

郝石生 陈章明 高耀斌 吕延防 著
黄志龙 付 广 姜振学 张绍臣

天然气藏的形成和保存

石油工业出版社



121060
P 618.130.1
039

天然气藏的形成和保存

郝石生 陈章明 高耀斌 吕延防
黄志龙 付 广 姜振学 张绍臣

著

(S912/27)



石油0111442

2/12/05



石油工业出版社

(京)新登字 082 号

内 容 提 要

本书是国家“八五”科技攻关项目三级专题“天然气运移、聚集与封盖条件”的研究成果。包括天然气的运移机理及研究方法；天然气的聚集条件；天然气藏封盖条件等三大部分，每部分均有我国主要天然气藏形成的地质条件研究实例。本书不仅系统地总结了近年来国内外天然气运聚成藏的研究成果，而且各部分均有突破性的认识，研究方法亦有创新。对天然气藏形成过程中的运移作用、聚集作用和封盖条件均在建立地质模式的基础上，提出数学模式与具体研究方法，为天然气藏形成的量化研究奠定了基础。

本书可供教学、科研和生产部门的石油天然气地质科技人员使用，也可作为有关大专院校师生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

天然气藏的形成和保存 / 郝石生等著. — 北京: 石油工业出版社, 1995.6

ISBN 7-5021-1457-2

I. 天…

II. 郝…

III. ①气田—油气藏—形成②气田—油气藏—封闭油气藏

IV. P618.130.2

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里 2 区 1 号楼)

石油工业出版社印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

787×1092 毫米 16 开 $12\frac{1}{2}$ 印张 307 千字 印 1-1200

1995 年 6 月北京第 1 版 1995 年 6 月北京第 1 次印刷

定价: 18.00 元

前 言

天然气藏的形成机制是天然气地质学的重要理论之一。由于它对认识含气(油)盆地内气藏分布规律、预测天然气资源、指导天然气勘探有实际意义,因此,天然气藏形成机制是多年来为石油地质家所关注和积极探索的一个重要课题。

随着人类社会的进步、工业的发展,人们对天然气资源的需要量越来越多。为了满足这种需求,石油地质家不断地努力勘探天然气藏,同时,在生产实践和科学实验的基础上不断总结天然气藏形成的地质条件及其规律性,并从理论上综合研究,总结提高,数值模拟的引用,使天然气运移、聚集和封盖条件的研究从定性分析进入到定量研究的阶段。

笔者在前人工作的基础上,开展了“七五”、“八五”国家重点科技攻关项目——“大中型天然气田形成条件、分布规律和勘探技术研究”中的“天然气运聚及封盖条件研究”专题研究。并对下列诸方面内容有所发展,加以归纳写成“天然气藏的形成和保存”一书。

1.对天然气运移的三种机理——分子扩散、渗流和脉冲式混相涌流进行了论述。总结出天然气扩散运移作用的六种地质模型,从而加深了对机理的认识,同时建立了数学模型并以典型气藏为计算实例,对数学模型进行验证。首次提出脉冲式混相涌流的运移机理,并建立了概念模式,分析了这一运移机理形成的地质条件。在天然气运移地球化学研究方面,主要从烃类组分、非烃组分、同位素、生物标志化合物、包裹体等方面分析其表征天然气运移的规律性。

2.在天然气运聚条件方面,根据天然气从源岩到圈闭运聚成藏这一过程,以动态研究为主,辅以动态、静态相结合的天然气成藏史研究方法并建立了运聚动平衡数值模型。以我国琼东南盆地、陕甘宁盆地等为实例进行了演算验证。

3.天然气的封盖条件既在运——聚过程中起着重要作用,又是圈闭组成要素之一和气藏的保存条件,故本书总结了盖层的物性封闭、流体超压封闭和烃浓度封闭机理及其封闭性形成的影响因素。并研究了天然气藏形成与保存条件的微观封闭能力和宏观封闭条件的综合评价标准。又以典型气藏形成的实例分析了封盖条件。

通过对盖层封闭性形成史的研究,指出盖层封闭史与生烃史、排烃史、天然气运移史和圈闭形成史的匹配对综合分析天然气成藏史的重要意义。

断层的开启—封闭性既可能是天然气运移的通道,又可能是天然气藏形成的阻挡条件。所以破坏盖层平面展布延续性的断层封闭性也列为我们研究工作的重要内容。经研究而提出了一些新方法,并以其对典型气藏形成的作用为实例进行了地质分析。

本书在编写过程中得到中国石油天然气总公司、北京石油勘探开发研究院及廊坊分院、南海西部石油公司、大庆石油管理局、塔里木石油勘探开发指挥部、长庆石油管理局、四川石油管理局等单位的大力支持。同时也得到关德范、戴金星、郭水生、黄第藩、杨俊杰、裴锡古、戚厚发、宋岩等同志的鼎力协助。特此致以衷心感谢。限于笔者水平所限,书中难免有不足之处,谨请读者批评指正。

目 录

第一章 绪论	(1)
第二章 天然气的运移机理	(4)
第一节 扩散运移	(4)
一、分子扩散	(4)
二、传质微分方程	(6)
三、天然气扩散的数学模型	(9)
四、地质剖面上的扩散运移现象	(14)
第二节 渗流运移	(16)
一、势与流体势	(16)
二、势场与力场	(19)
三、力场与流场	(21)
四、渗流运移的研究方法	(22)
第三节 脉冲式混相涌流	(22)
一、概述	(22)
二、形成条件及模式	(22)
三、实例分析	(23)
第三章 天然气运移的地球化学指标	(28)
第一节 烃类组分	(28)
一、低分子正构烷烃	(28)
二、分子量相同而结构不同的组分	(30)
三、芳烃与链状烷烃	(30)
四、 ΔR_3 参数	(31)
第二节 同位素	(32)
一、利用 $\delta^{13}C_1$ 同位素判别天然气垂向运移距离	(32)
二、天然气运移的同位素分馏效应	(34)
第三节 非烃气体	(35)
一、 CO_2 的成因	(35)
二、 CO_2 在天然气运移研究中的意义	(35)
第四节 生物标志化合物	(36)
一、石蜡指数和庚烷值	(36)
二、芳烃	(37)
三、储层沥青生物标志化合物	(38)
第五节 包裹体	(39)
一、包裹体的类型和分布特征	(39)
二、天然气运移的时间和深度	(41)

三、运移相态	(43)
四、运移方向	(43)
第四章 天然气聚集及成藏机制	(44)
第一节 天然气聚集条件研究的若干基本问题	(44)
一、天然气聚集条件的特殊性	(44)
二、气源的广泛性和运移方式的多样性	(44)
三、研究方法及其进展	(45)
第二节 天然气运聚动平衡原理	(45)
一、理论依据	(45)
二、聚散动态平衡原理	(46)
第三节 天然气运聚动平衡模型	(46)
一、生烃模型	(46)
二、排烃模型	(47)
三、运聚模型	(57)
四、散失模型	(57)
五、运聚动平衡模型	(57)
六、天然气聚集和保存条件的动态评价	(58)
第四节 典型气田的聚集条件及运聚动态平衡	(59)
一、琼东南盆地天然气聚集条件及运聚动平衡	(59)
二、陕甘宁盆地天然气聚集条件及运聚动平衡	(71)
第五章 天然气藏形成的封盖条件	(91)
第一节 微观封盖机理及定量研究	(91)
一、物性封闭机理及定量研究	(91)
二、超压封闭	(102)
三、烃浓度封闭	(111)
第二节 封盖条件演化史	(116)
一、泥质岩盖层封闭性演化史及其特征	(116)
二、盖层封闭天然气的有效性	(118)
第三节 利用地球物理信息研究盖层	(126)
一、利用测井资料研究盖层	(126)
二、利用地震资料研究盖层	(131)
第四节 断层封闭性研究	(142)
一、断层封闭性研究方法	(143)
二、典型断层封闭性分析	(151)
小结	(168)
第五节 封盖条件的综合评价	(170)
一、泥质岩盖层封闭机理的综合性	(170)
二、沉积环境对盖层封闭性的控制作用	(171)
三、盖层评价标准及其综合评价	(173)
四、盖层对盆地内气藏形成的控制作用	(184)

第一章 绪 论

天然气运移、聚集与封盖条件是天然气藏形成的核心内容，它包含着天然气成藏过程的运移作用、聚集作用和封盖条件诸方面静态地质要素的构成及作用过程的动态特征。实际上，也就制约着天然气藏的分布规律。因此，自 19 世纪 40 年代左右提出“背斜聚油理论”之后，油气的运移、聚集和保存条件的油气藏成藏研究工作被地质家更加重视，并逐渐成为石油地质学理论研究的重要内容之一。20 世纪 40 年代以来，由于科学技术的迅速发展和大规模开展油气勘探的结果，使得油气地质综合研究日益深化。本世纪 60 年代以来，有机地化实验技术和岩石结构测试技术的发展，使得地质家对油（气）源岩、储集岩及盖层岩石特性的认识达到了较高水平。数值模拟在石油地质学科的应用，已使石油地质家从定性分析地质演化史进入到定量分析地质演化史的阶段。同时，许多技术和方法的发展对油气藏形成机制也起到重要作用。例如流体势梯度在油气运移、聚集上的应用，油气运移聚集动平衡认识论的提出，断裂开启—封闭性的精细研究对油气运聚的作用，地层孔隙流体压力异常现象的判断，地层流体压力封存箱理论的提出等等对油气运移—聚集成藏机制的发展都起到了积极的推动作用。

天然气的运移和聚集是气藏形成的一个连续过程。天然气的运移机理有分子扩散、渗流和脉冲式混相涌流三种。它们有其各自的机理，也有其各自的地质制约因素。所以，其中任一种天然气运移机理在自然界的发生都有其特定的地质条件，也就是说它是在特定的地质背景下发生的。天然气分子在地质体中的扩散作用，受分子浓度、岩层结构、地下温—压等诸多因素影响，但主要影响因素是烃气浓度差和扩散系数，也就是说，烃气在地层中的扩散作用基本上符合斐克第一定律。本书据此并结合地层剖面中烃气存在的复杂地质现象归纳出六种天然气扩散地质模式：①烃源岩烃气扩散分为烃源岩两侧渗透层烃浓度为零和烃源岩烃气浓度不为零的两种扩散模式；②气藏中天然气通过盖层的扩散模式，它又可分为四种扩散模式：a. 烃源岩两侧渗透层烃浓度不为零；b. 盖层为非源岩，盖层上侧渗透层浓度为零；c. 盖层为烃源岩，盖层上侧渗透层烃浓度为零，盖层具一定烃浓度；d. 盖层为烃源岩，盖层上侧渗透层烃浓度不为零。当然，含气层上覆诸多岩性层段中的岩性等状况是复杂的，它们的扩散系数，含烃浓度是多样的。加上它们对烃气的吸附作用所造成的气体分异现象的存在，都将造成烃气在地层剖面上扩散运移的复杂现象。但其在漫长的地质时代中的扩散作用仍可概括为上述六种扩散地质模式。

天然气在输导层（渗透性岩层、不整合面和开启性断层）中的游离相和溶解相的渗流作用是必然存在的，其方向与动力受流体势梯度、水动力条件和输导层毛细管力诸因素的制约。在通常情况下，气体的渗流作用是气藏形成的主要运移因素。

在特定地质条件下，当构成高温高压的流体封闭体中的流体压力高于封闭体围岩的破裂压力时，围岩将产生裂缝，这时封闭体中的混相流体将以裂缝为突破口发生涌流。而当涌流至地层压力低于饱和压力时，则气体析出而呈游离相运移。因其封闭体内混相流体的增高—围岩破裂—封闭体内流体压力释放—围岩裂缝闭合复原这一过程具有短暂性特点，所以封闭体内混相流体的快速移流具有涌流特征，故称为混相涌流。而上述涌流过程机制又因地质过

程的周而复始而重复，所以，总称为脉冲式混相涌流。

上述三种烃气运移机理是在不同的特定地质条件下使天然气运移聚集成藏的。

天然气从源岩中排出进入输导层，在流体势梯度的制约下向低势区运移。因在其运移途中经过的岩性有所差异，矿物成分有所变化，则其对烃气组分的吸留作用随之产生。所以，不仅遗留下天然气运移的痕迹，也将使气体的成分、生物标志化合物和碳同位素等发生变化。又由于运移途中温—压系统的变化致使天然气运移相态也随之发生变异。这些变异因地质条件而存在其规律性。它不仅为人们研究天然气运移提供了依据，为找气提供了线索，也对研究天然气藏的类型及其特性起着重要作用。

天然气聚集成藏是天然气由高势区向低势区圈闭中运移而成的。但这并不意味着天然气的运移作用就此终止。不仅当地质构造事件使圈闭发生形变导致圈闭容积变小，或圈闭遭受断裂等破坏时，其中天然气将在流体势梯度的控制下再次发生运移，其结果或者减少其储量，或者散失，或者重新聚集成藏。而且更普遍的现象是，气藏中的天然气在不断地向上扩散运移，而使气藏中所储集的气量相应减少。但是，当该气藏的气源存在源源不断的补充供给时，则供—聚—散作用而使储气量在该圈闭容积的制约下保持着动平衡状态。这就称为天然气运聚动平衡。显然，这种天然气运聚动平衡在一个地区的存在是一个长期的动态演化过程。这种过程可以有三种“供—散”的动态现象。即“供气”大于“散失”、“供气”小于“散失”；或“供气”与“散失”等量。这三种现象可以表现于不同的成藏系统，也可以表现于同一个成藏系统的不同地史阶段。

天然气藏的保存需要有良好的封盖条件，这已为人们所周知。从天然气藏的形成来说，天然气自源岩排出进入输导层之时，就应该有区域性的良好封盖条件，亦即说，在天然气开始二次运移时，就应该有覆盖整个天然气成藏系统范围的良好盖层，这样才能保证天然气在二次运移时处于封闭系统中。因此，研究天然气藏形成与分布时，对封盖条件的研究及其评价应包括盖层封闭能力及其展布范围。

膏盐层因其具有致密非渗透，且塑性强不易产生裂缝的特点，所以被公认为最优的天然气盖层。但天然气勘探证明，泥质岩也是大多数气田的良好盖层，泥质岩盖层有三种阻止天然气逸散的封闭机理：即毛细管封闭作用、泥岩欠压实的超压封闭作用和烃浓度封闭作用。前两种封闭作用是阻挡天然气的渗滤作用，后一种封闭作用是阻挡天然气分子的扩散作用。一套泥质岩盖层可以因其地质条件的不同而具备上述三种，或是其中的二种封闭作用，也可能只具备一种封闭作用。当然，其封闭能力的优劣与其具备封闭作用的多少有关。

盖层展布范围、单层厚度、层段厚度均与其沉积环境有密切关系。成岩程度对泥质岩封闭能力的形成也有重要作用。它不仅体现在盖层埋深上，也表现在同一层位盖层在平面上成岩程度变化而影响同一层盖层封闭能力平面上的变化。

既然泥质岩的成岩程度直接影响着泥质岩的封闭性，那么，泥质岩盖层的封闭形成史就有其演化过程，认识这一点对于研究气藏形成过程与保存条件是很重要的。例如，盖层作为圈闭组分的三要素之一，则盖层封闭性的形成期也应是圈闭形成期的因素之一。导致天然气储集体的形态已形成，而盖层封闭性未形成，则从圈闭概念分析，就缺乏盖层这一要素。又如天然气输导层缺乏已具备封闭性盖层的封闭作用，那么，天然气就无法在封闭的输导层内进行运移而进入圈闭。所以，盖层封闭性形成期也是天然气成藏系统形成期的要素之一。因此，盖层封闭史的研究与源岩生烃史、排烃史、天然气运移史和圈闭发育史的研究具有同等重要意义，这些天然气成藏史匹配的综合分析是天然气成藏史研究的重要内容。

盖层平面上的封盖条件还受后生构造断裂作用所控制。断裂既可作为天然气运移通道，又可起着阻挡气体运移的作用，这与断裂的开启—封闭性特征和演化史密切相关。所以，断裂对盖层封闭性平面展布延续性的破坏（包括断层的破坏和盖层剥蚀“天窗”的形成）是制约天然气藏的形成与分布的重要地质因素。

综上所述，天然气封盖条件的研究及其评价，必须对其微观封闭能力、宏观封闭性展布、封闭性形成史以及盖层的后生破坏情况进行综合研究，以便正确认识天然气成藏系统、成藏模式及气藏分布的规律性。

总之，天然气运聚成藏机制是三度空间的静态地质要素和地质动态过程的综合。是油气地质理论的核心内容，是指导天然气勘探的理论基础。虽然对有关问题提出了系统的认识，但其中有些复杂的问题尚待今后进一步努力探索与实践。

第二章 天然气的运移机理

天然气的运移是天然气聚集成藏过程中一个非常重要的自然过程,了解和认识天然气的运移机理和规律,对指导天然气勘探具有重要意义。

天然气的运移机理有分子扩散、渗流和脉冲式混相涌流三种机理。这三种运移机理概括了天然气运移的机制和动力,它们有各自的特点及控制因素。

第一节 扩散运移

分子扩散(或称分子传质)是物质传递的一种方法。天然气不同于石油,其重要的特点是天然气的扩散渗透能力很强,在天然气运移、聚集和散失过程中的扩散作用应充分重视。

一、分子扩散

在静止系统中,由于浓度梯度而产生的质量传递称为分子扩散,分子扩散是物质传递的一种方式。

1. 斐克第一定律

在浓度扩散条件下,物质的扩散通量数学表达式是由斐克(Fick, 1855)根据热流类比求得的。斐克确定了稳态下双组分混合物中物质的分子扩散通量与扩散方向上的浓度梯度成正比,组分A沿X方向上的分子扩散可表示为

$$J_A = -D_{AB} \frac{dC_A}{dX} \quad (2-1)$$

这就是斐克第一定律的数学表达式。

式中 J_A ——由分子扩散所引起的组分A在X方向上的摩尔通量, $\text{kmol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$;

C_A ——组分A的摩尔浓度, kmol/m^3 ;

X——扩散方向上的距离, m;

D_{AB} ——组分A在组分B中的扩散系数, m^2/s 。

式(2-1)表示在总浓度C不变的情况下,由于组分A的浓度梯度 dC_A/dx 所引起的分子扩散通量,负号表示扩散方向与浓度梯度方向相反,即分子扩散朝着浓度降低的方向进行。

2. 分子扩散系数

分子扩散系数表示物质的扩散能力。根据斐克定律,分子扩散系数可以理解为沿扩散方向,在单位时间内每单位浓度梯度下,通过单位面积所扩散的某物质质量,即

$$D_{AB} = \frac{J_A}{dC_A/dX} \quad (2-2)$$

分子扩散系数取决于压力、温度和系统的组成。

(1) 气体通过液相的扩散

液相扩散不仅与物系的种类、温度有关，且随溶质的浓度而变化，只有稀溶液的扩散系数才可视为常数。

爱因斯坦假设扩散粒子是半径为 r_A 的刚球质点，以恒定速度 v_A 在一个粘度为 μ_B 的连续介质中移动。按照斯托克斯定律，层流中一个以稳态速度运动的球，其所受的力是

$$F_A = 6\pi r_A \mu_B v_A \quad (2-3)$$

式中 F_A ——溶质分子所受到的阻力；

μ_B ——溶剂的粘度；

v_A ——溶质分子的运动速度；

r_A ——溶质分子的半径。

在稀溶液中可求得

$$D_{AB} = kT \frac{v_A}{F_A} \quad (2-4)$$

式中 $\frac{v_A}{F_A}$ ——在单位力作用下，溶质 A 的分子运动速度；

k ——玻尔兹曼常数；

D_{AB} ——溶质 A 在稀溶液 B 中的扩散系数；

T ——绝对温度。

将式 (2-3) 代入式 (2-4) 便得

$$D_{AB} = \frac{kT}{6\pi r_A \mu_B} \quad (2-5)$$

这就是斯托克斯-爱因斯坦方程式，它表示液体的粘度和扩散系数之间的关系。

(2) 多孔介质中的扩散

气体或液体进入固态物质孔隙的扩散，取决于固态物质的物理结构或孔隙特性。气体通过多孔介质的扩散机制主要有两种，即通常的斐克扩散和努森 (Knudsen) 扩散。

1) 斐克扩散 一个扩散过程，究竟是以斐克扩散为主，还是以努森扩散为主，决定于介质孔隙的大小。如果孔隙直径相对说来大于气体平均自由行程，则属于斐克扩散，反之，则属于努森扩散。

多孔介质的孔隙是不规则的，其截面积是多孔介质的自由截面积。在多孔介质内，组分 A 是在曲折的毛细孔中进行扩散，因此，组分 A 在多孔介质内的分子扩散系数应采用有效扩散系数

$$D_{A, \text{eff}} = \frac{D_{AB} \varphi}{\tau} \quad (2-6)$$

式中 $D_{A, \text{eff}}$ ——有效扩散系数;
 D_{AB} ——双组合混合物的分子扩散系数;
 ϕ ——多孔介质的空隙率, 即孔隙度;
 τ ——曲折因数, 即曲折度。

曲折因数用来校正扩散方向所增加的距离, 实际的扩散路程曲折多变, 不仅与曲折路程长度有关, 并且受固体中小孔复杂结构的影响, 所以, 此值必须由实验测定。对于松散颗粒 $\tau = 1.5 \sim 2.0$, 紧密聚集的颗粒 $\tau = 7 \sim 8$ 。

2) 努森扩散 努森根据实验指出, 气体分子和孔壁碰撞后的运动方向是不规则的, 且与碰撞的方向无关。根据气体分子运动学说, 努森有效扩散系数为

$$D_{k, \text{eff}} = \frac{2}{3} \bar{r} \bar{u}_A \quad (2-7)$$

式中 $D_{k, \text{eff}}$ ——努森有效扩散系数;
 $\bar{r}$ ——平均孔隙半径;
 $\bar{u}_A$ ——组分 A 的分子均方根速度。

由于

$$\bar{u}_A = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M_A}}$$

所以

$$D_{k, \text{eff}} = 97.0 \bar{r} \left(\frac{T}{M_A} \right)^{1/2} \quad (2-8)$$

式中 M_A ——组分 A 的分子量。

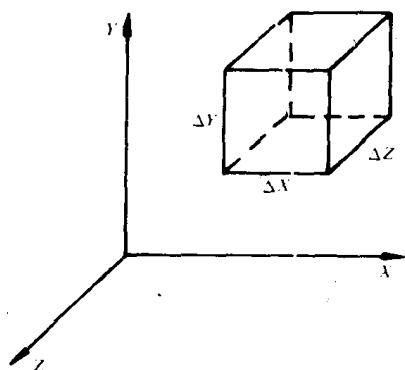


图 2—1 控制体

(3) 气体通过岩石的扩散

气体分子通过地下岩石的扩散比较复杂, 一方面气体分子通过孔隙介质进行扩散, 另一方面, 气体分子又通过岩石固体骨架进行扩散。因此组分 A 在岩石中的分子扩散系数应采用有效扩散系数, 它一般需实验来确定。

二、传质微分方程

分子扩散过程是与浓度分布和梯度密切相关的。按照不同的浓度分布和梯度, 可以分为一维、二维和三维分子扩散; 同时根据过程是否随时间而改变, 又可分为稳态的分子扩散和不稳态的分子扩散。但许多情况下的扩散现象可以近似地简化为浓度反沿一个方向变化的一维稳态或一维不稳态分子扩散过程。

1. 液体、固体中传质微分方程

我们可以应用控制体来求解传质微分方程。取一个控制体 ΔX 、 ΔY 、 ΔZ ，设组分 A 的物质通过这一控制体介质 B 扩散。如图 2—1 所示。分析控制体中组分 A 的质量守恒时，应考虑经化学反应生成物这一项。因此，质量守恒的一般式为

$$\begin{aligned} & \text{组分 } A \text{ 流出控制体质量 (摩尔量)} \\ &= \text{组分 } A \text{ 流进控制体质量 (摩尔量)} + \text{控制体内经化学反应生成 } A \text{ 的速率} - \text{组分 } A \text{ 在控制体内质量 (摩尔量) 局部变化率} \end{aligned} \quad (2-9)$$

$$\begin{aligned} X \text{ 方向: 流出控制体 } & \vec{N}_{A, X} \Delta Y \Delta Z |_{X+\Delta X} \\ & \text{流进控制体 } \vec{N}_{A, X} \Delta Y \Delta Z |_X \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Y \text{ 方向: 流出控制体 } & \vec{N}_{A, Y} \Delta X \Delta Z |_{Y+\Delta Y} \\ & \text{流进控制体 } \vec{N}_{A, Y} \Delta X \Delta Z |_Y \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z \text{ 方向: 流出控制体 } & \vec{N}_{A, Z} \Delta X \Delta Y |_{Z+\Delta Z} \\ & \text{流进控制体 } \vec{N}_{A, Z} \Delta X \Delta Y |_Z \end{aligned}$$

组分 A 在控制体内的质量局部变化率为

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} \Delta X \Delta Y \Delta Z$$

如果组分 A 在控制体内以 R_A 的速率生成，则质量生成项为

$$R_A \Delta X \Delta Y \Delta Z$$

将上述各式代入 (2-9) 式得

$$\begin{aligned} & \vec{N}_{A, X} \Delta Y \Delta Z |_{X+\Delta X} - \vec{N}_{A, X} \Delta Y \Delta Z |_X + \vec{N}_{A, Y} \Delta X \Delta Z |_{Y+\Delta Y} - \vec{N}_{A, Y} \Delta X \Delta Z |_Y \\ & + \vec{N}_{A, Z} \Delta X \Delta Y |_{Z+\Delta Z} - \vec{N}_{A, Z} \Delta X \Delta Y |_Z + \frac{\partial C_A}{\partial t} \Delta X \Delta Y \Delta Z - R_A \Delta X \Delta Y \Delta Z = 0 \end{aligned} \quad (2-10)$$

经整理得

$$\frac{\partial}{\partial X} \vec{N}_{A, X} + \frac{\partial}{\partial Y} \vec{N}_{A, Y} + \frac{\partial}{\partial Z} \vec{N}_{A, Z} + \frac{\partial C_A}{\partial t} - R_A = 0 \quad (2-11)$$

这就是组分 A 的连续性方程。由于 $\vec{N}_{A, X}$ 、 $\vec{N}_{A, Y}$ 、 $\vec{N}_{A, Z}$ 是摩尔通量矢量 $\vec{N}_A$ 在直角坐标系中的三个分量，所以式 (2-11) 可写成

$$\nabla \cdot \vec{N}_A + \frac{\partial C_A}{\partial t} - R_A = 0 \quad (2-12)$$

其中 R_A 为单位体积组分 A 的摩尔生成率。

2. 方程的特殊形式

如果控制体内没有组分 A 的整体流动, 则摩尔通量

$$\vec{N}_A = -\vec{D}_{AB} \nabla C_A$$

代入式 (2—12) 得

$$-\nabla \vec{D}_{AB} \nabla C_A + \frac{\partial C_A}{\partial t} - R_A = 0 \quad (2-13)$$

式中 $\vec{D}_{AB}$ 为组分 A 在介质 B 中的扩散系数, 式 (2-13) 可用来描述液体或固体介质扩散系统中的浓度分布, 为一般通式, 若附加一些条件, 则可得到连续性方程的特殊形式。

① 假定 D_{AB} 为常数, 则

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_{AB} \nabla^2 C_A + R_A \quad (2-14)$$

在直角坐标系中的表达式为

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_{AB} \left[\frac{\partial^2 C_A}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 C_A}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 C_A}{\partial Z^2} \right] + R_A \quad (2-15)$$

② 假定 D_{AB} 为常数, $R_A=0$, 则可简化为

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} = D_{AB} \nabla^2 C_A \quad (2-16)$$

这就是斐克第二定律的表达式, 此式仅适用于组分在固体及静止液体中的扩散。斐克第二定律在直角坐标系中的形式为

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} = D_{AB} \left[\frac{\partial^2 C_A}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 C_A}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 C_A}{\partial Z^2} \right] \quad (2-17)$$

③ 假定 D_{AB} 为常数, $R_A=0$, 又是稳态扩散过程即 $\frac{\partial C_A}{\partial t} = 0$, 则可简化成

$$\nabla^2 C_A = 0 \quad (2-18)$$

在直角坐标系中表示为

$$\frac{\partial^2 C_A}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 C_A}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 C_A}{\partial Z^2} = 0 \quad (2-19)$$

3. 一维不稳态扩散

如果浓度场随时间变化的质量传递过程称为不稳态分子扩散，且扩散又只沿着一个方向进行，则称为扩散是一维的。

①如果在固体或静止液体中扩散，无扩散组分 A 的物质生成 ($R_A=0$)，扩散只沿 X 方向上进行，则斐克第二定律表示为

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} = D_{AB} \frac{\partial^2 C_A}{\partial X^2} \quad (2-20)$$

②组分 A 在固体或静止液体中扩散，扩散组分 A 在单位体积内的摩尔生成率 $R_A=B$ ，则传质微分方程 (2-15) 可写成

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} = D_{AB} \frac{\partial^2 C_A}{\partial X^2} + B \quad (2-21)$$

三、天然气扩散的数学模型

在地质环境中，只要存在浓度梯度，分子扩散（包括石油和天然气）作用就无时无刻不在进行。由于液态烃（石油）分子量大，分子直径大，其扩散速度比气态烃要慢得多，它们的重要性往往可以忽略。而轻烃（天然气）扩散作用是不可忽视的，在天然气的运移和保存过程中起着重要作用。

烃源岩开始生烃后，轻烃可以通过分子扩散作用从烃源岩运移到相邻的渗透层（初次运移）。天然气在运移过程中或进入圈闭形成气藏后，其中的轻烃也可以通过分子扩散作用经盖层向外扩散。此类问题可看作是扩散组分由一平面向另一平面的一维不稳态扩散，可用斐克第二定律来描述

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial X^2}$$

式中 C ——烃浓度；

X ——扩散距离；

t ——扩散时间；

D ——扩散系数。

如果扩散系统中具有烃源岩，即烃源岩中天然气在不断生成，设烃的摩尔生成率为 B ，则扩散连续性方程为

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial X^2} + B$$

上述方程是天然气一维不稳态的连续性方程，即可作为建立天然气扩散数学模型的基础。

在不同石油地质条件下，轻烃的扩散具有两种不同情况，一种是烃源岩在生烃过程中轻

烃的扩散；另一种是已形成的气藏中天然气通过盖层的扩散。这两种情况可概括为六种地质模式（图 2—2），现将根据不同模式建立的数学模型分述如下。

1. 烃源岩的轻烃扩散

① 若烃源岩厚度为 $2L$ ，初始烃浓度为 C_0 ，烃产率为 B ，烃源岩上下两侧渗透层烃浓度为零（图 2—2—1）。扩散连续性方程

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial X^2} + B \quad (2-22)$$

这个浓度变化的解必须满足下列的初始条件和边界条件。

当 $t=0$ 时，在 $-L \leq X \leq L$ 处， $C = C_0$ ；

$t > 0$ 时，在 $X = L$ 处， $C = 0$ ；

$t > 0$ 时，在 $X = -L$ 处， $C = 0$ 。

由此可得到烃源岩中烃浓度的分布规律，进而得出单位面积烃源岩向上扩散量（ $X = L$ 处）为

$$Q_L = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{8BL}{(2n+1)^2 \pi^2} \cdot t + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{8LC_0}{(2n+1)^2 \pi^2} (1 - e^{-(n^2 \pi^2 Dt) / 4L^2}) - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{32BL^3}{(2n+1)^4 \pi^4 D} (1 - e^{-(n^2 \pi^2 Dt) / 4L^2}) \quad (2-23)$$

单位面积烃源岩向下扩散量（数值上， $X = -L$ 处）为

$$Q_{-L} = Q_L \quad (2-24)$$

② 烃源岩厚度为 $2L$ ，初始浓度为 C_0 ，产烃率为 B ，烃源岩上下两侧渗透层中烃浓度分别为 C_1 、 C_2 （图 2—2—2），扩散连续性方程同（2—22）式。

此扩散方程的解应满足下列初始条件和边界条件。

当 $t=0$ 时，在 $-L \leq X \leq L$ 处， $C = C_0$ ；

$t > 0$ 时，在 $X = L$ 处， $C = C_1$ ；

$t > 0$ 时，在 $X = -L$ 处， $C = C_2$ 。

同理可得到单位面积烃源岩向上（ $X = L$ ）的扩散量为

$$Q_L = -\frac{C_1 - C_2}{2L} Dt + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{8L [C_0 - \frac{1}{2} (C_1 + C_2)]}{(2n+1)^2 \pi^2} (1 - e^{-(n^2 \pi^2 Dt) / 4L^2}) + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{8BL}{(2n+1)^2 \pi^2} \cdot t - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{32BL^3}{(2n+1)^4 \pi^4 D} (1 - e^{-(n^2 \pi^2 Dt) / 4L^2}) \quad (2-25)$$

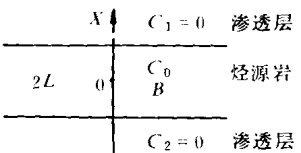
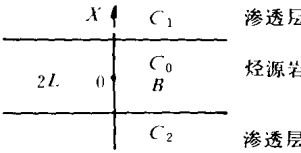
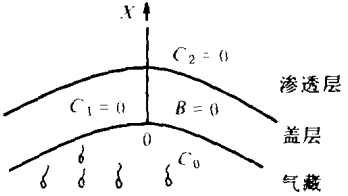
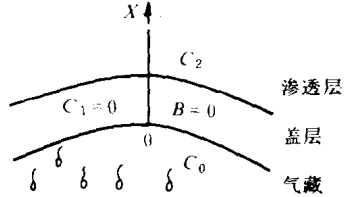
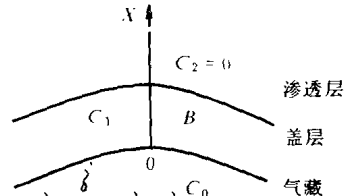
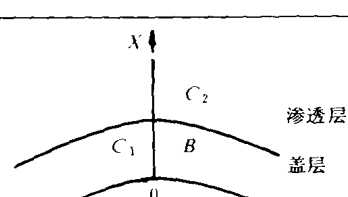
地 质 模 型		地 质 参 数
烃源岩轻烃扩散		1. 烃源岩两侧渗透层烃浓度为 零, 烃源岩厚度为2L, 初始 浓度为C ₀ , 产烃率为B
		2. 烃源岩两侧渗透层烃浓度不 为零, 烃源岩上下两侧渗透 层烃浓度分别为C ₁ 、C ₂ , 其 他参数同1
气藏中天然气通过盖层的扩散		3. 盖层为非源岩, 盖层上侧渗 透层烃浓度为零, 气藏浓度为 C ₀
		4. 盖层为非源岩, 盖层上侧渗 透层烃浓度为C ₂ (不为零), 其他参数同3
		5. 盖层为烃源岩, 盖层上侧渗 透层烃浓度为零, 盖层初始 浓度为C ₁ , 产烃率为B, 气 藏烃浓度为C ₀
		6. 盖层为烃源岩, 盖层上侧渗 透层烃浓度不为零(为C ₂), 其他参数同5

图 2-2 天然气扩散地质模型

单位面积烃源岩向下 ($X=-L$ 处) 的扩散量为

$$Q_{-L} = \frac{C_1 - C_2}{2L} Dt + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{8L \left[C_0 - \frac{1}{2} (C_1 + C_2) \right]}{(2n+1)^2 \pi^2} (1 - e^{-\frac{(n^2 \pi^2 Dt)}{4L^2}})$$