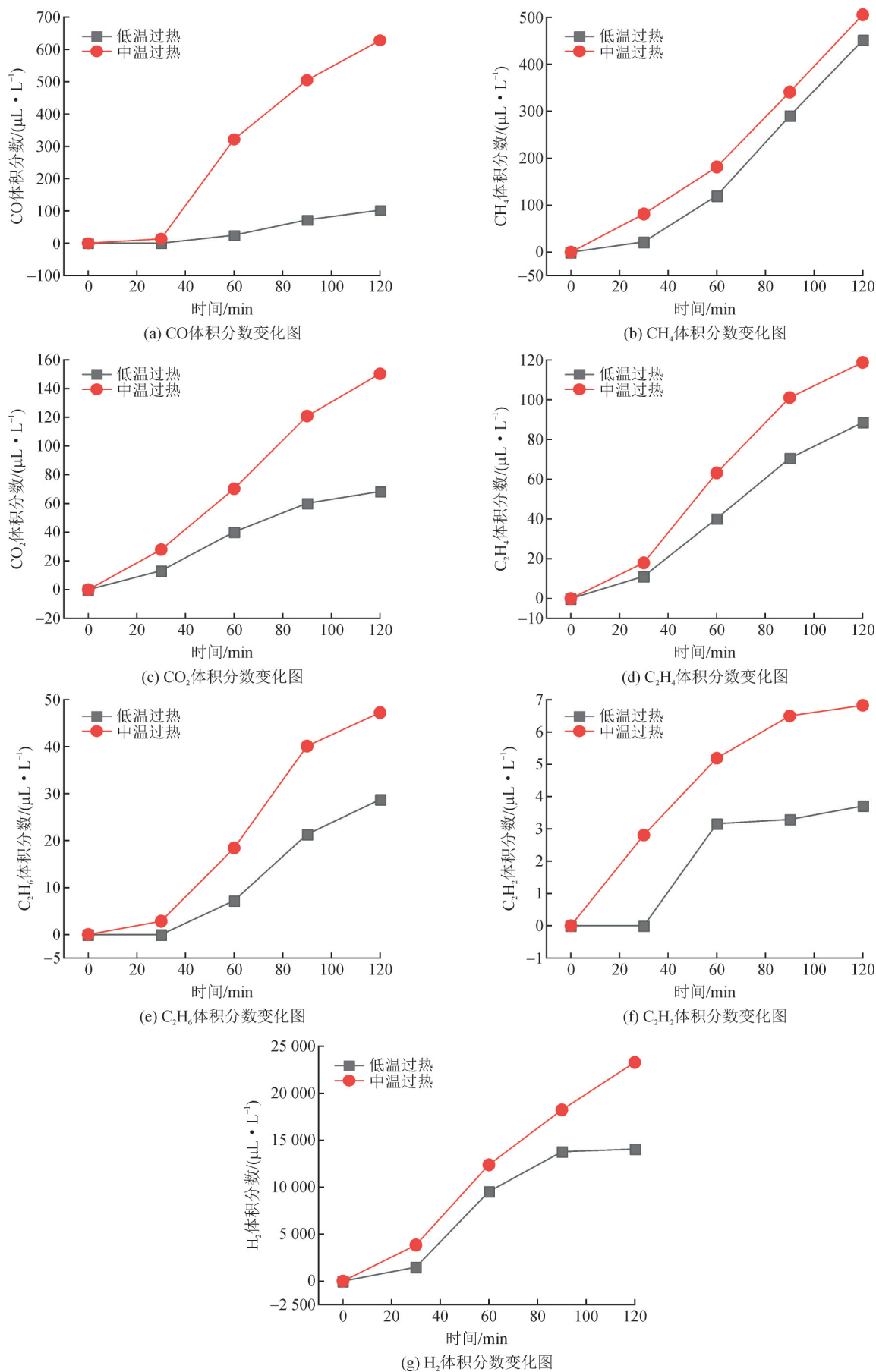


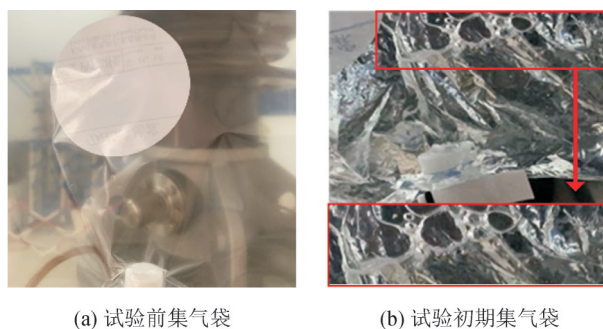
图3 油面特征气体体积分数变化图

Fig. 3 Free characteristic gases concentration change diagram

试验后期裂解速率再次变慢。由图 3(b)可以看出 CH_4 的体积分数随时间变化的规律在低温过热与中温过热下大致相同,不同的是在试验初期低温过热下 CH_4 的生成速率较小,但在试验中期与后期 CH_4 生成速率在低温过热与中温过热下相近,且中低温过热下 CH_4 的生成量在整个试验过程中相差较小。从图 3(d)中可以看出 C_2H_4 在试验初期中低温过热下均会出现在油面上,且体积分数相差较小,但在试验中期 C_2H_4 生成速率在中低温过热下均有明显提升,在中温过热下提升较为明显,试验后期 C_2H_4 生成速率较试验中期有所下降, C_2H_4 的生成规律整体呈现先变快后变慢的趋势。由图 3(e)可以看出 C_2H_6 的生成规律整体也是呈现先变快后变慢的趋势, C_2H_6 在低温过热试验初期并未出现在油面上,中温过热试验初期 C_2H_6 产量较少,而试验中期 C_2H_6 生成速率有明显加快,试验后期 C_2H_6 生成速率在中低温过热下相差不大。图 3(f)为 C_2H_2 的体积分数变化曲线,相较于其他 6 种特征气体, C_2H_2 的产量明显较少,低温过热试验结束后仅有 $3.7 \mu\text{L/L}$,中温过热试验结束时仅有 $6.8 \mu\text{L/L}$ 。除此之外, C_2H_2 在低温过热试验初期未出现在油面上,而此时中温过热下就能检测到 C_2H_2 ,且体积分数与低温过热试验中后期相差较小,说明当故障严重程度加剧时, C_2H_2 不仅会提早出现在油面上,而且生成浓度也会增加。从图

3(g)可以看出 H_2 的产气量在中低温过热下明显多于其他 6 种特征气体,低温过热下 H_2 生成规律在试验前中期呈先变快后变慢的趋势,在试验后期呈接近饱和状态,但在中温过热下呈持续增长趋势。

除此之外,在中低温过热实验过程中发现,当发热体实际温度刚达到设置温度,集气袋中就会收集到逸散出的油面气体,同时伴随着气泡“咕噜”声。试验前集气袋见图 4(a),此时集气袋内并未收集到任何气体,但当发热体达到设置温度时,会有少量绝缘油与特征气体进入集气袋中,见图 4(b),这说明在过热故障发生的初期,便会有特征气体产生,并逸散到油面上。



(a) 试验前集气袋

(b) 试验初期集气袋

图 4 试验初期试验现象对比图

Fig. 4 Comparison of test phenomena at the beginning of the test

相较于油面特征气体,实验过程中油中溶解气体的体积分数比较少,油中溶解气体的体积分数见表 1。

表 1 不同过热故障下油中溶解气体体积分数随时间变化表

Table 1 Content of dissolved gas in oil changing with time under different thermal faults

特征气体	气体体积分数/ $(\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1})$									
	0 min		30 min		60 min		90 min		120 min	
	低温过热	中温过热	低温过热	中温过热	低温过热	中温过热	低温过热	中温过热	低温过热	中温过热
CO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.13	17.30	21.86	32.45
CO_2	27.92	27.92	34.10	39.72	44.28	69.13	76.83	86.42	81.20	84.56
CH_4	0.00	0.00	0.81	1.17	3.94	20.88	7.24	27.19	9.93	30.54
C_2H_6	0.00	0.00	0.00	0.62	1.63	1.08	1.82	4.03	2.21	4.14
C_2H_4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.51	1.27	3.07	1.84	2.06
C_2H_2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
H_2	34.68	34.68	32.13	37.19	35.80	39.74	41.12	49.07	39.23	50.91

可以看出在过热故障发生的初期,油中溶解气体的体积分数与试验前的体积分数变化不大,随着加热时间的增长,少量的特征气体会溶解于油中,但直至试验结束,油中溶解气体的体积分数仍为达到行业标准中规定的注意值^[16],这说明过热故障产生的特征气体多数会逸散至油面上,在特征气体溶解于绝缘油中的体积分数低于行业规定的注意值前,无法通过油中溶解气体信息实现变压器过热故

障检测,而通过油面气体检测则可以在过热故障初期实现变压器内部过热故障的有效检测。

进一步地,为验证特征气体在故障的初期来不及溶解在油中,设置了对照试验,对照试验流程见 1.3 小节,对照试验的油面气体和油中溶解气体数据见表 2。

对比表 1、2 可以看出,对照试验各组分油中溶解气体的体积分数明显高于过热试验,而油面气体

表2 对照组特征气体数据

Table 2 Characteristic gases data of control group

特征气体	油中溶解气体/($\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$)		油面特征气体/($\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$)	
	低温过热	中温过热	低温过热	中温过热
CO	30.41	74.32	79.31	592.14
CO ₂	164.29	179.20	129.30	141.23
CH ₄	48.29	54.28	106.82	100.08
C ₂ H ₆	56.12	64.10	31.67	27.19
C ₂ H ₄	92.83	128.40	70.73	74.20
C ₂ H ₂	0.00	0.00	1.09	0.00
H ₂	218.94	294.10	2 801.39	2 992.12

表3 油面特征气体IEC三比值诊断结果

Table 3 IEC three-ratio diagnostic results of free characteristic gases

项目	30 min		60 min		90 min		120 min	
	低温过热	中温过热	低温过热	中温过热	低温过热	中温过热	低温过热	中温过热
三比值编码	012	112	012	012	012	101	011	011
故障类型	高温过热	电弧放电	高温过热	高温过热	高温过热	电弧放电	低能放电	低能放电
实际故障	低温过热	中温过热	低温过热	中温过热	低温过热	中温过热	低温过热	中温过热

从表3结果可以看出:在低温过热下,三比值法对试验前中期结果均诊断为高温过热,试验后期诊断结果为低能放电,但实际故障为低温过热;在中温过热下,三比值法对试验前中期诊断结果依次为电弧放电、高温过热和电弧放电,试验后期诊断结果为低能放电。目前常用的三比值法对油面特征气体诊断结果与实际故障相差甚远,针对油面特征气体,需要研究一种新的诊断方法。

3 变压器局部过热故障下油面特征气体产气速率研究

为探究各种特征气体在中低温过热下的产气速率差异,采用最小二乘法对低温过热和中温过热下油面特征气体生成速率进行拟合,拟合直线的斜率反映了各个油面特征气体的生成速率,不同试验温度下的各个油面特征气体生成速率见表4。

表4 油面特征气体生成速率

Table 4 Generation rate of free characteristic gas

油面特征气体	生成速率/[($\mu\text{L}\cdot\text{L}\cdot\text{min}$) ⁻¹]	
	低温过热	中温过热
CO	0.923 3	5.823 8
CO ₂	0.611 8	1.311 8
CH ₄	3.900 6	4.233 5
C ₂ H ₆	0.262 3	0.438 9
C ₂ H ₄	0.788 6	1.069 3
C ₂ H ₂	0.035 7	0.057 8
H ₂	134.609 4	203.146 9

由表4可知,中温过热试验条件下的油面特征

的组分体积分数低于试验组,这说明在过热故障发生时,产生的油面气体是来不及在油中溶解的,而对照试验油面特征气体相较于过热试验较少的原因除了部分油面气体溶解于油中之外,还有部分气体流失,例如氢气的分子极小,普通的容器无法有效的保存氢气,导致氢气的体积分数下降^[32-33]。

为探究目前电力现场常用的IEC三比值法能否用于油面气体组分体积分数分析,采用IEC三比值法对油面气体组分体积分数进行计算分析诊断,诊断结果见表3。

气体生成速率均大于低温过热下的速率,说明随着故障严重程度的加剧,油面气体的生成速率也会增加,其中H₂的生成速率最大,在低温过热下达到了134.61 $\mu\text{L}/(\text{L}\cdot\text{min})$,在中温过热下也达到了203.15 $\mu\text{L}/(\text{L}\cdot\text{min})$,明显高于其他6种油面气体。可能的原因是除了绝缘油受热分解产生的H₂外,还有在温度较高时,罐体的不锈钢材料与绝缘油的催化反应生成了大量的H₂^[34],而造成不同试验温度下H₂生成速率相差较大的原因可能是,当试验温度提高时,不仅加快了绝缘系统的裂解,还加剧了上述的影响效果。CO的生成速率在低温过热和中温过热下相差明显,低温过热下生成速率为0.923 3 $\mu\text{L}/(\text{L}\cdot\text{min})$,在中温过热下提高到了5.823 8 $\mu\text{L}/(\text{L}\cdot\text{min})$,随着故障严重程度的加剧,CO的生成速率也随之明显加快。CO₂的生成速率低温过热与中温过热相差0.7 $\mu\text{L}/(\text{L}\cdot\text{min})$,且CO₂的生成速率在中低温过热下均小于CO的生成速率,不同于DL/T 722—2014电力行业标准中规定的CO₂与CO的比值规律,随着故障严重程度的加剧,CO₂/CO的值在逐渐变小,说明行业标准中用于判定固体绝缘受损程度的标准也不适用于油面气体。CH₄、C₂H₄和C₂H₆的生成速率在中低温过热下变化也比较小。低温过热下7种特征气体生成速率由快到慢依次为:H₂、CH₄、CO、C₂H₄、CO₂、C₂H₆、C₂H₂。低温过热下主要特征气体为H₂和CH₄,次要特征气体为CO和C₂H₄;中温过热下7种特征气体生成速率由快到慢依次为:H₂、CO、CH₄、CO₂、C₂H₄、C₂H₆和C₂H₂,中温过热下H₂和CO是主要特征气体,

CH₄和CO₂是次要特征气体。

4 结论

针对会造成油浸式电力变压器发生起火、爆炸等安全事故的变压器局部过热故障, 试验探究了不同严重程度局部过热故障下各油面特征气体的产气积分分数和产气速率, 获得了以下结论:

1) 在低温过热下, 油面特征气体主要由H₂和CH₄构成; 在中温过热下, 油面特征气体主要是CO和H₂。目前电网系统中常用的油中气体检测法无法通过油面气体的组分体积分分数来准确判断变压器故障情况。

2) 通过对不同试验温度下7种油面特征气体的生成速率研究发现: H₂、CO和CO₂的生成速率在低温过热与中温过热下差异较大, 中温过热下其余4种特征气体的生成速率也略高于低温过热。电力行业标准中用于判断固体绝缘受损程度的标准也不适用于油面气体。

3) 当变压器内有过热故障发生时, 产生的特征气体大部分会逸散至油面上, 造成判断变压器运行状态关键信息的丢失, 以至于现有的油中溶解气体分析技术难以对故障类型和严重程度进行诊断。通过对发生故障时产生的油面气体的组分体积分分数和产气速率进行分析, 可间接判断变压器内部故障类型及严重程度。

参考文献:

- [1] 陈忠贤, 谢虎波, 任文军, 等. 基于FBG的35 kV油浸式变压器绕组变形监测研究[J]. 智慧电力, 2023, 51(1): 115-122.
Chen Zhongxian, Xie Hubo, Ren Wenjun, et al. 35 kV oil immersed transformer winding deformation monitoring based on FBG[J]. Smart Power, 2023, 51(1): 115-122.
- [2] 冀茂, 齐波, 黄猛, 等. 用于油浸式电力变压器内部压力测量的传感器结构设计[J]. 高压电器, 2020, 56(9): 33-38.
Ji Mao, Qi Bo, Huang Meng, et al. Structure design of sensors for internal pressure measurement in oil-immersed power transformers[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(9): 33-38.
- [3] 裴丽君, 徐慧, 陈晗, 等. 基于PSO优化的SA-LSTM变压器绕组温度预测方法[J]. 供用电, 2025, 42(8): 112-119.
Pei Lijun, Xu Hui, Chen Han, et al. Prediction method for winding temperature of SA-LSTM transformer based on PSO optimization[J]. Distribution & Utilization, 2025, 42(8): 112-119.
- [4] 何东升, 贾志东, 刘让雄, 等. 不同负载率下干式配电变压器绕组热点温升规律及推演模型研究[J]. 智慧电力, 2025, 53(5): 63-72.
He Dongsheng, Jia Zhidong, Liu Rangxiong, et al. Hotspot temperature rise patterns and deductive model of dry-type distribution transformer windings under different load rates[J]. Smart Power, 2025, 53(5): 63-72.
- [5] 刘建锋, 李志远, 周亚茹. 基于漏磁场和ICOA-ResNet的变压器绕组早期故障诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(9): 99-110.
Liu Jianfeng, Li Zhiyuan, Zhou Yaru. Transformer windings based on leakage field and ICOA-ResNet early fault diagnosis[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(9): 99-110.
- [6] 于达, 张玮, 王辉. 基于LSTM神经网络的油浸式变压器异常声纹诊断方法研究[J]. 智慧电力, 2023, 51(2): 45-52.
Yu Da, Zhang Wei, Wang Hui. Abnormal voiceprint diagnosis method of oil-immersed transformer based on LSTM neural network[J]. Smart Power, 2023, 51(2): 45-52.
- [7] 安国庆, 史哲文, 马世峰, 等. 基于RF特征优选的WOA-SVM变压器故障诊断[J]. 高压电器, 2022, 58(2): 171-178.
An Guoqing, Shi Zhewen, Ma Shifeng, et al. Fault diagnosis of WOA-SVM transformer based on RF feature optimization[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(2): 171-178.
- [8] Duval M. A review of faults detectable by gas-in-oil analysis in transformers[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2002, 18(3): 8-17.
- [9] 全玉生, 谌军, 李巍, 等. 基于突变理论的油浸式变压器过热性故障预测方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(18): 100-106.
Quan Yusheng, Shen Jun, Li Wei, et al. Methodology of forecasting the oil-immersed transformer over-hot fault tendency based on catastrophe theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(18): 100-106.
- [10] Benmahamed Y, Kherif O, Tegar M, et al. Accuracy improvement of transformer faults diagnostic based on DGA data using SVM-BA classifier[J]. Energies, 2021, 14(10): 2970.
- [11] 梁栋, 朱建华, 张翠, 等. 变压器状态评估及故障诊断研究综述[J]. 变压器, 2024, 61(2): 35-43.
Liang Dong, Zhu Jianhua, Zhang Cui, et al. Review of transformer condition assessment and fault diagnosis[J]. Transformer, 2024, 61(2): 35-43.
- [12] 徐惠, 罗传仙, 张静. 基于加性模型的电力变压器油中溶解气体预测方法研究[J]. 电网与清洁能源, 2025, 41(7): 27-35.
Xu Hui, Luo Chuanxian, Zhang Jing. Research on the prediction method of dissolved gases in the power transformer oil based on additive model[J]. Power System and Clean Energy, 2025, 41(7): 27-35.
- [13] 张晓华, 吕志瑞, 孙云生, 等. 基于修正热路模型的油浸式变压器绕组热点温度计算研究[J]. 电测与仪表, 2025, 62(3): 78-84.
Zhang Xiaohua, Lyu Zhirui, Sun Yunsheng, et al. Research of hot spot temperature calculation in oil-immersed transformer based on modified thermal model[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(3): 78-84.
- [14] 张德文, 张健, 曲利民, 等. 基于PSO-ELM的变压器油纸绝缘状态无损评估方法[J]. 电力工程技术, 2024, 43(3): 201-208.
Zhang Dewen, Zhang Jian, Qu Limin, et al. The assessment method of transformer oil-paper insulation state based on PSO-ELM[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(3): 201-208.
- [15] 马宏忠, 李峥. 电力变压器过热故障及其综合诊断[J]. 高电压技术, 2005, 31(4): 9-11.

- Ma Hongzhong, Li Zheng. Transformer overheating fault and synthesis diagnosis[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(4): 9-11.
- [16] DL/T 722—2014 变压器油中溶解气体分析和判断导则[S].
DL/T 722—2014 Guide to the analysis and the diagnosis of gases dissolved in transformer oil[S].
- [17] Faiz J, Soleimani M. Assessment of computational intelligence and conventional dissolved gas analysis methods for transformer fault diagnosis[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(5): 1798-1806.
- [18] 王 艳, 李 伟, 赵洪山, 等. 基于油中溶解气体分析的 DBN-SSAELM 变压器故障诊断方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(4): 32-42.
Wang Yan, Li Wei, Zhao Hongshan, et al. Transformer DGA fault diagnosis method based on DBN-SSAELM[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(4): 32-42.
- [19] 李永康, 张丙旭, 杜振斌, 等. 一起低端换流变压器油中缓慢产生乙炔故障分析[J]. 变压器, 2024, 61(2): 74-76.
Li Yongkang, Zhang Bingxu, Du Zhenbin, et al. Analysis of acetylene fault in oil of a low-end converter transformer[J]. Transformer, 2024, 61(2): 74-76.
- [20] 连鸿松, 刘慧鑫, 黄 锦, 等. 变压器油多参量一体化分析平台[J]. 变压器, 2025, 62(4): 53-61.
Lian Hongsong, Liu Huixin, Huang Jin, et al. Transformer oil multi-parameter integrated analysis platform[J]. Transformer, 2025, 62(4): 53-61.
- [21] 林 鹏, 张 森, 陈 根, 等. 电力变压器在线油色谱装置运维检修模式探讨及建议[J]. 变压器, 2024, 61(1): 58-61.
Lin Peng, Zhang Sen, Chen Gen, et al. Discussion and suggestions on operation and maintenance mode of online oil chromatography device for power transformer[J]. Transformer, 2024, 61(1): 58-61.
- [22] 王 杰, 李永鑫, 张军亮, 等. 基于 SBOA-TVFEMD 的变压器油中溶解气体浓度预测[J]. 变压器, 2025, 62(5): 23-31.
Wang Jie, Li Yongxin, Zhang Junliang, et al. Prediction of dissolved gas concentration in transformer oil based on SBOA-TVFEMD[J]. Transformer, 2025, 62(5): 23-31.
- [23] 杨廷方, 刘 沛, 李景禄, 等. FCM 结合 IEC 三比值法诊断变压器故障[J]. 高电压技术, 2007, 33(8): 66-70.
Yang Tingfang, Liu Pei, Li Jinglu, et al. New fault diagnosis method of power transformer by combination of FCM and IEC three-ratio method[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(8): 66-70.
- [24] 董 明, 赵文彬, 严 璋. 油气分析诊断变压器故障方法的改进[J]. 高电压技术, 2002, 28(4): 6-8.
Dong Ming, Zhao Wenbin, Yan Zhang. An improved method for transformer fault diagnosis based on DGA[J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(4): 6-8.
- [25] Khan I, Wang Zhongdong, Dai Jie, et al. Fault gas generation in ester based transformer fluids and dissolved gas analysis(DGA)[C]//2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, 2008: 909-913.
- [26] Zhang Yucheng, Hao Zhigui, Zheng Yuping, et al. Developing characteristics of oil-immersed transformer internal fault with diagnostic method using convergence patterns of free gas[C]//2021 IEEE 2nd China International Youth Conference on Electrical Engineering(CIYCEE), 2021: 1-6.
- [27] Xiang Jing, Zhou Xinyu, Liu Qiang, et al. Correlation of hydrogen generation with sparking discharges in a mineral insulating oil[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2018, 34(3): 7-12.
- [28] Zhang Yucheng, Hao Zhiguo, Yang Haitao, et al. Mechanism of gas movement and convergence in oil-immersed transformer[C]//2021 International Conference on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE), 2021: 1-4.
- [29] Koukouvini P, Gavaises M, Supponen O, et al. Simulation of bubble expansion and collapse in the vicinity of a free surface[J]. Physics of Fluids, 2016, 28(5): 052103.
- [30] Wang Xiongfei, Wang Zhongdong, Liu Qiang, et al. Dissolved gas analysis of thermal faults in transformer liquids simulated using immersed heating method[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(5): 1749-1757.
- [31] Li Yangliu, Zhao Xuezeng. Estimation of dissolved gas concentrations in transformer oil from membranes[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2011, 27(2): 30-33.
- [32] Farver J R. Oxygen and Hydrogen diffusion in minerals[J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 2010, 72(1): 447-507.
- [33] 范慧芳, 咸日常, 刘兴华, 等. 基于能量系数的电力变压器热故障严重性评估方法[J]. 电测与仪表, 2024, 61(2): 83-88.
Fan Huifang, Xian Richang, Liu Xinghua, et al. Evaluation method of thermal fault severity of power transformer based on energy coefficient[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(2): 83-88.
- [34] 朱建红, 仇 辉, 陈星宇. 导致变压器油产生氢气的问题研究[J]. 变压器, 2020, 57(2): 65-69.
Zhu Jianhong, Qiu Hui, Chen Xingyu. Research on problems that cause hydrogen to transformer oil[J]. Transformer, 2020, 57(2): 65-69.

张国治(1990—),男,博士,副教授,主要从事电力设备绝缘检测和评估方面的研究工作(通信作者)(E-mail:youzgz@163.com)。