

机械通气手册

Manual of
Mechanical Ventilation

主编 张翔宇



人民卫生出版社
PEOPLE'S MEDICAL PUBLISHING HOUSE

机械通气手册

Manual of
Mechanical Ventilation

主 编 张翔宇
副主编 诸杜明 瞿洪平
王瑞兰 彭 沪

人民卫生出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

机械通气手册 / 张翔宇主编 . — 北京 : 人民卫生出版社 ,
2013.10

ISBN 978-7-117-17913-3

I. ①机… II. ①张… III. ①呼吸器 - 治疗 - 手册
IV. ①R459.6-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 190998 号

人卫社官网	www.pmph.com	出版物查询, 在线购书
人卫医学网	www.ipmph.com	医学考试辅导, 医学数据库服务, 医学教育资源, 大众健康资讯

版权所有, 侵权必究!

ISBN 978-7-117-17913-3



机械通气手册

主 编: 张翔宇

出版发行: 人民卫生出版社 (中继线 010-59780011)

地 址: 北京市朝阳区潘家园南里 19 号

邮 编: 100021

E - mail: pmph@pmph.com

购书热线: 010-59787592 010-59787584 010-65264830

印 刷: 三河市富华印刷包装有限公司

经 销: 新华书店

开 本: 850×1168 1/32 印张: 13.5 字数: 346 千字

版 次: 2013 年 10 月第 1 版 2013 年 10 月第 1 版第 1 次印刷

标准书号: ISBN 978-7-117-17913-3/R · 17914

定 价: 49.00 元

打击盗版举报电话: 010-59787491 E-mail: WQ@pmph.com

(凡属印装质量问题请与本社市场营销中心联系退换)

编委会名单

主 编 张翔宇

副主编 诸杜明 瞿洪平 王瑞兰 彭 沪

编 者（按姓氏笔画排序）

于 鹏（北京医院呼吸与危重病医学科）

王启星（上海同济大学附属第十人民医院急诊危重病
学科）

王胜昱（西安医学院附属医院呼吸内科）

王瑞兰（上海交通大学附属第一人民医院急诊危重病科）

石 斌（上海交通大学附属第一人民医院松江分院急诊危
重病科）

刘金蓉（台湾中国医药大学附属医院呼吸治疗科）

庄育刚（上海同济大学附属第十人民医院急诊危重病
学科）

杨 忠（云南省第一人民医院重症医学科）

吴允孚（苏州市立医院东院重症医学科）

张中琳（上海同济大学附属第十人民医院急诊危重病
学科）

张翔宇（上海同济大学附属第十人民医院急诊危重病
学科）

欧阳彬（中山大学附属第一医院重症医学科）

周 锋（上海同济大学附属第十人民医院急诊危重病
学科）

周书琴（上海同济大学附属第十人民医院急诊危重病
学科）

侯 明（青海大学附属医院急诊危重症科）

袁月华（浙江大学医学院附属邵逸夫医院呼吸治疗科）

◀ 编委会名单

钱巧慧（上海同济大学附属第十人民医院急诊危重病
学科）

徐 磊（天津市第三中心医院重症医学科）

浦其斌（浙江大学医学院附属第一医院危重病学科）

诸杜明（复旦大学附属中山医院外科监护病房）

彭 沪（上海同济大学附属第十人民医院急诊危重病
学科）

葛慧青（浙江大学医学院附属邵逸夫医院呼吸治疗科）

樊海蓉（上海同济大学附属第十人民医院急诊危重病
学科）

瞿洪平（上海交通大学医学院附属瑞金医院重症医学科）

编辑助理

周书琴 张中琳 钱巧慧 王启星 景 欣
郭 慧 叶 娜

序

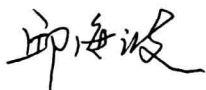
重症医学是现代医学史上的一朵奇葩，在重症患者抢救以及近年的突发公共事件及灾难面前已显示出巨大的力量，重症医学是医学进步的重要标志之一，其重要性日益为人们所认识。由于广大从事危重病医学医护人员的共同努力，各级卫生行政主管部门的支持，近十多年来，我国的重症医学事业有了长足的进步和发展。

1952年哥本哈根发生一次小儿麻痹症大流行，一位麻醉科医生把经气管插管-正压通气技术引入临床，经过努力，患者的病死率从90%降到40%，使得机械通气正式走上现代医学的历史舞台。机械通气的出现并在临床的快速广泛地使用，以及对大量重症患者的救助，使其成为重症医学及重要的器官支持手段之一。随着对机械通气概念、原理及理念的不断认识，机械通气已不再仅仅是呼吸支持，而是循环、肾脏、脑等各脏器的重要支持手段之一，是全身及局部氧代谢的重要保障。但由于现今重症医学规模的迅速扩大，从业人员急剧增加，新技术新方法的不断涌现，广大重症医护人员需要不断更新自己的机械通气知识和技能，更需要在临床实践中不断规范机械通气的操作和使用。

本书主编张翔宇教授勤奋敬业、孜孜不倦，致力于重症患者的医疗加强和基础研究工作。他善于思考、锲而不舍的精神值得赞扬和学习。他主编的《机械通气手册》一书借鉴了国内外比较成熟的基础培训教材，从基础理论到

◀ | 序

临床应用进行系统讲解，突出了基础与理论、临床与实践相结合的特点。我相信本书将会受到重症临床医师和研究生同学们的欢迎。故为之作序。



2013年8月

目 录

第一章 机械通气的基本概念	1
第一节 氧合和酸碱评估	1
第二节 机械通气的基本概念	16
第三节 呼吸机送气原理	31
第二章 机械通气的初始阶段设定	45
第一节 明确机械通气目的	45
第二节 机械通气模式的选择	58
第三节 呼吸机初始设置	79
第四节 呼吸机设置的进一步调整	93
第三章 机械通气的监测	118
第一节 机械通气患者的初始评估	118
第二节 呼吸机图形	145
第三节 呼吸功能的无创评估	187
第四节 气道管理	197
第四章 干预与治疗	228
第一节 改善通气的方法和人-机通气的 其他技术	228
第二节 氧合的改善和 ARDS 的管理	255
第五章 机械通气的效果和并发症	295
第一节 正压机械通气对心血管系统、脑、 肾脏和其他脏器的影响	295
第二节 正压通气对呼吸系统的影响	309
第三节 常见问题的解决	341

◀ 目 录

第六章 呼吸机的撤离和长期机械通气·····	370
第一节 机械通气的撤离·····	370
第二节 长期机械通气·····	389
第七章 机械通气的特殊运用·····	403
第一节 新生儿和儿童机械通气·····	403
第二节 通气支持的特殊技术·····	413
后记·····	423

第一章

机械通气的基本概念

第一节 氧合和酸碱评估

本节要点：

一个动脉血气值只代表那个时间点的情况。

临床医师应该看患者血气值的动态趋势而不是一个数字。

过多的血液抽样是一种常见的做法，应该避免。

呼吸的主要功能是从外界摄取氧气 (O_2)，通过肺泡 - 毛细血管转运系统将氧气运送到组织供细胞生物氧化代谢使用。如果没有氧气，细胞的代谢将受到严重影响，进而引起机体器官的功能障碍，甚至死亡。同时，氧在组织细胞和肺之间的转运是血液和心脏功能的一个反映。由此可见，熟悉并掌握氧从肺泡的转运和摄取，并能进行详细的评估是临床工作中非常重要的一部分。

一、评估氧从肺泡的转运和摄取

(一) 概述

体外的 O_2 经肺的通气、换气，进入血液中，主要通过两种形式存在：①物理溶解在血浆中，通过氧分压 (partial pressure of oxygen, PO_2) 反映；②与血红蛋白化学结合，通过氧合血红蛋白 (oxyhemoglobin, O_2Hb)、血红蛋白氧饱和度 (oxygen saturation, SO_2)、氧含量 (content of oxygenation, CO_2) 等反映。这两种存在形式中，物理溶解的氧量非常少，在正常体温下，每 100ml 血液中，每

第一章 机械通气的基本概念

1mmHg 的 PO_2 只能溶解约 0.003ml 的氧气，一般表示为 0.3vol%。

由此可见，在氧转运到组织细胞的过程中，只有很少一部分 O_2 是通过物理溶解的，而 O_2 的主要转运形式是通过与血红蛋白的结合，在健康个体中，超过 98% 的 O_2 以化学结合形式存在。每 1g 血红蛋白可以携带 1.34ml 的 O_2 ，以健康成年男性每 100ml 血液中含 14~16g 血红蛋白计算，每 100ml 血液中化学结合的 O_2 量约为 18.76~21.44ml，用 18.76~21.44vol% O_2 表示。但是，因人体在生理情况下，肺内存在一部分静脉血经支气管静脉和极少的肺内动-静脉交通支直接流入肺静脉，掺入动脉血等正常的生理性分流，故健康个体的动脉血中血红蛋白氧饱和度只有约 97%。

值得注意的是，虽然物理溶解的 O_2 量少，但是由于 O_2 与血红蛋白发生化学结合前必须先物理溶解，所以 O_2 的物理溶解在 O_2 和血红蛋白进行化学结合的过程中起着非常重要的桥梁作用。这也就解释了为什么在机械通气过程中要频繁监测动脉血气中的氧分压，而不是仅凭监护仪上的脉搏氧饱和度 (SpO_2) 来评估患者的氧合状态。

(二) 关于氧合和呼吸衰竭的几个概念

1. 呼吸衰竭 首先明确呼吸衰竭不是一个疾病，是一个过程。评价机体是否呼吸衰竭的客观指标是动脉血气分析，当动脉血氧分压 (PaO_2) <60mmHg 和 (或) 动脉血二氧化碳分压 ($PaCO_2$) >50mmHg (COPD 患者 >55mmHg) 时，即可定义为呼吸衰竭。

呼吸衰竭一般分为两种类型，即低氧型呼吸衰竭和高碳酸血症型呼吸衰竭。两种类型可以同时存在。只要 PaO_2 <60mmHg 即可定义为低氧型呼吸衰竭；高碳酸血症型呼吸衰竭又分为慢性高碳酸血症型呼吸衰竭和慢性基础上的急性加重型高碳酸血症型呼吸衰竭 (A on C 型)。具体的鉴别和分型方法在本章中将进行详细的介绍。

2. 缺氧 (hypoxia) 和低氧 (hypoxemia)

(1) 缺氧 (hypoxia): 主要描述组织细胞的氧状态。

当组织得不到充足的氧, 或不能充分利用氧时, 组织的代谢、功能、甚至形态结构都可能发生异常变化, 这一病理过程称为缺氧。评价机体是否缺氧的客观指标是动脉血气分析, 当动脉血氧分压 (PaO_2) $<60\text{mmHg}$ 和 (或) 动脉血二氧化碳分压 (PaCO_2) $>50\text{mmHg}$ (COPD 患者 $>55\text{mmHg}$) 时, 即可定义为缺氧。

缺氧的类型和原因包括以下几个方面: ①低氧型缺氧 (低于正常 PaO_2); ②贫血型缺氧 (低于正常红细胞计数, 异常血红蛋白, 碳氧血红蛋白); ③循环型缺氧 (心排血量的减少, 组织灌注的减少); ④组织型缺氧 (氰化物中毒); ⑤亲合型缺氧 (氧从血红蛋白释放至组织的量减少, 如胎儿血红蛋白)。

(2) 低氧 (hypoxemia): 指动脉氧分压较低, $<80\text{mmHg}$ 。一般临床上可以依据动脉血气中的 PaO_2 把低氧分为 3 级 (表 1-1-1)。

表 1-1-1 低氧的分级及动脉血气指标

分级	PaO_2 范围	氧饱和 (SaO_2)
轻度低氧	60 ~ 79mmHg	90% ~ 94%
中度低氧	40 ~ 59mmHg	75% ~ 89%
重度低氧	$<40\text{mmHg}$ 或 $<60\text{mmHg}$ ($\text{FiO}_2 > 0.5$ 时)	$<75\%$

在临床中常见的引起低氧的原因主要有 3 大类: 分流、通气/血流比例失调和肺泡低通气, 也可见于弥散障碍、扩散障碍等, 具体为: ①低通气 (神经肌肉疾病导致的 CO_2 的增加, 慢性呼吸功的增加, 呼吸中枢的抑制); ②吸入氧浓度或压力的减少 (如高海拔时, FiO_2 的降低); ③分流 (如肺不张、肺水肿、肺炎、ARDS 等); ④弥散能力的受损 (如肺减容术后、肺气肿、肺纤维化等); ⑤通气量降低 (如气道受阻、支气管痉挛等)。

(三) 评估氧从肺泡的转运和摄取的指标意义及其正常值范围

自 19 世纪 60 年代左右至今, 评估氧从肺泡的转运和摄取的指标有近 20 个, 本章主要介绍目前对临床使用价值较大的 13 个指标, 包括: 肺泡氧分压 (P_AO_2)、动脉血氧分压 (PaO_2)、肺泡 - 动脉氧分压差 [$P_{(A-a)}O_2$]、动脉 - 肺泡氧分压比 (PaO_2/P_AO_2)、氧合分数 (PaO_2/FiO_2)、氧合指数 (OI)、动脉血氧含量 (CaO_2)、动静脉氧含量差 [$C_{(a-v)}O_2$]、肺分流分数 (Q_s/Q_t)、氧输送总量 (DO_2)、氧饱和度 (SO_2)、 P_{50} 、氧解离曲线等, 表 1-1-2 总结了各指标的正常值范围。

表 1-1-2 评估氧合各指标的正常值范围

正常值范围	
PaO_2	80 ~ 100mmHg
$P_{(A-a)}O_2$	10 ~ 15mmHg (吸入空气); 25 ~ 65mmHg (吸入纯氧)
a/A	0.74 ~ 0.9
PaO_2/FiO_2	350 ~ 450
OI	0 ~ 25
CaO_2	17 ~ 24vol%
$C_{(a-v)}O_2$	<5vol%
Q_s/Q_t	<5%
DO_2	460 ~ 650ml/min/m ²
SO_2	动脉: >95%; 静脉: 60% ~ 85%
P_{50}	26.6mmHg

1. 肺泡氧分压 (P_AO_2)

(1) 定义: 肺泡氧分压 (partial pressure of oxygen in the alveolar gas, P_AO_2), 是指肺泡中氧气的压力, 可以用吸入气体的氧分压减去机体代谢消耗的氧气量。单位是 mmHg。

(2) 计算公式: $P_AO_2 =$ 吸入气体的氧分压 - 氧耗量 =

$$(P_B - 47) \times FiO_2 - PaCO_2 \times 1.25$$

注：公式中 P_B 指当地的大气压； FiO_2 指吸入氧浓度，用小数值表示； $PaCO_2$ 指动脉二氧化碳分压。

(3) 临床运用：计算 P_AO_2 可以推算出其他氧合指标，此外， $P_AO_2 > PaO_2$ ，如果动脉血气分析的结果显示 $PaO_2 > P_AO_2$ ，则说明测定的结果有误，需要寻找错误的原因。

2. 动脉血氧分压 (PaO_2)

(1) 定义：动脉血氧分压 (arterial oxygen tension, PaO_2)，是指物理溶解在动脉血液中的氧压力。

(2) 血气分析直接测定。

(3) 正常值范围：年龄影响，60岁以下正常值范围是80~100mmHg；60岁以下正常值可用以下公式估算： $80 - (\text{年龄} - 60)$ ；例如：年龄80岁， PaO_2 的正常值约为： $80 - (80 - 60) = 60\text{mmHg}$ 。因此年龄越大， PaO_2 正常值越小。

(4) 临床应用： PaO_2 在临床评估氧合状态时非常重要，反映了氧转运的结果，很多评价指标的计算均与 PaO_2 的值相关，但同时 PaO_2 受很多生理因素的影响。当吸入空气时，存在低氧，若 $PaO_2 + PaCO_2$ 的总和约为110~130mmHg，则引起低氧的原因是肺泡低通气。若 $PaO_2 + PaCO_2$ 的总和 < 110mmHg，则低氧原因就与肺氧合血液的功能受损有关。若 $PaO_2 + PaCO_2$ 的总和 > 130mmHg，患者可能吸入的不是空气而是额外氧气吸入，或者 PaO_2 测定有误。

3. 肺泡 - 动脉氧分压差 [$P_{(A-a)}O_2$]

(1) 定义：肺泡 - 动脉氧分压差 [alveolar-arterial oxygen tension difference, $P_{(A-a)}O_2$ or A-a O_2 gradient]，是指肺泡氧分压与动脉血氧分压的差，受吸入氧浓度和年龄影响。单位是 mmHg。

(2) 计算公式： $P_{(A-a)}O_2 = P_AO_2 - PaO_2 = (P_B - 47) \times FiO_2 - PaCO_2 \times 1.25 - PaO_2$ ，简单的预估公式： $P_{(A-a)}O_2 = (\text{年龄} / 4) + 4$ 或 $\text{年龄} \times 0.4$ ，注：年龄单位是年。

(3) 正常值范围：10~15mmHg (吸入空气)；25~

第一章 机械通气的基本概念

65mmHg (吸入纯氧)。正常 $P_{(A-a)}O_2$ 是随着年龄而增长的, 大约年龄 20 岁时为 5mmHg。如计算 PaO_2 的公式所示, PaO_2 随 FiO_2 的改变而变化。

(4) 临床运用: 肺部的改变可以减少氧从肺泡到肺毛细血管的转运能力, 从而引起 PaO_2 下降与一定的 $P_{A}O_2$ 相关, 正如 $P_{(A-a)}O_2$ 在异常条件下会增加, 例如通气/血流比异常、分流和弥散障碍。

4. 动脉-肺泡氧分压比 ($PaO_2/P_{A}O_2$)

(1) 定义: 动脉-肺泡氧分压比 (arterial/alveolar oxygen tension ratio, $PaO_2/P_{A}O_2$ 或 a/A 比), 用小数表示。

(2) 计算公式: $a/A=PaO_2/P_{A}O_2$

(3) 正常值范围: 随 FiO_2 的变化较 $P_{(A-a)}O_2$ 略稳定。正常值范围是: 0.74~0.9。从中我们可以看出肺泡中 90% O_2 转移到毛细血管中。当 a/A 比值 <0.6 时, 提示有通气/血流比不匹配。当 a/A 比值 <0.15 时, 提示有分流存在。

(4) 临床运用: a/A 比值是 20 世纪 60 年代提出的, 它在评价重症患者肺的通气/血流比值方面有一定的意义。a/A 比值不仅可以预估动脉氧分压, 而且可以用来选择合适的氧疗方式。

5. 氧合分数 (PaO_2/FiO_2)

(1) 定义: 氧合分数 (PaO_2/FiO_2 或称 P/F 比), 动脉氧分压与吸入氧浓度的比值。该比值不需要计算 PaO_2 但是仍能描述氧输送到血液的量与 FiO_2 的量有关。

(2) 计算公式: $P/F=PaO_2/FiO_2$ (FiO_2 用小数表示)

(3) 正常值范围: 350~450

(4) 临床运用: 氧合分数常被用于描述肺损伤的程度, 现已用于肺损伤的诊断分级。当氧合分数为 200~300 时, 提示有肺损伤 (ALI); 当氧合分数 <200 时, 提示 ARDS; 当氧合分数 <150 时, 提示存在肺内分流。

6. 氧合指数 (OI)

(1) 定义: 氧合指数 (oxygenation index, OI), 指单位氧分压下, 吸入氧浓度和平均气道压的乘积大小。综合考

虑了吸入氧浓度和气道压力。

(2) 计算公式: $OI = (FiO_2 \times MAP) / PaO_2$ 注: 公式中 FiO_2 用百分比表示, 而非小数; MAP 指平均气道压。

(3) 正常值范围: 0 ~ 25。

(4) 临床运用: 氧合指数最早提出是用于人的肺泡表面活性物质实验中评估通气-氧合的支持程度。随后氧合指数被引入婴幼儿, 以此评估需要体外膜肺或体外膜氧合 (extracorporeal membrane oxygenation, ECMO) 治疗的可能性。当 OI 25 ~ 40 时, 提示死亡几率 >40%; 当 OI 30 ~ 1000 时, >4 小时, 增加死亡的几率; 当 OI 40 ~ 1000 时, 可考虑使用 ECMO 治疗。

7. 动脉氧含量 (CaO_2)

(1) 定义: 动脉氧含量 (arterial oxygen content, CaO_2), 指每 100ml 动脉血中氧气的含量。单位: vol%。

(2) 计算公式: $CaO_2 = 1.34 \times Hb \times SaO_2 + PaO_2 \times 0.003$ 注: Hb 指血红蛋白量; SaO_2 指动脉氧饱和度, 用小数表示。

(3) 正常值范围: 17 ~ 24vol%。

(4) 临床意义: CaO_2 是评价氧合状态的最重要指标, 可以从血细胞计数或碳氧血氧仪 (co oximeter) 获得该指标。因在本章第一节中讲到, O_2 主要是以 O_2Hb 的形式存在, 所以 Hb 量对 CaO_2 的影响非常大, 当 Hb 量减少, CaO_2 必然降低, 而无论 PaO_2 和 SaO_2 的大小多少。除了低氧和贫血, CaO_2 的降低还可见于 CO 中毒, CO 中毒时, SaO_2 和 CaO_2 显著降低, 而实测的 PaO_2 比根据 SaO_2 估计的 PaO_2 要高。如果没有碳氧血氧仪测定, CO 中毒与否仅凭动脉血气分析的结果或监护仪监测的脉搏氧饱和度很难确定。尤其是当患者处于昏迷状态或没有提供相应的 CO 中毒的病史时。

8. 动静脉氧含量差 $C_{(a-\bar{v})}O_2$

(1) 定义: 动静脉氧含量差 (arterial-venous oxygen content difference, $C_{(a-\bar{v})}O_2$), 是指动脉氧含量与混合静脉血氧含量的差值。

第一章 机械通气的基本概念

(2) 计算公式: $C_{(a-\bar{v})O_2} = CaO_2 - C\bar{v}O_2 = 1.34 \times Hb \times SaO_2 + PaO_2 \times 0.003 - (1.34 \times Hb + PaO_2 \times 0.003)$

(3) 正常值范围: $<5\text{vol}\%$ 。

(4) 临床运用: $C_{(a-\bar{v})O_2} > 5\text{vol}\%$ 时提示存在组织缺氧。

9. 肺分流分数 (Q_s/Q_t)

(1) 定义: 肺分流分数 (pulmonary shunt fraction, Q_s/Q_t), 是指分流血流量占总心排血量的比例。用百分比表示。

(2) 计算公式: $Q_s/Q_t = (C_cO_2 - CaO_2) / (C_cO_2 - C\bar{v}O_2)$

注: C_cO_2 指肺泡毛细血管氧含量; $C\bar{v}O_2$ 指混合静脉血氧含量。两者计算公式如下:

$C_cO_2 = 1.34 \times Hb \times S_AO_2 + PaO_2 \times 0.003$ (注: A 为肺泡, $S_AO_2 = 1$)

$C\bar{v}O_2 = 1.34 \times Hb \times S\bar{v}O_2 + P\bar{v}O_2 \times 0.003$

(3) 正常值范围: $<5\%$ 。

(4) 临床运用: 可以用来评估肺内分流的严重程度, 20% 以下为轻度分流; 20% ~ 30% 为中度分流; $>30\%$ 为严重分流。当分流量 $>15\%$ 时提示有机机械通气的指征。

10. 氧输送量 (DO_2)

(1) 定义: 氧输送量 (total oxygen delivery, DO_2), 是指单位时间里 (每分钟) 心脏通过血液向外周组织输送的氧总量。单位: $\text{ml}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$ 。

(2) 计算公式: $DO_2 = CO \times CaO_2 = CO \times (1.34 \times Hb \times SaO_2 + PaO_2 \times 0.003)$

(3) 正常值范围: $460 \sim 650 \text{ml}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$ 。

(4) 临床运用: 由计算公式可见, DO_2 受 CO、Hb、 SaO_2 和 PaO_2 影响, 四者中任一因素发生变化均会影响心脏向外周组织输送氧的量。通过计算 DO_2 的大小可以很好地反映外周组织氧的状态。

11. 氧饱和度 (SO_2)

(1) 定义: 氧饱和度 (oxygen saturation, SO_2), 指血红蛋白与氧结合达到饱和程度的比例。可以分为: 动脉血氧饱和度 (SaO_2)、静脉血氧饱和度 (SvO_2)、混合静脉血