

卫生部麻醉科住院医师培训规划教材

麻醉学基础

- 主 编 李文志
- 副主编 吴新民 赵嘉训 景 亮

 人民卫生出版社

卫生部麻醉科住院医师培训规划教材

麻醉学基础

主 编 李文志

副主编 吴新民 赵嘉训 景 亮

审 阅 陈伯銮 郑 方 庄心良

编 者 (以姓氏笔画为序)

方向明	浙江大学附属邵逸夫医院	郑 方	哈尔滨医科大学附属第二医院
庄心良	上海交通大学附属第一人民医院	郑 宏	新疆医科大学附属第一医院
刘 军	哈尔滨医科大学附属第二医院	赵嘉训	山西省肿瘤医院
许 幸	北京大学附属第一医院	赵鹤龄	河北省人民医院
李士通	上海交通大学附属第一人民医院	段世明	徐州医学院麻醉重点实验室
李文志	哈尔滨医科大学附属第二医院	徐咏梅	哈尔滨医科大学附属第二医院
吴新民	北京大学附属第一医院	曹君利	徐州医学院附属医院
陈伯銮	河北省人民医院	景 亮	东南大学附属中大医院
张诗海	华中科技大学附属同济医院	鄢建勤	中南大学湘雅医院
张励才	徐州医学院附属医院	裴 凌	中国医科大学附属第一医院

人民卫生出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

麻醉学基础/李文志主编. —北京:
人民卫生出版社, 2004. 7

ISBN 7-117-06253-3

I. 麻... II. 李... III. 麻醉学-教材 IV. R614

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 051018 号

麻 醉 学 基 础

主 编: 李文志

出版发行: 人民卫生出版社 (中继线 67616688)

地 址: (100078) 北京市丰台区方庄芳群园 3 区 3 号楼

网 址: [http://www. pmph. com](http://www.pmph.com)

E - mail: [pmph @ pmph. com](mailto:pmph@pmph.com)

印 刷: 原创阳光印业有限公司

经 销: 新华书店

开 本: 787×1092 1/16 印张: 23

字 数: 526 千字

版 次: 2004 年 7 月第 1 版 2004 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

标准书号: ISBN 7-117-06253-3/R · 6254

定 价: 29.00 元

著作权所有, 请勿擅自用本书制作各类出版物, 违者必究

(凡属质量问题请与本社发行部联系退换)

编写说明

全国卫生专业技术资格考试(主治医师)已进行二年,这是我国人事制度的重大改革,在卫生部的领导下,在全国卫生专业技术资格考试麻醉学专家委员会的具体组织下,通过全国专家的共同努力,麻醉学专业的考试大纲、考试指南已初步完成,题库也已初步建成,从2003年起整个工作已进入完善与提高阶段,这对我国规范化住院医师培训将起到重要的推动作用。为了进一步做好住院医师培训工作,真正做到考试是培训结果评估的一种重要方式,在考生与专家建议的基础上,经过研究并请示有关领导部门后认为:在考试大纲与考试指南的基础上组织编写《卫生部麻醉科住院医师培训规划教材》是非常必要的,通过这一举措不仅可以进一步修改考试大纲并提高题库的数量与质量,也将为规范化住院医师培训工作奠定坚实的基础。

此次编写《卫生部麻醉科住院医师培训规划教材》的深度与广度是依据以下要求决定的:①卫生部颁发的主治医师任职资格标准;②全国卫生专业技术资格考试(主治医师)麻醉学专业命题的范围与要求;③我国住院医师培训的实际情况。因此,整个教材由五部分组成,即麻醉学基础、临床麻醉学、危重病医学、疼痛诊疗学和相关学科基础。为了体现教材的特征,编写中坚持“三基”、“五性”。在编写人员的遴选、特别是主编与副主编的遴选中,为了我国麻醉学科的持续发展,经大家反复磋商,最后决定这次编写工作实行“老、中、青三结合,并以中青年为主体”组成编写班子,老一辈麻醉学家基本均担任教材的审阅。

经过前期的准备,2003年4月在杭州召开了编写工作会议,会后由各分册主编主持着手编写各教材的撰稿工作,期间又经过2~3次的集体审定稿件,整套教材相继于2004年初交稿。由于这套教材是我国麻醉医学乃至整个临床医学领域中的空白,虽大家已尽心尽力、全力以赴,但由于组织工作及编写经验不足,因此,出现不足与各种问题是意料之中的,望全国同道给予批评指正。

再次感谢老一辈麻醉学家的认真审阅与无私奉献。

曾因明

2004年2月于徐州

卫生部麻醉科住院医师培训规划教材

- | | | |
|-----------|----|---------|
| 1. 麻醉学基础 | 主编 | 李文志 |
| 2. 临床麻醉学 | 主编 | 姚尚龙 王俊科 |
| 3. 危重病医学 | 主编 | 邓小明 |
| 4. 疼痛诊疗学 | 主编 | 谭冠先 |
| 5. 相关学科基础 | 主编 | 刘 进 |

卫生部麻醉科住院医师培训规划教材

第一届编审委员会

主任委员 曾因明(徐州医学院)

副主任委员 罗爱伦(北京协和医院)

委员 (以姓氏笔画为序)

王俊科(中国医科大学)	邓小明(上海第二军医大学)
李文志(哈尔滨医科大学)	刘 进(四川大学华西医院)
姚尚龙(华中科技大学同济医学院)	谭冠先(广西医科大学)

前 言

麻醉学科同其他学科一样处在迅速发展之中,经过几代麻醉学专家及全体麻醉工作人员的不懈努力,麻醉学科的队伍日渐扩大,同时毕业后的继续教育也正在步入正规化。随着法制化的不断深入,执业医师法的深入落实,执业医师资格考试以及专业职称晋升的以考代评,更显得住院医师培训尤为重要,而住院医师规范化培训教材是完成住院医师培训最重要的内容。麻醉学基础是麻醉学专业住院医师培训一套系列教材的一部分,是所有部分的基础。

本书的主要内容是与麻醉学相关的基础知识,包括麻醉设备学、麻醉解剖学、麻醉生理学以及麻醉药理学四部分。各部分水平定位在本科毕业生与主治医师之间。

此书是系列教材的一部分,内容上注意涵盖了执业医师考试及中级职称晋级考试所涉及的知识,以解决临床麻醉中所遇到的基本问题为目标,内容上力求既有广度又有深度,为更好地学习本套教材的其他部分奠定基础。

以职称晋级考试大纲为基础,本教材主编、副主编及编审人员以及本套系列教材的主编、副主编、编审人员共同研究制定出本书的编写大纲。本教材的编者也是经过专家推荐、全国麻醉专业教材委员会研究确定下来的。他们均具有丰富的医疗、教学、科研工作经验,其中大部分作者担任博士生、硕士生导师的工作,是国内麻醉专业队伍中的骨干。

本书是麻醉专业住院医师培训教材,是针对麻醉学本科毕业后或从事麻醉专业工作准备参加晋升中级职称以及准备参加执业医师考试人员进行编写的。适用于麻醉本科或专科人员或相当于此水平从事麻醉专业工作的人员。

本书在编写过程中得到了人民卫生出版社、全国医学教育学会麻醉学教育研究会、各相关的医学院校以及各位副主编、编审以及编者们的的大力支持,并付出了辛勤劳动。曾因明教授在本书的编写大纲的确定以及本书内容编写方面给予了全面的支持与指导,另外,主编助理徐咏梅副教授为本书的统稿编辑工作付出了大量的心血和时间。由于本书的内容多、范围广、编写及编审时间紧张,难免存在许多不足及不当之处,还请读者能发现问题并提出您的宝贵意见,以便增强本书的实用性。

编 者

2004年4月

目 录

第一章 麻醉设备学	(1)
第一节 物理基础知识	(1)
一、气体定律	(1)
二、物态的变化	(5)
三、流体的运动	(7)
四、表面张力和顺应性	(11)
第二节 麻醉机	(14)
一、麻醉机的基本结构	(14)
二、麻醉机的基本部件	(15)
三、麻醉通气系统	(15)
四、麻醉机安全保障系统	(20)
五、麻醉蒸发器	(22)
六、麻醉残气清除系统	(25)
第三节 通气机	(26)
一、通气机的基本构造	(26)
二、通气机的基本原理	(28)
三、通气模式和特殊通气功能	(31)
四、通气机的工作参数	(36)
五、通气机的物理特性	(37)
六、麻醉通气机简介	(38)
第四节 麻醉监测和测量仪器	(43)
一、医学气体监测	(43)
二、呼吸功能监测	(53)
三、循环功能监测	(60)
四、脑电监测	(70)
五、肌松监测	(75)
第二章 麻醉解剖学	(80)
第一节 总论	(80)
一、麻醉解剖学的定义和范畴	(80)

二、人体基本分区和层次结构概况	(80)
第二节 头部	(82)
一、面部	(82)
二、颅部	(87)
第三节 颈部	(91)
一、颈部血管	(91)
二、颈部神经	(94)
三、气管插管或气管造口的路径解剖	(97)
第四节 胸部	(104)
一、胸壁	(104)
二、胸腔及其脏器	(107)
三、胸部交感神经节阻滞的径路	(117)
四、胸椎旁神经阻滞的径路	(118)
第五节 腹部	(118)
一、腹壁的神经分布	(118)
二、腹部内脏神经分布	(121)
三、腰部交感神经节阻滞径路	(124)
四、腰椎旁神经阻滞径路	(124)
第六节 盆部及会阴	(124)
一、盆肌、盆膈及盆筋膜	(125)
二、盆部神经	(127)
三、与麻醉相关的盆腔血管走行	(129)
第七节 脊柱区	(130)
一、脊柱	(130)
二、椎管及其内容物	(136)
三、脊髓节段与椎骨的对应关系	(139)
第八节 上肢	(139)
一、腋窝的内容及臂丛神经阻滞	(139)
二、上肢的血管	(141)
三、上肢的神经	(143)
四、手部	(144)
五、上肢神经的节段分布	(144)
第九节 下肢	(145)
一、下肢主要血管、神经的体表投影	(146)
二、下肢主要血管、神经的行程及定位	(146)
 第三章 麻醉生理学	 (150)
第一节 麻醉与神经系统	(150)
一、麻醉与神经系统的生物电现象	(150)

二、麻醉与意识	(153)
三、麻醉与疼痛	(155)
四、麻醉与躯体运动	(159)
五、麻醉与自主神经系统的功能	(162)
第二节 麻醉与呼吸	(166)
一、呼吸道的结构和生理功能	(166)
二、肺通气的动力学	(172)
三、气体在血液中的运输	(175)
四、肺内气体交换	(178)
第三节 麻醉与循环	(180)
一、心脏的电活动	(180)
二、心脏的泵血功能	(182)
三、血流动力学和血液流变学	(184)
四、心血管功能的调节	(188)
五、麻醉对循环功能的影响	(189)
六、冠脉循环和脑循环	(191)
第四节 麻醉与肝脏	(195)
一、肝脏组织解剖生理学	(195)
二、肝功能的评估	(198)
三、麻醉和手术对肝功能的影响	(200)
第五节 麻醉与肾脏	(201)
一、肾脏的血液循环	(202)
二、肾脏的功能及麻醉与手术对肾功能的影响	(203)
第六节 麻醉与内分泌	(207)
一、内分泌系统的生理功能	(207)
二、麻醉和手术对内分泌功能的影响	(207)
第七节 麻醉与体温	(211)
一、体温的调节	(211)
二、麻醉和手术期间影响体温的因素	(212)
三、术中体温升高和降低的危害	(213)
四、恶性高热	(214)
第八节 麻醉与老年、小儿生理	(215)
一、老年生理特点	(215)
二、小儿生理特点	(217)
第九节 麻醉与免疫	(221)
一、免疫学概述	(221)
二、免疫调节	(222)
三、机体免疫状态的评估	(223)
四、围术期免疫状态的变化及调控	(225)

第四章 麻醉药理学	(229)
第一节 总论	(229)
一、静脉给药的药物代谢动力学	(229)
二、静脉给药的药物效应动力学	(233)
三、吸入给药的药物代谢动力学	(236)
四、吸入给药的药物效应动力学	(238)
五、药物的相互作用及个体差异	(239)
第二节 镇静催眠药与安定药	(239)
一、巴比妥类	(240)
二、苯二氮革类	(241)
三、吩噻嗪类	(246)
四、丁酰苯类	(249)
五、其他镇静催眠药	(250)
第三节 阿片类镇痛药及其拮抗药	(250)
一、阿片受体与内阿片肽	(250)
二、阿片类镇痛药的分类及临床应用	(254)
三、阿片受体激动药	(255)
四、阿片受体激动-拮抗药	(260)
五、阿片受体拮抗药	(261)
六、非阿片类中枢性镇痛药	(263)
七、药物依赖性	(264)
第四节 吸入麻醉药	(265)
一、概述	(265)
二、恩氟烷	(268)
三、异氟烷	(271)
四、氟烷	(273)
五、七氟烷	(276)
六、地氟烷	(278)
七、甲氧氟烷	(279)
八、乙醚	(280)
九、氧化亚氮	(282)
十、氙	(284)
第五节 静脉麻醉药	(285)
一、硫喷妥钠	(285)
二、丙泊酚	(287)
三、氯胺酮	(289)
四、依托咪酯	(291)
五、羟丁酸钠	(293)
第六节 局部麻醉药	(294)

一、局麻药结构和分类	(294)
二、局麻药的作用机制	(294)
三、药代动力学	(298)
四、局麻药的副作用	(300)
五、常用局麻药	(301)
第七节 骨骼肌松弛药	(305)
一、概述	(305)
二、常用肌松药	(307)
第八节 作用于胆碱能受体的药物	(310)
一、概述	(310)
二、拟胆碱药	(312)
三、M胆碱受体拮抗药	(315)
第九节 作用于肾上腺素能受体的药物	(319)
一、概述	(319)
二、 α 和 β 受体激动药	(321)
三、 α_1 受体激动药	(324)
四、 α_2 受体激动药	(327)
五、 β 受体激动药	(328)
六、 α 受体拮抗药	(330)
七、 β 受体阻滞药	(331)
第十节 强心药	(334)
一、强心苷类	(334)
二、磷酸二酯酶Ⅲ抑制药	(336)
三、强心药物的使用	(337)
第十一节 控制性降压药	(338)
一、血管扩张药	(338)
二、钙通道阻滞药	(341)
第十二节 血浆容量扩充药	(344)
一、右旋糖酐	(344)
二、羟乙基淀粉	(344)
三、明胶制剂	(345)
四、全氟碳化合物	(346)
第十三节 其他临床麻醉应用的药物	(346)
一、镇吐药	(346)
二、抗胃酸药	(349)
三、催醒药	(350)
四、非甾体类抗炎镇痛药	(351)

第一章 麻醉设备学

麻醉设备学是麻醉学与理工科学相互渗透、交叉的边缘性应用学科，属于麻醉学的基础课程。研究内容包括麻醉机、通气机、监测仪器等临床麻醉相关设备的结构和原理。本章旨在帮助读者了解设备，熟悉设备，提高麻醉手术的安全性。

第一节 物理基础知识



一、气体定律

(一) 气体的状态参量

对于气体，我们研究的是大量气体分子的集体表现，常用压强（P）、容积（V）及温度（T）来描述。一定质量的气体，它的 P、V、T 完全决定了气体的状态，所以这三个表征气体状态的量称为气体的状态参量。

1. 体积 气体分子之间平均距离很大，远远大于其分子直径。气体分子间的相互作用很小，气体分子可以自由地无规律地运动，并不断地互相碰撞或撞击容器壁。气体这种无规则热运动使容器内的气体充满整个容器空间。气体体积是指气体所能达到的空间，对于容器而言，就是容器的容积。在 SI 单位制中，体积的单位为 m^3 。

2. 压强 或叫压力。由于气体分子无规则热运动，经常与容器壁发生碰撞，这种碰撞的宏观表现就是气体对容器壁的压强。压强定义为单位面积所受的垂直作用力。在 SI 单位制中，压强的单位为帕斯卡（Pa）。下面为临床常用的压强单位之间的换算关系：

$$1\text{Pa}=1\text{N}/\text{m}^2$$

$$1\text{atm}=1.013\times 10^5\text{Pa}=101.3\text{kPa}=760\text{mmHg}$$

$$1\text{mmHg}=0.133\text{kPa}=1.36\text{cmH}_2\text{O}$$

$$1\text{kPa}=7.5\text{mmHg}=10.2\text{cmH}_2\text{O}$$

3. 温度 温度是一个比较复杂的物理量，它的本质和物质的分子热运动密切相关。温度的高低，反映物质内部分子运动剧烈程度。它是定量描述物体的冷热状况的一个物理量。常用摄氏温标 t 和 K 氏温标 T 表示。 $T=273+t$ 。 T 又称绝对温度。

(二) 阿伏伽德罗定律 (Avogadro's law)

在同温、同压下，相同体积的各种理想气体所含的分子数相等，这一定律称为阿伏伽德罗定律。凡某物质中所含的基本粒子数目为 6.02×10^{23} 即为 1mol 物质。其中

6.02×10^{23} 为阿伏伽德罗常数 (Avogadro's number)。在标准状态 (1atm、 0°C) 下, 1mol 任何理想气体所占的体积都是 22.4L。

所谓理想气体是指不计分子的本身体积和分子间的相互作用力的气体。实际气体温度越高, 压强越低, 越接近理想气体。在常温、常压下, 许多实际气体如氮、氢、氧等, 都可近似看成理想气体。

(三) 玻意耳定律 (Boyle's law)

温度一定, 一定质量的理想气体体积与绝对压力成反比。即

$$V = k/P \quad (1-1)$$

式 (1-1) 中 k 为常数。

(四) 查理定律 (Charles' Law)

压力一定, 一定质量的理想气体体积与绝对温度成正比。即

$$V = kT \quad (1-2)$$

式 (1-2) 中 k 为常数。

(五) 理想气体状态方程

对于质量为 M 、摩尔质量为 μ 的理想气体, 其状态方程为:

$$PV = \frac{M}{\mu}RT = nRT \quad (1-3)$$

式 (1-3) 中 R 为普适气体常数, $R = 8.31\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; n 为摩尔数; T 为绝对温度。

如气体质量一定, 理想气体状态方程可改写下列形式:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \quad (1-4)$$

即一定质量的气体, 虽然所处的状态不同, 但每一状态下的体积 V 与压强 P 的乘积除以温度 T , 结果相等。

[例 1-1] 计算 1ml 液态氟烷在 1 个大气压、 20°C 情况下能够蒸发产生多少体积的气体。

氟烷的摩尔质量为 197.4g, 在 0°C 和 1 个大气压下可挥发成 22.414L 的气体。此时, 1ml 的氟烷可挥发的气体体积 = (密度 $\times$ 22.414) / 摩尔质量 = $(1.86 \times 22.414) / 197.4 = 0.211(\text{L}) = 211\text{ml}$ 。

当室温为 20°C 时, 挥发的气体 = $(20 + 273) / 273 \times 211 = 226\text{ml}$ 。

(六) 道尔顿分压定律 (Dalton's law of partial pressures)

混合气体中, 各成分的气体都有自己的压强, 称为分压 (partial pressures)。混合气体的总压强等于各成分气体的分压之和。这一定律称为道尔顿分压定律。分压的大小与其他气体存在与否无关。混合气体中某一种气体的分压 = 总压 $\times$ 该气体在混合气体中所占的体积百分比。

[例 1-2] 大气中的氧浓度为 20.7%, 所以大气中的氧分压 = 1 个大气压 $\times$ 氧浓度 = $101.3\text{kPa} \times 20.7\% = 20.9\text{kPa}$ 。

气体分压与气体内部迁移密切相关, 大部分气体对机体的生理作用不决定于它的浓度, 而取决于它的分压。

(七) 溶解度 (solubility) 和亨利定律 (Henry's law)

气体与液体直接或隔半透膜互相接触, 气体可借助分子热运动, 进入并均匀分布在液体内, 这种现象称为气体在液体内的溶解。气体溶解在液体内是气体分子进入液体分子间隙内, 而并非以小气泡的形式存在于液体中。溶解在液体内的气体分子也不断地从液体内逸出, 直至在单位时间内进出液体的气体分子数量相等时, 达到动态平衡, 此时, 气体在液体内的分压与在液体外的分压相等, 溶解在液体内的气体分子数量不再增加, 我们称气体在液体内达到饱和。气体溶解于液体是一个放热过程。

在一定温度和压力下, 溶解在液体中的气体分子达到动态平衡时, 气体在液体中的浓度就是气体的溶解度。通常用单位体积的液体中所能溶解气体的体积表示。对溶解度较大的气体, 习惯用 100ml 的液体能溶解多少 ml 的气体来表示; 对于溶解度较小的气体, 习惯用 1 000ml 的液体能溶解多少 ml 的气体来表示。从概念上讲, 溶解度就是浓度, 因此, 凡是能够表达浓度的概念都可以表达溶解度。

溶解度受下列因素影响:

1. 压力

增加总压强, 液面上的气体密度增加, 从而和液面接触的气体分子数目增多, 溶解度增大。如果液体上方的气体为混合气体, 在一定温度下, 气体在液体中的溶解度 C 与液面上该气体的分压 P 成正比。这一规律称为亨利定律。即

$$C=kP \quad (1-5)$$

式 (1-5) 中 k 称为溶解系数。必须注意, 亨利定律只适用不与液体发生化学反应的气体。

亨利定律在医学上有许多应用实例。例如, 使用麻醉气体时, 其分压越大, 则它在血液中的溶解度就越大, 麻醉越深。

2. 温度 气体溶解度随温度的升高而降低。

3. 气体和液体的性质

例如, 在一个大气压、37℃条件下, O_2 和 CO_2 在水中的溶解度分别为 2.386% 和 56.7%; 而 O_2 和 CO_2 在全血中的溶解度分别为 2.36% 和 48%, 由此可见, CO_2 在全血中的溶解度远高于 O_2 在全血中的溶解度。

麻醉诱导及清醒速度与麻醉气体在血中的溶解度有关。血中溶解度低的麻醉药, 吸入后肺泡内与脑内浓度迅速提高, 诱导迅速。反之, 排除也迅速, 能够很快清醒。

麻醉气体在脂肪中的溶解度与麻醉作用强度有关。脂溶性越高, 作用强度越强, 最低肺泡有效浓度 (minimal alveolar concentration, MAC) 越小。故 MAC 与麻醉药在脂肪中溶解度成反比。不同麻醉药的 MAC 与脂肪中溶解度的乘积接近相等。脂溶性低的麻醉药, 由于吸收较少, 排除较快。

(八) 分配系数

在一定温度下, 相互接触的两相中的气体达到动态平衡时, 气体在两相中的溶解度之比称为分配系数 (partition coefficient)。如其中一相为气体, 另一相为液体, 则分配系数等于溶解度。分配系数与气体、两相的性质、温度及压力有关 (表 1-1)。

表 1-1 常用吸入麻醉药的理化特性

	摩尔质量	血/气分配 系数(37℃)	沸点(℃)	饱和蒸气压 mmHg(20℃)	比重	MAC%
HAL	197	2.5	50.2	243	1.86	0.77
ISO	184.5	1.4	48.5	240	1.5	1.15
ENF	184.5	1.8	56.5	175	1.52	1.68
SEV	200.05	0.65	58.6	157	1.52	1.71
DES	168	0.45	22.8	669	1.45	7.25

挥发性麻醉药经肺泡进入血液，可把肺泡气和血液看成相邻的气、液两相。当麻醉药在两相间达到动态平衡时，在两相中的浓度之比，称为血/气分布系数。如安氟烷在 37℃ 的血/气分布系数 (blood/gas partition coefficient) 为 1.8，即血中的溶解度为气中的 1.8 倍。

从物质的分配系数可以了解该物质在人体内各组织的分布情况。

(九) 弥散 (diffusion) 和费克定律 (Fick's law)

由于气体分子无规则热运动，气体分子总是由分压高处向分压低处流动，这种过程称为气体的弥散 (diffusion)。机体内的气体交换就是以弥散方式进行的。

气体弥散作用：①密度不均匀的气体均匀地充满整个容器或全部空间；②气体与液体直接接触或隔生物膜接触，气体分子可逐渐弥散到液体内，这种现象又称溶解；③溶解在液体内的气体，逐渐弥散，最终均匀地分布在液体内。

气体透过生物膜的弥散速率 Q ，即单位时间通过膜的气体容积，与膜两侧气体分压差成正比，与扩散面积成正比，与膜的厚度成反比，这就是气体弥散费克定律。即

$$Q = k \frac{S}{d} \Delta P \quad (1-6)$$

式 (1-6) 中 k 为弥散系数； S 为扩散面积； d 为膜厚度； ΔP 为分压差。

弥散系数 k 是衡量气体弥散能力的物理量，定义为在单位分压下、单位时间内、通过单位面积的气体量。弥散系数取决于气体和液体的性质，它与气体溶解度成正比；与气体分子量平方根成反比 (Graham's Law)。如 O_2 的分子量为 32， CO_2 的分子量为 44，因此单纯对分子量而言， O_2 弥散速度比 CO_2 要快 1.17 倍。但 CO_2 溶解度比 O_2 大 24 倍，故经生物膜进行弥散时，总的效果是 CO_2 比 O_2 的弥散速率快 20 倍左右。

另外，弥散由分子自由热运动造成，因此，弥散速率与温度成正比。

气体弥散方向由分压高处指向分压低处，与总压力无关。如甲方混合气体总压力为 760mmHg，其中 P_{O_2} 为 456mmHg， P_{N_2} 为 304mmHg。乙方混合气体总压力为 1000mmHg，其中 P_{O_2} 为 800mmHg， P_{N_2} 为 200mmHg。并非乙方气体向甲方弥散，而是 O_2 从乙向甲弥散， N_2 从甲向乙弥散。

当弥散达到动态平衡后，气体分子仍在两个区域之间移动，但速率相等。故不存在弥散。在机体内，氧气不断消耗，二氧化碳不断产生，故无法达到平衡。而不被代谢的

气体，如氧化亚氮、氮气和挥发性麻醉药，会逐渐趋向平衡，平衡时，组织内的气体分压与吸入气中分压相等。

二、物态的变化

物质分子可以聚集成气、液、固三种状态，称为物质的三态。在一定的温度和压力下，物态可以互相转化，称为物态变化或称为相变。自然界中，有很多物态变化的例子。水壶中水不断化为蒸气；在深秋季节，水汽夜间转化为露、霜。在麻醉中我们常遇到的是液、气之间的相变。

(一) 汽化

物质从液态转变为气态的过程叫汽化，相反的过程，叫液化。汽化有两种方式：蒸发和沸腾。

1. 蒸发

发生在液体表面的汽化过程，叫蒸发。蒸发可以在任何温度下发生。液体表面在任何温度下都在汽化，这可用分子运动论来解释。蒸发就是液体分子脱离液面而成为气体分子的过程。在温度不高情况下，液体分子间的吸引力相当大，使分子凝集，所以液体可以保持一定的体积和自由表面。然而，由于液体分子无规则热运动，在任何温度下，总有一些动能较大的分子挣脱表面层分子的吸引力而脱离液面，形成蒸气。相对而言，多数分子不具有脱离液体的动能，液体的蒸发是一个缓慢的过程。

蒸发时，脱离液面的分子都是动能较大的分子，而剩下的液体分子都是平均动能较小的，从而表现为液体温度下降，并向周围吸收热量，所以蒸发有致冷作用。例如，我们用酒精消毒，就会感觉到冷，这是因为酒精在蒸发时带走了热量的缘故。

液体的温度越高、液面及液面上方的气流越大，蒸发就越快。此外，在相同的外界条件下，不同的液体蒸发的快慢程度也不同。

液体蒸发时，温度下降，蒸发速度逐渐减慢。因此，要维持液体温度恒定，就必须给液体提供热量。在一定温度下，单位质量的液体全部转化为同温度的蒸气所吸收的热量称为该物质的汽化热 (heat of vaporization)。单位为 J/g。

汽化热与液体的种类有关，如恩氟烷在 25℃ 时的汽化热为 175.7 J/g，异氟烷在 25℃ 时的汽化热为 171.5 J/g；对于同一液体，汽化热随温度升高而减少，如水在 20℃ 下的汽化热为 2 447.2 J/g，100℃ 时的汽化热为 2 255.2 J/g。

在密闭容器里，从液面蒸发出去的分子，由于不能扩散出去，经过相互间以及与器壁的碰撞，其中一部分又回到液体中来。起初，液面上方的蒸气密度较小，单位时间内离开液面的分子数要比返回到液体的分子数大。但随着离开液面的分子的增多，蒸气分子密度逐渐加大，返回到液体分子也逐渐增多，最后蒸气分子密度不再改变，液体也不再减少。即在单位时间内离开液面的分子数恰好等于返回到液体里的分子数，也就是说达到液气动态平衡状态。此时与液体处于动态平衡的蒸气叫做饱和蒸气，相应的饱和蒸气所占的分压叫做饱和蒸气压 (saturated vapor pressure, SVP)。动态平衡是暂时的，随着外界条件的改变，平衡就会遭到破坏，而被新的动态平衡所取代，出现新的饱和状态，饱和蒸气压也随之改变。

同一液体, 饱和蒸气压只与温度有关。饱和蒸气压随着温度的升高而增大, 一般成指数关系(图 1-1); 在相同温度下, 不同液体的饱和蒸气压不同(表 1-1)。

挥发性麻醉药饱和蒸气压表示的是当前温度下的麻醉药所能蒸发的最大分压, 根据道尔顿定律, 麻醉药所能蒸发的最大浓度 = (饱和蒸气压/大气压) × 100%。例如, ENF 在 20℃ 时饱和蒸气压为

175mmHg, 所以, ENF 在 20℃ 下能够蒸发的最大浓度 = $175/760 = 23\%$ 。

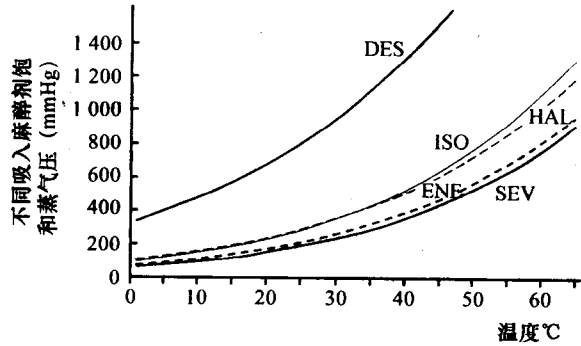


图 1-1 常用挥发性麻醉药饱和蒸气压与温度之间的关系

2. 沸腾

水温度达到 100℃ 时, 不仅在水的表面, 而且在水的内部也要发生剧烈的汽化过程, 形成气泡, 气泡在水的浮力作用上升到水的表面后破裂, 将水汽释放出来, 这就是水的沸腾现象。

在一定温度下, 液体的表面和内部同时进行的汽化现象叫做沸腾。沸腾只在一定温度下发生, 这个一定温度叫沸点。此时, 饱和蒸气压等于外界大气压。液体沸腾时, 虽然继续吸收热量, 但温度并不升高, 直到液体全都汽化, 温度才继续上升。这表明液体在汽化时所吸收的热量主要是转变为分子的动能, 用来挣脱其他分子的束缚。

沸点除了与液体种类有关外, 还与大气压有关。沸点随大气压增加而升高; 反之, 随大气压下降而降低。在高原地区, 大气压低于海平面, 所以沸点下降。

(二) 液化

物质从气态转变为液态的过程叫做液化, 或叫凝结。增大压强和降低温度可使气体液化。通过增压液化存在一个特殊的温度, 在这个温度之上, 无论怎样增大压强, 气体也不会液化, 这个特有的温度称为临界温度 (critical temperature)。在临界温度下, 使气体液化的最低压强称为临界压强 (critical pressure)。在临界温度和临界压强下的状态, 叫临界状态。在临界状态下, 气体或液体的密度称为临界密度。临界温度以上的气态物质由于不能直接液化, 通常称为气; 而在临界温度以下的气态物质由于能够直接加压液化, 因此, 叫做汽。液化为一放热过程, 单位质量的汽转变为同温度的液体所放出的热量在数值上等于同温度下的汽化热。

氧气的临界温度为 -116℃, 室温下不可能通过加压液化; 在 -116℃ 下, 加 50 个大气压可使氧气液化, 这样, 氧气的临界压强就等于 50 个大气压; 降温至 -183℃, 在一个大气压下既可使氧气液化而不必加压, 其中, -183℃ 就是氧的沸点。氧化亚氮的临界温度为 36.1℃, 高于室温, 这样, 在室温下氧化亚氮通过加压就可液化, 温度越低, 所需的压力越小。在 -89℃, 氧化亚氮在一个大气压下就可液化, 其中, -89℃ 就是氧化亚氮的沸点。室温下, 贮气筒内的氧化亚氮处于液气共存状态, 减压表指示的是氧化亚氮在当时温度下的饱和蒸气压。