(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 101809688 B
(45)授权公告日 2012.10.03

(21)申请号 200880108491.4

(22)申请日 2008.04.16

(30)优先权数据
2007-278754 2007.10.26 JP

(85)PCT申请进入国家阶段日
2010.03.24

(86)PCT申请的申请数据
PCT/JP2008/057400 2008.04.16

(87)PCT申请的公布数据
WO2009/054155 JA 2009.04.30

(73)专利权人 三菱电机株式会社
地址 日本东京

(72)发明人 外山悟 谷村纯二 瓦井久胜
纲本刚

(74)专利代理机构 中国国际贸易促进委员会专利商标事务所 11038
代理人 王健

(51)Int.Cl.
*H01F 41/00*(2006.01)
*H01F 27/00*(2006.01)

(56)对比文件
JP 特开2002-350426 A,2002.12.04, 全文.
JP 特开平7-335446 A,1995.12.22, 全文.
JP 特开平9-72892 A,1997.03.18, 全文.
CN 1072869 A,1993.06.09, 全文.
US 2007/0197405 A1,2007.08.23, 全文.

审查员 王光军

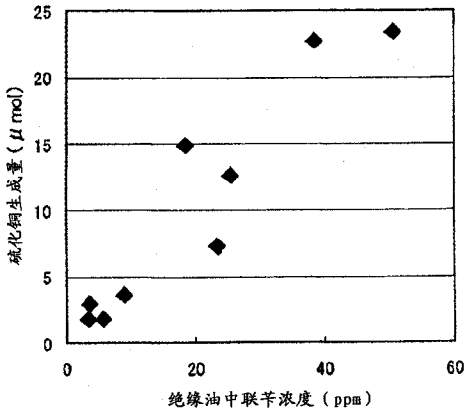
权利要求书 1 页 说明书 6 页 附图 4 页

(54)发明名称

充油型电气设备的诊断方法

(57)摘要

本发明实现了即使使用微量的绝缘油也能高精度地诊断生成硫化铜所引起的充油型电气设备的异常的方法。充油型电气设备的诊断方法，是对绝缘油中设置有铜部件的充油型电气设备的异常进行诊断的充油型电气设备的诊断方法，其中检测充油型电气设备的油中的联苄和二苄基硫醚的任一种化合物，根据该化合物的检测量来诊断上述充油型电气设备的异常。能够通过特定物质的检测来诊断生成硫化铜所引起的充油型电气设备的异常，因此即使使用微量的绝缘油也能高精度地诊断异常。




CN 101809688 B

1. 充油型电气设备的诊断方法，是对绝缘油中设置有铜部件的充油型电气设备的绝缘油生成硫化铜引起的异常进行诊断的充油型电气设备的诊断方法，其中检测上述绝缘油中的联苄和二苄基硫醚的任一种化合物，根据上述化合物的检测量来诊断上述充油型电气设备的异常。

2. 充油型电气设备的诊断方法，是对绝缘油中设置有铜部件的充油型电气设备的绝缘油生成硫化铜引起的异常进行诊断的充油型电气设备的诊断方法，其中检测上述绝缘油中的硫与苄基结合的硫化物，根据上述硫化物的检测量来诊断上述充油型电气设备的异常。

3. 充油型电气设备的诊断方法，是对绝缘油中设置有铜部件的充油型电气设备的绝缘油生成硫化铜引起的异常进行诊断的充油型电气设备的诊断方法，其中检测上述绝缘油中的联苄和上述绝缘油中的硫与苄基结合的硫化物，根据联苄和上述硫化物的检测量来诊断上述充油型电气设备的异常。

4. 充油型电气设备的诊断方法，是对绝缘油中设置有铜部件的充油型电气设备的绝缘油生成硫化铜引起的异常进行诊断的充油型电气设备的诊断方法，其特征在于具有：使绝缘油与氧化铝或硅胶接触的工序，将与上述绝缘油接触后的上述氧化铝或上述硅胶浸渍于溶剂的工序，和对将上述氧化铝或上述硅胶浸渍的上述溶剂进行分析而检测联苄或硫与苄基结合的硫化物，根据联苄或上述硫化物的检测量来诊断上述充油型电气设备的异常的工序。

5. 权利要求 1 ～ 4 任一项所述的充油型电气设备的诊断方法，其特征在于，化合物的检测方法采用气相色谱质量分析法。

# 充油型电气设备的诊断方法

## 技术领域

[0001] 本发明涉及对基于充油型电气设备的硫化腐蚀的不良发生进行诊断的方法。

## 背景技术

[0002] 充油型变压器等充油型电气设备，作为其绝缘油含有硫成分。在这种情况下，已知存在硫成分和油中的铜部件反应而生成导电性的硫化铜，产生绝缘破坏等问题。但是，该硫化铜的生成机理的详细情况尚不清楚。而且，难以在不使既有设备停止的情况下诊断硫化铜的生成引起的充油型电气设备的异常。因此，进行了采用硫化腐蚀难以产生的绝缘油的选定、硫化物的除去技术使难以发生硫化铜的生成。

[0003] 例如，对于绝缘油，下述的日本专利文献 1 中示出了难以产生硫化腐蚀的绝缘油的选定方法。将一定量的绝缘油和具有规定的表面积的铜板封入容器，在规定的温度下加热规定时间后，测定绝缘油中含有的油中溶解铜和硫酸离子的含有率，通过各自的含有率的和来诊断绝缘油的硫化腐蚀性。

[0004] 此外，还已知通过检测某种物质来诊断充油型电气设备的异常的方法。例如，下述的日本专利文献 2 中示出了由有无检测到从运转中的平常充油型电气设备没有检测到而只在过热或放电异常时容易检测到的醋酸 [$CH_3COOH$]、3- 戊酮 [$CH_3CH_2COCH_2CH_3$]、2,5- 二甲基呋喃 [$C_6H_8O$]、丁醛 [$CH_3CHCHCHO$]、2- 甲氧基乙醇 [$C_3H_8O_2$]、甲硫醇 [$CH_3SH$]、二甲基硫醚 [$(CH_3)S_2$]、氨 [$NH_3$]、1,3- 二嗪 [$C_4H_4N_2$]、甲基乙烯基乙炔 [$C_5H_6$]、2- 甲基 -1,3- 丁二烯 [$C_5H_8$]，诊断设备内部的过热异常或放电异常。

[0005] 此外，下述的日本专利文献 3 中示出了以油中含有的二氧化碳 [$CO_2$]、一氧化碳 [CO]、甲烷 [$CH_4$]、氢 [$H_2$]、乙烷 [$C_2H_6$]、乙烯 [$C_2H_4$]、乙炔 [$C_2H_2$] 等各种气体量作为表示充油型变压器、电抗器、自动电压调节器等充油型电气设备、浸油型电缆等的劣化、异常状况的参数的诊断方法。

[0006] 此外，下述的日本专利文献 4、下述的日本专利文献 5 中示出了检测羟基甲基糠醛、糠醛作为绝缘纸的劣化指标的充油型变压器的诊断方法。

[0007] 此外，下述的日本专利文献 6 中示出了为了诊断充油型电气设备的流动带电，检测油中的硫化物、其生成物的方法。

[0008] 专利文献 1 :特开平 7-335446 号公报

[0009] 专利文献 2 :特开平 9-72892 号公报

[0010] 专利文献 3 :特开 2000-241401 号公报

[0011] 专利文献 4 :特开平 5-315147 号公报

[0012] 专利文献 5 :特开平 8-124751 号公报

[0013] 专利文献 6 :特开 2005-223104 号公报

## 发明内容

[0014] 发明要解决的课题

[0015] 要对充油型电气设备的绝缘油中含有的硫成分和油中的铜部件生成硫化铜产生的充油型电气设备的异常进行诊断，如专利文献 1 那样，加热铜板和绝缘油的处理是必要的，费事且花费时间。此外，为了使铜板和绝缘油反应，使诊断的精度提高，需要足够量的绝缘油。此外，如专利文献 2 ～ 6 那样，示出了检测各种物质的充油型变压器的诊断方法，但利用这些方法不能诊断生成硫化铜引起的充油型电气设备的异常。

[0016] 因此，本发明实现了即使使用微量的绝缘油也能高精度地诊断生成硫化铜引起的充油型电气设备的异常的方法。

[0017] 用于解决课题的手段

[0018] 本发明的充油型电气设备的诊断方法是对绝缘油中设置了铜部件的充油型电气设备的异常进行诊断的充油型电气设备的诊断方法，其中检测绝缘油中的联苄和二苄基硫醚的任一种化合物，根据该化合物的检测量诊断上述充油型电气设备的异常。

[0019] 发明的效果

[0020] 由于能够通过检测特定的物质来诊断生成硫化铜引起的充油型电气设备的异常，因此即使使用微量的绝缘油也能高精度地诊断异常。因此能够从既有的充油型电气设备抽取微量的绝缘油进行诊断，在不使充油型电气设备停止的情况下进行诊断变得容易。

## 附图说明

[0021] 图 1 是本实施方式 1 的充油型电气设备的诊断方法的检测物质的一部分的结构式。

[0022] 图 2 是表示用于确定本实施方式 1 的充油型电气设备的诊断方法而进行的实验结果的表。

[0023] 图 3 是表示本实施方式 1 的充油型电气设备的诊断方法的一例的图。

[0024] 图 4 是表示本实施方式 2 的充油型电气设备的诊断方法的实验结果的图。

[0025] 图 5 是表示本实施方式 2 的充油型电气设备的诊断方法的实验结果的图。

[0026] 图 6 是表示本实施方式 2 的充油型电气设备的诊断方法的实验结果的图。

[0027] 图 7 是表示本实施方式 3 的充油型电气设备的诊断方法的实验结果的图。

[0028] 图 8 是表示本实施方式 3 的充油型电气设备的诊断方法的实验结果的图。

## 具体实施方式

[0029] 实施方式 1.

[0030] 成为本发明的诊断方法的对象的充油型电气设备具备：装入绝缘油的容器，和具有浸渍于该绝缘油中的铜、铜合金的铜部件。例如，其为具有由铜制成的线圈、卷绕于该线圈的绝缘纸的变压器。此外，绝缘油为例如日本工业标准 JIS C 2320 中所示的绝缘油。

[0031] 本实施方式 1 的充油型电气设备的诊断方法是通过检测二硫化二苄等硫与苄基结合的硫化物从而诊断充油型电气设备异常的诊断方法。图 1 是表示本实施方式 1 的充油型电气设备的诊断方法的检测物质即硫化物中结合的苄基的部分的结构式。以下进行详细说明。

[0032] 如果充油型电气设备的绝缘油中有含硫的成分，已知如下问题：与铜反应而生成导电性的硫化铜，产生绝缘不良。但是，不知道绝缘油中的何种硫物质对硫化铜的生成影响

大。因此，考虑到如果能够明确指定对硫化铜的生成影响大的物质，则只检测该物质的存在，能够诊断基于硫化铜的生成的充油型电气设备的异常，进行了下述的实验。

[0033] 绝缘油中含有的硫化化合物各种各样，选择己硫醇、二己基硫醚、二硫化二己基、己基噻吩、苄硫醇、二苄基硫醚、二硫化二苄、二苄基亚砜，考察这些硫化化合物与铜的反应性。首先，制作将这些化合物分别溶解于 JIS C 2320 的 2 种 3 号油的绝缘油即烷基苯油中的试料油。对于溶解各化合物的量，调节该量以使溶解时硫的质量浓度为 30ppm。其次称量 4g 各试料油，封入 10cm$^3$ 的样品瓶。与各试料油一起封入样品瓶的气相部分为空气。进而，将铜板 (15mm×20mm、厚 0.2mm、约 0.5g) 装入该样品瓶，将铜板浸渍于试料油。在 135℃下将该样品瓶加热 72 小时，通过铜板的变色来评价与铜的反应性。再有，该变色由硫化铜的生成引起，变色越强则表示与铜的反应性越高，生成硫化铜越多。

[0034] 图 2 是表示用于确定本实施方式 1 的充油型电气设备的诊断方法而进行的实验结果的表。苄硫醇和二硫化二苄的变色最强，因此硫化铜的生成量多。此外，对于二苄基硫醚和二苄基亚砜，也产生变色，发现了硫化铜的生成。另一方面，己硫醇、二己基硫醚、二硫化二己基、己基噻吩几乎无变色，可知对硫化铜的生成的影响小。

[0035] 己硫醇、二己基硫醚、二硫化二己基、己基噻吩是硫与烷基结合的硫化化合物，它们对硫化铜的生成的影响小。另一方面，苄硫醇、二苄基硫醚、二硫化二苄、二苄基亚砜是硫与苄基结合的硫化物，可知与铜的反应性高。

[0036] 因此，如果检测出绝缘油中的硫与苄基结合的硫化物，能够判断充入该绝缘油的充油型电气设备容易产生硫化铜引起的绝缘不良。因此，本实施方式 1 的充油型电气设备检测硫与苄基结合的硫化物，根据该化合物的检测量来诊断上述充油型电气设备的充油型电气设备的异常。

[0037] 绝缘油中的硫化物的检测方法，例如，可以使用气相色谱质量分析法 GC-MS(Gas Chroma tograph-Mass Spectrometry)。由于明确指定检测的物质，因此即使少量的绝缘油也可检测。

[0038] 图 3 是表示本实施方式 1 的充油型电气设备的诊断方法的硫化物的检测手段的一例，即 GC-MS 的测定结果的图。该图表示包含 JIS C2320 的 1 种 4 号油的矿物油的绝缘油中含有二硫化二苄 ( 以下简称为 DBDS) 时用 GC-MS 测定的质量色谱。图中，横轴为导入气相色谱柱后的经过时间，纵轴为检测信号强度。纵轴用将信号强度最强的值记为 100 的任意单位表示。如图中所示，绝缘油中含有二硫化二苄时，将绝缘油导入柱后经过特定的时间 T 后，苄基的质量电荷比的检测信号强度出现峰。特定的时间 T 是因物质而异的时间，而且是还依赖于测定机、测定条件的时间。再有，图中在比 DBDS 的峰早的时间出现峰 Q，是由不是硫化物而是与本发明无关的物质产生的。此外，与峰 Q、DBDS 的峰重叠的宽信号是矿物油中所含成分产生的干扰，这些也不是硫化物产生的。

[0039] 从既有的充油型电气设备抽取少量其绝缘油，采用上述的检测方法检测该绝缘油中硫与苄基结合的硫化物，根据该化合物的检测量能够诊断该充油型电气设备是否异常或者产生异常的可能性高。

[0040] 异常的判断可以根据检测出了硫与苄基结合的硫化物，也可以根据含有特定的浓度以上的这些化合物。硫与苄基结合的硫化物的浓度非常低时，因充油型电气设备的构成而异，认为不会影响到硫化铜产生绝缘不良。即，这些硫化物的绝缘油中的允许浓度依赖于

变压器的绝缘结构，因此如果含有特定的浓度以上，则诊断变得更正确。

[0041] 采用本实施方式 1 的诊断方法，不必预先测定装入充油型电气设备的绝缘油中的硫化物，计测该硫化物量的时间变化。因此，对于既有的充油型电气设备的诊断容易。

[0042] 另一方面，可以测定装入充油型电气设备前的未使用的绝缘油中的硫与苄基结合的硫化物的浓度，计测该硫化物的浓度的时间变化。这些硫化物可以认为是在将绝缘油装入充油型电气设备的时刻混入。如果在装入充油型电气设备前检测这些硫化物，能够事先防止将这样的绝缘油装入充油型电气设备。此外，如后所述，认为这些硫化物与铜反应。伴随着硫化铜的生成，认为这些硫化物减少，因此由初期的硫化物的浓度和使用中的硫化物的浓度，也可以推定生成的硫化铜而诊断异常。

[0043] 实施方式 2.

[0044] 本实施方式 2 的充油型电气设备的诊断方法，是检测绝缘油中的联苄和二苄基硫醚的任一种化合物，根据该化合物的检测量来诊断充油型电气设备的异常的诊断方法。以下详细说明。

[0045] 绝缘油中存在二硫化二苄等硫与苄基结合的硫化物时，因与铜的反应而产生硫化铜的生成。如果检测因该反应而在硫化铜的生成时产生的化合物，能够间接地获知硫化铜的生成。但是，目前为止由于硫化铜生成的机理的详细情况不清楚，因此没有实现。

[0046] 在进行铜和硫与苄基结合的硫化物的反应产生的生成物的研究中，判明因该反应产生联苄和二苄基硫醚。认为其反应机理如下：首先，作为第 1 阶段，产生硫与苄基结合的硫化物吸附于铜板的反应，其次，作为第 2 阶段，硫化物与铜反应生成硫化铜，同时产生生成苄自由基和苄基硫自由基的反应。

[0047] 第 2 阶段生成的苄自由基，苄自由基之间反应，生成联苄。苄基硫自由基与氢自由基反应，生成苄硫醇，与苄自由基反应生成二苄基硫醚，而且苄基硫自由基之间反应，生成二硫化二苄。

[0048] 这些化合物中，苄硫醇在变压器内这样的铜共存的环境下，容易被氧化为二硫化二苄，无法与原来的化合物区分，因此不适合诊断。同样地，二硫化二苄也不适合已在变压器内生成的硫化铜的诊断。因此，联苄和二苄基硫醚适合诊断。

[0049] 这些在硫化铜生成时生成的联苄和二苄基硫醚可以通过 GC-MS 检测。

[0050] 其次，对于硫与苄基结合的硫化物与铜反应生成联苄和二苄基硫醚进行实验的结果，进一步详细说明。

[0051] 首先，作为含有与铜的反应性高的硫化物的绝缘油，将 DBDS 溶解于 JIS C 2320 的 2 种 3 号的绝缘油即烷基苯油中制作试料油。DBDS 使用和光纯药制的试剂，试料油中的硫的质量浓度为 30ppm。

[0052] 其次，将 5g 该试料油和约 0.5g 铜板（厚 0.2mm）密封在 10cm$^3$ 的样品瓶中。在 150℃下将该样品瓶加热规定的时间。通过加热使硫化铜的生成加速。生成的硫化铜附着于铜板的表面，由加热前后的铜板的重量变化能够求出生成的硫化铜量。

[0053] 其次，采用 GC-MS 装置求出联苄和二苄基硫醚的绝缘油中浓度。以下以联苄为例对步骤进行详细说明。称量加热后的试料油，进而用己烷将其稀释以在 GC-MS 分析中获得适度的信号强度。这里使用己烷，但如果烷基苯、联苄和 DBDS 容易溶解，也可以是其他溶剂。将该溶液 1mm$^3$ 注入气相色谱。

[0054] 联苄等的定量中使用气相色谱的峰面积值采用常规方法求出。数据解析可以采用总离子色谱求出，也可以使用采用选择性离子监测法得到的峰面积。

[0055] 图 4 和图 5 是表示本实施方式 2 的充油型电气设备的诊断方法的实验结果的图。图 4 和图 5 是 GC-MS 的气相色谱。图 5 是图 4 的虚线的四方部分的范围的放大图。图 4 中看到添加的 DBDS 的峰。图 5 中看到联苄的峰 BiBz。可由该峰面积和试料油重量算出油中的联苄浓度。再有，该联苄的峰在未使用的烷基苯油、未添加 DBDS 而装入铜加热的烷基苯油中没有看到，因此推定由 DBDS 和铜的反应生成。

[0056] 图 6 是表示本实施方式 2 的充油型电气设备的诊断方法的实验结果的图，表示采用上述方法求出的绝缘油中联苄量和由铜板的质量变化求出的硫化铜生成量的关系。由该图可知，绝缘油中的联苄浓度和硫化铜的生成量大致成正比。因此，通过对绝缘油中的联苄进行定量，能够推定生成的硫化铜量。

[0057] 联苄通常为在未使用的绝缘油中不含有的物质，从既有的充油型电气设备抽取少量绝缘油，通过检测出联苄能够推定生成了硫化铜，诊断充油型电气设备的异常。此外，对于二苄基硫醚，也与联苄同样地，可用于诊断充油型电气设备的异常。

[0058] 联苄和二苄基硫醚通常在未使用的绝缘油中不含有，因此可通过将这些物质和硫与苄基结合的硫化物同时检测来诊断充油型电气设备的异常。如果检测出两者，则推定硫化铜已生成的可能性更高，因此能够进行可靠度高的诊断。

[0059] 采用本实施方式 2 的诊断方法，不必预先检测装入充油型电气设备的绝缘油中的化合物，计测该化合物量的时间变化。因此，对于既有的充油型电气设备的诊断容易。

[0060] 另一方面，可以计测装入充油型电气设备前的未使用的绝缘油中的联苄、二苄基硫醚的浓度的时间变化，由该时间变化诊断充油型电气设备的异常。这些化合物可以认为是硫化物与铜的反应时生成，认为伴随着硫化铜的生成量增加而增加。因此，也可由其浓度变化量推定生成的硫化铜而诊断异常。

[0061] 实施方式 3.

[0062] 本实施方式 3 也如上述实施方式那样，是通过检测硫与苄基结合的硫化物、以及联苄和二苄基硫醚中的任一种化合物来诊断异常的充油型电气设备的诊断方法。本实施方式 3 的充油型电气设备的诊断方法具有：使绝缘油和氧化铝或硅胶接触的工序，将与绝缘油接触后的氧化铝或硅胶浸渍于溶剂的工序，采用 GC-MS 法分析将氧化铝或硅胶浸渍的溶剂而检测联苄或者硫与苄基结合的硫化物的任一种，根据联苄或硫化物的检测量诊断异常的工序。可以根据联苄的检测量和硫化物的检测量诊断异常。

[0063] 如实施方式 1 的图 3 所示，使用 JIS C 2320 的 1 种 4 号油作为绝缘油时，在 GC-MS 分析中，DBDS 等硫与苄基结合的硫化物的峰的位置与来自绝缘油中含有的与硫化铜的生成无关的成分的信号重叠。此外，信号在检测到联苄的峰位置也重叠，如果这些物质的浓度低，则产生不能检测出的问题。

[0064] 因此，特别是使用矿物油的绝缘油时，可以预先采用吸附剂将联苄、硫与苄基结合的硫化物与绝缘油中含有的与硫化铜的生成无关的成分分离，然后采用气相色谱 / 质量分析法进行分析。作为此时的吸附剂，可以使用氧化铝吸附剂或硅胶。以下对于使用了氧化铝吸附剂的实例进行说明。

[0065] 首先，在 JIS C 2320 的 1 种 4 号矿物油即不含有成为硫化铜的原因的硫的绝缘油

中，混合 DBDS 以使硫的质量浓度为 30ppm，制作试料油。DBDS 使用了和光纯药制的试剂。将 5g 该试料油和铜板（厚 0.2mm、质量约 0.5g）密封在 10cm$^3$ 的样品瓶中。在 150℃下将该样品瓶加热规定的时间。通过该加热硫化铜生成，由加热前后的铜板的质量变化能够求出生成的硫化铜量。

[0066] 将加热后的矿物油 200mm$^3$ 和己烷 200mm$^3$ 混合，将该混合液通入填充有氧化铝吸附剂的柱。填充的氧化铝吸附剂是市售产品，粒径为 10 ～ 100 微米左右。在柱中填充有采用常规方法活性化的氧化铝吸附剂约 100mg。

[0067] 联苄和二苄基硫醚被氧化铝吸附而残留在柱内，作为矿物油的主要成分的石蜡、环烷没有被吸附而从柱流出。但是，石蜡、环烷也有残留的部分，在这种情况下，可通过进一步用己烷对柱进行洗涤而将其除去。

[0068] 应充分地采用己烷进行洗涤，但如果过量，则作为目标的联苄等也会流出，因此优选根据氧化铝的干燥度等氧化铝的性质事先确定适合洗涤的己烷量。

[0069] 其次，通过将甲苯等溶剂通入柱内，能够回收该溶剂中的目标成分。用于溶出的溶剂并不限于甲苯。也可以使用二氯甲烷、甲醇等单一的液体，还可以使用甲苯 / 己烷溶液这样的混合溶剂。

[0070] 通过对经过以上步骤得到的含联苄等的溶剂进行 GC-MS 分析，检测联苄、硫与苄基结合的硫化物的至少任一种，诊断充油型电气设备的异常。

[0071] 图 7 和图 8 是表示本实施方式 3 的充油型电气设备的诊断方法的实验结果的图，示出甲苯溶液的色谱。图 8 为图 7 的虚线包围的区域的放大图。将图 7 与图 3 比较可知，矿物油中含有的与硫化铜的生成无关的成分的信号减少，能够明确地检测 DBDS 的信号。此外，图 8 中联苄的峰 BiBz 清楚。如图 3 所示矿物油中含有的其他成分的峰大时，该联苄的峰 BiBz 不能检测。

[0072] 在上述步骤中将氧化铝用于吸附剂，但即使使用硅胶也具有检测精度提高的同样的效果。此外，关于联苄、DBDS 对检测精度提高进行了说明，但对于以二苄基硫醚为首的其他硫与苄基结合的硫化物，也能够提高检测精度。

[0073] 由上述可知，如果使绝缘油与氧化铝或硅胶接触，将与绝缘油接触后的氧化铝或硅胶浸渍于溶剂，采用 GC-MS 法分析将氧化铝或硅胶浸渍的溶剂而检测联苄、或者硫与苄基结合的硫化物的任一种，则联苄、硫化物的检测精度提高，因此能够高精度地诊断充油型电气设备的异常。

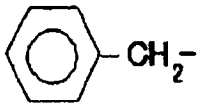



图 1

| 化合物名 | 化合式 | 变色（硫化铜生成） |
|---|---|---|
| 己硫醇 | C7H13SH | 无 |
| 二己基硫醚 | C7H13SC7H13 | 无 |
| 二硫化二己基 | C7H13SSC7H13 | 无 |
| 己基噻吩 | C4H5SC7H13 | 无 |
| 苄硫醇 | C6H5CH2SH | 有 |
| 二苄基硫醚 | C6H5CH2SCH2C6H5 | 有少许 |
| 二硫化二苄 | C6H5CH2SSCH2C6H | 有 |
| 二苄基亚砜 | C6H5CH2SOCH2C6H5 | 有少许 |

图 2

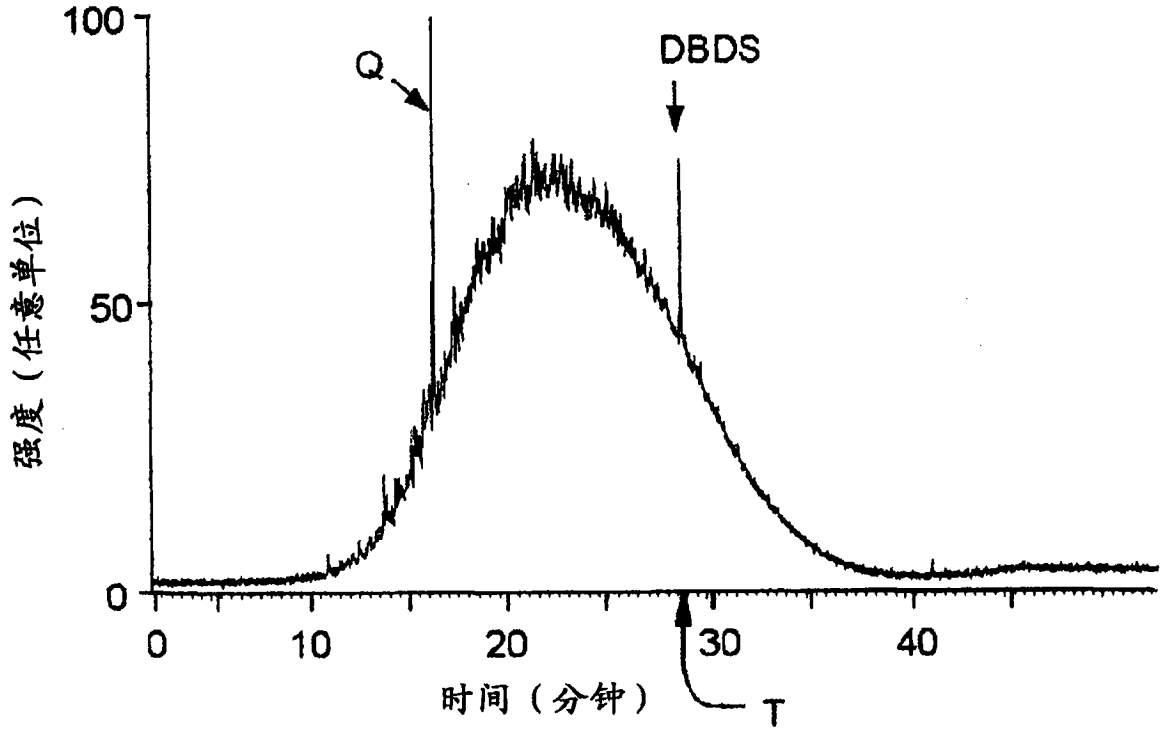



图 3

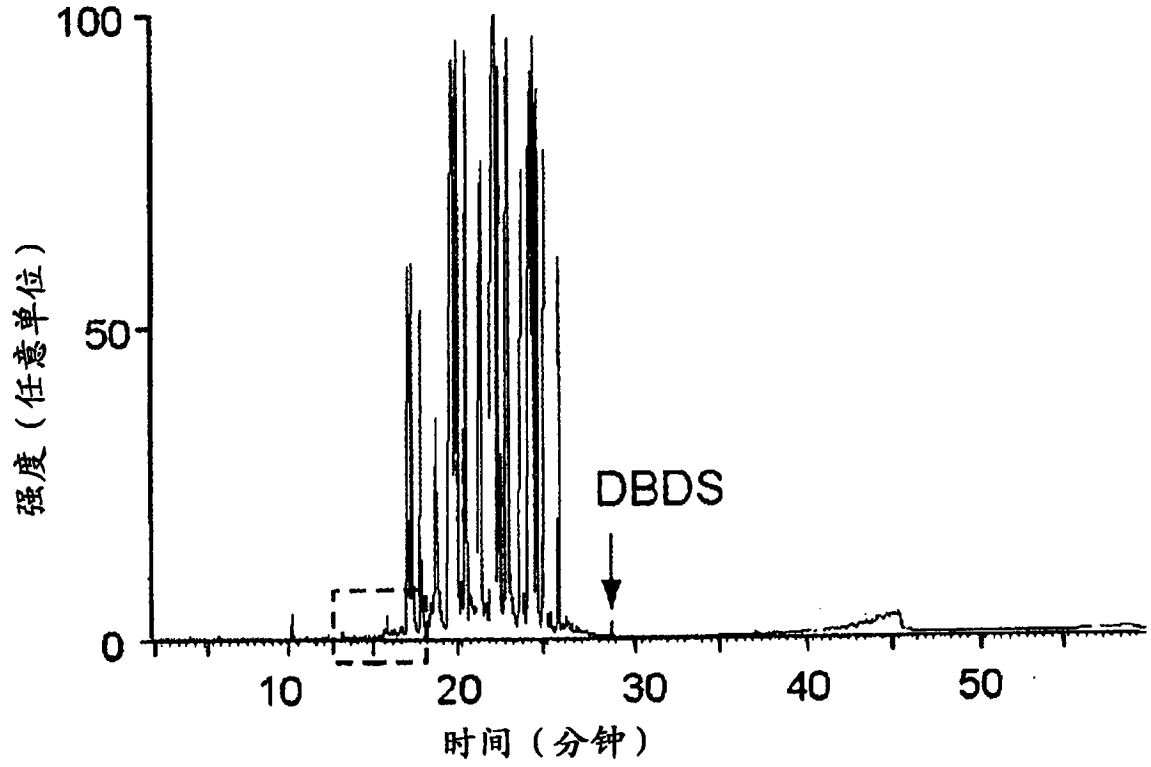

100
50
0
强度（任意单位）
DBDS
10
20
30
40
50
时间（分钟）

图 4

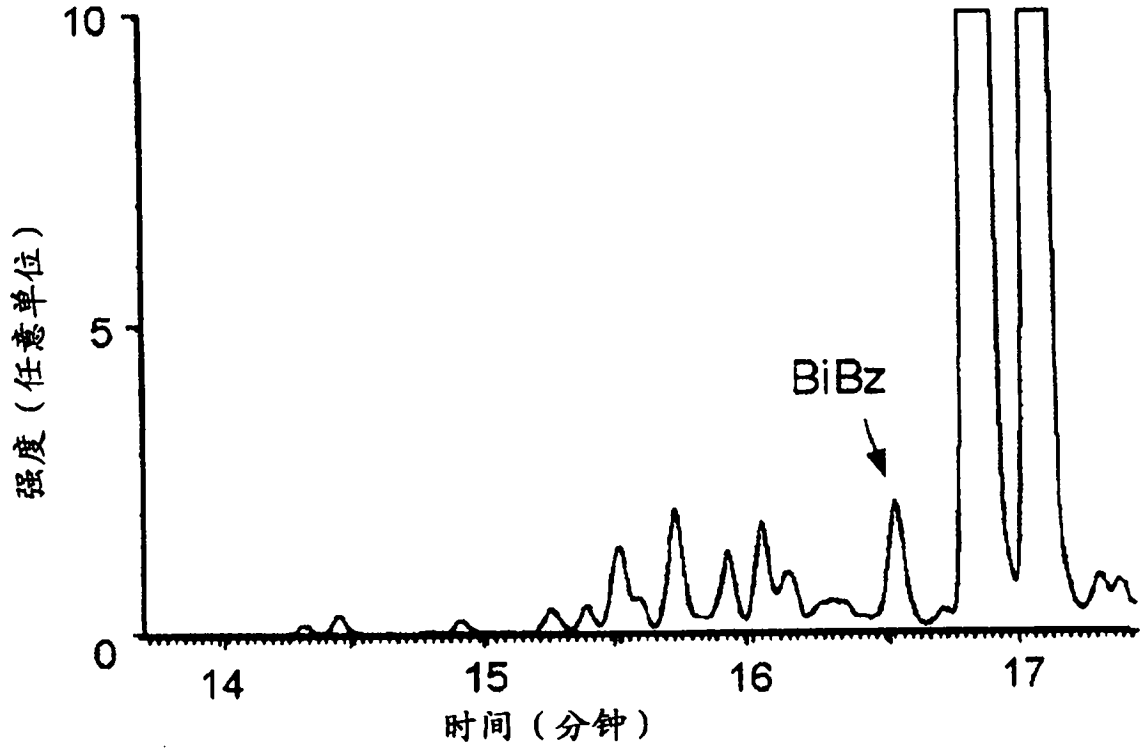

10
5
0
强度（任意单位）
BiBz
14
15
16
17
时间（分钟）

图 5

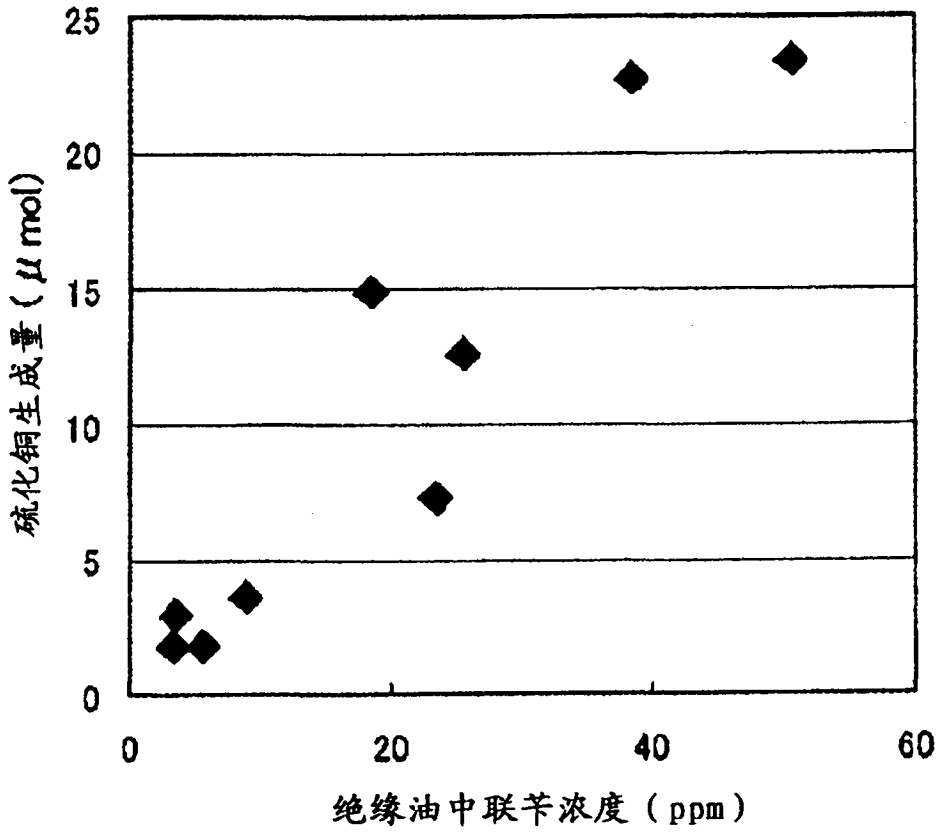

硫化铜生成量（μmol）
25
20
15
10
5
0
0
20
40
60
绝缘油中联苄浓度（ppm）

图 6

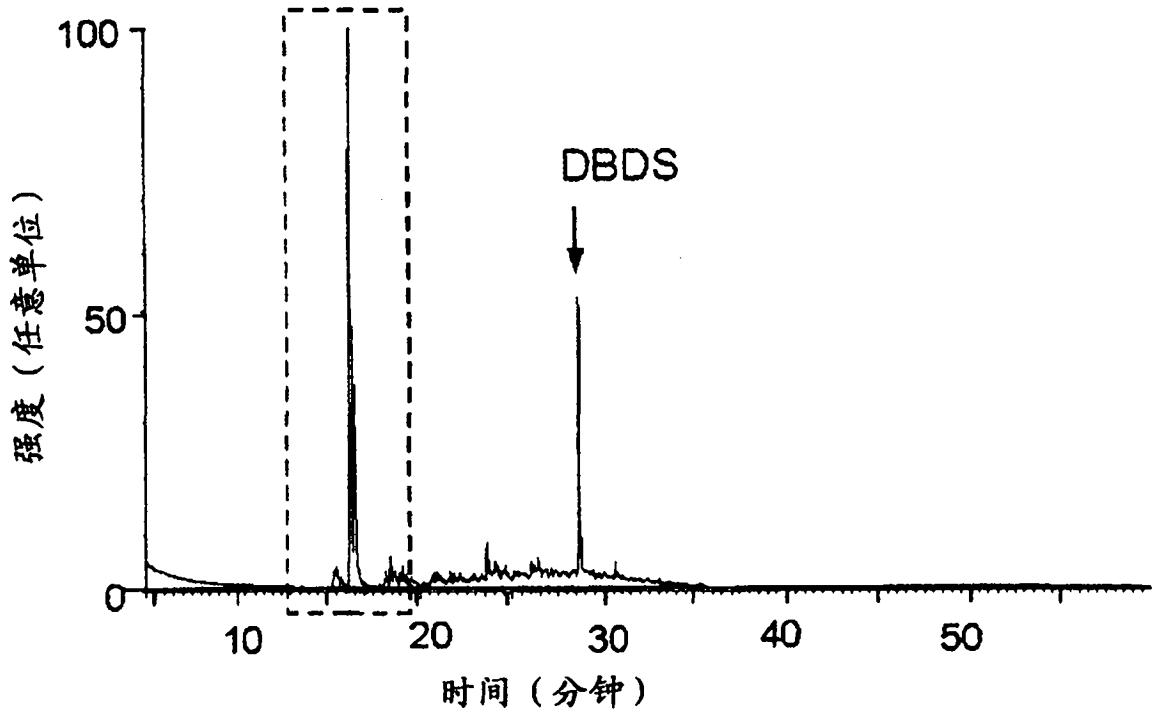

强度（任意单位）
100
50
0
DBDS
10
20
30
40
50
时间（分钟）

图 7

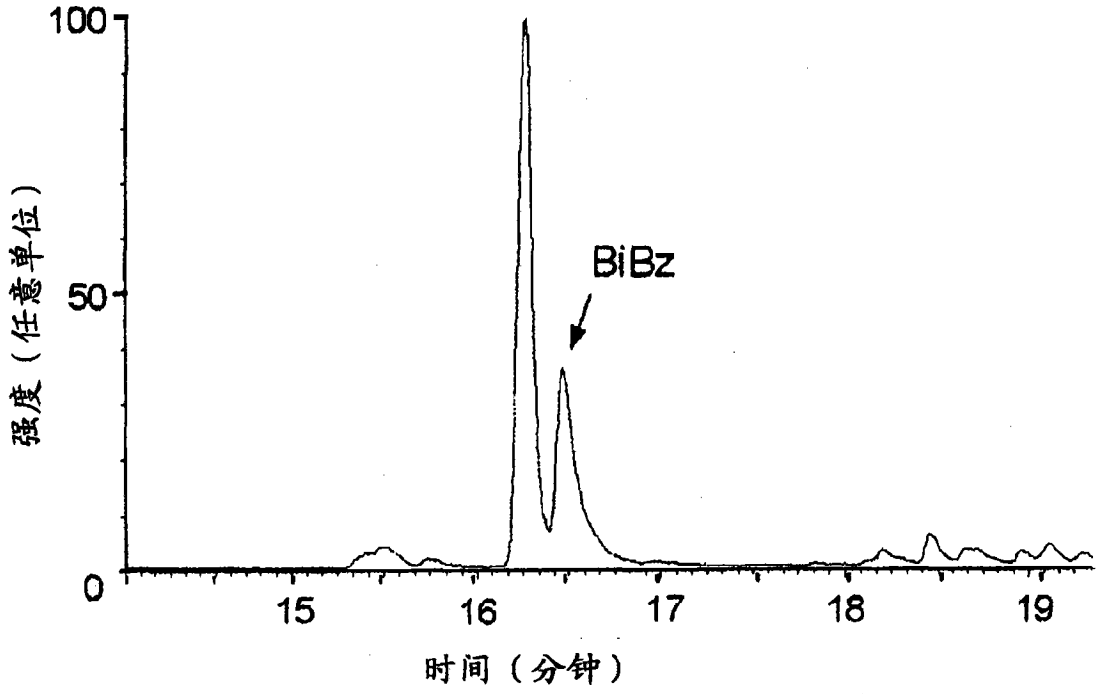



图 8