



# 中华人民共和国石油天然气行业标准

SY/T 6573—2003

---

## 最低混相压力细管实验测定法

Measurement method for minimum miscibility  
pressure by slim tube test

2003-03-18 发布

2003-08-01 实施

---

## 目 次

前言 .....	II
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 术语和定义 .....	1
4 实验原理 .....	2
5 仪器仪表 .....	2
6 实验准备 .....	3
7 最低混相压力测定 .....	4
8 测定报告项目及要求 .....	6
9 安全与环保注意事项 .....	6
附录 A (资料性附录) 最低混相压力测定报告格式 .....	7

## 前 言

本标准的附录 A 为资料性附录。

本标准由油气田开发专业标准化委员会提出并归口。

本标准起草单位：中国石油勘探开发研究院石油采收率研究所。

本标准主要起草人：刘宁、郑希谭、陈钢、李实、孙文悦。

## 最低混相压力细管实验测定法

### 1 范围

本标准规定了细管实验法测定地层原油与注入气之间最低混相压力所用的实验原理、仪器仪表、实验程序、数据处理和评价指标。

本标准适用于一般地层原油、易挥发原油及人工配制模拟油与注入气（如烃类气体和/或非烃类气体）之间最低混相压力的测定。最低混相组成的测定可比照执行。

### 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。

SY/T 0529 油田气中  $C_1 \sim C_{12}$ ,  $N_2$ ,  $CO_2$  组分分析 关联归一气相色谱法

SY/T 5120 岩石气仿抽提物及原油中饱和烃气相色谱分析法

SY/T 5336 岩心常规分析方法

SY/T 5542 地层原油物性分析方法

SH/T 0169 矿物绝缘油平均分子量测定法 冰点降低法

SH/T 0604 原油和石油产品密度测定法 U 型振动管法

### 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本标准。

#### 3.1

**混相 miscibility**

指两种流体在一定条件下可以完全均匀混合并以单相状态存在。

#### 3.2

**一次接触混相 first-contact miscibility**

指在一定温度和压力条件下，注入流体能按任何比例直接与地层原油相混合并保持单相的过程。

#### 3.3

**多次接触混相 multiple-contact miscibility**

指在一定温度和压力条件下，注入流体与地层原油虽然不能发生一次接触混相，但在流动过程中，经过两相间反复接触，发生充分的相间传质作用后，也能达到混相的过程。也称作动态混相。

#### 3.4

**最低混相压力 minimum miscibility pressure (MMP)**

指在一定温度条件下，给定地层原油和注入流体间形成混相所需的最低压力。

#### 3.5

**最低混相组成 minimum miscibility composition (MMC)**

指在一定温度和压力下，能与给定的地层原油形成混相所需注入流体（通常为烃类混合物）的最小富化度组成。也称作注入流体的最佳混相组成。

### 3.6

#### 细管模型 slim tube model

指一根内部均匀填充一定粒径范围的经压实的未胶结石英砂粒或玻璃珠不锈钢长细管。它是一个简化的一维物理模型，通常作为进行混相实验（仅仅是热力学实验）的孔隙介质。一般将细管模型盘成螺旋状，垂直放入恒温浴中。

### 3.7

#### 细管实验 slim tube test

指用细管模型进行的测定最低混相条件的实验。

## 4 实验原理

对于给定的地层原油和油藏温度，驱替压力和注入气组分组成是影响能否混相的主要因素。在细管模型提供的多孔介质条件下，通过改变驱替压力（或注入气组分组成）的一组实验，获得驱油效率、气油比与注入孔隙体积倍数以及驱油效率与驱替压力（或注入气组分组成）的关系曲线，曲线拐点所对应的压力（或组分组成）即为最低混相压力（或最低混相组成）。

## 5 仪器仪表

### 5.1 细管模型

规格为：

- a) 长度：不小于 12m；
  - b) 内径：3.5mm~8mm；
  - c) 填充物（洁净石英砂或玻璃珠）粒径：40 $\mu$ m~150 $\mu$ m；
- 注：细管内径越小，填充物粒径应越小；反之亦然。
- d) 额定工作压力：不低于 50MPa；
  - e) 额定工作温度：不低于 150℃。

### 5.2 恒温浴

额定工作温度不低于 150℃，控制温度精确到  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 。

### 5.3 高压驱替泵

容量不低于 250cm<sup>3</sup>，最小刻度分辨力 0.01cm<sup>3</sup>，驱替速度 2.5cm<sup>3</sup>/h~560cm<sup>3</sup>/h，额定工作压力不低于 50MPa。

### 5.4 回压调节器

额定工作温度不低于 150℃，额定工作压力不低于 50MPa，控制压力精确到  $\pm 0.1\text{MPa}$ 。

### 5.5 高压观察窗

额定工作压力不低于 40MPa，额定工作温度不低于 150℃。

### 5.6 标准压力传感器或压力表

压力传感器精度不低于 0.2%，压力表精度不低于 0.4 级。

### 5.7 密度仪

测量密度值精确到不低于 0.0001g/cm<sup>3</sup>，控制温度精确到  $\pm 0.05^\circ\text{C}$ 。

### 5.8 气相色谱仪

天然气组分分析到庚烷以上，摩尔分数精确到 0.0001；

原油组分分析到碳 30 以上，质量分数精确到 0.0001。

### 5.9 相对分子质量测定仪

测量范围 150~700，测量误差不大于 5%。

### 5.10 气体计量计

最小刻度分辨力  $1\text{cm}^3$ 。

### 5.11 天平

量程不小于  $160\text{g}$ ，感量为  $1\text{mg}$ 。

### 5.12 大气压力表

精度 0.4 级。

### 5.13 真空泵

排量不小于  $4\text{L/s}$ ，真空度  $1.33\text{Pa}$  以上。

### 5.14 活塞容器

容积不小于  $500\text{cm}^3$ ，额定工作压力不低于  $50\text{MPa}$ ，额定工作温度不低于  $150^\circ\text{C}$ 。

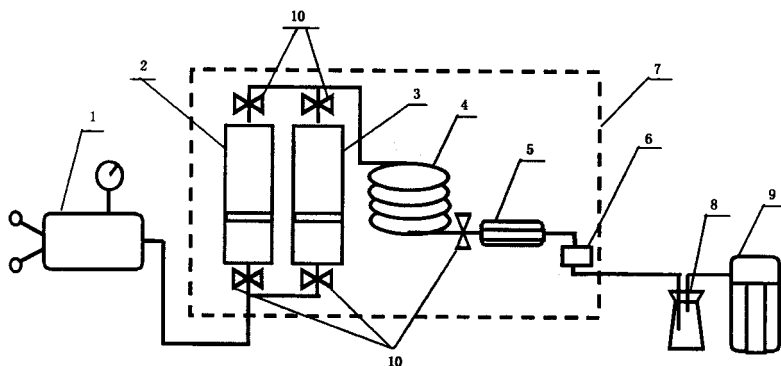
### 5.15 气体增压泵

额定工作压力不低于  $30\text{MPa}$ 。

## 6 实验准备

### 6.1 细管模型孔隙体积的测定

#### 6.1.1 细管实验流程示意图见图 1。



1—高压驱替泵；2—地层原油贮存容器；3—注入剂贮存容器；4—细管模型；5—高压观察窗；  
6—回压调节器；7—恒温浴；8—分离瓶；9—气量计；10—阀门

图 1 细管实验流程示意图

6.1.2 将细管模型恒温到实验温度，依次用一定体积的合适溶剂（如甲苯、三氯乙烷和甲醇）清洗细管模型，直到色谱分析结果表明细管已完全清洗干净为止。用干燥的高压氮气吹干细管中的溶剂。用高压氮气对实验流程进行试漏检查，保证流程无渗漏。

6.1.3 抽空细管至  $200\text{Pa}$  后，继续抽  $12\text{h}$  以上。

6.1.4 用驱替泵将甲苯（或环己烷）充满并冲洗至细管进口阀的管线，将压力增至所需的实验压力，记录该压力下的初始泵读数。

6.1.5 开启细管进口阀,进泵注入甲苯,增压到相同的实验压力,待压力充分稳定后,记录此时进泵的读数。泵体积读数之差经校正后即细管模型的孔隙体积 ( $V_{si}$ )。

6.1.6 采用类似方法,测定细管模型出口阀与回压调节器之间的体积,其与细管模型孔隙体积之和即为细管模型的总孔隙体积 ( $V_{sti}$ )。

## 6.2 细管模型孔隙度的计算

细管模型孔隙度的计算见式 (1):

$$\phi_i = 4V_{si}/(\pi D^2 L) \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中:

$\phi_i$ ——某实验压力和实验温度下的细管模型孔隙度;

$V_{si}$ ——某实验压力和实验温度下的细管模型孔隙体积,  $\text{cm}^3$ ;

$\pi$ ——圆周率;

$D$ ——细管内径,  $\text{cm}$ ;

$L$ ——细管进口阀至出口阀之间的长度,  $\text{cm}$ 。

## 6.3 细管模型气体渗透率的测定

按 SY/T 5336 的规定执行。

## 6.4 地层原油样品的准备

6.4.1 实验所用地层原油样品的准备和配制按 SY/T 5542 的规定执行。

6.4.2 地层原油组分组成测定按 SY/T 0529 和 SY/T 5120 的规定执行。

6.4.3 原油密度和相对分子质量测定分别按 SH/T 0604 和 SH/T 0169 的规定执行。

## 6.5 注入气体的准备

6.5.1 注入气体的组分组成根据实验目的确定,其组分组成测定按 SY/T 0529 的规定执行。

6.5.2 采用气体增压泵法或冷冻复压法等方法将注入气体复压至活塞容器中备用。

## 7 最低混相压力测定

### 7.1 地层原油样品的饱和

7.1.1 将细管模型清洗干净后,用甲苯(或环己烷)充满整个细管模型,并恒定到实验温度和压力下。通过回压调节器将回压设置到实验所需压力值(须高于地层原油的饱和压力值)。

7.1.2 将地层原油样品恒温到实验温度 4h 以上,用驱替泵将样品增压至实验压力以上,充分搅拌,使其成为单相。

7.1.3 在保持实验压力和实验温度下,缓慢开启地层原油样品容器出口阀和细管模型入口阀,用地层原油样品顶替细管中的甲苯。驱替速度为  $200\text{cm}/\text{h} \sim 500\text{cm}/\text{h}$ 。

7.1.4 当原油样品驱替 2.0 倍孔隙体积后,每隔 0.1 倍~0.2 倍孔隙体积,在细管出口端测量产出的油、气体积(按 SY/T 5542 的要求执行),并取油、气样分析其组成。如果产出样品的组分组成、气油比均与地层原油样品一致,停止驱替。

### 7.2 驱替实验

7.2.1 将注入气样品恒定在实验温度下。

7.2.2 用注入气充满并冲洗至细管模型入口阀的管线。将注入气压力调整到实验压力,记录该压力下泵的初读数。

7.2.3 在实验温度、实验压力和恒定注入速度下,用注入气驱替细管模型中的地层原油样品。驱替速度一般为  $100\text{cm}/\text{h} \sim 300\text{cm}/\text{h}$ 。每注入 0.1 倍~0.2 倍孔隙体积,测量一次产出油、气体积,记录泵读数、注入压力和回压,并可测定产出油、气的组分组成及性质。注意观察高压观察窗中流体的相

态和颜色变化。

7.2.4 在气体突破后, 尽量加大数据采集密度。

7.2.5 当累积进泵超过 1.20 倍孔隙体积或不再产油后, 停止驱替。

### 7.3 细管实验混相驱替评价指标

细管实验中的混相驱替, 应同时满足下列两个指标:

- 注入 1.20 倍孔隙体积时的驱油效率, 一般不应低于 0.90 倍孔隙体积, 而且实验压力大于最低混相压力后, 与最低混相压力下的驱油效率相比, 驱油效率不应有明显的增加;
- 在高压观察窗中可以观察到混相流体 (即在驱替气和其之前的油墙间不存在明显的界面)。

### 7.4 最低混相压力的确定

7.4.1 在地层原油饱和和压力以上选取 4 个~6 个实验压力分别进行细管驱替实验。

7.4.2 一般首先在原始地层压力下实验, 根据混相与否及其程度, 采用逐次逼近最低混相压力的方法, 确定其他驱替实验压力。

7.4.3 在混相段和非混相段应至少各有三个以上的实验压力点。

7.4.4 绘制各次细管实验注入 1.20 倍孔隙体积时驱油效率与驱替压力的关系曲线图, 非混相段与混相段曲线的交点所对应的压力即定为最低混相压力 (MMP)。

### 7.5 数据整理

7.5.1 注入孔隙体积倍数的计算见式 (2):

$$PV_i = V_i / V_{sti} \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中:

$PV_i$ ——第  $i$  时刻的注入孔隙体积倍数;

$V_i$ ——第  $i$  时刻的累积注入体积 (在实验温度和压力下),  $\text{cm}^3$ ;

$V_{sti}$ ——在实验压力和实验温度下的细管模型总孔隙体积,  $\text{cm}^3$ 。

7.5.2 气油比的计算见式 (3):

$$GOR_i = T_0 p_1 V_{gi} / (p_0 T_1 V_{oi}) \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中:

$GOR_i$ ——第  $i$  时间间隔内采出样品的气油比,  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ;

$T_0$ ——标准温度, 293.15K;

$p_1$ ——实验时大气压力, MPa;

$V_{gi}$ ——第  $i$  时间间隔内采出气体在室温、大气压力下的体积,  $\text{cm}^3$ ;

$p_0$ ——标准压力, 0.101325MPa;

$T_1$ ——室温, K;

$V_{oi}$ ——第  $i$  时间间隔内采出脱气油的体积 (20℃时),  $\text{cm}^3$ 。

7.5.3 驱油效率的计算见式 (4):

$$R_i = V_{toi} B_{oi} / V_{sti} \quad \dots\dots\dots (4)$$

式中:

$R_i$ ——第  $i$  注入孔隙体积倍数时的累积驱油效率;

$V_{toi}$ ——第  $i$  注入孔隙体积倍数时的累积采出脱气油体积 (20℃),  $\text{cm}^3$ ;

$B_{oi}$ ——在实验温度和实验压力下的地层原油体积系数。



## 8 测定报告项目及要求

测定报告项目及格式要求见附录 A。

## 9 安全与环保注意事项

9.1 细管实验所用溶剂（如甲苯、三氯甲烷和甲醇等）具有一定毒性和较强的挥发性，对人体健康和环境有一定危害，使用时必须采取安全防护措施，并保证实验室拥有良好的通风抽风设施。

9.2 使用过的废弃溶剂不得随意抛洒、倾倒，应按照规定送交有关部门统一处理。

附录 A  
(资料性附录)

最低混相压力测定报告格式

最低混相压力测定报告的格式见表 A.1～表 A.8 及图 A.1、图 A.2。

表 A.1 检测报告封面格式

最低混相压力测定报告

档案号\_\_\_\_\_

送样单位\_\_\_\_\_

样品类型\_\_\_\_\_

油田\_\_\_\_\_

井号\_\_\_\_\_

层位\_\_\_\_\_

注入气\_\_\_\_\_

报告页数\_\_\_\_\_

报告日期\_\_\_\_\_

×××× (检测单位名称)

表 A.2 测定报告首页格式

行业标准代号及名称\_\_\_\_\_

主要检测仪器名称及编号\_\_\_\_\_

环境条件\_\_\_\_\_

检测人\_\_\_\_\_

报告编写人\_\_\_\_\_

审核人\_\_\_\_\_

技术负责人\_\_\_\_\_

表 A.3 油藏流体组分组成数据表格式

送样单位：\_\_\_\_\_ 第\_\_\_\_\_页 共\_\_\_\_\_页  
 油 田：\_\_\_\_\_ 井 号：\_\_\_\_\_ 档案号：\_\_\_\_\_ 层 位：\_\_\_\_\_

油藏流体组分组成数据

组 分	组成 (摩尔分数)
CO <sub>2</sub>	
N <sub>2</sub>	
C <sub>1</sub>	
C <sub>2</sub>	
C <sub>3</sub>	
iC <sub>4</sub>	
nC <sub>4</sub>	
iC <sub>5</sub>	
nC <sub>5</sub>	
C <sub>6</sub>	
C <sub>7</sub>	
C <sub>8</sub>	
C <sub>9</sub>	
C <sub>10</sub>	
C <sub>11+</sub>	
合 计	1.0000
C <sub>11+</sub> 的特性：相对分子质量： 相对密度：	

表 A.4 油藏流体物性数据表格式

送样单位：\_\_\_\_\_ 第\_\_\_\_\_页 共\_\_\_\_\_页  
 油 田：\_\_\_\_\_ 井 号：\_\_\_\_\_ 档案号：\_\_\_\_\_  
 层 位：\_\_\_\_\_

## 油藏流体物性数据

1. 饱和压力： MPa ( \_\_\_\_\_ ℃ )
2. 气油比：  $\text{m}^3/\text{m}^3$
3. 地层体积系数： ( \_\_\_\_\_ ℃ 和 \_\_\_\_\_ MPa )
4. 饱和压力下地层原油密度：  $\text{g}/\text{cm}^3$  ( \_\_\_\_\_ ℃ )
5. 饱和压力下地层原油粘度：  $\text{mPa}\cdot\text{s}$  ( \_\_\_\_\_ ℃ )

表 A.5 注入气组分组成数据表格式

送样单位：\_\_\_\_\_ 第\_\_\_\_\_页 共\_\_\_\_\_页  
 油田：\_\_\_\_\_ 井号：\_\_\_\_\_ 档案号：\_\_\_\_\_ 层位：\_\_\_\_\_

注入气组分组成数据

组 分	组成 (摩尔分数)
CO <sub>2</sub>	
N <sub>2</sub>	
C <sub>1</sub>	
C <sub>2</sub>	
C <sub>3</sub>	
iC <sub>4</sub>	
nC <sub>4</sub>	
iC <sub>5</sub>	
nC <sub>5</sub>	
C <sub>6</sub>	
C <sub>7+</sub>	
合 计	1.0000

表 A.6 细管模型基本参数及实验条件数据表格式

第\_\_\_\_页 共\_\_\_\_页

送样单位: \_\_\_\_\_

档案号: \_\_\_\_\_

油 田: \_\_\_\_\_

井 号: \_\_\_\_\_

层 位: \_\_\_\_\_

细管模型基本参数

- 1. 长度:       m
- 2. 内径:       mm
- 3. 外径:       mm
- 4. 填充物类型:
- 5. 填充物:      $\mu\text{m}$
- 6. 孔隙度:     % (在地层温度和地层压力下)
- 7. 气体渗透率:      $\mu\text{m}^2$

细管实验条件

- 1. 地层温度:      $^{\circ}\text{C}$
- 2. 地层压力:     MPa
- 3. 实验温度:      $^{\circ}\text{C}$
- 4. 驱替速度:     cm/h

表 A.7 细管实验数据表格式

送样单位：第\_\_\_\_页 共\_\_\_\_页  
 油田：\_\_\_\_ 井号：\_\_\_\_ 档案号：\_\_\_\_  
 层位：\_\_\_\_

第\_\_\_\_次细管实验数据 (实验温度：\_\_\_\_℃，实验压力：\_\_\_\_MPa)

注入孔隙体积倍数	气 油 比 $\text{m}^3/\text{m}^3$	驱 油 效 率



表 A.8 细管实验结果数据表格式

送样单位：  
油 田：\_\_\_\_\_

井 号：\_\_\_\_\_

第\_\_\_\_页 共\_\_\_\_页  
档案号：\_\_\_\_\_  
层 位：\_\_\_\_\_

细管实验结果数据

实验序号	实验温度 ℃	实验压力 MPa	注入 1.20 倍孔隙 体积时的驱油效率
最低混相压力 (MMP):            MPa			

第\_\_\_\_页 共\_\_\_\_页

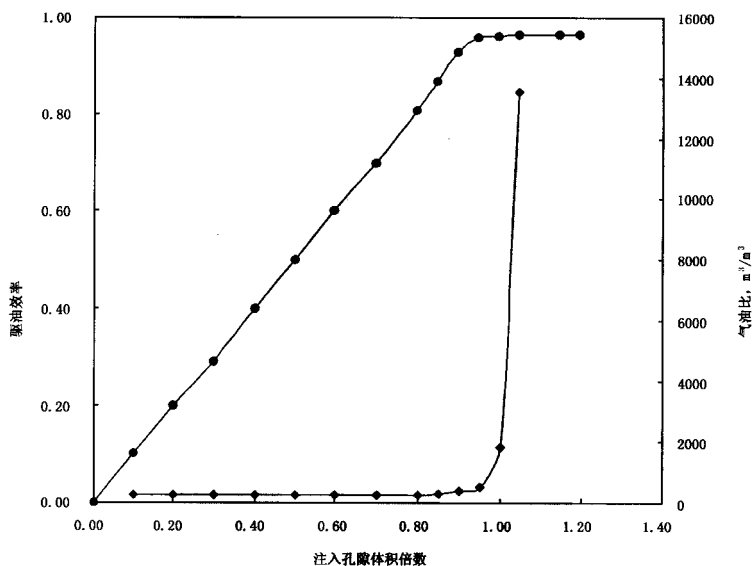
送样单位:

档案号: \_\_\_\_\_

油田: \_\_\_\_\_

井号: \_\_\_\_\_

层位: \_\_\_\_\_



注: ●——驱油效率;

◆——气油比。

图 A.1 第 次细管实验的驱油效率和气油比曲线图 (    ℃,    MPa)

送样单位：

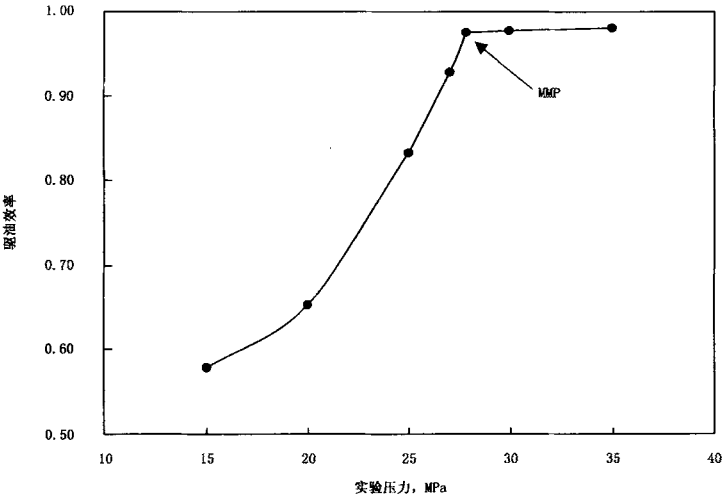
油 田：\_\_\_\_\_

井 号：\_\_\_\_\_

第\_\_\_\_页 共\_\_\_\_页

档案号：\_\_\_\_\_

层 位：\_\_\_\_\_



注：MMP——最低混相压力。

图 A.2 注入 1.20 倍孔隙体积时的驱油效率与实验压力关系曲线图 (    ℃ )