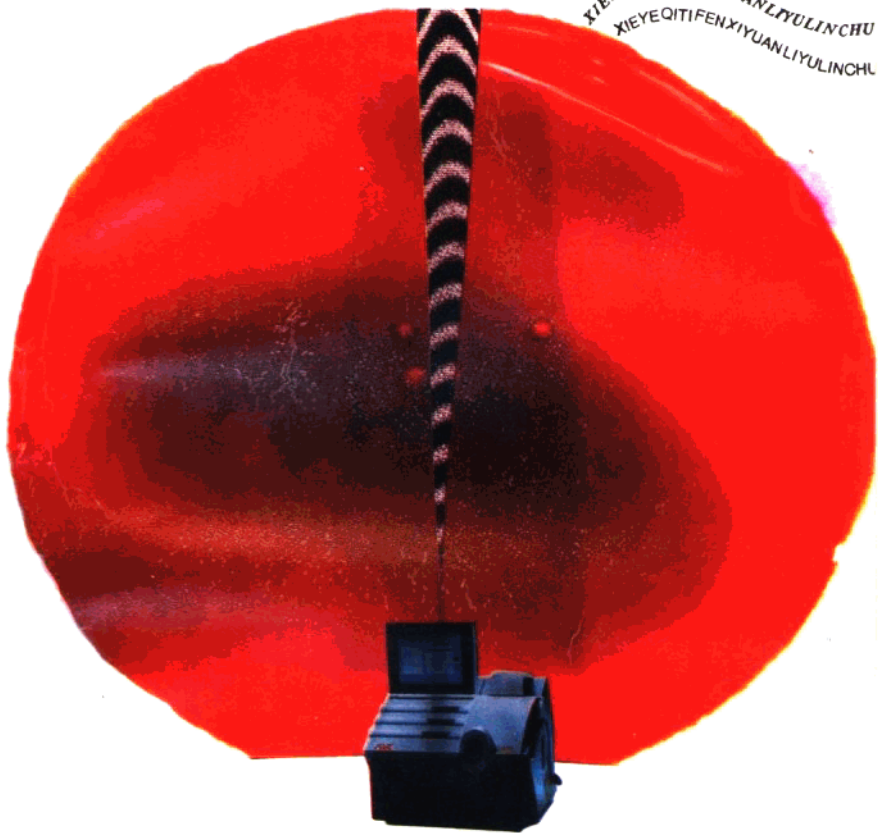


XIEYEQITIFENXIYUANLIYULINCHU
XIEYEQITIFENXIYUANLIYULINCHU



血液气体 分析原理与临床

刘剑雄 王太重 主编

湖北科学技术出版社

XIEYEQITIFENXIYUANLIYU

内 容 摘 要

本书系统、深入地介绍了血液气体运动规律、血液气体分析基本原理与方法、血液气体分析的临床应用。使用了国际上统一的法定计量单位。

全书共分九章。第一章至第四章介绍了气体运动规律，第五章阐述了酸碱平衡及其调节原理，第六章与第七章介绍了血液气体分析的基本原理与具体方法，第八章、第九章介绍了血液气体分析在缺氧和酸碱平衡失调诊断方面的应用。

本书内容丰富，理论性与实践性并举，并附有大量的实例。可作为临床工作者、实验室工作者、医学院校学生的教材和参考书籍。

主编 刘剑雄 王太重

主审 黄从新

编者 (按姓氏笔画为序)

王太重 刘剑雄

何小霞 李 栋

施雪梅 黄 渤

序

自动化分析技术和仪器的使用，促进了血液气体及酸碱分析的临床应用。但如缺乏血气酸碱分析的理论知识，则很难正确地将此项分析结果用于临床实际，这部专著可填补这方面的不足。

刘剑雄教授是国内知名的医学检验专家，有渊深的理论造诣和丰富的实践经验。他与有关专家一道经过一年的努力，编著了这本适合广大专业读者渴求的专著。

该书内容丰富，理论与实践并重，有极强的可读性。前7个章节系统地、深入地阐述了血气酸碱分析的理论，后2个章节重点介绍了血气酸碱分析在缺氧及酸碱失衡诊断中的应用。

由于计算技术的进步及计算机的应用，历史上曾经起过重要作用的诸如Siggaard-Anderson列线图等图表已经失去了其重要性。该专著选择性地屏弃了这方面的内容，重点突出了血气酸碱分析测定项目的原理、衍生项目的理论推导以及血气酸碱分析的临床应用。

该专著在保证正确地测量和使用血气酸碱分析数据方面有重要的意义。阅读这本专著有助于提高临床医师和检验工作者的理论技术水平，促进血气酸碱分析的应用和发展。

杨振华

1995年10月于北京

前 言

随着医学的发展和自动化分析仪器的普遍应用，血液气体分析在各级医院都得到了普及，并显示着越来越重要的作用。血液气体分析的理论性很强，所涵盖的知识面较广，广大临床工作者和实验室工作人员普遍要求得到系统的理论指导，为此我们编写了这本专著。

在介绍血气分析基础理论知识时，即强调了系统性，又强调了深入性。参阅了大量的参考资料，力求将最基础的知识提供给读者，并注意了知识的新颖性。

缺氧的诊断和酸碱平衡失调的诊断是血液气体分析在临床的应用的两大领域。虽然这两个领域是互相联系的，但为了体现其系统性，我们首次将它们分开作为两个的体系，分别介绍了其诊断指标、诊断方法，并列举了实例进行论证。

书中采用了国际上统一使用的法定计量单位，为了方便读者理解，在一些特殊的地方也同时用法定计量单位和旧制单位表达。

由于笔者知识的局限性，加之编写时间仓促，书中定有诸多不足和错误之处，恳请同行不吝指正。

在本书的编写过程中，得到了广大同行的热情支持。华珊公司、AVL公司、Coulter公司提供了大量的资料，并给予了鼓励和帮助。在此，表示衷心感谢！

编 者

1995年10月于武汉

目 录

第一章 气体运动规律	1
§ 1.1 气体的性质	1
§ 1.1.1 速度	1
§ 1.1.2 质量	1
§ 1.1.3 加速度与力	2
§ 1.2 气体运动与压强	3
§ 1.3 温度对气体分子运动的影响	5
§ 1.4 理想气体定律	5
§ 1.4.1 理想气体定律的推导	6
§ 1.4.2 理想气体定律的应用	8
§ 1.5 大气的组成	10
§ 1.5.1 大气层的组成	10
§ 1.5.2 大气的气体构成与气体分压	11
第二章 呼吸器官构造、功能和呼吸调节	14
§ 2.1 呼吸器官的结构	14
§ 2.2 呼吸器官的功能	16
§ 2.2.1 气体交换量	16
§ 2.2.2 气体分压	17
§ 2.2.3 扩散系数	17
§ 2.2.4 肺泡和毛细血管的适宜比例	18
§ 2.2.5 肺循环与通气/血流比值	19
§ 2.3 呼吸运动的调节	21
§ 2.3.1 呼吸中枢的位置	21
§ 2.3.2 呼吸性神经冲动	21
§ 2.3.3 呼吸中枢的周期性兴奋	23

§ 2.4 呼吸运动的神经性调节.....	26
§ 2.4.1 肺的扩张.....	26
§ 2.4.2 颈动脉体及主动脉体.....	28
§ 2.4.3 血压升高.....	30
§ 2.4.4 呼吸道粘膜的刺激.....	30
§ 2.4.5 肌、腱、关节的刺激.....	31
§ 2.4.6 痛觉刺激.....	31
§ 2.4.7 大脑皮层的影响.....	31
§ 2.5 呼吸运动的化学性调节.....	32
§ 2.5.1 脑干的化学感受器.....	32
§ 2.5.2 CO ₂ 的呼吸促进作用.....	34
§ 2.5.3 低O ₂ 血症.....	35
§ 2.5.4 屏息.....	35
§ 2.5.5 高压氧治疗.....	36
§ 2.6 各种条件下的呼吸.....	36
§ 2.6.1 肌肉运动.....	36
§ 2.6.2 低气压.....	37
§ 2.6.3 高气压.....	38
§ 2.6.4 窒息.....	37

第三章 氧合和氧的运输..... 40

§ 3.1 评价氧合的指标.....	40
§ 3.1.1 肺泡氧分压.....	41
§ 3.1.2 肺泡-动脉氧分压差.....	42
§ 3.1.3 血氧分压.....	43
§ 3.2 血液中氧气的运输.....	43
§ 3.2.1 血红蛋白.....	44
§ 3.2.2 氧的运输.....	45

第四章 二氧化碳..... 61

§ 4.1	CO ₂ 穿过细胞膜的动力.....	61
§ 4.2	血液中CO ₂ 的运输.....	62
§ 4.2.1	血液中CO ₂ 的运输形式.....	62
§ 4.2.2	CO ₂ 从组织进入血液后的变化过程.....	62
§ 4.2.3	CO ₂ 由肺呼出的变化过程.....	64
§ 4.3	CO ₂ 解离曲线.....	67
§ 4.4	HCO ₃ ⁻ 和CO ₂ 含量.....	68
§ 4.5	CO ₂ 的排出量.....	68
§ 4.6	肺泡通气和CO ₂	68

第五章 H⁺浓度、pH值和酸碱平衡的调节..... 71

§ 5.1	酸和碱.....	71
§ 5.2	体内氢平衡与pH计算.....	72
§ 5.3	体内酸性物与碱性物的来源.....	75
§ 5.3.1	酸性物质的来源.....	75
§ 5.3.2	碱性物质的来源.....	76
§ 5.4	酸碱平衡的调节.....	77
§ 5.4.1	血液的缓冲体系及其作用.....	77
§ 5.4.2	肺的呼吸功能在保持酸碱平衡中作用...	81
§ 5.4.3	肾脏的排泄与重吸收功能在调节酸碱平衡中的作用.....	82

第六章 电位分析法原理..... 89

§ 6.1	概论.....	89
§ 6.2	电位分析法基本原理.....	89
§ 6.2.1	指示电极.....	89
§ 6.2.2	参比电极.....	90
§ 6.3	电位法测定溶液的pH值.....	91
§ 6.3.1	测定pH值用的电极.....	91
§ 6.3.2	电位法测定pH的原理.....	101

§ 6.4 离子选择电极.....	106
§ 6.4.1 离子选择电极的测定原理.....	107
§ 6.4.2 离子选择电极的类型.....	107
§ 6.4.3 离子选择电极的性能.....	110
§ 6.4.4 应用离子选择电极的测量方法.....	113
§ 6.4.5 应用.....	117
第七章 血液气体测定.....	118
§ 7.1 样本采集.....	118
§ 7.1.1 采样工具.....	118
§ 7.1.2 样本种类和采集方法.....	119
§ 7.1.3 样本采集过程中的质量保证.....	124
§ 7.2 血液气体分析指标.....	125
§ 7.3 血液pH测定.....	129
§ 7.3.1 电极.....	129
§ 7.3.2 pH标准液.....	129
§ 7.3.3 一般操作及常见误差来源.....	131
§ 7.4 血液二氧化碳分压的测定.....	132
§ 7.4.1 电极与原理.....	132
§ 7.4.2 电极校正.....	134
§ 7.5 血液氧分压测定.....	135
§ 7.5.1 电极与原理.....	135
§ 7.5.2 电极校正.....	136
§ 7.6 血氧饱和度的测定.....	138
§ 7.6.1 透射式血氧计.....	138
§ 7.6.2 反射式血氧计.....	139
§ 7.7 血气分析的质量保证.....	139
§ 7.8 血气分析的质量控制.....	141
第八章 酸碱平衡失调的诊断.....	149
§ 8.1 诊断酸碱平衡失调的生物化学指标.....	149

§ 8.2 酸碱平衡失调诊断中的几个问题.....	151
§ 8.2.1 酸碱平衡失调诊断的步骤.....	151
§ 8.2.2 代偿与代偿预期值计算.....	153
§ 8.2.3 正确理解、应用 HCO_3^- 值.....	153
§ 8.3 酸碱平衡失调的类型.....	155
§ 8.3.1 呼吸性酸中毒.....	155
§ 8.3.2 呼吸性碱中毒.....	162
§ 8.3.3 代谢性酸中毒.....	165
§ 8.3.4 代谢性碱中毒.....	173
§ 8.3.5 混合型酸碱平衡紊乱.....	176

第九章 缺氧的诊断..... 181

§ 9.1 缺氧的诊断指标.....	181
§ 9.2 缺氧的病因.....	183
§ 9.2.1 大气中氧分压降低.....	183
§ 9.2.2 $\text{Hb}-\text{O}_2$ 亲和力增加.....	183
§ 9.2.3 通气不足.....	183
§ 9.2.4 氧含量和容量下降.....	186
§ 9.2.5 周围血管因素.....	186
§ 9.2.6 右-左分流.....	186
§ 9.2.7 组织用氧障碍.....	187
§ 9.2.8 假性缺氧.....	187
§ 9.3 缺氧的分类.....	187
§ 9.3.1 低氧血症性缺氧.....	188
§ 9.3.2 低血流性缺氧.....	191
§ 9.3.3 组织中毒性缺氧.....	192
§ 9.4 缺氧引起的机能与代谢变化.....	193
§ 9.4.1 呼吸系统的变化.....	194
§ 9.4.2 循环系统的变化.....	194
§ 9.4.3 血液系统的变化.....	196

§ 9.4.4	中枢神经系统的变化	198
§ 9.4.5	细胞与组织的变化	199
附录1	酸碱失衡类型筛选判断法	204
附录2	单纯性酸碱失衡代偿预期值计算	205
附录3	动脉血气体数据正常参考值	207
附录4	动脉化毛细血管血气体数据正常参考值	207
附录5	国际单位制的基本单位	208
附录6	国际单位制的词冠	208
附录7	常用单位换算	209
附录8	常用缩写与全称对照	209
附录9	中英名词对照	211
索引		215

第一章 气体运动规律

为了了解肺的结构与功能，理解血液气体的运动规律，首先应该学习周围环境中的气体是如何运动的。空气大约覆盖地球高度为1931Km以内的范围，与固体和液体相比，气体分子在空气中运动更为自由，它们频繁地发生碰撞，也与周围的固体分子和液体分子发生碰撞，碰撞之后互相分开，气体分子之间的间隔比它们自己的直径还要大得多。

§ 1.1 气体的性质

§ 1.1.1 速度

气体分子有许多性质。首先，它们连续不断地运动，有一定的速度，速度即单位时间(t)内改变的距离(s)

$$v = \frac{\Delta s}{t} \quad 1-1$$

气体分子运动非常快，室温下氧分子的速度为 $4.82 \times 10^4 \text{ cm/s}$ ，相当于 1609 Km/h 。

§ 1.1.2 质量

气体分子亦有质量(m)，单位为千克(kg)。质量不同于重量(W)，因为重量依赖于重力(G)

$$W = mG \quad 1-2$$

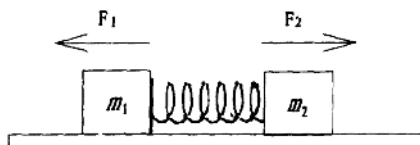
§ 1.1.3 加速度与力

当足够大的力作用于一个物体，会产生加速度(a)。加速度为单位时间内速度的改变

$$a = \frac{\Delta v}{t} \quad 1-3$$

如，在重力的作用下，一个自由落体的加速度为 980.665 cm/s^2 。

松开弹簧之前



松开弹簧之后

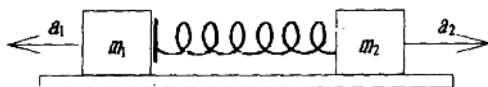


图1-1 惯性实验示意图

加速度(a)与力(F)成正比，与物体质量(m)成反比

力(F)等于质量与加速度的乘积:

$$F = ma \quad 1-4$$

在惯性实验中，在一个有摩擦力的平面上，放置两个不同质量的物体(图1-1)在它们之间压上一个弹簧，同时放开两物，弹

簧弹回到它自然的位置，加速度使两物体向相反的方向运动，力 F_1 作用于第一个物体 (m_1)，力 (F_2) 作用于第二个物体 (m_2)，按照牛顿第三定律：

$$F_1 = m_1 a_1 = F_2 = m_2 a_2 \quad 1-5$$

应用牛顿第二定律：

$$m_1 = m_2 \frac{a_2}{a_1} \quad 1-6$$

因此，质量是重量的指标。给同样的力，在相联系的加速度的基础上能对任何物质进行比较。气体分子虽很小，但有质量。气体分子的质量在 $10^{-20} \sim 10^{-23} \text{g}$ 。

大气中的气体分子有了质量和速度，也就有了动能 (Ke)。运动分子理论认为气体分子均匀地分布在空间中，每一个粒子都具有动能。

动能与质量和加速度的关系是：

$$Ke = \frac{1}{2} m v^2 \quad 1-7$$

有了随意运动和动能，气体分子相互碰撞，或与其他固体或液体分子碰撞，根据公式：

$$n = \frac{1}{4} N \bar{v} \quad 1-8$$

这里 n 等于气体分子碰撞的次数， N 是在特定容器中的气体分子数量，是无方向的气体运动的平均速度。

§ 1.2 气体运动与压强

另一运动分子观点是：“气体分子之间相互产生碰撞，碰撞之

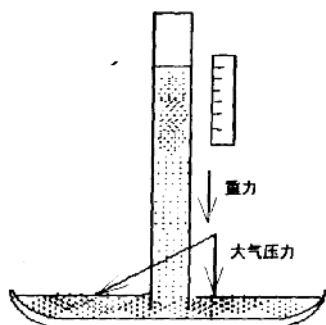


图1-2 气压计原理示意图

大气压力驱动管中水银向上运动，重力使其向下运动，平衡时大气压力等于管中水银的重力

后直接产生压力”。由于气体分子的运动速度在密闭容器中所有方向和部位都均等，故压力在密闭容器中所有方向和部位都相等。压强是单位面积上的压力，可写作：

$$P = \frac{F}{Area} \quad 1-9$$

这里F是压力，Area是力所作用的面积(单位是 cm^2)。

17世纪30年代，Evangelista Torricelli作了一个简单而富有意义的实验(图1-2)，将一个注满液体的长管倒置放入盛有同样液体的容器里，Torricelli发现只有部分液体流出长管。当使用的液体为水银时，长管内的液体高度不低于75cm，这种仪器称为气压计。

气压计显示水银柱的长度(mmHg)。最初大气压用水银柱的高度(mmHg)表示。为了纪念Torricelli的伟大发现，常用“Torr”代替mmHg作为压强的单位，但只有在海平面用“Torr”作压力单位才是正确的。现在国际上统一使用“帕斯卡”(Pascal)作为压

强的单位，血气分析中用千帕 (kPa) 作单位。

$$1\text{kPa} = \frac{1}{7.501} \times \text{mmHg} = \frac{1}{7.501} \times \text{Torr} \quad 1-10$$

§ 1.3 温度对气体分子运动的影响

热能是改变气体运动的一个因素，它被视为一种无形的动力，热力学第一定律表明宇宙中所有的能量保持恒定。那么在一个动力的作用下，气体分子在空间自由运动，动能转变为热能。因为热能与气体分子运动存在直接联系，部分热能来自分子的转移，另一部分来自旋转的能量，还有一部分来自潜在的振动的能量。因此，气体分子的动能与绝对温度有关：

$$K_e = 1/2 m v^2 = cT \quad 1-11$$

这里c是恒量，T是绝对温度，那么气体分子的运动速度取决于气体分子的动能和温度。液体水银在不同温度的空气中的不同行为为温度计的产生提供了理论依据。

温度计起源于17世纪的佛罗伦萨。30年后，自然科学家 Charles Renaldi 通过利用水的沸点和冰点作为刻度标准证实了温度计的可靠性。随后，Fahrenheit, Celsius 和 Kelvin 刻度标准也相继产生，通过下列公式，可以互相转换：

$$^{\circ}\text{F} = 32 + \frac{9}{5} ^{\circ}\text{C} \quad 1-12$$

$$^{\circ}\text{C} = (^{\circ}\text{F} - 32) \times \frac{5}{9} \quad 1-13$$

$$^{\circ}\text{K} = ^{\circ}\text{C} + 273 \quad 1-14$$

绝对温度K常用于气体运动规律计算。

§ 1.4 理想气体定律

§ 1.4.1 理想气体定律的推导

关于能量在以前段落已被提及，有了气体的质量、压力和温度，即可得推导出气体定律。

气体分子充满密闭容器，它们有能量，在运动，分子的质量和速度合称动量。分子的动量如图 1-3 所示，当分子接近容器

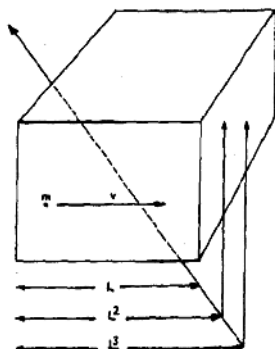


图1-3 假设一个气体分子在密闭的容器中运动

当分子碰撞右侧壁并弹回时，分子动量为 $2mv$ ， L 为侧壁长度； L^2 和 L^3 分别为侧壁的面积和容器的体积； v 是速度； m 是气体分子的质量

壁时，它等于 mv ，碰撞后做相反的运动， $-mv$ ，每次碰撞后改变 $2mv$ 。分子与容器碰撞后产生的力为

$$F = 2mv \quad 1-15$$

设容器壁长度为 L ，分子碰撞后共运行 $2L$ ，速度保持不变，每秒冲击 $v/2L$ 次，力写为：

$$F = 2mv(v/2L) = mv^2/L \quad 1-16$$

容器内分子随意运动，所有方向的分子平均速度均等