

包裹体在石油地质研究中的应用与问题讨论

柳少波

(中国科学技术大学研究生院, 北京 100039)

顾家裕

(北京石油勘探开发科学研究院, 北京 100083)

包裹体在石油地质领域主要应用于确定成岩和成藏作用的时间与温度, 推断油气运移、构造运动及古热流历史。其应用前提是流体包裹体是在均一体系中形成的, 形成后保持封闭和等容体系。由于包裹体具有成分复杂、形态各异特性, 所以后期易随温度和压力的变化而产生塑性变形或爆裂, 导致所测均一温度值失真。因此, 在应用包裹体均一温度时, 必须分析包裹体形成后的变化及成藏、成岩作用对它的影响, 进行均一温度校正。将包裹体中烃的等容线的起点定在现今油藏油的泡点曲线上, 而等容线的另一点由包裹体的爆裂温度和矿物所承受的包裹体内压力来确定, 油气包裹体的等容线与盐水包裹体等容线的交点的温度和压力即为其捕获时的温度和压力。

关键词 包裹体 均一温度 石油地质 应用 讨论

第一作者简介 柳少波 男 30 岁 博士 有机地球化学

流体包裹体最初主要应用于矿床学的研究, 1957 年 Murray 在自形石英中发现了较大的油气包裹体^[1]。70 年代末到 80 年代初随着石油地球化学的发展, 流体包裹体已作为一种手段广泛应用于石油地质研究^[2~11], 包裹体均一温度是其中一项重要的研究内容。利用均一温度可以进行成藏时间和古地温梯度的估算、成岩作用历史的推断及成熟度的研究等。由于油藏中流体包裹体成分复杂, 形成环境特殊, 均一温度应用存在一些问题, 这些问题有时会导致对包裹体测试结果的错误解释。本文旨在讨论研究中存在的实际问题, 探讨未来的研究方向。

1 均一温度的应用

流体介质中晶体不规则生长, 捕获了很少一部分流体, 当主晶体周围部分生长时, 这些不规则的部分被封闭而产生原生流体包裹体, 晶体生长过程中裂隙的愈合可产生假次生包裹体, 而在结晶之后的裂隙愈合则形成次生包裹体。在石油地质研究中, 这三种包裹体都较为重要。包裹体形成后物理条件变化使均一的流体相变为两相或多相, 通过加热使流体成分均一为一相得到包裹体的均一温度, 将压力校正到包裹体形成时的压力条件下时, 就可以得到包裹体的捕获温度。

1.1 成岩、成藏时间的确定

流体包裹体(尤其是油气包裹体)的均一温度常用来推断油气成藏时间^[5~6, 8, 12~15],当结合成分分析结果时,可提供油藏流体成分的变化。Nedkvitne等^[14]对北海Ula油田储层的研究表明,成岩作用自生矿物形成的先后顺序是:方解石 $\rightarrow$ 钾长石 $\rightarrow$ 石英+钠长石。Nedkvitne等^[14]和Karlsen等^[8]对自生钾长石、石英和钠长石的均一温度测定表明,钾长石均一温度为30~50℃,而石英和钠长石均一温度为110~143℃,最高均一温度(143℃)与现今油藏的温度(143℃)相一致。根据沉积埋藏历史及地温梯度推断钾长石的成岩作用发生在45~75 Ma,形成深度为1.0~1.5 km;石英和钠长石的成岩作用开始于10 Ma,深度为2.5 km,其成岩作用一直持续到现在。钾长石、石英和钠长石中均含有油气包裹体,但钾长石中油气包裹体成分与现今油藏原油成分差别较大,而石英和钠长石油气包裹体成分与现今油藏原油成分近似,表明两者具有不同的油源。根据后者可推断Ula油田成藏开始时间为10 Ma。

在未知地温梯度的情况下,成岩作用的时间可以通过流体包裹体的压力进行推算。Haszeldine等^[5]根据生标参数得到的古温度资料与流体包裹体的均一温度相对照,在一定盐度下的等容线上找到流体包裹体的捕获压力,根据沉积埋藏史即可计算出成岩作用的时间。在已知地温梯度的条件下,捕获温度的推算就较为简单。

1.2 排烃、油气运移及构造运动史的确定

不同世代成岩作用形成的矿物,以及岩石中不同时期形成的微脉中的流体包裹体,记录了随时间的变化而发生的温压条件和成分的变化,不同世代及期次包裹体的特征可用于确定排烃期次、油气运移及构造运动的变化历程。

陈孔全等^[16]在研究松辽盆地时,将岩石裂隙方解石脉的均一温度分为97.6℃,106℃,122.5℃和168.8℃四组,分别代表四次排烃过程。覃建雄^[17]在研究鄂尔多斯盆地东部奥陶系方解石脉、石膏脉、重晶石脉、硬石膏脉及铁白云石脉油气包裹体的分布特征时,通过含油气包裹体的微脉的空间分布来确定油气运移的通道,这种方法在油气勘探中具有一定的实用价值。

在结合流体包裹体的宿主矿物形成世代时,流体包裹体往往用来研究沉积盆地的沉积埋藏及抬升剥蚀的历史。麦碧娴等^[10]在研究泌阳凹陷下第三系流体包裹体时发现,第三期脉体均一温度较第二期低,说明第三期包裹体形成时,沉积盆地受到了抬升作用。

1.3 古地温及古热流

古地温梯度可以根据均一温度、成岩矿物形成的时间和盆地的沉积埋藏历史进行推断;根据古地温变化又可以进一步推断盆地的古热流状态。Tilley等对加拿大Alberta Deep盆地的研究表明,多数成岩自生石英形成于170~195℃,形成时介质溶液中盐的质量分数20%~30%;而方解石胶结物形成时的温度为108~169℃,形成于石英之后的构造抬升过程。根据沉积埋藏历史推断古地温梯度为38℃/km,较现今地温梯度(27℃/km)高。较高的地温梯度很难用剥蚀作用解释(因剥蚀厚度不够),而且研究地区无岩浆活动,推断地温梯度高异常可能与热的流体流动有关。这种热流可能由深部向斜的轴部沿向斜倾斜方向向上在砾岩或平行于层面的裂隙中流动引起,在一些油气田中是较为常见的^[18]。利用流体包裹体均一温度研究古热流是较为直接的手段。

2 问题讨论

随着研究的深入,人们发现流体包裹体均一温度的应用中存在着一些问题,例如当矿物受

到较高的温度压力影响时,包裹体的均一温度可能发生再平衡^[19];不同自生矿物中均一温度存在差别;同一自生矿物中烃类包裹体和盐水包裹体均一温度差异^[8,14];油气类包裹体均一温度的校正等。实际上,在包裹体均一温度的应用中如果不注意这些,往往引起错误解释。

2.1 包裹体形成后的变化

包裹体测温的前提是包裹体所捕获的是均匀流体,而且捕获后为封闭体系,具有等容特征。流体包裹体在储层及成岩作用等的研究中,一个主要的问题是当宿主矿物受到较高的温度和压力影响时,包裹体的均一温度可能会再平衡,表现为包裹体的脆性和塑性变形,引起均一温度的改变,这一问题尤其是在盐矿、碳酸盐矿物上表现得更加突出^[19~23]。

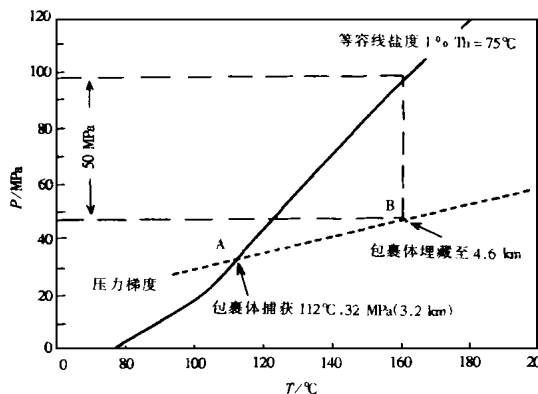


图1 埋深过程的流体包裹体内部过压力图^[19]

明包裹体均一温度再平衡除与过压力有关外,还受包裹体大小的影响^[22,24~25],包裹体越大越易发生再平衡,并具有较高的均一温度^[20]。不仅如此,包裹体均一温度的再平衡还受到其形状的影响^[23,25~26],形状越不规则,均一温度再平衡越易发生。

包裹体是否发生了爆裂或塑性变形,可根据均一温度和盐度测试结果判断(图2)。塑性变形的包裹体因其仍保持为封闭体系,成分没有改变包裹体的盐度保持恒定,但包裹体的体积变化破坏了其等容体系,使均一温度升高,在深度-盐度图解上沿平行于深度轴方向分布;发生爆裂的包裹体不但体积发生了变化,而且成分也发生了改变,从而引起包裹体均一温度和盐度的同步变化,包裹体点沿图2中的斜线方向分布。在用包裹体均一温度推断成岩和成藏时间时,进行图中所示的判断十分必要;应用均一温度研究成岩及成藏作用时,应剔除已发生均一温度再平衡的包裹体。用于包裹体研究的主要矿物有重晶石、方解石、萤石、闪锌矿和石英等,其中石英矿物中的包裹体受再平衡作用的影响较小^[26],是进行均一温度测试的首选包裹体。

2.2 成藏和成岩作用对流体包裹体形成的影响

Hawkins^[27]研究表明,Bothamsall油田砂岩储层成岩作用的变化主要受化学过程的控制,在原油充填带,岩石的孔隙度没有多大变化,原油成藏作用阻止石英的进一步次生长;而在

包裹体形成后,内压随环境温度升高而增加,达到一定程度时,包裹体可能会发生塑性变形、脆性变形或爆裂,盐的质量分数为1%的包裹体在112°C和32 MPa捕获时,当埋深达1.4 km,包裹体的内压力将比外部孔隙压力大50 MPa(图1)^[19]。石英中流体包裹体的完全爆裂所需要的过压力为85~100 MPa,对于小的包裹体可达250 MPa^[24],这种压力在埋藏过程中较难达到,所以包裹体均一温度再平衡的主要方式是塑性变形。塑性变形所需的过压力在自然埋藏过程中是能够达到的^[19],40 MPa的过压力可使大约20%的包裹体变形^[25]。实验表

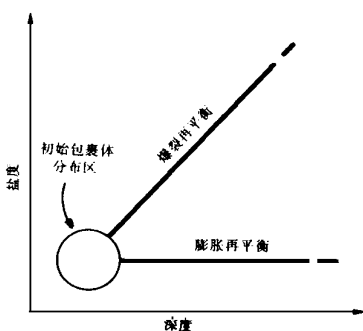


图2 包裹体爆裂和塑性变形判别模式图^[21]

水充填带,岩石的孔隙度减小,成岩作用可以进行下去。最近研究表明,矿物晶体与原油层之间往往存在一薄层盐水溶液,这一假设也得到了实验的证实^[28],由于宿主矿物对红外线的吸收而使得来自这一薄层盐水溶液不能被红外光谱检测^[29]。在局部地方,即使油气的饱和度较高,由于薄层水溶液的存在而使得结晶作用仍然可以进行,关键是是否存在油气的超饱和而不是油气饱和的百分率^[28]。总体来看,成藏以后成岩作用速度可能会减慢。

成藏以后成岩作用并未停止,那么与自生矿物密切共生的油气包裹体及盐水包裹体是在油藏形成之初还是油藏形成以后形成的就很重要,因为只有前者在地质应用中,尤其是在确定成藏时间上才有价值。储层中流体包裹体主要有两种:一种是沿矿物颗粒与次生晶体的接触面分布,在远离接触面的地方包裹体数量大大减少^[4, 28],另一种是沿裂隙分布。第一种情况较普遍,测定均一温度时也往往测定的是第一种类型的包裹体,所以说多数包裹体是在成藏之前或成藏时形成的,成藏后即使形成包裹体也是次要的。Saigal等^[30]研究北海中部 Fulmar 油藏砂岩时发现,包裹体的最高均一温度与现今油藏的温度相一致,他们将其作为成藏后成岩作用仍然继续进行的有力证据。事实上,成藏之后形成包裹体的数量是较少的,而均一温度与现今油藏温度相近也可能是均一温度再平衡的结果^[19]。从以上看来,用包裹体均一温度推算成岩和成藏的时间是可行的,应该注意的是均一温度的校正和包裹体形成后的变化。

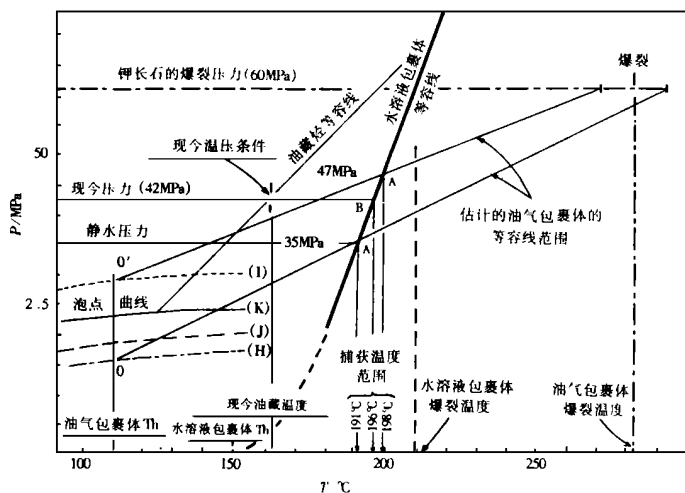
2.3 均一温度的校正

由于油藏中流体包裹体成分的复杂性,流体包裹体均一温度的压力校正一直是一个十分困难的问题。虽然有少数油水多相包裹体存在^[28],但镜下观察结果表明,同一矿物晶体中油和水溶液包裹体常作为独立的形式产出。尽管部分研究者发现共生的油气包裹体与盐水包裹体具有相同的或相近的均一温度^[28],但多数研究成果表明油气包裹体的均一温度小于盐水包裹体的均一温度^[4, 8]。Pagel等^[4]测试结果表明这种差异可达到 40℃,这一事实与水-烃体系中流体的不混溶相一致,且均一温度的差异随油气的成熟度的增加而增加,因为轻烃组分临界点较低,其均一温度一般也较低^[8]。

当已知盆地沉积埋藏史时,通过压实厚度的恢复,求得包裹体形成时的压力,在盐水等容线上可以得到包裹体的捕获温度。在埋藏较浅时,通过静水压力和静岩压力来确定可能的压力范围及捕获温度的范围。在深度小于 1.5 km 时静水压力起一定作用,而在深度大于 1.5 km 时,可能只有静岩压力^[5],所以在深度大于 1.5 km 时,用静岩压力就可较准确地确定流体包裹体的捕获温度。油藏中的水溶液包裹体可能会有少量烃类气体混入,如 CH₄ 等,可能会影响均一温度的测定。一定温度时 H₂O-NaCl-CH₄ 体系水溶液包裹体的压力较纯 H₂O-NaCl 体系的压力大^[31],当包裹体中存在少量 CH₄ 时,利用 H₂O-NaCl 体系进行均一温度校正后所得到的包裹体的捕获温度较实际的捕获温度要高。而流体包裹体中 CH₄ 通过拉曼光谱直接测定很难做到,因为激光诱导会引起较强的荧光。可以根据不同矿物中流体包裹体的爆裂温度来判断盐水包裹体中是否存在大量的 CH₄^[32],选定 H₂O-NaCl 体系的盐水包裹体进行包裹体均一温度校正。

油藏中油气包裹体的均一温度很难得到校正,因为其中油气成分的 PVT 变化较大。当油藏中油气和盐水包裹体同时形成时,由于两者的等容线的斜率不同而使得在理论上估计捕获温度和压力成为可能,关键在于油的等容线及其油藏烃 PVT 数据的确定。Walgenwitz等^[32]根据安哥拉盆地 Pinda 油藏油气包裹体位于现今油水界面之上,而假设包裹体中的烃与油藏中的烃具有相似的泡点压力,他将包裹体中烃的等容线的起始点定在现今油藏油的泡点曲线

上, 而等容线的另一点由包裹体的爆裂温度和矿物所能承受的包裹体的内压力来确定, 油气包裹体的等容线与盐水包裹体等容线交点的温度和压力即为包裹体捕获的温度和压力(图 3)。由于流体的分异及轻烃组分的损失而使得油藏烃饱和和压力有一定的分布范围, 最后确定的捕获温度和捕获压力也有一定的范围而不是一个确定的值。在实际研究中并不是所有的情况都

图3 用油气包裹体及水溶液包裹体校正均一温度^[32]

应用前提是流体包裹体是在均一体系中形成, 形成后保持封闭体系和等容体系。在应用流体包裹体均一温度时应注意包裹体形成后的次生变化, 如塑性变形、脆性变形和爆裂等, 可据均一温度-盐度图解来判断。流体包裹体均一温度可以根据沉积埋藏史推断出的负荷压力, 或者根据油气包裹体和水溶液包裹体等容线的交点进行校正。

参考文献

- 1 Marray R C. Hydrocarbon fluid inclusions in quartz. AAPG Bull, 1957, 41: 950~ 952
- 2 Roedder E. Fluid inclusion evidence on the environments of sedimentary diagenesis. SEPM Spec Publ, 1979, 26: 89~ 107
- 3 Pagel M, Poty B. The evolution of composition temperature and pressure of sedimentary fluids over time: a fluid inclusion reconstruction. In: Durand B, ed. Thermal phenomena in sedimentary basins. Houston: Gulf Pub Comp, 1983. 71~ 88
- 4 Pagel M, Walgenwitz F, Dubessy J. Fluid inclusions in oil and gas-bearing sedimentary formations. In: Burruss J, ed. Thermal modeling in sedimentary basins. Houston, Texas: Gulf Publishing Comp, 1985. 565~ 583
- 5 Haszeldine R S, Samson I M, Cornfort C. Dating diagenesis in a petroleum basin, a new fluid inclusion method. Nature, 1984, 307: 354~ 357
- 6 Haszeldine R S, Samson I M, Cornfort C. Quartz diagenesis and convective fluid movement, Beatrice Oilfield, North Sea. Clay Miner, 1984, 19: 391~ 402
- 7 Burley S D, Mullis J, Matter A. Timing diagenesis in the Tartan reservoir (UK North Sea): constraints from combined cathodoluminescence microscopy and fluid inclusion studies. Mar Petrol Geol, 1989, 6: 98~ 120
- 8 Karlsen D A, Nedkvitne T, Larter S R, et al. Hydrocarbon composition of authigenic inclusions: application to elucidation of petroleum reservoir filling history. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1993, 57: 3641~ 3659
- 9 潘长春, 周中毅. 液体流体包裹体在准噶尔盆地油气资源评价中的应用. 石油实验地质, 1990, 13(4): 399~ 407

- 10 施继锡, 李本超, 傅家谟等. 有机包裹体及其与油气的关系. 中国科学(B 辑), 1987, (3): 318~ 325
- 11 麦碧娟, 汪本善. 泌凹凹陷下第三系流体包裹体特征及其应用——流体包裹体研究. 地球化学, 1991, (4): 331~ 341
- 12 Horsfield B, McLinans R K. Geothermometry and geochemistry of aqueous and oil-bearing fluid inclusions from Fateh Field, Dubai. *Org Geochem*, 1984, 6: 733~ 740
- 13 McLinans R K. The application of fluid inclusions to migration of oil and diagenesis in petroleum reservoirs. *App Geochem*, 1987, (2): 585~ 603
- 14 Nedkvitne T, Karlsen D A, Bjorlykke K, et al. Relationship between reservoir diagenetic evolution and petroleum emplacement in the Ula Field, North Sea. *Mar Petrol Geol*, 1993, 10: 255~ 270
- 15 Burruss R, Cercone K R, Harris P M. Timing of hydrocarbon migration: evidenced from fluid inclusions in calcite cements, tectonics and burial history. In: Schneidermann N, Harris P M, eds. *Carbonate cements*. Tulsa: Soc Econ Paleontol Mineral, 1985, 277~ 289
- 16 陈孔全, 徐言岗, 张文淮. 松辽盆地南部有机包裹体特征及石油地质意义. 石油与天然气地质, 1995, 16(2): 138~ 147
- 17 覃建雄. 矿物流体包裹体研究在油气资源评价和油气勘探远景中的应用. 地质科技情报, 1993, 12(1): 47~ 52
- 18 Tilley B J, Nesbitt B, Longstaffe F J. Thermal history of Alberta Deep Basin: comparative study of fluid inclusion and vitrinite reflectance data. *AAPG Bull.*, 1989, 73: 1 206~ 1 222
- 19 Osborne M, Haszeldine S. Evidence for resetting of fluid inclusion temperatures from quartz cements in oilfields. *Mar Petrol Geol*, 1993, 10: 271~ 294
- 20 Burruss R. Diagenetic paleotemperatures from aqueous fluid inclusions re-equilibration of inclusions in carbonate cements by burial heating. *Mineral Mag*, 1987, 51: 477~ 481
- 21 Goldstein R H. Re-equilibrium of fluid inclusions in low temperature calcium carbonate cement. *Geology*, 1986, 14: 792~ 795
- 22 Bodnar R J, Bethke P M. Systematics of stretching in fluid inclusions — I. fluorite and sphalerite at 1 atmosphere confining pressure. *Econ Geol*, 1984, 79: 1 241~ 1 242
- 23 Barker C E. A fluid inclusion technique for determining maximum temperature in calcite and its comparison to the vitrinite reflectance geothermometer. *Geology*, 1991, 18: 1 003~ 1 006
- 24 Leroy J. Contribution à l'étalonnage de la pression interne des inclusions fluides lors de leur décrepitation. *Bull Mineral*, 1979, 102: 584~ 593
- 25 Bodnar R J, Bims P R, Hall D L. Synthetic fluid inclusions — VI. Quantitative evaluation of the decrepitation behavior of fluid inclusions in quartz at one atmosphere confining pressure. *J Metamorphic Geol*, 1989, 7: 229~ 242
- 26 Ulrich M R, Bodnar R J. Systematics of stretching of fluid inclusions II: barite at 1 atm confining pressure. *Econ Geol*, 1988, 83: 1 037~ 1 046
- 27 Hawkins P J. Relationship between diagenesis, porosity reduction, and oil emplacement in late Carboniferous sandstone reservoirs, Bothamsall Oilfield, Midlands. *J Geol Soc Lond*, 1978, 135: 7~ 24
- 28 Kihle J, Johansen H. Low-temperature isothermal trapping of hydrocarbon fluid inclusions in synthetic crystals of KH_2PO_4 . *Geochim Cosmochim Acta*, 1994, 58: 1 193~ 1 202
- 29 Pironon J. Synthesis of hydrocarbon fluid inclusions at low temperature. *Amer Mineral*, 1990, 75: 226~ 229
- 30 Saigal G C, Bjorlykke K, Larter S. The effect of oil emplacement on diagenetic processes — examples from the Fulmar reservoir sandstones, central North Sea. *AAPG Bull* 1992, 76: 1 024~ 1 033
- 31 Hanor J S. Dissolved methane in sedimentary brines: potential effect on the PVT properties of fluid inclusions. *Econ Geol*, 1980, 75: 603~ 609
- 32 Walgenwitz F, Pagel M, Meyer A, et al. Thermochronological approach to reservoir diagenesis in the Offshore Angola Basin: a fluid inclusion, ^{40}Ar – ^{39}Ar and K–Ar investigation. *AAPG Bull*, 1990, 74: 547~ 563

Abstract

The bottom boundary of the postglacial strata in Qiantangjiang River Mouth region is recognized as the surface of the regional unconformity formed during the lower sea level period of the last glacial age. The postglacial strata can be divided into four sets corresponding to primary, early, mid and late stages. Channel gravels deposited in the primary stage, alluvial flat clay rock and sandy clay rock deposited in the early stage, mudstone deposited in the middle stage, silty clay and limnic clay deposited in the late stage. Sedimentary facies include river bed, alluvial flat, neritic, river mouth and limnetic, littoral, weathered continental drift bed and flood deposit facies. It is suggested that the sandy lenticular bodies of alluvial flat and neritic facies are favourable reservoir zones for ultra-shallow biogas exploration.

(上接第 331 页)

APPLICATION OF FLUID INCLUSIONS TO PETROLEUM GEOLOGICAL STUDY AND DISCUSSION

Liu Shaobo

(Graduate School, China University of Science and Technology, Beijing)

Gu Jiayu

(Beijing Institute of Petroleum Exploration and Development, CNPC, Beijing)

Abstract

This paper summarizes the research advances and application methods of fluid inclusion homogenization temperature, especially in the aspects of determining the time of oil reservoir formation, petroleum expulsion, oil migration, history of deposition and uplift and geothermal gradient. Some problems relating to the criteria of homogenization temperature resetting and pressure correction, the application of fluid inclusion homogenization temperature and petroleum geology are discussed.