

中国工程热物理学会

工程热力学与能源利用学术会议

论文集（上册）

二〇〇七

绍兴

中国工程热物理学会编



工程热力学与能源利用学术会议论文集(上册) 目录

一. 基础热力学

- 071008 物理科学发展史的回顾与聚集力学的创建.....童景山(1)
- 071010 液氮、干冰在人控气象中的相变热力学.....童景山(6)
- 071012 基于焓传递原理的油藏驱动方式判别.....成庆林 刘 扬 项新耀(11)
- 071028 汽液相变及亚稳态理论研究.....王洪利 马一太 李敏霞 汪耀东(17)
- 071044 ADP 晶体相变界面微观形貌及其推移过程的实时 AFM 研究.....
.....喻江涛 李明伟 王晓丁(23)
- 071063 理想 Bose 气体中的二种热力学势能.....黄为民(33)
- 071064 相变中的热力学势能.....黄为民(38)
- 071069 辐射传热定律时加热气体的最优膨胀.....宋汉江 陈林根 孙丰瑞(45)
- 071070 基于构形理论的体一点导热熵产生最小化.....周圣兵 陈林根 孙丰瑞(51)
- 071071 基于三角形单元体的以焓耗散最小为目标的体点导热构形优化.....
.....魏曙寰 陈林根 孙丰瑞(57)
- 071083 水分子模型对汽液界面影响的模拟研究.....
.....孙 杰 何雅玲 李印实 陶文铨(63)
- 071087 过程熵和状态熵.....吴 晶 过增元(68)
- 071103 太阳能电池中光电转换的有效能.....莫松平 陈则韶 江守利 胡 芑(74)
- 071111 湿空气相平衡的分子动力学模拟研究.....陈 俊 刘 朝 曾丹苓(83)
- 071112 微通道中 Poiseuille 流动的分子动力学研究.....刘彬武 刘 朝 刘娟芳(87)
- 071113 热分析方法联用求解动力学参数.....王文钊 刘 朝(93)
- 071119 CdZnTe 晶体分离结晶稳定性研究.....彭 岚 伍顺发 李友荣(97)
- 071122 Cu 团簇在 Cu 表面沉积效果影响因素的分子动力学模拟.....
.....高 虹 赵良举 刘娟芳 曾丹苓(102)
- 071123 纳米流体中液体分子吸附的分子动力学模拟.....
.....刘娟芳 高 虹 蔡治勇 曾丹苓(109)

071124	混合物输运特性的分子动力学研究·····刘娟芳 刘 朝 高 虹 曾丹苓	(114)
071125	纳米液滴蒸发过程的分子动力学模拟···蔡治勇 刘娟芳 刘 朝 曾丹苓	(119)
071140	水蒸汽凝结潜热释放方式刍议·····周少祥	(124)
071166	简单流体迁移性质分子动力学模拟研究·····高 辉 吴江涛	(129)

二. 热力与节能

071005	不同干燥方式下可降解有机废物湿解系统的用能比较与分析····· ·····郭淑青 董向元 肖云汉	(135)
071006	热力管道保温焓经济设计及应用分析····· ·····耿丽丽 王志国 刘晓燕 项新耀 马一太	(142)
071023	论带有能量旁路的冲压发动机的形成·····于达仁 唐井峰 鲍 文	(148)
071025	基于闭式 Brayton 循环的超燃冲压发动机能量热管理系统····· ·····鲍 文 秦 江 于达仁 周伟星	(160)
071038	低温多效热蒸汽压缩海水淡化系统热力性能分析·····王永青	(168)
071039	注蒸汽燃机—海水淡化复合系统热力性能分析·····王永青	(176)
071041	地板辐射采暖与散热器采暖热环境比较····· ·····王立璞 李金平 王林军 王磊磊	(183)
071042	太阳能与生物质能互补的采暖系统研究····· ·····李金平 王磊磊 王林军 王立璞	(187)
071043	太阳能和生物质能互补的散热器采暖系统····· ·····王磊磊 李金平 王立璞 王林军 金红光	(195)
071045	引射式增压装置的设计与试验研究·····赵良举 李德胜 李 斌 苏成功	(202)
071046	工质对低沸点有机工质朗肯循环的影响····· ·····赵远扬 李连生 刘云霞 刘广彬 束鹏程	(208)
071052	燃气机热泵系统的性能优化·····赵海波 杨 昭 徐振军 方 笋	(212)
071054	燃气机热泵的全年性能优化研究·····杨 昭 赵海波 方 笋 徐振军	(217)
071056	布雷顿—两平行逆布雷顿循环性能 I. 循环模型····· ·····张万里 陈林根 孙丰瑞	(223)

071057 布雷顿—两平行逆布雷顿循环性能 II. 性能优化·····	张万里 陈林根 孙丰瑞(230)
071060 超临界二氧化碳膨胀做功过程分析·····	李敏霞 马一太 王洪利 汪耀东(236)
071065 基于热经济学的 O_2/CO_2 循环燃烧系统和 MEA 吸附系统的技术—经济评价 ·····	熊 杰 赵海波 柳朝晖 郑楚光(240)
071066 基于热经济学结构理论的电站热力系统分解优化·····	熊 杰 赵海波 张 超 郑楚光(247)
071067 不可逆 Diesel 循环有限时间热力学分析·····	戈延林 陈林根 孙丰瑞(253)
071075 基于热经济学结构理论的微型冷热电联供系统性能评价·····	邓 建 吴静怡 王如竹 李 胜 朱天生(259)
071076 采用两级 Fresnel 透镜的太阳能高倍聚光系统的透光特性·····	韩延民 王如竹 代彦军 邓 建(267)
071093 微燃机冷热电联供系统的热力学分析·····	陶德安 段立强 杨勇平(274)
071094 IGCC 中燃气蒸汽联合循环系统的模拟及优化研究·····	王 旭 段立强 杨勇平 马顺勤(281)
071095 基于 Aspen Plus 对 Texaco 水煤浆气化炉的模拟研究·····	马顺勤 段立强 杨勇平 王 旭(288)
071096 基于灰色关联层次分析理论的加热炉余热利用综合评价·····	张翠珍 杨 荣(296)
071097 两气联合循环的有限时间热力学分析·····	赵 婷 杨 荣 余 敏(301)
071099 聚焦型太阳能集热器中腔体吸收器的热性能研究·····	张丽英 翟 辉 代彦军(306)
071101 聚光分频光伏发电系统的光学分析·····	江守利 陈则韶 莫松平 陈建新(313)
071108 论能源利用的评价基准·····	周少祥(321)
071115 固体氧化物燃料电池产功机理研究·····	段立强 杨勇平 徐二树(329)
071116 基于菲涅耳透镜的聚焦型太阳能集热器的数值计算及性能分析·····	翟 辉 代彦军 吴静怡(337)
071118 双源供暖(空调)系统性能分析和应用研究·····	毕庆生 宋之平 杨勇平 徐二树(345)

071120 有无后冷器的微燃机 HAT 循环性能研究.....	王 波 张士杰 张 彦 肖云汉(352)
071121 不同排烟方式 HAT 循环性能对比.....	万逢芳 肖云汉 张士杰(358)
071127 太阳能热水驱动地板采暖性能研究.....	宋兆培 翟晓强 王如竹(366)
071128 近零排放双燃料多功能系统特性规律分析及优化.....	张国强 韩 巍 金红光 蔡睿贤(372)
071130 氢工艺能量分析图与乙炔多联产系统集成.....	王志方 郑丹星(379)
071131 燃气轮机与燃气内燃机在联供系统中的应用比较.....	陆 伟 张士杰 肖云汉(386)
071132 结合双效吸收式热泵的新型海水淡化系统.....	宿建峰 韩 巍 林 湖 金红光(395)
071133 喷淋吸收过程模型及实验研究.....	魏 璠 肖云汉 张士杰 路 源(404)
071135 火电厂相变干式空气冷却系统优化.....	尹建国 傅秦生 吴江涛(410)
071137 中低温太阳热能与甲醇重整互补制氢实验研究.....	刘启斌 洪 慧 袁建丽 金红光 蔡睿贤(417)
071138 燃料气混烧的油电联产系统经济性分析.....	郭志刚 王 逊 张士杰(425)
071139 焦炭和甲醇/动力多联产系统集成与特性.....	金红光 孙士恩 林汝谋 高 林(432)
071143 辐射对流传热对不可逆太阳能 Braysson 热机循环性能的影响.....	林国星 吴兰梅(440)
071145 氨水工质浓度可调型功冷联供循环.....	张 娜 刘 猛 赵洪滨(445)
071146 内燃机及其热电联产系统的典型变工况解析特性.....	何晓红 蔡睿贤(453)
071147 利用间冷的甲醇重整制氢—发电联产系统.....	张筱松 金红光(460)
071148 生物质基甲醇动力多联产系统焓分析.....	李洪强 洪 慧 金红光(467)
071150 燃气轮机冷热电联供系统蓄能调节的混和动力原理.....	黄纯浩 隋 军 金红光(478)
071162 蒸汽喷射压缩器的优化设计.....	王汝武(485)
071163 水源热泵系统动态模型和仿真问题研究.....	薛志方 史 琳(492)

物理科学发展史的回顾与聚集力学的创建

童景山

(清华大学化工系 北京 100084 电话 62785139 email:khy6608@yahoo.com)

摘要 本文主要论述<聚集力学>这门新兴学科的创建, 它的提出说明是现代科学技术发展对应用基础理论有着更高的要求, 它也是人类科学技术发展的必然“产物”。

关键词 物理科学 分子聚集理论 聚集力学

1. 前言

从 17 世纪初至今人类科技发展也就是 400 年历史, 本文拟针对物理科学发展史进行阐述。从 17 世纪初到 19 世纪末的 300 年中物理科学取得的成就是巨大的。我们知道, 物理科学主要有三大领域, 而三大领域都分别取得令人瞩目的成就, 如研究宏观物体运动, 有牛顿力学, 其代表作为《自然哲学的数学原理》; 研究热运动, 有热力学和统计力学; 研究电磁波和光波, 有麦克斯韦电磁场理论(电动力学)。由于有了这些成就, 因而许多物理学家踌躇满志, 叹为观止。他们普遍认为, 理论上的一些基本的原则问题都已得到解决, 这标志着物理学已经发展到了完整、系统和成熟的阶段, 所以, 物理学的大厦就算建成了, 以后的工作只不过是对大厦的进一步装修——在细节上不断做些修正和补充, 使理论更加完备而已。

但是, 正当人们在世纪之交为物理学的空前胜利额手相庆之际, 以牛顿力学和麦克斯韦电磁场理论为支柱的无比美好的经典物理学, 却在一些新的实验事实面前显得无能为力了, 这些实验表现出与经典物理学理论的尖锐冲突, 使经典物理学濒临危机, 其中之一就是迈克尔逊实验测定的“以太相对于地球的漂移速度为零。另外, 1845 年天文学家发现水星近日点在不断前移, 根据牛顿理论计算, 在考虑到所有可能摄动影响之后, 仍有每世纪 43”的差异无法解释。与此同时在对比热和热辐射定律的研究中又出现了“紫外灾难”等古典理论不可克服的矛盾。这次危机最后终于酿成了一场空前的物理学大革命。而相对论和量子论就是这场物理革命的最主要成果。

前面已提到物理科学包含三个领域, 其中热科学实际上也存在着和其他两个领域的同样的“命运”, 当时也遇到不可克服的困难, 如乳光现象, 应用经典热力学和统计力学(平均场理论)不论定性解释和定量计算都无法做到。当然还有如反常相变等复杂现象都有待人们去研究解决, 这就引发了分子聚集理论和聚集力学的诞生。

2. 聚集力学理论的建立

众所周知,任何重要的科学理论的提出,都有其历史必然性,在时机成熟时(实验测试技术的水平、实验数据资料的积累以及基础理论的准备等),就会应运而出。据了解,对分子聚集现象的研究(包括实验研究和理论研究)已历经 100 多年,在这漫长的时间里,始终未形成较为完整的理论体系,原因是多方面的,如实验测试技术、计算技术以及对现象本质的认识等在相当长的时间里都处于较低水平,一直到 20 世纪 80 年代初之后世界上少数国家对此现象的研究给予很大的关注,他们利用高水平的测试技术对此进行实验研究,并取得一些很有意义的结果,而且还对现象的本质及其应用前景提出一些初步看法。从此新的实验数据资料也就有了较多的积累。此外,现代科技发展对应用基础理论有着更高要求。上述这些都对聚集理论的形成与发展起到积极作用。一门学科的形成都有一定的继承性,必定含有已成熟的学科作为基础。作者体会,本学科和如下几门基础学科有关,即经典热力学,统计力学,物理化学和分子物理学,而一定程度上还与物质结构理论知识有关。作者在《聚集理论》中提出的聚集运动方程是基于分子聚集物理模型,应用统计力学方法和化学热力学原理导出的,继而又在聚集运动方程基础上导出聚集函数 j 的表达式。在上述诸方程的推演中曾应用了对应态原理,能量均分定理以及微观粒子运动的广义外自由度等。例如,基于硬球引力场模型应用统计力学方法构建了聚集子混合物 Helmholtz 自由能方程,然后应用化学反应平衡原理由此推导出相应的聚集运动方程,继而又引出聚集函数式。另一方面,利用热力学微分关系式又推得聚集型范德瓦耳斯状态方程,同时还导出一些反映分子聚集行为特性的参量方程。这样,流体的一系列热物理性质以及特殊条件下的物理化学性质即可进行定量预测。另外,基于上述原理和方法,作者还建立了聚集溶液理论,从而可运用该理论来处理一些如流体相平衡等问题。以上所述,是作者提出的《聚集理论》的基本内容。本学科的研究路线为图 1 所示。

自 90 年代初以来本理论已在许多领域,如物理、化学、化工、能源、材料和生物等得到应用。同时,还在物理、化学、生物等前沿课题研究中取得重要进展。此成果已在《中国日报》(英文版)和《科技日报》于 2002 年和 2003 年分别给予报道。本学科可望在地球科学,如大气、海洋、生物等继续发挥其重要作用。

3. 聚集力学理论的核心内容

众所周知,力学是研究力的作用和物质的运动的科学,而聚集力学是研究分子运动行为这一层次,具体来说,是研究分子的相互作用力,即电磁力(包括定向力、诱导力、色散力和短程斥力以及弱化学力)和由此而产生的分子聚集运动的规律。本学科包括如下几方面内容。

3.1 基本论点

(1) 分子聚集是流体中存在的一种普遍现象, 因此, 一般流体均可看作为一种由各种聚集体分子所组成的混合物。

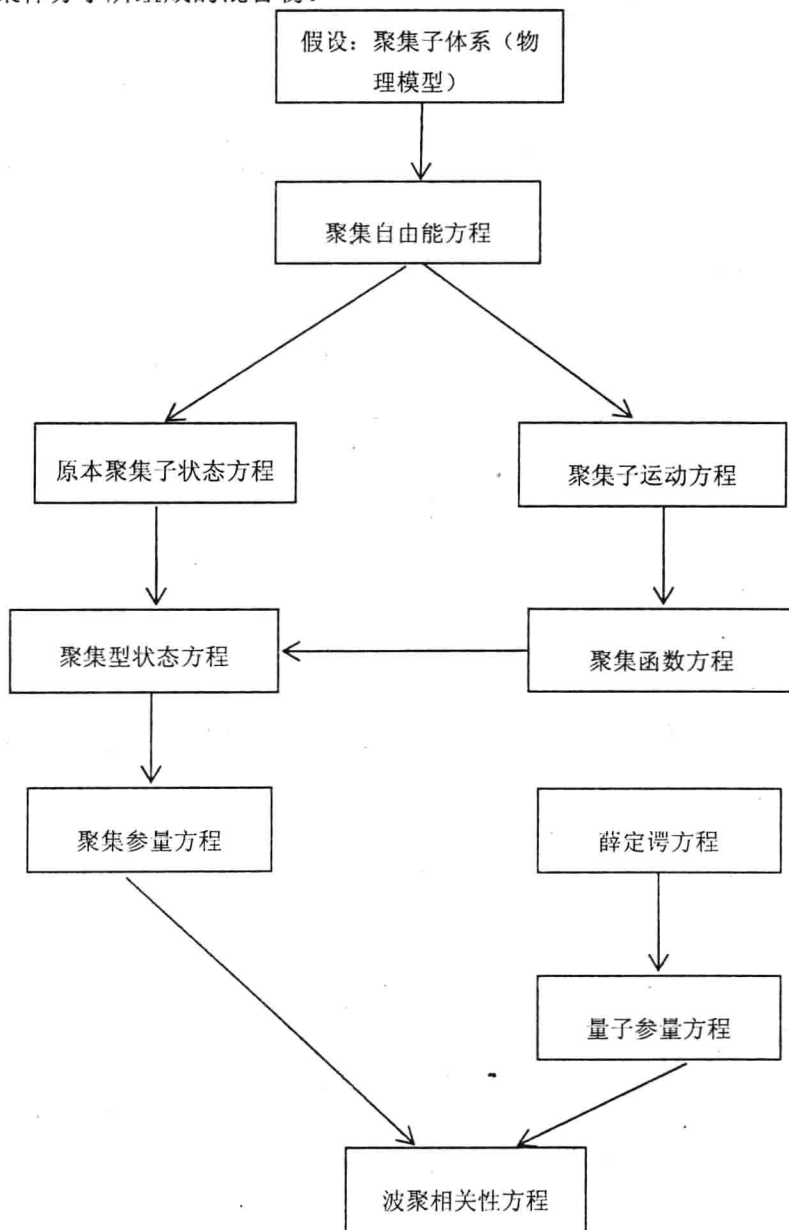


图1 研究路线的框图表示

(2) 引起分子聚集的主要原因是分子间的相互作用力, 即范德瓦耳斯力, 包括定向力, 诱导力和色散力(或称范德瓦耳斯键)及弱化学力(如氢键等)。因氢键的能量与分子间作用的范德瓦耳斯力的能量差不多, 故这里把氢键也归入分子间的作用力。氢键与范德瓦耳斯键所引起的分子聚集, 其区别在于前者有饱和性和方向性, 而后者无此特点。

(3) 分子聚集度不仅与物质本身的化学结构特性有关, 而且随物质所处的物态(气

态, 液态和超临界流体态)而异。

(4) 当分子形成聚集体时, 此行为在一定程度上会直接影响聚集体内各个分子的内部运动, 如振动、内转动等, 还可引起运动形态的变化。

(5) 分子聚集度不仅与物质体系的压力、温度, 组成有关, 而且也受外力场(如重力场、电场和磁场等)的影响。

(6) 物质内存在各种形式的聚集体分子, 该分子群体的分布在恒定条件下是稳定的。

(7) 物质中存在着分子聚集与解聚“反应”过程, 该过程是可逆的, 即简单聚集体分子可形成更复杂的聚集体分子; 相反, 复杂的聚集体分子可分解为简单的分子聚集体和单体分子。各种聚集体分子之间在一定条件下处于动平衡状态。

(8) 在流体的相变过程中常伴随着分子聚集或解聚过程。

3.2 四个基础模型方程

1. 分子聚集自由能方程

$$F = \sum_i [N_i \varepsilon_{oi} - (3C_i / 2) N_i \kappa T \ln T + N_i \delta_i T] - \sum_i N_i \kappa T \\ + \sum_i N_i \kappa T \ln N_i - \sum_i N_i \kappa T \ln(V - b) - a/V$$

2. 聚集型状态方程

$$p = \frac{jRT}{V-b} - \frac{a}{V^2} \quad j = \sum_i N_i / N_A$$

3. 聚集运动方程

$$\prod_i N_i^{v_i} = DT^{\sum_i v_i (3C_i / 2)} e^{-\sum_i v_i \varepsilon_{oi} / \kappa T} (V-b)^{\sum_i v_i}$$

4. 聚集活性方程

$$\left(\frac{3C^*}{2}\right)_{cp} = \frac{\frac{1}{4}h-1}{(j_c^{-1}-1)} + h-2$$

3.3 四个基本原理

1. 分子聚集运动原理 分子群进行聚集运动时, 其聚集行为, 不论是双聚体、三聚体或 n 聚体的形成过程都必须遵循这普遍规律, 即聚集运动方程。

2. 分子聚集活性原理 每一种分子都有固有的聚集活性、活性强弱用(3C*)来表征, 进行定量描述, 当分子进行聚集运动时, 各个分子都发挥其应有的活性作用。

3. 波聚相关性原理 对每种分子而言, 它所具有的波动性(量子性)和聚集性, 这是两种运动属性, 经研究发现, 它们之间的关系是遵循线性规律, 即 $(3C^*)_{cp} = A_o + B_o \Lambda_r$ 。

这里, 量子参量 $\Lambda_r = \frac{h}{r \cdot \sqrt{m\varepsilon^*}}$, 是根据量子力学中 Schrödinger 波动方程引出。

4. 生物分子相互作用原理 生物体内的生物小分子与大分子进行相互作用(聚集作用), 是生物体内必不可少的功能性行为。例如, 已发现一氧化氮(NO)依据其很强的聚

集活性,可激活可溶性鸟苷酸环化酶(sGC),从而促使三磷酸鸟苷(GTP)进行转化反应,产生环磷酸鸟苷(cGMP),这是一种强的血管扩张剂。又如新发现的神经递质—多巴胺,也是一种活性很强的生物小分子。在脑部神经系统中它是充当信息传递功能的信使分子,故称为“递质”。多巴胺依据其强的聚集活性与细胞表面上的受体进行作用,并且跨越细胞膜对细胞内部运动形态产生影响。如激起细胞内产生一系列生物反应,生成一些新的信使分子,从而实现了生物信息的传递。

4. 聚集力学的本源

近几年来,本人对大量资料进行分析研究,发现如下规律:一个自然力和一个自然普适量相结合,由此,可以引发出具有普遍意义的基本理论。

基于四个基本的自然力和四个普适量,本人提出的基本论点:物质运动具有耦合性,如一个自然力和一个相应的普适量相耦合,引出的基础理论,该理论就可以用来阐述和解决一些复杂现象的本质问题。下面分别进行论述:

4.1 万有引力与真空光速相耦合,形成了广义相对论(相对论力学)。该理论包含如下几个原理:光速不变原理、相对性原理和等效原理。该理论可用来阐述和定量计算太阳系中天体运动中的某些现象,如引力红移、光线在引力场中的偏转和水星近日点进动等。

4.2 电磁力和阿伏伽德罗常量相耦合,即形成了分子聚集理论和聚集力学。该理论包含聚集运动原理、聚集活性原理和波聚相关性原理(互补原理)等。近10多年来,该理论已被应用于如下一些现象:溶液与相变现象、临界与超临界现象、超低温物理现象和生命体内信使分子的行为特性及其生理功能作用机制,等等。

4.3 核力和普朗克常量相耦合,则形成了量子理论和量子力学。该理论包含物质的波动性原理、不相容原理和不确定性原理等。本理论的应用例子有:原子核外电子的排布、光电效应、受激辐射与激光技术,以及放射性与衰变现象等。

从上述可知,聚集力学、相对论力学和量子力学,三者同出一个本源,即它们的“源头”一样,都是基于自然力和普适量相耦合而引出的理论。

以上三种基础理论可分别归属于天体物理、分子物理和原子物理。它们在宇宙学、地球科学和原子物理科学领域将继续发挥其重要作用。

从以上论述可以看出,一个自然力和一个自然常数相耦合可以构建一种理论,用它来处理一些复杂的自然现象。一般来说,简单的问题可以用单一的知识因素就可以予以处理,可是对一些复杂的问题必须用两种以上的知识因素联合,从而会产生一种特殊功能。这样才能处理一些复杂问题。

参考文献

- [1] 清华大学自然辩证法教研组编,科学技术史讲义[M].北京:清华大学出版社,1982
- [2] 解恩泽,科学蒙难集[M],长沙:湖南科学技术出版,1998
- [3] 张三慧主编.大学物理学(第一册):力学[M].北京:清华大学出版社,1999
- [4] 张三慧主编.大学物理学(第五册):量子物理[M].北京,清华大学出版社,2000
- [5] 童景山,分子聚集理论及其应用[M],北京,科学出版社,1999
- [6] [美] E. H. 威切曼著,复旦大学物理系译,量子物理学[M].北京:科学出版社,1978

液氮、干冰在人控气象中的相变热力学

童景山

(清华大学化工系 北京 100084 电话 62785139 email:khy6608@yahoo.com).

摘要 本文主要是, 首先介绍近几年来我国气象工作者在人控气象(如人工消雾、人工增雨和防雹等)方面取得了一系列的研究成果。其次是阐述催化剂(液氮、干冰)在人控气象作业中的相变的热力学性质。

关键词 人控气象 液氮、干冰相变催化剂 相变热力学

1. 简述

随着科学技术的发展, 人类逐渐了解和掌握大气中出现的现象, 如云、雾、雨、雪、雹等形成机理。为了减轻各种自然天气对人类的生活和工作的影响, 人们开展应用科技知识作人控气象的研究工作。据报道, 近些年来北京气象局在有关部门的支持下在人工消雾、增雨、消雨和防雹等方面开展了多年卓有成效的研究, 已取得了多项研究成果:

(1) 人工消雾 通常气象学家把由悬浮于贴近地面空中的微小水滴造成水平能见度小于 1000 米的天气现象称为雾。由于雾天能见度很差, 致使交通堵塞、车祸增多, 航空港、海港、高速公路关闭, 从而影响人们的正常工作和生活。据报道, 在科技主管部门的支持下北京市气象局成功地进行了“液氮消冷雾技术研究项目”的试验。由于液氮在常压下($p_0=101.33\text{kPa}$)下气化温度为 $T=73.35\text{K}(-195.8^\circ\text{C})$ 通过一般交通工具, 如车辆, 飞机等将液氮喷洒在雾层中, 由于液氮迅速蒸发, 而吸取四周的热, 即可造成气温低于零下 40°C 的低温环境, 从而让雾中的微小水滴迅速冻结成微冰晶, 这些冰晶成为凝化核心, 又迅速地凝化了周围的雾滴, 长成小雪花而降落, 最终达到消冷雾的目的;

(2) 人工增雨和消雨 当旱情严重的季节, 可应用人工增雨技术。自上世纪 50 年代末以来, 北京就开始进行人工降雨试验研究。已经积累了相当多的经验。一般来说是利用飞机、高炮和火箭等工具进行增雨作业, 值得一提的, 北京率先在国内把对环境无影响的绿色催化剂——液氮用于飞机增雨作业, 当液氮喷洒在云层(雨层云)中使云层迅速冷却, 即刻使云层中小水滴凝化, 成长为大水滴而降落。另外, 据专家介绍, 消雨原理实际上和人工增雨一样, 只不过是让本来要在需要避雨的地区下的雨提前而已。一般来说, 在需要消雨地区上风方向约 50 公里左右的位置, 一旦发现哪块雨层云要下雨, 就使用人工降雨技术, 让雨水提前降落, 这样, 需防雨的地域自然也就是晴朗了, 此外气象专家还可以通过向云层中发射大量催化

剂，使云层中的雨滴“长不大”，等云飘过避雨区才下雨，这样也可起到人工消雨的作用。

需再提一下，在过去人们早就知道，人工降雨的催化剂可采用干冰（固态 CO_2 ）、当在云层中喷洒干冰同样起到和液氮人工降雨的作用。两者所不同的，干冰是通过升华相变热而液氮是通过气化相变热使云层降温，促进云中水滴凝化成雨滴降落。

2. 相变催化剂热物性研究

显然，要实施人控气象作业，首先人们必须掌握催化剂和大气中水蒸汽的相变机理和有关的热物性知识。

2.1 液氮的气-液相变热物理性质

(1) 饱和液相体积 V^{SL} 数据的计算

本文作者曾于 1985 年提出如下形式的饱和液体积的通用性方程^[1]：

$$V^{SL} = \frac{RT_c}{p_c} \exp \left\{ - (1.2310 + 0.8777\zeta) \left[1 + (1 - T_r)^{2/7} \right] \right\} \quad (1)$$

式中 ζ 为氮的构形因子； p_c 、 T_c 分别为临界压力，临界温度。

表 1 中给出液氮的实验和理论计算值。

表 1 饱和液氮体积 (cm^3/mol) 数据

T/K	$V/\text{cm}^3/\text{mol}$	实验值	计算值	Dev.(%)
77.35		1.239	1.240	0.08
77.0		1.237	1.237	0.00
76.0		1.230	1.231	0.08
75.0		1.224	1.218	0.05

表 2 氮气的基本物性数据

M	T_b/K	T_c/K	$P_c/(10^5\text{Pa})$	$V_c/(\text{cm}^3/\text{mol})$	Z_c	ζ
28.011	77.35	126.35	33.96	92.579	0.298	0.0104

(2) 液氮的蒸气压数据

本节直接采用 Clapeyron 两常数方程，即

$$\ln p = A - B/T \quad (2)$$

其中常数 A、B 由数据直接回归确定，得

$$A = 9.3184735 \quad B = 719.428975$$

表 3 给出液氮蒸气压的实验和计算值。

表 3 液氮蒸气压数据

$\begin{array}{c} V/\text{cm}^3/\text{mol} \\ T/\text{K} \end{array}$	实验值	计算值	Dev.(%)
77.35	1.0133	1.0177	0.43
77.0	0.9719	0.9755	0.37
76.0	0.8614	0.8627	0.15
75.0	0.7609	0.7604	-0.06

(3) 液氮的气化热数据

作者基于分子聚集理论导出如下的气化热通用公式：

$$\frac{\Delta H_V}{RT_c} = h \left(1 - \frac{P_r}{T_r^m}\right)^{0.5} \quad (3)$$

式中 $h = \frac{T_{br} \ln P_c(\text{atm})}{1 - T_{br}}$ ，而指数 $m = \frac{3C^*}{2} + 1$ ， m 值可用 $m = \frac{h-1}{2}$ 来估算。表 4 给

出液氮气化热数据。

表 4 液氮气化热数据

$\begin{array}{c} V/\text{cm}^3/\text{mol} \\ T/\text{K} \end{array}$	实验值	计算值	Dev.(%)
77.35	197.6	198.43	0.27
77.0	197.9	198.74	0.42
76.0	199.1	199.57	0.24
75.0	200.1	200.35	0.13
74.0	201.4	201.09	0.15

2.2 干冰的热物理性质

干冰是固态二氧化碳，能直接转变成气态，即为升华过程。下面讨论干冰升华过程的有关物性。

(1) CO_2 气-固相平衡的相体积计算

本文是采用分子聚集型 CS-vdW 状态方程，其形式如下：

$$p = j \frac{RT}{V} \cdot \frac{1 + \eta + \eta^2 - \eta^3}{(1 - \eta)^3} - \frac{a}{V^2} \quad \eta = \frac{b}{4V} \quad (3)$$

$$j = 1 - \frac{C_p}{RT} \quad C = (1 - j_c) \frac{RT_c}{p_c} \exp[(\beta^* + \delta^*)\left(\frac{1}{T_r} - 1\right) + \left(\frac{3C^*}{2}\right) \ln \frac{1}{T_r}] \quad (4)$$

$$a = \Omega_a \frac{(j_c RT_c)^2}{p_c} \quad \Omega_a = 0.496388$$

$$b = \Omega_b \frac{j_c RT_c}{p_c} \quad \Omega_b = 0.187295$$

$$j_c = Z_c / \zeta_c \quad \zeta_c = 0.3589567$$

应用式 (3) 和 (4) 对 CO₂ 气、固相体积进行计算，其结果，如表 5 所示。

表 5 CO₂ 气、固相体积计算结果

T/K	V/cm ³ ·mol ⁻¹		Dev. (%)	固相体积		Dev. (%)
	实验值	计算值		实验值	计算值	
193.15	17516.378	17509.198	-0.04	28.123029	28.122020	-0.00
198.15	11838.959	11884.762	0.38	28.299073	28.267143	-0.11
203.15	8159.6394	8174.6288	0.18	28.475117	28.436906	-0.13
208.15	5690.6223	5693.2050	0.04	28.695172	28.722145	0.09
213.15	4013.8092	4012.4026	-0.03	28.915227	28.947778	0.11

表 6 气固相 3C* 关联式

物态	3C* 关联式	温度范围 (K)
气相	3C* = 5.657765 - 0.01271567T	198.15-203.15
固相	3C* = 38.45229916 - 0.111795854T	

(2) 干冰升华过程的蒸气压数据

经分析研究干冰升华蒸气压基本上也遵守 Clapeyron 两常数方程，最后确定为

$$(\text{晶体上}) \ln p = 16.04572685 - 3.119948736 \times 10^3 \frac{1}{T} \quad (5)$$

表 7 中给出计算结果与实测值

表 7 干冰蒸气压数据

T/K	p/(10 ⁵ Pa)		Dev.(%)
	实验值	计算值	
193.15	0.8963278	0.8983645	0.22
198.15	1.343511	1.3503231	0.50
203.15	1.98094	1.98479	0.43
208.15	2.873348	2.87717	0.13

(3) 干冰相变热的计算

本文应用 Clausius-Clapeyron 方程导出如下形式的气固相变热方程:

$$\frac{\Delta H^{sg}}{RT_c \Delta Z^{sg}} = h^{sg} = 10.256579 \quad (6)$$

式中 $\Delta Z^{sg} = \frac{p^s}{RT} (V^g - V^s)$, 其中升华过程蒸气压和相体积数据前面已给出, 可直接用来确定 Z^{sg} 值。表 8 给出相变热 (升华热) 计算结果。

表 8 CO₂ 干冰升华热 ΔH^{sg} 的数据

$\Delta H/\text{kJ/kg}$ T/K	实验值	计算值	Dev.(%)
193.15	573.68	576.34	0.46
198.15	569.92	572.77	0.50
203.15	564.48	565.54	0.19
208.15	558.20	555.04	-0.56

3. 小结

随着近代科学技术水平的提高, 人类在一定程度上已有可能做到人工控制和调节气象。大气现象, 如云、雾、雨、雪、雹的形成机制, 是值得人们进一步深入研究的, 只有真正掌握了大气中各个现象的本质规律, 才能做到较准确地控制气象, 人控气象这一科学技术不仅对人类生活和工作有着重要影响, 而且对农业、国防事业也有重大意义。

参考文献

- [1] 童景山, 工程热物理学报, 1985, 6 (1): 11-13
- [2] 童景山, 流体的热物理性质, [M], 北京 中国石化出版社, 1996
- [3] 童景山, 聚集力学原理及其应用[M], 北京 高等教育出版社, 2007
- [4] Vargaftih N B. Tables on Thermophysical Properties of Liquids and Gases [M] and zdn. New York, Hemisphere Publishing Corporation, 1975

基于焓传递原理的油藏驱动方式判别

成庆林 刘扬 项新耀

(大庆石油学院提高油气采收率教育部重点实验室, 黑龙江大庆, 163318)

Tel: 0459-6504578, E-mail: chengqinglin7212@163.com

摘要: 探讨了油藏驱动过程的热力学本质, 即以多势场为驱动源, 以驱油为目的的典型焓传递问题。在导出驱动势场焓传递基本方程的基础上, 给出油藏驱动方式的判别准则, 包括驱动功(焓流量)、驱动功率(焓流密度)、驱动功(焓)比率及驱动功率(焓流密度)比率。最后以二维轴对称热水驱油过程为例, 对油藏的主要驱动方式加以判别。

关键词: 油藏渗流; 焓; 焓传递; 场协同; 驱动方式

1 前言

一般而言, 储集于油藏中的油、气、水, 其在岩石孔道中渗流所消耗的能量, 主要来自于边水的压能、岩石和液体的弹性能、气顶中压缩气体的弹性能、原油中溶解气体的弹性能和原油本身的重力势能。在自然条件下, 这种多孔介质内的流动, 往往是各种能量同时起作用。然而在不同的石油开采时期, 驱使油气混合液流向井底的能量中必有一种能量起主要作用, 根据这一起主要作用的能量可区分油藏的不同驱动方式。判别油藏的天然驱动方式, 对于确定开采过程中产量、压力及采收率等生产指标的变化规律有重要的实际意义^[1]。但目前在石油开发领域缺乏简洁、统一的油藏驱动方式判别方法, 无益于合理、有效地开发油气田。

实际上, 油藏中的原油之所以被驱动, 是以消耗一定的驱动功为代价的。也就是说, 只能提供驱动功的势源, 才是驱油的真正驱动源。从热力学的观点看, 驱动功是焓(能质)的传递和转换的一种形式, 而驱油过程即是一个以消耗一定量的驱动功为代价, 使原油由某一区域推进到生产井的物质传输过程。可以说, 驱油过程乃是一种以多势场为驱动源, 以驱油为目的的典型焓传递问题。近年来逐渐发展起来的焓传递原理, 有可能将由多种能量形式同时参与作用的物质传输的复杂过程, 通过引入统一目标和共同尺度——驱动焓(功), 而将多目标转化为单一目标来研究, 使这类问题思路清晰简洁, 有助于取得求解结果^[2]。

2 油藏的主要驱动方式

渗流过程的产生是由于各种力作用的结果。按照某一开采时期内流体所受到的主要驱动力的不同, 可将油藏的驱动方式分为以下五种^[3]:

(1) 重力水压驱动

与外界连通的水头压力或人工注水的压力作为主要驱动力的驱油方式称重力水压驱动方式。如果在开发过程中这种压力能维持不变, 并且油藏内岩石及流体的弹性力都很小以至可以忽略不计, 那么这时的重力水压驱动可称为刚性水压驱动。

(2) 弹性驱动

以岩石及流体本身的弹性力作为主要驱动力的驱动方式称为弹性驱动方式。如果油藏具有很大且连通性很好的含水区, 这时弹性力将起到重要的作用。

(3) 溶解气驱动

以从石油中不断分离出来的溶解气的弹性能作为主要驱动力的驱动方式称为溶解气驱动方式。由于油中溶解的气是有限的, 故这种驱动方式也常被认为是消耗性的开采方式, 其采收率很低。

(4) 气压驱动

若油藏内存在气顶, 且主要依靠气顶压缩气体的弹性力作为主要驱动力的驱油方式称为气压驱动方式。

(5) 重力驱动

以流体的重力作用为主要驱动力的驱油方式称为重力驱动方式。由于重力的作用很有限, 只是在其它能量均已枯竭, 且油藏具有明显的倾角时, 才会出现这种驱动方式。

需要指出的是, 油藏的驱动方式受到多种因素的影响, 一是储集层类型、厚度、面积、构造形态以及油气层的岩性变化等因素的影响; 二是油田的开发方法、油井的管理措施及采油速度等因素的影响。总之, 驱动方式只是反映油藏中的主要动力, 但不是说某一种驱动方式存在唯一的一种动力, 而是其它的动力相对来说不起主要作用。驱动方式不是一成不变的, 而是可以人为地加以控制, 以保证高速度、高水平地开发油气田^[1]。

3 驱动势场的传热基本方程

如果将油藏储集层及其孔隙流体视作连续体, 驱油域内存在着压力场、温度场、流速场、浓(密)度场、重力场等多种场。其中有些场是由多种“力”作用的结果, 如压力场是由地层压力、驱替介质压力、热膨胀作用力等多种力综合作用形成的。从采油的角度看, 无论何种势场, 只有提供驱动功或影响驱动功的势场才是有效的、有价值的。因此, 文献[2]对驱动域的众多势场, 按其共同目标—提供驱动功, 统一尺度—对总驱动功的权重, 来归纳分类、描述评价各种势场的特点和作用, 将它们分为四类:

(1) 驱动势场 直接为驱油提供驱动功的势场, 有压力场、重力场、浓度场等。显然, 该势场越强, 驱油效率越高。

(2) 驱抗势场 以传递阻力的方式影响驱油效率和效果的势场, 如热采中的温度场。

(3) 驱效势场 体现驱动效果和驱动强度的势场, 如流速场。油井生产目的就是尽可能提高采收率、提高产量、即提高流速。它是驱动势场与阻力势场相作用的结果。

(4) 无效势场 对驱动过程不起作用或相对其它势场其作用可予忽略的势场。在实际过程中, 排除无效势场, 可使问题得到简化。

单个驱动势场引发的传热动力学基本方程可归纳为^[4]:

$$E_{xr} = -k_e \nabla P_e = -\nabla P_e / (1/k_e) = -\nabla P_e / R_e \quad (1)$$

式中 k_e 为传热系数, R_e 为传热阻, P_e 为引发此种传热传递的势, E_{xr} 为单位时间、单位面积上的传热量, 即传热密度。