

ICS 29.040.10

E 38

备案号: 24192-2008



中华人民共和国电力行业标准

DL / T 1094 — 2008

电力变压器用绝缘油选用指南

Guide to the choice of power transformer oil

2008-06-04 发布

2008-11-01 实施

中华人民共和国国家发展和改革委员会 发布

第一章、目 次

前言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 2

4 变压器用油选用原则和技术指标 3

5 包装、运输和贮存 4

附录 A（资料性附录） 油在变压器中的基本功能和变压器油的性质 5

附录 B（规范性附录） GB 2536—1990 对变压器油的技术指标规定 10

附录 C（规范性附录） IEC 60296—2003 标准所含的通用规范表和对高温下运行的
变压器用油经氧化试验后的指标要求 11

前 言

为了适应交直流超高压和特高压输变电工程迅速发展的形势对变压器的要求，针对我国现有变压器油选用标准的不足，特别是 SH 0040—1991《超高压变压器油》标准已不能适应选择用油的要求，根据《国家发展改革委办公厅关于印发 2006 年行业标准项目计划的通知》（发改办工业〔2006〕1093 号）的要求，特制定本标准。

本标准参照 IEC 60296—2003《变压器及开关用未使用过的矿物绝缘油》和 GB 2536—1990《变压器油》的技术要求，并结合国内长期使用变压器油的经验，依据安全、寿命、经济性兼顾的原则进行编制。

本标准在编制过程中，为加深对不同专业知识的了解，兼顾电气和油化学专业的要求，邀请了电力变压器运行、制造部门和变压器油的炼制、供油厂家共同制定，有利于变压器油技术指标的确定、稳定炼制工艺及对设备的制造和维护管理。

本标准的附录 A 为资料性附录，附录 B、附录 C 为规范性附录。

本标准由中国电力企业联合会提出。

本标准由电力行业电力变压器标准化技术委员会归口并解释。

本标准起草单位：中国电力科学研究院、湖北省电力试验研究院、中国石油克拉玛依润滑油厂、西安热工研究院、国网武汉高压研究院、保定天威变压器股份有限公司、西安西电变压器有限责任公司、特变电工沈阳变压器集团有限公司。

本标准主要起草人：凌愍、王瑞珍、马书杰、孟玉婵、付锡年、张玲俊、董宝骅、李强、刘丰、李光范、金文龙、张淑珍。

本标准在执行过程中的意见或建议反馈至中国电力企业联合会标准化中心（北京市白广路二条一号，100761）。

1. 电力变压器用绝缘油选用指南

● 1 范围

本标准规定了变压器用油的选用原则。

本标准适用于油浸式变压器、电抗器、互感器等设备，其中包括 500kV 及以上超高压和特高压交流和换流变压器、并联和平波电抗器、互感器用的新（未被使用过的）变压器油的选用。

● 2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件，其随后所有的修改单（不包括勘误的内容）或修订版均不适用于本标准，然而，鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件，其最新版本适用于本标准。

GB/T 259 石油产品水溶性酸及碱测定法（GB/T 259—1988，ГОСТ 6307：1975，NEQ）

GB/T 261 石油产品闪点测定法（闭口杯法）（GB/T 261—1983，ISO 2719：1973，NEQ）

GB/T 262 石油产品苯胺点测定法

GB/T 264 石油产品酸值测定法（GB/T 264—1983，ASTM D974，NEQ）

GB/T 265 石油产品运动粘度测定法和动力粘度计算法

GB/T 507 绝缘油 击穿电压测定法（GB/T 507—2002，IEC 60156：1995，EQV）

GB/T 510 石油产品凝点测定法

GB/T 1884 原油和液体石油产品密度实验室测定法（密度计法）（GB/T 1884—2000，ISO 3675：1998，EQV）

GB/T 1885 石油计量表（GB/T 1885—1998，ISO 91—2：1991，EQV）

GB 2536 变压器油（GB 2536—1990，IEC 60296：1982，NEQ）

GB/T 3535 石油产品倾点测定法（GB/T 3535—2006，ISO 3016：1994，MOD）

GB/T 5654 液体绝缘材料 相对电容率、介质损耗因数和直流电阻率的测量（GB/T 5654—2007，IEC 60247：2004，IDT）

GB/T 6541 石油产品油对水界面张力测定法（圆环法）（GB/T 6541—1986，ISO 6295：1983，EQV）

GB/T 7595 运行中变压器油质量标准

GB/T 21216 绝缘液体 测量电导和电容确定介质损耗因数的试验方法（GB/T 21216—2007，IEC 61620：1998，IDT）

DL 418 绝缘液体雷电冲击击穿电压测定法

DL/T 419 电力用油名词术语

DL 423 绝缘油中含气量的测定 真空压差法

DL/T 432 电力用油中颗粒污染度测量方法

DL/T 703 绝缘油中含气量的气相色谱测定法

DL/T 929 矿物绝缘油、润滑油结构族组成的红外光谱测定法

DL/T 1095 变压器油带电度现场测试导则

SH 0040—1991 超高压变压器油

SH/T 0206 变压器油氧化安定性测定法

SH/T 0207 绝缘油水含量测定法

SH/T 0304 电气绝缘油腐蚀性硫试验法

SH/T 0725 石油基绝缘油碳型组成计算法

IEC 60156 Insulating liquids — Determination of the breakdown voltage at power frequency — Test method

IEC 60296—2003 Fluids for electrotechnical applications — Unused mineral insulating oils for transformers and switchgear

- IEC 60590 Determination of the aromatic hydrocarbon content of new insulating oils
- IEC 60628 Gassing of insulating liquids under electrical stress and ionization
- IEC 60666 Detection and determination of specified anti-oxidant additives in insulating oils
- IEC 60814 Insulating liquids — Oil-impregnated paper and pressboard — Determination of water by automatic coulometric Karl Fischer titration
- IEC 61125 Unused hydrocarbon based insulating liquids — Test methods for evaluating the oxidation stability
- IEC 61198 Mineral insulating oils — Methods for the determination of 2-furfural and related compounds
- IEC 61619 Insulating liquids — Contamination by polychlorinated biphenyls (PCBs) — Method of determination by capillary column gas chromatography
- IEC 61868 Mineral insulating oils — Determination of kinematic viscosity at very low temperatures
- IEC 62021-1 Insulating liquids — determination of acidity — Part 1: Automatic potentiometric titration
- ISO 2719 Determination of flash point — Pensky-Martens closed cup method
- ISO 3016 Petroleum products — Determination of pour point
- ISO 3104 Petroleum products — Transparent and opaque liquids — Determination of kinematic viscosity and calculation of dynamic viscosity
- ISO 3675 Crude petroleum and liquid petroleum products — Laboratory determination of density — Hydrometer method
- ISO 6295 Petroleum products — Mineral oils — Determination of interfacial tension of oil against water — Ring method
- ISO 12185 Crude petroleum and petroleum products — Determination of density — Oscillating U-tube method
- ISO 14596 Petroleum products — Determination of sulfur content — Wavelength-dispersive X-ray fluorescence spectrometry
- BS 2000 Part 346 Determination of polycyclic aromatics in lubricant base oil and asphaltene free petroleum fractions — Dimethylsulfoxide refractive method
- BS 2000 Part 373 Determination of sulfur content of light and middle distillates — Oxidative microcoulometry
- DIN 51353 Detection of corrosive sulfur — Silver strip

● 3 术语和定义

DL/T 419 确立的以及下列术语和定义适用于本标准。

3.1

未使用过的矿物绝缘油（新变压器油） unused mineral insulation oil

由原油经过分馏和精制而成的油品，油供应商通过标准规定的贮存和运输方式送到交货地点的油（GB/T 7595 中称为新变压器油），既未接触过电气设备也未与贮存和运输无关的容器接触过。

3.2

碳型结构（结构族组成） carbon type composition

所谓碳型结构，就是将组成复杂的基础油简单看成是由芳香环、环烷环和烷基侧链三种结构组成的单一分子，分别用 $\%C_A$ 、 $\%C_N$ 、 $\%C_P$ 表示上述三种碳原子分布的百分数。通常评定生产变压器油用的基础油除常规的理化性质外最简单的方法是碳型结构（结构族组成）。目前，一般采用IEC 60590 或SH/T 0725 和DL/T 929 测定。

3.2.1

链烷碳原子百分组成 $\%C_P$ percent of paraffinic carbons

烷基侧链上的碳原子占整个分子总碳数的百分数。变压器油碳型结构中 $\%C_P$ 值高说明油

品组成中链烷烃含量高。链烷烃是变压器油中的主要结构组分之一，但其中的直链烷烃即正构烷烃（石蜡），低温时会析出，对水及氧化产物的溶解性、热稳定性较差，易形成油泥。

3.2.2

环烷碳原子百分组成 %C_N percent of naphthenic carbons

环烷环上的碳原子占整个分子总碳数的百分数。变压器油碳型结构中 %C_N 值高说明油品组成中环烷烃含量高。环烷烃也是变压器油中的主要结构组分之一，可含有 5、6、7 个碳原子环（多数为 6 个碳原子环），环烷烃具有优良的低温性能和较好的对水和氧化产物的溶解性。

3.2.3

芳香碳原子百分组成 %C_A percent of aromatic carbons

芳香环上的碳原子占整个分子总碳数的百分数。变压器油碳型结构中 %C_A 值高说明油品组成中芳香烃含量高。芳香烃是变压器油中的重要结构组分，至少有一个由 6 个碳原子组成的单、双键交替结构的苯环，其结构和理化性能完全不同于链烷烃和环烷烃，单环芳香烃电气性能较好，吸气性和氧化稳定性也较好，而多环芳香烃（PCA，见附录 A 的 A.2.2.4）在油中也自然存在，利少弊多。

3.3

环烷基、石蜡基和中间基油 naphthenic, paraffinic and intermediate oil

一般采用碳型结构来区分变压器油的基属，通常的区分是：C_p < 50% 为环烷基油，C_p = 50% ~ 56% 为中间基（混合基）油，C_p > 56% 为石蜡基油。

3.4

最低冷态投运温度 lowest cold start energizing temperature (LCSET)

变压器油的粘度不大于 1800 mm²/s（对应 -40℃ 时，粘度应不大于 2500 mm²/s）所对应的温度。IEC 60296—2003 将其作为区分绝缘油类别的重要标志之一。

● 4 变压器用油选用原则和技术指标

4.1 通用要求

4.1.1 供油方应有稳定的油源，对基础油严格的质量控制和管理及成熟的炼制工艺。所供油品应经过运行考核，证明具有良好的氧化安定性和质量稳定性。

4.1.2 供油方提供符合标准规定的各项指标要求的检测报告，同时说明所加添加剂的种类和含量。

4.1.3 选择变压器油倾点应低于最低月环境平均温度。

4.1.4 变压器油生产商供应的变压器油其油源、生产工艺和添加剂配方改变时应及时通知变压器油使用者。

4.2 一般变压器用油

应符合 GB 2536 标准要求（见附录 B）。

4.3 500kV 及以上变压器用油性能指标

4.3.1 除通用要求外，还应符合 IEC 60296—2003（见附录 C 的 C.1），两者不一致时以 IEC 60296 为准（试验方法除按附录 B 外其余按 IEC 60296—2003 进行），不再采用 SH 0040—1991《超高压变压器油》。

4.3.2 油基和添加剂

a) 优先选择环烷基油。

b) 抗氧化剂，可选用 2, 6-二叔丁基对甲酚（T501），含量为 (0.3 ± 0.05) %。

c) 油中除抗氧化剂外, 不推荐加其他任何添加剂, 除非有公认的并经过大量试验和运行验证的添加剂。

4.3.3 验收合格的新油经脱气和过滤净化处理后, 还应满足下列各项的指标要求:

击穿电压, kV	≥ 70
介质损耗因数 (DDF, 90℃)	≤ 0.002
含水量, mg/L	≤ 10
含气量 (V/V), %	≤ 1.0
油中颗粒数 ($\geq 5\mu\text{m}$), 个/100ml 油	报告

4.3.4 特高压变压器、换流变压器、升压变压器、并联和平波电抗器及运行温度较高的变压器用油, 应满足高氧化安定性和低硫含量的要求 (见附录 C 的 C.2)。

4.3.5 对 750kV 及特高压变压器、电抗器, 油品供应单位应提供以下测试项目 (包括测试方法和结果) 的试验报告:

- a) 脉冲击穿电压;
- b) 析气性;
- c) 带电度 (带电倾向, ECT);
- d) 碳型结构及苯胺点分析结果;
- e) 界面张力。

● 5 包装、运输和贮存

5.1 一般要求

变压器油是一种质量要求很高的石油产品, 在生产、储存、运输、使用等各个环节都应满足专门规定的要求, 严防污染和进水。

5.2 容器

5.2.1 变压器油贮存和运输的容器 (储罐、汽车罐车、铁路罐车、集装罐等) 包括管线所使用的材质与变压器油两者的兼容性必须符合要求。

5.2.2 变压器油所用容器包括管线必须和其他油的容器严格分开, 防止混油。装变压器油的油罐要有防潮措施或密闭以避免接触潮湿空气。

5.3 运输和贮存

5.3.1 变压器油在运输和贮存过程中, 严禁水和颗粒杂质的混入。

5.3.2 桶装变压器油严禁与润滑油或其他油的油桶混放。

5.4 包装容器标识

包装容器上至少应有以下标识:

- a) 供货方名称;
- b) 油品名称 (包括抗氧化剂含量标识、凝点);
- c) 油重。

5.5 供货文件

供货时至少应提供以下文件:

- a) 供货方名称;
- b) 油品名称 (包括抗氧化剂含量标识、凝点);
- c) 出厂检验证书及相应的试验报告;
- d) 添加剂的种类和含量。

附录 A (资料性附录)

油在变压器中的基本功能和变压器油的性质

A.1 油在变压器中的基本功能

A.1.1 冷却

变压器运行损耗所产生的热量借热传导经固体绝缘或直接传给油，油借自身的热对流或外部的强迫循环，通过油箱壁和冷却器，利用自然或强迫风或用水冷却热油，从而完成由油传递热量的全过程。

采用粘度低（受其他性能制约不可能太低）的油，可提高变压器的冷却效率，对采用热对流循环的冷却方式更为有利。变压器的设计是在首先满足温升限值的条件下，根据损耗所产生的热量来确定冷却能力，不对粘度提出苛刻要求。

A.1.2 绝缘

变压器中大量的不同部件处于不同的电位，需要用绝缘介质隔离。油纸结合的绝缘介质用于变压器已有百年以上的历史，特别是高电压、大容量的变压器，至今无突破性超越。油浸入纤维绝缘内部提高了纤维绝缘的绝缘强度，而纸（板）对油的屏障作用又提高了油隙的绝缘强度，因而提高了变压器整体的绝缘性能。

变压器的绝缘介质需要承受多种电压的作用，包括长期的工作电压和短时过电压以及操作、雷电等冲击电压作用，对直流输电系统中用的换流变压器（平波电抗器）还需承受高的直流和极性反转电压的作用，在制造厂中都需经过相应的试验程序和绝缘水平的考核。为了保证顺利通过试验和长期运行的安全，对高电压等级的设备用油提出某些较高要求，是考虑到设备所处的重要位置和防止可能出现的质量疏忽，是从提高可靠性出发，并非为了提高同一油隙下的设计许用场强。因此对绝缘介质之一的变压器油按电压等级来划分（如 SH 0040—1991《超高压变压器油》）是不科学的，与国际上的通用原则也不一致。

A.1.3 信息载体

油是变压器的“血液”，通过不同方法检验，能反映变压器内正常和不正常的运行状态。如油中气体成分异常是反映设备内部潜伏性故障的征兆；绝缘老化反映在油中水分、酸值、糠醛等含量的增加；油中含气量的增加显示了密封变压器密封上的缺陷等。很多情况下，油只是获取信息的载体，并不是问题的根源。

另外，全密封油浸式套管（充油电缆终端压力箱）中的油，主要起绝缘作用，所用的油一般由套管制造厂选择（补油时应注意），也可作为信息的载体，但结构决定应尽量少取油样。有载调压开关切换开关室（带储油柜）的油，主要起绝缘和灭弧作用，也可从中获得信息。

A.1.4 保护功能

油能起到使铁芯和线圈等组件与空气和水分隔离的作用，避免锈蚀和直接受潮。

对纤维绝缘材料，由于油充填在纤维空隙之中，因此可将易于氧化的纤维素所吸收的氧含量减少到最低限度。也就是说，油会使混入设备中的氧首先起氧化作用，从而延缓了氧对纤维绝缘材料的侵蚀。

A.2 变压器油的性质

A.2.1 性质指标分类

A.2.1.1 通常（按检测方法）分类

- a) 物理性能：如外观、密度、粘度、闪点、倾点、界面张力等；
- b) 化学性能：如氧化安定性、酸值、硫含量、水含量等；
- c) 电气性能：如击穿电压、介质损耗因数、电阻率等。

A.2.1.2 IEC 60296—2003 分类方法

- a) 功能特性：与绝缘和冷却功能相关的性质。包括粘度、密度、倾点、水含量、击穿电压、介质损耗因数。
- b) 精制与稳定性：受原油的类型、精制的质量及添加剂影响的性质。包括外观、界面张力、硫含量、酸值、腐蚀性硫、抗氧化剂、2-糠醛含量。
- c) 运行性能：油的长期运行条件和（或）对高电场应力和温度的反应相关的性能。包括氧化安定性、析气性等。
- d) 健康、安全和环境因素：与人体健康、安全运行和环境保护相关的性质。包括闪点、密度、PCA（多环芳香烃）、PCB（多氯联苯）。

A.2.2 性质指标及其意义

A.2.2.1 功能特性

A.2.2.1.1 粘度

液体流动时内摩擦力的量度，粘度随温度的升高而降低。标准规定在指定温度下用运动粘度评价变压器油，单位是 mm^2/s 。用粘度的上限值作为对冷却效果的保证。

随着温度升高油粘度下降，下降的速率取决于油的化学组分。通常，用粘度指数来表示油品粘度随温度变化的特性，粘度指数高表明油品的粘度随温度变化较小。在变压器正常的工作温度下，环烷基油的粘度指数 VI（Viscosity Index）低于石蜡基油，用环烷基油比用石蜡基油更有利于变压器的冷却。

A.2.2.1.2 倾点（和凝点）

倾点：在规定条件下，被冷却的试样能流动的最低温度，单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。

凝点：试样在规定条件下冷却至停止流动的最高温度，单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。

理论上，对同一油品两者是一致的，而实际上由于测定方法和条件不同两者之间有一定的差别，还因油品的组分和性能不同，其差值也有所不同，一般约差 $2^{\circ}\text{C}\sim 3^{\circ}\text{C}$ 。显然油的凝点不是一般意义上的物理常数，其值与油的化学组分有关。石蜡基油的凝点高于环烷基油，这往往是由石蜡结晶引起的。凝点高的油不宜在寒冷地区使用，不宜采用添加抗凝剂降低变压器油的凝点。

A.2.2.1.3 含水量

存在于油品中的水分含量。

水在油中的溶解度随温度的升高而增大（采用真空热油循环干燥变压器的原理），油中溶解水的能力还随芳香烃含量的增加而增加，这也是芳香烃含量过高的油的水分含量很难被处理到规定值的原因。

油中游离水的存在或在有溶解水的同时遇到有纤维杂质时，将会降低油的电气强度。将油中含水量控制在较低值，一方面是防止温度降低时油中游离水的形成，另外也有利于控制

纤维绝缘中的含水量，还可降低油纸绝缘的老化速率。

A.2.2.1.4 击穿电压

在规定的试验条件下，绝缘体或试样发生击穿时的电压。

通常标准规定的均指油在工频电压作用下的击穿电压值。它表征油耐受电应力的能力，该值与油的组成和精制程度等油本质因素无关，受油中杂质的影响，温度对其也有影响。影响最大的杂质是水分和纤维，特别是两者同时存在时。油品经净化处理后，不同油的击穿电压值都可得到很大提高。因此，从某种意义上说，击穿电压值不是油品本身的电气特性，而是对油物理状态的评定。

A.2.2.1.5 密度

在规定温度下，单位体积内所含物质的质量数，以 g/cm^3 或 g/ml 表示。由于油的密度受温度影响较大，标准规定的密度是指 20°C 时的值。

油品的密度与炼制中切割馏分的温度及其化学组分有关。要求油的密度尽量小一些，是使油中水分和生成的沉淀物能尽快下沉到油箱的底部。标准规定油的密度不大于 $0.895\text{g}/\text{ml}$ ，是为了即使在极低温度下因游离水凝结成冰也不致漂浮在油层表面而影响绝缘。

油密度发生变化，可能是轻馏分的蒸发或受到重质油的污染使密度增大，或混入了轻质油使密度降低，在油的处理过程中需要注意。

A.2.2.1.6 介质损耗因数（DDF）

在工频电压作用下，利用电桥测量标准试油杯中流过油的有功电流与无功电流的无量纲的比值，是检验油的电气性能的方法之一。

它是由于介质电导和介质极化的滞后效应，在其内部引起的能量损耗，取决于油中可电离的成分和极性分子的数量，同时还受到油精制程度的影响。介质损耗因数增大，表明油受到水分、带电颗粒或可溶性极性物质的污染。它对油处理过程中的污染非常敏感，对变压器而言，内部的清洁度是至关重要的。

A.2.2.2 精制与稳定性

A.2.2.2.1 酸值

在规定条件下， 1g 试油中的酸性组分所消耗的氢氧化钾毫克数。

新油的酸值可以达到十分低的程度，除非受到污染。油经氧化试验后的酸值是评定该油氧化安定性的重要指标之一。它是反映油早期劣化阶段的主要指标，因此也是运行性能指标。

A.2.2.2.2 界面张力

指油与纯水（不相容且极性极强）之间的界面分子力的作用，表现为反抗其本身的表面积增大的力。用来表征油中含有极性组分的量，单位为 N/cm 或 mN/cm 。

该指标对油的运行性能没有影响，但可用于判断油处理过程中是否受到污染和油经运行一段时间后的老化程度。

A.2.2.2.3 总硫含量

油中存在多种有机硫化物，它与原油的产地及油的精制工艺质量有关。油在精制（脱硫）过程中大量硫化物已被清除，但仍会有极少量的硫化物存在。因此对总硫含量的测量也是对油的精制工艺和质量的检验。特别应对产自高硫含量原油的制品提出相应指标要求。

A.2.2.2.4 腐蚀性硫

指存在于油品中的腐蚀性硫化物（包括游离硫）。

某些活性硫化物对铜、银（开关触头）等金属表面有很强的腐蚀性，特别是在温度作用

下，能与铜导体化合形成硫化铜侵蚀绝缘纸，从而降低绝缘强度。因此，变压器油中不允许存在腐蚀性硫。

A.2.2.2.5 抗氧化剂

加入油品中可以抑制其氧化的添加剂。例如 2, 6-二叔丁基对甲酚（代号：T501）抗氧化添加剂，我国自 20 世纪 60 年代开始在变压器油中加入，已积累大量运行经验。

A.2.2.2.6 2-糠醛

用目前测试方法测到的呋喃化合物中的主要成份（国内通常称糠醛）。

在新油中表征某些油在炼制过程中经糠醛精制后的残留量，与油性能无关。运行中的油则可由糠醛含量了解变压器中纤维绝缘的老化程度。限制新油中的含量是为了尽量避免对运行中绝缘老化程度判断的干扰。

A.2.2.3 运行性能

A.2.2.3.1 氧化安定性

它表征油抵抗大气（或氧气）的作用而保持其性质不发生永久变化的能力，是变压器油的一项重要性能指标。

油的氧化安定性与油的精制程度及组分有关。原“超高压油”为提高析气性能，在油中添加浓缩芳烃，结果使油的氧化安定性变差，从油的长期运行稳定性出发是不可取的。

标准规定油的氧化安定性，是由油经过规定条件下的氧化试验后油中的总酸值、沉淀物和介质损耗因数等指标来确定的。IEC 60296 根据油中是否添加抗氧化剂和添加量的不同，规定了不同的氧化试验时间。对于经常处于高温下运行的变压器中的油，经氧化安定性试验后，其控制指标的要求比一般变压器油均有很大提高（见附录 C 的 C.1、C.2）。

A.2.2.3.2 析气性

指绝缘油在电应力作用下烃分子被电离的情况下吸收或释放气体的特性。在标准规定的试验条件下，当吸收气体量大于释放气体量时，析气速率的表示值（ $\mu\text{L}/\text{min}$ ）为“负”，反之为“正”。析气速率值小的油析气性能相对较好。

油在电场作用下吸收气体的实质是：电场的作用使油含有的芳香烃中的芳环被电离后打开双键，并与游离的氢离子多次相结合，最终形成稳定的新环烷烃。析气性所体现的是油的“吸氢”（实际为吸收氢离子）能力和油被裂解形成的烃类气体（部分溶在油中）在油面反映出的压力变化的综合效应：吸氢使油面压力降低，裂解出的气体使油面压力升高，其结果是油中芳烃含量逐渐减少，环烷烃含量增加，部分饱和烃被裂解。

显然，芳香烃含量越多，可被打开的苯环双键就多，吸气效果越好。如果少油设备内部存在极低能量的局部放电（以裂解出氢离子为主要特征），油中芳香烃多时，因不易形成氢气气泡，会起到对“放电”的抑制作用。但对于变压器，由大量的油中气体分析数据可知，内部有“放电”故障时除产生氢外，还有烃类气体和一氧化碳等，只靠芳烃吸氢是无法抑制“放电”的，还有可能使潜伏的放电性故障延时发现。更何况人为添加含有很多多环芳香烃的添加剂会带来氧化安定性和绝缘相关的性能变差的问题。因此认为选用变压器油时，不应片面追求高的析气性指标。

A.2.2.4 健康、安全和环境

A.2.2.4.1 闪点（闭口）

在规定的条件下，加热油品所逸出的蒸汽和空气组成的混合物与火焰接触发生瞬间闪火时的最低温度。闭口闪点是用规定的闭口杯闪点测定器所测得的闪点，单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。

作出油闪点不能过低的初衷是为了防止变压器油在正常呼吸过程中因蒸发使油过分耗散导致油量快速减少使油位过低，降低油的对流循环冷却作用，甚至使铁芯和线圈露出油面，影响安全运行。这种情况基本上只适用于不带储油柜的配电变压器，对一般变压器这种情况已不存在。目前主要是从“防火”的角度考虑，不希望闪点过低。

闪点的降低主要受轻组分油的污染或油中溶解有可燃气体。曾用闪点的降低判断变压器内部存在故障，现早已用油中气体分析替代了这一功能，运行中油可不测闪点。

A.2.2.4.2 多环芳香烃（PCA）含量

通常将两个苯环及以上的芳香烃称为多环芳香烃或稠环芳香烃。

某些多环芳香烃被认为有致癌作用，因此作为控制指标。从绝缘性能看，多环芳香烃对油的冲击击穿电压有降低作用、易吸潮、易产生油流静电及对抗氧化性能不利等。

A.2.2.4.3 多氯联苯（PCB）含量

在联苯分子中两个或两个以上的氢原子被氯原子取代后，得到的一些同分异构物和同系物混合而成的绝缘液体。

PCB 是一种有毒化合物，会对肝脏、神经和内分泌系统等造成损伤，也是致癌物质，因此被严格控制。但由于其电气性能良好、燃点高，过去曾被一些国家作为绝缘介质使用，在我国曾有少量电容器使用过。由原油精制而成的矿物绝缘油不含任何多氯联苯，为防止矿物绝缘油受到污染而被列入控制指标。

A.2.2.5 导则中补充的试验项目

A.2.2.5.1 冲击击穿电压

按标准规定的试验方法，油在冲击电压作用下发生击穿时的峰值电压。试验方法按 DL 418。

它与工频击穿电压相反，其值与油的组分密切相关，而与油中的水分和其他杂质关系不大。油中芳烃含量，特别是多环芳烃、胶质等含量增多使击穿电压峰值明显降低。因此它是评定油品本身电气性能的指标。

对结构族组分相对稳定的油，其耐受冲击电压性能基本不变，当使用的抗氧添加剂改变或添加其他物质时需要重新测试，运行中的油无需测试。

A.2.2.5.2 带电度（或称带电倾向）（ECT）

表征变压器油在一定外界条件下流过固体绝缘表面时产生电荷的能力。它被定义为单位体积的变压器油所产生电荷的总数，可用 $\mu\text{C}/\text{m}^3$ 或 pC/ml 表示。现场测试方法标准见 DL/T 1095。

影响油带电度（ECT）的因素是油的组分、精制程度，油中电离物质等。对于新油其值应该较低，但在处理过程中也可能受污染。引起变压器中油流带电以及是否会导致静电放电的因素很多，特别是油的流速，与油的带电度（ECT）也有关系。

A.2.2.5.3 苯胺点

指油品在规定条件下和等体积的苯胺完全混溶时的最低温度，单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。试验方法按 GB/T 262。

利用油分子结构中各种烃类组分与苯胺的临界溶解温度不同（苯胺点最高的是石蜡烃，依次为环烷烃和芳香烃），可较简单地测定油的大致结构组分。

A.2.2.5.4 颗粒度

存在于油品单位体积内不同粒径的固体微粒的数目。试验方法按 DL/T 432。

通常在 100mL 油中以过滤器的最大直径（如 $5\mu\text{m}$ ）作为颗粒杂质的最小直径，对等于和

大于该直径的颗粒作分级计数，以控制油的纯净度。

过高的要求往往难以达到，过低的要求对绝缘不利，特别是特高压设备油的纯净度十分重要，因此对不同设备应有不同要求。

A.2.2.5.5 气体含量

指溶解在油中的气体（主要是永久性气体）的含量。试验方法按 DL 423 或 DL/T 703。

运行中的变压器有的因密封良好，含气量很低（如 $<1\%$ ），敞开式变压器油中含气量接近饱和值。控制油中含气量（即氧含量）可减缓油、纤维绝缘的氧化速度。低的含气量说明变压器密封状态好，可防止潮气渗入变压器内部，它与变压器油的结构组成和性能无关。

附 录 B (规范性附录)

GB 2536—1990 对变压器油的技术指标规定

B.1 GB 2536—1990 对变压器油的技术指标规定见表 B.1。

表 B.1 GB 2536—1990 对变压器油的技术指标规定

项 目		质 量 指 标			试验方法
牌 号		10	25	45	
外观		透明，无悬浮物和机械杂质			目测 ^a
密度（20℃），kg/m ³	不大于	895			GB/T 1884 GB/T 1885
运动粘度，mm ² /s					GB/T 265
40℃	不大于	13	13	11	
-10℃	不大于	—	200	—	
-30℃	不大于	—	—	1800	
倾点，℃	不高于	— 7	—22	报告	GB/T 3535 ^b
凝点，℃	不高于	—		—45	GB/T 510
闪点（闭口），℃	不低于	140		135	GB/T 261
酸值，mgKOH/g	不大于	0.03			GB/T 264
腐蚀性硫		非腐蚀性			SH/T 0304
氧化安定性 ^c					SH/T 0206
氧化后酸值，mgKOH/g	不大于	0.2			
氧化后沉淀，%	不大于	0.05			
水溶性酸或碱		无			GB/T 259
击穿电压（间隔 2.5mm交货时） ^d ，kV	不小于	35			GB/T 507 ^e
介质损耗因数（90℃）	不大于	0.005			GB/T 5654
界面张力，mN/m	不小于	40	38		GB/T 6541
水分，mg/kg		报 告			SH/T 0207
a把产品注入 100mL 量筒，在 20℃±5℃下目测，如有争议时，按 GB/T 511 测定机械杂质含量为无。					
b 以新疆原油和大港原油生产的变压器油测定倾点和凝点时，允许用定性滤纸过滤。倾点指标，根据生产和使用实际与用户协商，可不受本标准限制。					
c 氧化安定性为保证项目，每年至少测定一次。					
d 击穿电压为保证项目，每年至少测定一次。用户使用前必须进行过滤并重新测定。					
e 测定击穿电压允许用定性滤纸过滤。					

附 录 C (规范性附录)

IEC 60296—2003 标准所含的通用规范表和对高温下运行的变压器用油 经氧化试验后的指标要求

C.1 IEC 60296—2003变压器和开关用未使用过的矿物绝缘油的通用规范

表 C.1 变压器和开关用未使用过的矿物绝缘油的通用规范

性 质	试 验 方 法	指 标	
		变压器油	低温开关油
1. 功能性			
粘度, 40℃	ISO 3104	$\leq 12 \text{ mm}^2/\text{s}$	$\leq 3.5 \text{ mm}^2/\text{s}$
粘度, -30℃ ^a	ISO 3104	$\leq 1800 \text{ mm}^2/\text{s}$	—
粘度, -40℃ ^b	IEC 61868	—	$\leq 400 \text{ mm}^2/\text{s}$
倾点 ^a	ISO 3016	$\leq -40^\circ\text{C}$	$\leq -60^\circ\text{C}$
水含量	IEC 60814	$\leq 30 \text{ mg/kg}^c / 40 \text{ mg/kg}^d$	
击穿电压	IEC 60156	$\geq 30 \text{ kV} / 70 \text{ kV}^e$	
密度, 20℃	ISO 3675/ISO 12185	$\leq 0.895 \text{ g/cm}^3$	
DDF, 90℃	GB/T 5654/ GB/T 21216	≤ 0.005	
2. 精制/稳定性			
外观		透明, 无沉淀和悬浮物质	
酸值	IEC 62021—1	$\leq 0.01 \text{ mgKOH/g}$	
界面张力	ISO 6295	无通用要求 ^f	
总硫含量	BS 2000 第 373 部分 或 ISO 14596	无通用要求	
腐蚀性硫	DIN 51353	无腐蚀性	
抗氧化剂	IEC 60666	U 未加抗氧化剂油: 检测不出 T 加微量抗氧化剂油: $\leq 0.08\%$ I 加抗氧化剂油: $0.08\% \sim 0.40\%$	
2-糠醛含量	IEC 61198	$\leq 0.1 \text{ mg/kg}$	
3. 性能			
氧化安定性	IEC 61125 C 法 试验时间: U 未加抗氧化剂油: 164h T 加微量抗氧化剂油: 332h I 加抗氧化剂油: 500h		
总酸值		$\leq 1.2 \text{ mgKOH/g}^g$	
沉淀		$\leq 0.8\%^g$	

DDF, 90℃	GB/T 5654	≤0.500 ^g
----------	-----------	---------------------

表 C.1 (续)

性 质	试 验 方 法	指 标	
		变压器油	低温开关油
析气性	IEC 60628 A	无通用要求	
4. 健康，安全和环境			
闪点	ISO 2719	≥135℃	≥100℃
PCA 含量	BS 2000 第 346 部分	≤3%	
PCB 含量	IEC 61619	检测不出	
<p>a 此值是变压器用油的标准LCSET（见IEC 60296—2003 的5.1），可根据每个国家的气候条件进行修改。倾点至少应比LCSET低 10K。</p> <p>b 低温开关设备用油的标准 LCSET。</p> <p>c 批量供应。</p> <p>d 以桶装或 IBC 运输。</p> <p>e 经试验室处理（见IEC 60296—2003 的6.4）。</p> <p>f 当有通用要求时，建议不低于 40mN/m。</p> <p>g 在有些国家，可能要求更严格和/或有其他指标要求。</p>			

C.2 IEC 60296—2003 对高温下运行的变压器用油经氧化试验后的指标要求

对于在高温下运行的变压器或为延长使用寿命而设计的变压器, 对油经氧化试验后 (按 IEC 61125 C 法) 有严格的指标要求, 见表 C.2。这些油大部分是添加抗氧化剂的油。

表C.2 变压器油经氧化试验后的指标要求^{a、b}

指 标	数 值
总酸值	≤0.3mg KOH/g
沉淀	≤0.05%
DDF, 90℃	≤0.050
总硫含量	≤0.15%
<p>a 有些国家要求更严格和 / 或有其他指标要求。</p> <p>b 有些国家, 对超高压 (EHV) 互感器和套管用油要求经 2h 氧化试验后 (IEC 61125 C 法) 的 DDF 不大于 0.020。</p>	