一种获取流体包裹体气液比的便捷方法

周振柱1),周瑶琪1),陈勇1,2),白振华2),毛毳1)

1) 中国石油大学(华东)地球资源与信息学院,山东青岛,266555;

2) 提高石油采收率国家重点实验室(中国石油勘探开发研究院),北京,100083

内容提要:本文建立了一套基于利用高分辨率偏光显微镜和荧光显微镜获取流体包裹体气液比的方法。通过高分辨率显微镜自身刻度,获取不同深度平面包裹体的图像,应用绘图软件勾画包裹体和气泡边界,获取不同深度切片上包裹体和气泡的面积,①把不同切片看做短柱体,用面积与切片步长相乘,累加获得包裹体和气泡的体积,计算包裹体的气液比;② 拟合面积与深度的函数,积分计算包裹体和气泡的体积,从而求取包裹体气液比。此方法不仅能够计算发荧光的烃类包裹体气液比,还能够计算含烃盐水包裹体、盐水包裹体和 H₂O-CH₄包裹体等不发荧光的包裹体气液比,同时,也能够进行包裹体气液比的原位分析。此方法成本低,所需设备相对简单,利于普及应用, 有助于流体包裹体热力学模拟的发展。

关键词:流体包裹体;气液比;便捷方法

随着地质学的发展,流体包裹体技术越来越受 到地质学者们的重视,而流体包裹体研究也越来越 细化,技术手段也逐渐丰富。流体包裹体的气液比 是进行包裹体热力学模拟的重要参数,如何计算气 液比是一个十分重要的问题。自1998年开始,有地 质学者将在医学领域广泛应用的激光扫描共聚焦显 微镜(CLSM)应用到地质学,利用烃类包裹体气液 两相不同的荧光性质,对包裹体逐层扫描并进行三 维重建,从而求取烃类包裹体的气液比(Aplin et al., 1999, 2000; Thiéry et al., 2002; Liu et al., 2003;米敬奎等, 2003;王存武等, 2008)。激光扫 描共聚焦法自动化强,但成本太高,难以广泛应用。 为了降低获取包裹体气液比的成本,已有学者利用 组合荧光显微镜来研究流体包裹体(Blamey et al., 2008)。为实现低成本、便捷地求取流体包裹体气液 比,同时能够被广大学者广泛应用,本文尝试用高分 辨率偏光显微镜结合荧光显微镜来计算包裹体的气 液比,取得了较好的效果。相对于激光扫描共聚焦 方法,此法最大的优点就是成本低,并且设备的普及 性高,便于推广。

1 方法的基本原理

方法的基本原理就是:根据显微镜在垂向上的

分辨率,通过调焦,获取不同层面上的包裹体图像切片,运用软件(目前为 CorelDRAW X3)计算各切片中包裹体和气泡的面积,然后拟合包裹体和气泡面积与切片深度的函数,积分获得包裹体和气泡的体积,或者直接把不同切片看做一个个短柱体,直接用面积与切片步长相乘,获得包裹体和气泡的体积,最后计算包裹体的气液比。

2 不同平面图像的获取

一般高分辨率显微镜的调节精度可达到 0.5μm,因此不同深度平面的图像步长就选取为 1μm或0.5μm,这就要求尽量选择较大的包裹体来 进行计算。普通显微镜虽然是场光源,但只要薄片 质量好(抛光好,厚度适中),便能够在不同平面上获 得较为清晰的包裹体图像。在包裹体的底部和顶 部,由于受包裹体整体最大截面影像的干扰,包裹体 切片边缘不是很清晰,此时应该把边缘的内侧作为 这一平面上包裹体的边缘,或者利用荧光来判断包 裹体边缘。另外,在最佳聚焦平面的上下,气泡表现 出不同的变化:在上部,气泡表现为灰色的边缘与灰 白的气泡,并有气泡最大界面的阴影,随着截面接近 最佳聚焦平面,边缘与气泡黑白对比越明显,且气泡 截面越大;在下部,气泡具有模糊虚边和较为清晰的

注:本文为国家自然科学基金(编号 40772082,40902040)、国家"863"计划课题(编号 2007AA06Z210)和中国石油科技创新基金(编号 2010D-5006-0106)的成果。

收稿日期:2010-06-23;改回日期:2010-11-20;责任编辑:章雨旭。

作者简介:周振柱,男,1983年生。博士研究生。地质学专业。Email:zhouzhenzhu1983@163.com。

实边,随着深度的增加,能明显看到虚边的增大和实 边的变小,直到最后全部模糊而看不清楚;这种差别 与透射光穿过气泡时气泡本身阴影的影响有关。

图 1 所示为 CLSM(图 1a、b)与偏光显微镜(图 1c、d)获取的包裹体两个深度截面的图片。在最佳 聚焦平面上,受荧光的干扰,CLSM 获取图片中气泡 失真(图 1a),而偏光显微镜获取图片很清楚地体现 了气泡的真实大小(图 1c);在比最佳聚焦平面深 1.5µm 的截面上,偏光显微镜获取的图片(图 1d)中 包裹体边缘与 CLSM 获取图片(图 1b)中的大体一 致,而气泡部分可见模糊的虚边与较为清晰的实边, CLSM 获取图片中气泡依然受荧光的影响,不能清 晰判断气泡边缘。因此,CLSM 对偏光显微镜并没 有体现出大的优势,反倒是在气泡边缘的判断上受 到更大的干扰。图 1(c、d)由于数码摄像头像素不 高和图像采集软件分辨率不够而略显模糊,所以,高 质量的图像采集系统有助于包裹体和气泡边缘的准 确识别。

3 包裹体气液比的计算

获得包裹体不同深度切片后,应用 CorelDRAW X3 对包裹体图像进行轮廓勾画和面



图 1 CLSM 与偏光显微镜获取的包裹体不同深度截面的 图片;(a) CLSM,最佳聚焦平面;(b) CLSM, + 1.5 μ m; (c) 偏光显微镜,最佳聚焦平面;(d) 偏光显微镜, + 1.5 μ m

Fig. 1 The fluid inclusion images in the depth of optimal focal plane (a, c) and added 1.5 μ m(b, d) taken with CLSM (a, b) and petrographic microscopy (c, d)

积求取。为了求取包裹体的体积,可以选择两种计 算方法:一是简单算法,即把不同深度切片的包裹体 看作短柱体,用面积乘步长,计算不同短柱体的体 积,然后累加在一起就是包裹体的体积;另一种是积 分算法,即在获取包裹体不同深度切片面积的基础 上,建立面积与深度的数据对,以深度为自变量 *x*, 面积为因变量 *y*,应用数据处理软件(如 Excel),以 一元 *n* 次多项式的形式拟合面积(*y*)与深度(*x*)的 函数,确定包裹体或气泡上下界面的深度,通过简单 的积分算法求取面积对深度的定积分,就是包裹体 或气泡的体积。

流体包裹体的气泡可分为规则和不规则两类。 形状规则的气泡主要为球形、椭球形和酒桶形三种 立体形态;而当气泡较大或包裹体形状极不规则时, 受包裹体壁的影响,气泡也表现出不规则的形态。 对于较小的气泡,如果包裹体在各个方向上的长度 都比气泡的直径大,那么就可以认为气泡是个球体, 则选择气泡最大的那个切片中的气泡直径作为球体 的直径计算气泡的体积。如果气泡呈现椭球形、酒 桶形或其它的不规则形态,其体积计算方法和前面 包裹体体积计算方法一样。

因此,计算气泡体积时有三种选择:

(1)当做球体来计算。

(2)除去气泡模糊的虚边进行勾画,勾画完成后 求取每个切片气泡的面积,把每个切片当作一个个 短柱体,计算每个短柱体气泡的体积,然后累加求取 气泡体积。

(3)在对气泡进行勾画并求取气泡面积的基础 上,①选择全部数据拟合面积与深度的函数,并积分

表 1 激光扫描共聚焦显微镜下油气包 裹体垂向不同深度切片面积计算结果

(Aplin et al., 1999)

Table1Calculated areas of liquid andvapour in images taken with a ConfocalLaser Scanning Microscope as a z seriesthrough a petroleum fluid inclusion

(Aplin et al. , 1999)

深度	气泡面积	包裹体总	深度	气泡面积	包裹体总
(µm)	(μm^2)	面积(µm ²)	(µm)	(μm^2)	面积(μm ²)
0	0.0	11.0	7	1.5	24.8
1	0.4	13.1	8	0.0	22.0
2	0.3	15.7	9	0.0	17.8
3	3.1	18.9	10	0.0	9.1
4	4.4	21.2	11	0.0	3.3
5	5.6	24.2	12	0.0	0.0
6	3.9	23.9			



图 2 激光扫描共聚焦显微镜下石英加大边中 11 μ m 深包 裹体垂向不同深度图片(6/12)(Aplin et al., 1999) Fig. 2 Six of the twelve images of the z series taken with the Confocal Laser Scanning Microscope through an 11 μ m deep inclusion hosted in diagenetic quartz(Aplin et al., 1999)

求取体积;②当气泡不大时,为了减弱气泡上下两端 面积求取误差大的影响,可以选择最佳聚焦平面上 下部分较为清楚图像的数据,进行部分数据函数拟 合,求取上下界,积分求取体积。

4 效果分析

由于气泡的形状直接影响了包裹体气液比计算 方法的选择,所以有必要先根据气泡的相对大小和 包裹体的形状判断气泡可能的形状,然后再选择合 适的方法进行计算。

4.1 大气液比包裹体计算

当气泡相对于包裹体较大时,容易受到包裹体 壁的影响:如果包裹体厚度小,可以使气泡呈圆饼 状;如果包裹体厚度大而截面小,则可以使气泡呈垂 向拉伸的椭球体;如果截面小且厚度不够,则可以使 气泡呈酒桶形;另外包裹体壁的不规则变化也会把 气泡限制在包裹体内的某个部位,使之呈现不规则 的形状;这些包裹体的一个重要特点就是具有较大 的气液比值,可称之为大气液比包裹体。

图 2 所示为石英加大边中包裹体在激光扫描共 聚焦显微镜下不同深度的切片图像(Aplin et al., 1999), CLSM 计算的包裹体和气泡面积结果见表 1。根据表 1 数据,通过短柱体累加法和函数拟合法 可以计算包裹体的气液比。短柱体累加法较为简 单,Aplin 等用的也正是这种计算方法。函数拟合 法首先确定面积和深度的数据点,然后用 Excel 趋 势线功能,选择多项式的阶数拟合函数(图 3),求取



图 3 图 2 所示包裹体不同深度切片函数拟合 Fig. 3 Simulating equation of area and depth for the fluid inclusion in figure 2

面积对深度的定积分,得到包裹体和气泡的体积。 不同的计算方法得到的计算结果如表2所示。由于 气泡在垂向上的长度超过了其在平面上的直径,表

表 2 图 2 所示包裹体气液比计算结果对比表 Table2 Calculated vapour/liquid ratios of the fluid inclusion in figure 2 using different methods

	气泡体积	包裹体总	气液比
	(μm^3)	体积(µm ³)	(%)
CLSM 短柱体累加法	19.1	205.2	9.3
函数拟合法	19.10	199.98	9.55
球体法	9.69	205.2	4.86
显微镜目估	_		10

表 3 C6 包裹体气液比计算结果对比表 Table3 Calculated vapour/liquid ratios of the fluid inclusion numbered in C6 using different methods

	气泡体积	包裹体总体积	气液比
	(μm^3)	(μm^3)	(%)
函数拟合法	299.80	1095.54	27.36
短柱体累加法	316.38	1157.43	27.33
球体法	200.62	1157.43	17.33
显微镜目估	_		30

表 4 Q1 包裹体气液比计算结果对比表 Table4 Calculated vapour/liquid ratios of the fluid inclusion numbered in Q1 using different methods

		气泡 体积 (µm ³)	包裹体 总体积 (µm ³)	气液比 (%)
函数拟合法	全部数据拟合 部公数据拟合	10.76	191.05	5.63
	叩刀 奴 1 百 1 5 百	7.45		3.09
短柱体累加法		11.41	196.38	5.81
球体法		5.86	191.05	3.07
显微镜目估		—		3



图 4 方解石中大气泡烃类包裹体(C6)由浅 及深不同切片包裹体图片(6/17) Fig. 4 Six of seventeen images taken from shallow to deep of a hydrocarbon inclusion with a big bubble (C6) hosted in calcite

现为一个垂向拉伸的椭球体,所以应用应用短柱体 累加法和函数拟合法得到的气液比较为准确,而直 接把气泡当做球体来计算要比实际值小得多,误差 较大。

又如,图4 所示 C6 包裹体厚 8μm,切片步长为 0.5μm。包裹体气泡很大,在垂向和平面上均受到 包裹体壁的限制,表现为近酒桶形。包裹体和气泡 的函数拟合如图 5 所示。通过计算,得到了不同方 法计算的包裹体气液比(表 3)。由表 3 可以看出, 函数拟合法和短柱体累加法计算的气液比相差不 多,而球体计算法与两者相比,计算的气液比要小很 多。



因此,对于大气液比包裹体采用函数拟合法和









the fluid inclusion numbered in Q1

短柱体累加法效果较好。

4.2 小气液比包裹体计算

当气泡相对于包裹体较小时,受包裹体壁的影 响很小,在包裹体内可以移动,一般为球体。图 6 所 示为 FS1 井碎屑岩储层石英颗粒中油气包裹体 Q1 不同深度切片图像,包裹体 Q1 厚 7μm,切片步长为 0.5μm。根据 CorelDRAW X3 勾画获得的数据,采 用不同方法进行体积计算。对包裹体的函数拟合如 图 7 所示,在对气泡进行函数拟合时,分别进行了全 数据拟合一积分和部分数据拟合一积分(图 8)。所 谓部分数据拟合就是选取最佳聚焦平面上下几张清 晰的切片,勾画气泡的面积,拟合面积和深度的简单





函数,计算函数曲线与 x 轴的交点坐标,确定了气泡的上下边界深度,积分计算气泡的体积。不同方法的计算结果见表 4。

当气泡较小时,在距最佳聚焦平面较远的深、浅 切片中,气泡受到中间部位气泡阴影的影响,浅部切 片中气泡边缘模糊,难以勾画,深部切片中气泡被上 部大气泡切片遮挡,不仅边缘模糊,且直径比理论直 径大些,这就造成了气泡勾画时较大的误差,使得气 泡被人为"拉长",从而短柱体累加和全部数据拟 合一积分都计算出了较真实值更大的气液比。此 时,由于气泡相对于包裹体来说很小,受到包裹体壁 张力的影响有限,因此将气泡当作球体来计算,可能 更接近气泡的真实体积。部分数据拟合积分介于两 者之间,可在气泡为近球体时应用。

5 讨论

5.1 方法的优势及意义

此方法可以单独应用高分辨率普通显微镜或荧 光显微镜来进行,但最好两者结合,这样就能够较为 清晰地识别包裹体边界和气泡边界,从而使计算结 果更加准确。与激光扫描共聚焦显微镜相比,此方 法应用的设备价格相对便宜,操作简单,因此成本 低,大部分地质实验单位都配备有这两种设备,所 以,此方法更适于普及应用。虽然现在人工勾画费 时费力,但只要方法正确,在相关处理软件的帮助 下,会达到快速处理的程度。

另外,此方法不仅能够计算发荧光的烃类包裹 体气液比,还能够计算含烃盐水包裹体、盐水包裹体 和 H₂O--CH₄包裹体等不发荧光的包裹体气液比。 所以此方法的广泛应用,有助于流体拓宽包裹体热 力学模拟的研究。

5.2 方法误差分析及讨论

5.2.1 边缘的界定

由于受到最佳聚焦平面的影响,在其上下距离 较远的切片中包裹体的边界和气泡的边界变得模 糊,难以勾画其轮廓,数据失真,造成一定的误差。 另外,在包裹体上下界面附近,由于远离最佳聚焦平 面,且受到包裹体阴影的影响,包裹体边缘已经十分 模糊,不易确定包裹体的上下界面。

这一问题在激光扫描共聚焦显微镜的使用中也 存在,为了使边界清晰,需增强激光强度且降低背景 强度,但同时由于激光强度的增加,使得荧光照亮了 颗粒和气泡的边缘,造成模拟出的包裹体变大而气 泡变小,从而使气液比要比真实值小。

5.2.2 包裹体和气泡体积的计算

其实,Aplin 等(1999)求取包裹体和气泡的体积也是通过短柱体累加法计算的,只是切片通过 CLSM获得。相对于短柱体累加法,函数拟合法更 能够反映包裹体的实际形态。

对于气泡体积的计算,当气泡很小时,可以当作 球体来计算;当气泡较大时,由于受到包裹体壁的影 响,形状可能不规则,此时宜采用短柱体累加法或者 函数拟合法进行计算。对于大部分包裹体气泡,由 于受到上下包裹体壁的张力作用,气泡并非球形,而 可能是表现为椭球形或者酒桶形,即在显微镜下表 现为圆形,而在垂向上表现为椭圆形或者被截掉一 部分的椭圆形,这时应当用拟合函数的全数据积分 或部分数据积分算法较为合适。

由于无法在垂向上对气泡进行观察,也就无法 确定气泡的形状,只能通过镜下观察确定计算方法。 一般来说,对于非烃类包裹体,当气泡在包裹体中可 以跳动时,说明受包裹体壁张力影响很小,气泡应该 为一个球体;而对于烃类包裹体,液相的粘度较大, 控制了气泡的活动,只能根据平面上气泡大小选择 不同的计算方法。

由于对不同计算方法的选择没有定量标准,这 也就增加了计算结果的人为干扰。因此,如何将平 面上气泡量化并与不同的计算方法联系起来,是以 后研究中的一个重要内容。

5.3 包裹体气液比的原位分析

在流体包裹体的热力学模拟中,气液比用于模 拟流体成分。包裹体原位分析可以求取不同温度下 的气液比,变温条件的气液比能够提供更多的约束 条件,从而更加准确地反映流体成分(Aplin et al., 1999)。该方法能够实现变温条件下包裹体气液比 的测量,从而可以使包裹体模拟更加接近实际的热 力学条件。

6 结论

(1)利用高分辨率普通显微镜和荧光显微镜可 以进行流体包裹体气液比的计算。此方法成本低, 所需设备相对简单,利于推广普及。

(2)对于大气液比包裹体,适于应用短柱体累加 法和函数拟合法进行计算,球体法结果偏小;对于小 气液比包裹体,适于应用球体法来进行计算,受气泡 阴影影响,短柱体累加法和全数据拟合法结果偏大。

(3)该方法不仅能计算发荧光的烃类包裹体气 液比,还可以计算含烃盐水包裹体、盐水包裹体和 H₂O-CH₄包裹体等不发荧光包裹体的气液比。

(4)该方法可以在变温条件下计算包裹体的气 液比,有助于准确模拟包裹体捕获时的热力学条件。

参考文献 / References

米敬奎,肖贤明,刘德汉,申家贵. 2003.利用储层流体包裹体的 PVT特征模拟计算天然气藏形成古压力——以鄂尔多斯盆地 上古生界深盆气藏为例.中国科学(D辑),33(7):679~685.

- 王存武,邹华耀,姜丽娜,匡大庆,姜立.2008. 激光扫描共聚焦显微 镜精确测量有机包裹体气液比方法研究.现代科学仪器,(1): 20~22.
- Aplin A C, Macleod G, Larter S R, Pederxen K S, Sorenxen H and Booth T. 1999. Combined use of confocal Laser Microscopy and *PVT* simulation for estimating the composition and physical properties of petroleum in fluid inclusions. Marine and Petroleum Geology, 16: 97~109.
- Aplin A C, Larter S R, Bigge M A, Macleod G, Swarbrick R E and Grunberger D. 2000. PVTX history of the North Sea's Judy oilfield. Journal of Geochemical Exploration. 60 ~ 70: 641 ~ 644.
- Blamey N J F, Ryder A G, Feely M, Dockery P and Owens P. 2008. The application of structured-light illumination microscopy to hydrocarbon-bearing fluid inclusions. Geofluids. 8: 102~112.
- Thiéry R, Pironon J, Walgenwitz F and Montel F. 2002. Individual characterization of petroleum fluid inclusions (composition and P-T trapping conditions) by microthermometry and confocal laser scanning microscopy: inferences from applied thermodynamica of oils. Marine and petroleum Geology, 19: $847 \sim 859$.

A Convenient Method for Obtaining Vapour/Liquid Ratios of Fluid Inclusions

ZHOU Zhenzhu¹⁾, ZHOU Yaoqi¹⁾, CHEN Yong^{1, 2)}, BAI Zhenhua²⁾, MAO Cui¹⁾

 College of Geo-Resource and Information, University of Petroleum China; Qingdao, Shandong, 266555;
State Key Laboratory of Enhanced Oil Recovery, Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina; Beijing, 100083

Abstract: This paper presents a new method for calculating vapour/liquid ratios of fluid inclusions based on high-resolution petrographic microscopy and fluorescent microscopy. The microscope can offer a series of two-dimensional images of single fluid inclusions by regulating its own dial. The following procedure is to draw the outline and measure the area of inclusion and vapour in each two-dimensional image with drawing-software. The volume of inclusion and vapour bubble can then be determined by ① accumulating the slices which are described as irregular cylinders using equation, and ② integrating the pseudo-function of area and depth. The vapour/liquid ratio can then be calculated. The new method can provide vapour/liquid ratios of not only fluorescent hydrocarbon-bearing fluid inclusions but also non-fluorescent aqueous fluid inclusions. Otherwise, it can also serve the in-situ thermal variation analysis of fluid inclusions. The new method just requires ordinary instruments, so it costs little. Therefore, the method can be widely used and can help to develop the thermodynamic simulation of fluid inclusions.

Key words: fluid inclusions; vapour/liquid ratios; convenient method