

中华人民共和国国家标准

GB/T 18048—2008/ISO 8996:2004
代替 GB/T 18048—2000

热环境人类工效学 代谢率的测定

Ergonomics of the thermal environment—
Determination of metabolic rate

(ISO 8996:2004, IDT)

2008-07-16 发布

2009-01-01 实施



中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局
中国国家标准化管理委员会

发布

目 次

前言	I
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 方法和准确度	1
3.1 总则	1
3.2 方法	2
3.3 准确度	2
4 第一级 筛分法	2
4.1 按职业估算代谢率用表	2
4.2 代谢率种类的划分	3
5 第二级 观察法	3
5.1 根据工作要求估算代谢率	3
5.2 典型活动的代谢率	3
5.3 一个工作周期的代谢率	3
5.4 工作与休息时间长度的影响	3
5.5 内插法估值	4
5.6 代谢率用表的使用要求	4
6 第三级 解析法	4
6.1 利用心率估算代谢率	4
6.2 心率与代谢率的关系	5
7 第四级 测量法	6
7.1 用耗氧量测定代谢率	6
7.2 采用双标水法进行长时间测量	10
7.3 直接测热法原理	10
附录 A (资料性附录) 利用第一级方法(筛分法)估算代谢率	11
附录 B (资料性附录) 利用第二级方法(观察法)估算代谢率	13
附录 C (资料性附录) 利用第三级方法(解析法)估算代谢率	16
附录 D (资料性附录) 利用第四级方法(测量法)估算代谢率(根据所测数据计算代谢率的实例)	17

前 言

本标准等同采用 ISO 8996:2004《热环境人类工效学 代谢率的测定》(英文版)。

本标准是对 GB/T 18048—2000《人类工效学 代谢热量的测定》的修订。

本标准与 GB/T 18048—2000 相比,主要技术内容变化如下:

——本标准首次将人体代谢率测量方法划分为 4 种,即筛分法、观察法、解析法和测量法。其中,观察法、解析法的技术内容在原标准基础上作了不同程度的更新和补充;双标水法和直接测热法为新增加内容。

——在附录 B 中增加了关于代谢率测量日志格式的内容。

本标准的附录 A、附录 B、附录 C 和附录 D 为资料性附录。

本标准由全国人类工效学标准化技术委员会提出并归口。

本标准起草单位:中国标准化研究院。

本标准主要起草人:刘太杰、肖惠、滑东红、张欣、冉令华。

本标准所代替标准的历次版本发布情况为:

——GB/T 18048—2000。

热环境人类工效学 代谢率的测定

1 范围

本标准规定了在工作气候环境下的各种代谢率测定方法。
本标准适用于工作行为评估,特定工作、体育运动的体能消耗估算,以及特定活动的总能耗估算等。
注:本标准使用的估算、表格及其他资料均建立在以下标准人的基础上:
——男性:30岁,体重70 kg,身高1.75 m(体表面积为1.8 m²);
——女性:30岁,体重60 kg,身高1.70 m(体表面积为1.6 m²)。
如果用户所面对的是特殊人群,比如包括儿童、老年人或残疾人等群体,应做出适当的修正。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件,其随后所有的修改单(不包括勘误的内容)或修订版均不适用于本标准,然而,鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件,其最新版本适用于本标准。

- ISO 9886 人类工效学 用生理学方法评价热紧张
- ISO 15256 热环境人类工效学 热工作条件下预防热紧张及不适的风险评估策略

3 方法和准确度

3.1 总则

代谢率决定着人们暴露在热环境中的舒适度或疲劳度。特别是在比较热的气候下,肌肉活动所产生的大量代谢热加剧了热应激,大量的热量需要以汗液蒸发的方式散发。被称为“有用功”的肌肉活动的机械效率比较低,对于大多数的工业作业而言,所占比例很低(只有百分之几),因此通常忽略不计。因此,可以假定总能量消耗等于所产生的热量。本标准中假定代谢率等于热量生成速率。表1中列举了用于测定代谢率的多种方法。这些方法构建在ISO 15265中所述关于接触评定的基本原理之上。这里考虑划分为4级。

表1 代谢率测定方法分级

级别	方 法		精 度	作业现场检查
第一级	筛分法	1A:按职业分类	粗略信息,很有可能出错	不必要,但需要技术设备和工作组织的信息
		1B:按活动分类		
第二级	观察法	2A:群组估算表	有较大可能出错,精度:±20%	有必要进行操作和工时研究
		2B:具体活动表		
第三级	解析法	特定条件下测量心率法	出错的可能性一般,精度:±10%	需研究确定典型时段
第四级	测量法	4A:测量耗氧量法	误差程度在测量或在操作与工时研究允许的范围内,精度:±5%	有必要进行操作和工时研究
		4B:双标水法		有必要进行作业现场检查,但必需评估休闲活动
		4C:直接测热法		不必要

3.2 方法

3.2.1 第一级 筛分法

为了灵活表征特定职业或活动的工作负荷的平均值,介绍了两种简易的方法。

——方法 1A 是按照职业所作的分类;

——方法 1B 是按照活动的种类所做的分类。

两种方法都只是提供了一种估计,都存在相当程度的误差。这也在很大程度上限制了它们的准确度。在这一级,不需要进行作业现场调查。

3.2.2 第二级 观察法

面向对工作条件有充分了解而无需进行工效学培训的用户,介绍了两种一般在特定时间概括工作状况的方法。

——方法 2A,将基础代谢率与不同姿势、工作类型以及特定工作速度下人体动作的代谢率(采用组群评价表)相加,得到代谢率。

——方法 2B,利用不同活动的评估表来确定代谢率。

为了按时间轴记录活动并计算时间加权平均代谢率,本标准中描述了一种程序,对上述两种方法所取得的数据进行处理。误差可能比较高。为了确定一个周期内各种活动工况条件下的代谢率,有必要进行操作和工时研究。

3.2.3 第三级 解析法

该方法主要定位于接受过职业健康和热环境人类工效学培训的人群。通过记录一个典型周期内的心率测定代谢率。这种间接测量代谢率的方法的依据是,一定条件下耗氧量与心率具有相关性。

3.2.4 第四级 测量法

介绍了三种测量的方法,需要由专家具体实施。

——方法 4A,在较短的周期内(10 min~20 min)进行耗氧量的测量。为了说明测量期的代表性,有必要进行详细操作和工时研究。

——方法 4B,即所谓的双标水法,旨在表征更长时期内的平均代谢率。

——方法 4C,直接测热法。

3.3 准确度

估算准确度的主要影响因素有以下几方面:

——个体差异;

——工作设备差异;

——工作速度差异;

——操作技术与技巧差异;

——性别差异和人体测量学特点;

——文化差异;

——使用估算表时,观测者及其培训水平的差异;

——使用第三级方法时,心率与摄氧量相关性的准确度,同时其他的紧张因素也会影响心率;

——在第四级方法中,测量本身的准确度(气体体积和氧气体积分数的测定)。

结果的准确性及其研究费用都从第一级到第四级逐步增加。第四级的测量中给出了最精确的数值,应尽可能采用最准确的方法。

4 第一级 筛分法

4.1 按职业估算代谢率用表

附录 A 的表 A.1 给出了不同职业的代谢率。所给数值是全部工作时间的平均值,但未考虑较长时间的休息暂停,例如,午餐时间。由于技术、工作内容、工作组织等的差异,数值可能出现明显变化。

4.2 代谢率种类的划分

利用附录 A 所给出的分类,可以大致估算代谢率。表 A.2 中将代谢率划分为 5 级:休息、低代谢率、中等代谢率、高代谢率、极高代谢率。对每一级均给出了代谢率平均值和取值范围以及许多实例。这些活动中包含短时间的休息暂停。表 A.2 中所给出的实例说明了这种分类方法。

5 第二级 观察法

5.1 根据工作要求估算代谢率

——涉及作业的身体各部位:双手、单臂、双臂、全身。

——身体各部分的工作负荷:轻度、中度、重度,这些由观测人员主观判断;身体姿势:坐、跪、蹲、站、弯腰站立;工作速度。

附录 B 中表 B.1 给出了标准人坐姿下相应肢体部分承受工作负荷时代谢率的平均值和取值范围。表 B.2 给出了非坐姿情况下的纠正值。

5.2 典型活动的代谢率

附录 B 表 B.3 中给出了典型活动的代谢率数值。这些数值是基于以往各实验室的测量基础上得到的。

5.3 一个工作周期的代谢率

为测定一个工作周期的全部代谢率,需要进行操作和工时研究,其中将对操作进行详细描述,如每个活动的持续时间、所行走的距离、所攀登的高度、搬运的重量、所作动作的数目等。

一个工作周期的时间加权代谢率按式(1)计算,通过测定每个活动的代谢率及其所持续的时间得出。

$$M = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^n M_i t_i \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中:

M ——平均代谢率,单位为瓦每平方米(W/m^2);

M_i ——单项活动代谢率,单位为瓦每平方米(W/m^2);

t_i ——活动的持续时间,单位为分(min);

T ——工作周期的持续时间,等于各部分持续时间之和,单位为分(min)。

可通过使用表 B.4 和表 B.5 中所给出的日志,使得一个工作日或特定时间的职业活动及其持续时间的记录得以简化。当活动发生变化时,就采用一种分类码进行记录。这种分类码来源于根据不同任务组成估算代谢率的表格。需要考虑的组成的数量将视活动的复杂程度而变化。估算程序如下:

- a) 填写被研究者的姓名及其他详细资料;
- b) 观察被研究者的操作(2 h~3 h);
- c) 确定单个任务的组成,并根据表 B.1、表 B.2 或表 B.3 估算相应的代谢率;
- d) 始终将发生变化的任务组成填入日志;
- e) 计算各任务组成所耗费的总时长;
- f) 将各任务组成所耗费的时间与对应的代谢率相乘;
- g) 将上述乘积相加;
- h) 将上述相加和除以总观测时长。此类估算的表格已由表 B.4 和表 B.5 给出。

5.4 工作与休息时间长度的影响

附录 B 中所给出的表格不适用于工作时间短和休息时间较长的工作。因为在这种情况下,5.3 中所提供的方法将导致代谢率的估算值偏低,这就是西蒙森效应。工作时间和休息时间复合后有效性的限制在图 1 的曲线中得到了说明。例 1 显示 8 min 休息及 1 min 工作的工作节律。在这种情况下,5.3 中所描述的方法将导致代谢率的估算值偏低,并且附录 B 中的代谢率表不能使用。对于像例 2 中那样的工作—休息周期,上述表格可以使用并能够达到所标示的精度。

图 1 只适用于休息期间无工作负荷的情况。

西蒙森效应所导致的代谢率的提高取决于工作类型和所使用的肌肉群。由于问题的复杂性并且在本级估算方法上的相关性较低,这里不再详述。

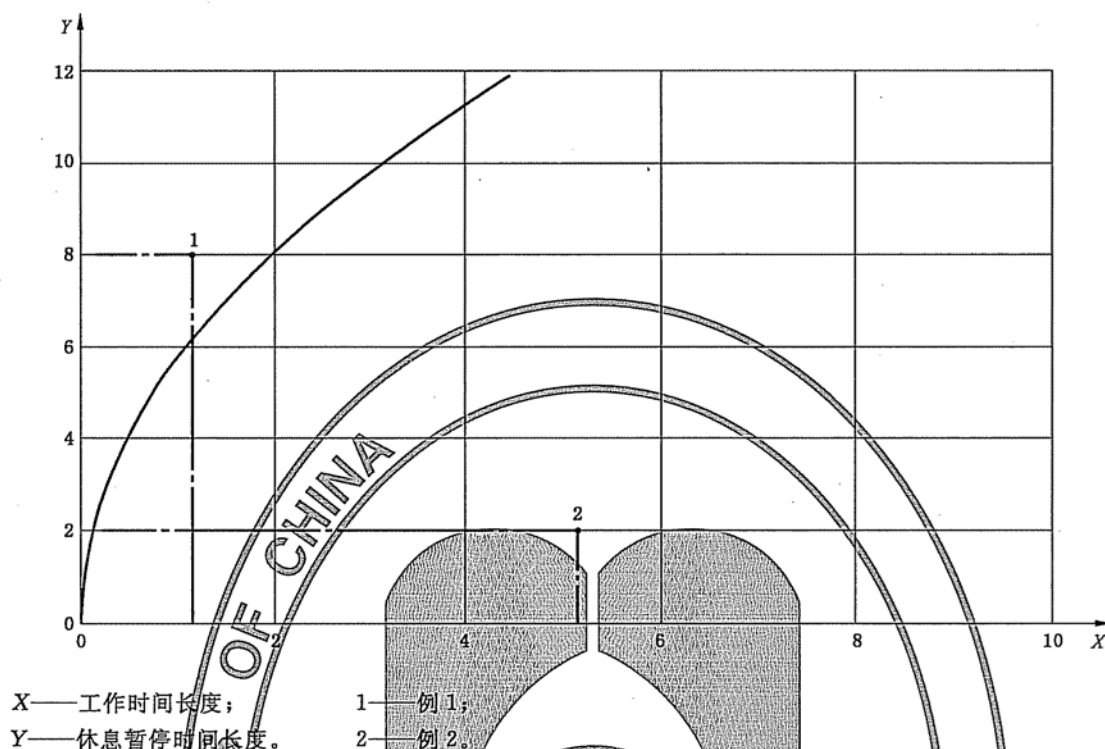


图1 估算代谢率过程中工作和休息时间复合后有效性的限制曲线

5.5 内插法估值

当工作速度与附录B表中所给出的不同时,可在所给速度 $\pm 25\%$ 范围内采用内插法对代谢率数值进行改动。

5.6 代谢率用表的使用要求

附录A和附录B中所公布的价值已针对舒适热环境下的标准人进行了统一处理,以便与不同来源的数值进行比较。

由于第3章中所提及的因素的影响,由特定的人执行特定的工作时的代谢率,可能会在表中所给出的平均值一定的上下限内变化。然而,据估计:

- 对于同一工作,在同一工作条件下,不同的人的代谢率可有不同,其偏差约为 $\pm 5\%$;
- 在实验室条件下,对于一个接受过此类活动培训的人,变化幅度约为 5% ;
- 在现场条件下,所测定的每一活动不是确切地在每一试验中都完全一致,其代谢率最高可能有 20% 的变动。

考虑到误差的存在,在这一级的估算上,要将身高和性别的差异考虑在内还缺乏足够的依据。

对于步行、攀爬、提举重物等这类涉及全身运动的活动,可能有理由要考虑被测者的体重。

在高温条件下,由于心率增加和排汗,代谢率值最高可增加 $5 \text{ W/m}^2 \sim 10 \text{ W/m}^2$,但此修正尚未得到充分证实。

另一方面,在低温条件下,在战栗发生时观到的代谢率值最高可增加 200 W/m^2 。穿厚重的衣服由于增加了被测者的体重并在一定程度上造成被测者行动不便,将导致代谢率的增加。

6 第三级 解析法

6.1 利用心率估算代谢率

特定时刻的心率可认为是式(2)中右边几部分心率值的总和:

$$HR = HR_0 + \Delta HR_M + \Delta HR_S + \Delta HR_T + \Delta HR_N + \Delta HR_E \dots\dots\dots (2)$$

式中:

HR_0 ——在中等热环境下处于休息状态测定的心率,单位为次每分钟;

ΔHR_M ——在中等热环境条件下由于动态肌肉负荷引起的心率增加量,单位为次每分钟;

ΔHR_S ——由静态肌肉工作造成的心率增加量,单位为次每分钟;

ΔHR_T ——由于热应激造成的心率增加量,单位为次每分钟;

ΔHR_N ——由于精神负荷造成的心率增加量,单位为次每分钟;

ΔHR_E ——其他因素导致的心率变化,例如由呼吸效应、生理节律等引起的心率变化,单位为次每分钟。

在从事体力工作(没有热紧张和心理负荷)时,可以通过测量工作时的心率估算代谢率。如果考虑上述限制,此法可比第1类和第2类方法估算的更精确(见表1),也不像测耗氧量那么复杂,但耗氧量法可提供最准确的结果。

心率可连续记录,例如用遥测心率仪或用准确性较低的,通过数脉搏(见ISO 9886)也可得到。

平均心率HR,可在固定的时间间隔(例如1 min)内计算,或在不同工作周期中或整个工作班的时间间隔内计算。

在有相当大的热负荷、静态肌肉工作、使用小肌肉群进行的动态工作或有精神负荷存在时,心率与代谢率关系的形式及斜率将发生改变。ISO 9886中给出了考虑热效应对心率测量的影响时的修正程序。

6.2 心率与代谢率的关系

可在中等热环境下的试验条件下,通过记录人体承受特定肌肉负荷时不同阶段的心率来确定心率与代谢率的关系。在肌肉的不同阶段,记录心率对应的耗氧量或所承担的体力工作。由于工作的种类(自行车功量计,台阶试验,踏步机)、负荷阶段的顺序以及时间都对两项参数(心率及代谢率)存在一定影响,因此要执行标准化程序。

通常,在以下范围内常表现为线性关系:

——120次/分钟以上,精神因素可以忽略不计;

——达到低于被试者最大心率20次/分钟,因为高于此值,心率将趋于极限。

在此范围内,心率与代谢率的相关性可写成:

$$HR = HR_0 + RM \times (M - M_0) \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中:

M ——代谢率,单位为瓦每平方米(W/m^2);

M_0 ——休息时的代谢率,单位为瓦每平方米(W/m^2);

RM ——单位代谢率对应的心率增加值;

HR_0 ——在中度热环境下,休息时的心率;

根据这个关系式,可利用心率测量值导出代谢率的值。

通过试验从HR和M的实测值推导上述表达式时,估算精度约为10%。

忽略进一步的精度损失,可得到估算以下值的表达式。

最大工作负荷(MWC,单位为 W/m^2)作为年龄(用A表示,单位为岁)和体重(用 W_b 表示,单位为kg)的函数,可由式(4)、式(5)估算:

$$\text{男性: } MWC = (41.7 - 0.22A)W_b^{0.666} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\text{女性: } MWC = (35.0 - 0.22A)W_b^{0.666} \quad \dots\dots\dots (5)$$

最大心率(HR_{max})可由式(6)、式(7)估算:

$$HR_{max} = 205 - 0.62A \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$RM = (HR_{max} - HR_0)/(MWC - M_0) \quad \dots\dots\dots (7)$$

$M_0 = 55 W/m^2$ 。

附录C中表C.1直接给出了年龄在20~60岁、体重为50~90 kg的人群的心率和代谢率关系的推测。在这种情况下,估算精度进一步降低。

7 第四级 测量法

7.1 用耗氧量测定代谢率

7.1.1 部分法和整体法

代谢率的测定方法主要有以下两种：

——部分法，适用于轻微的和中等强度工作；

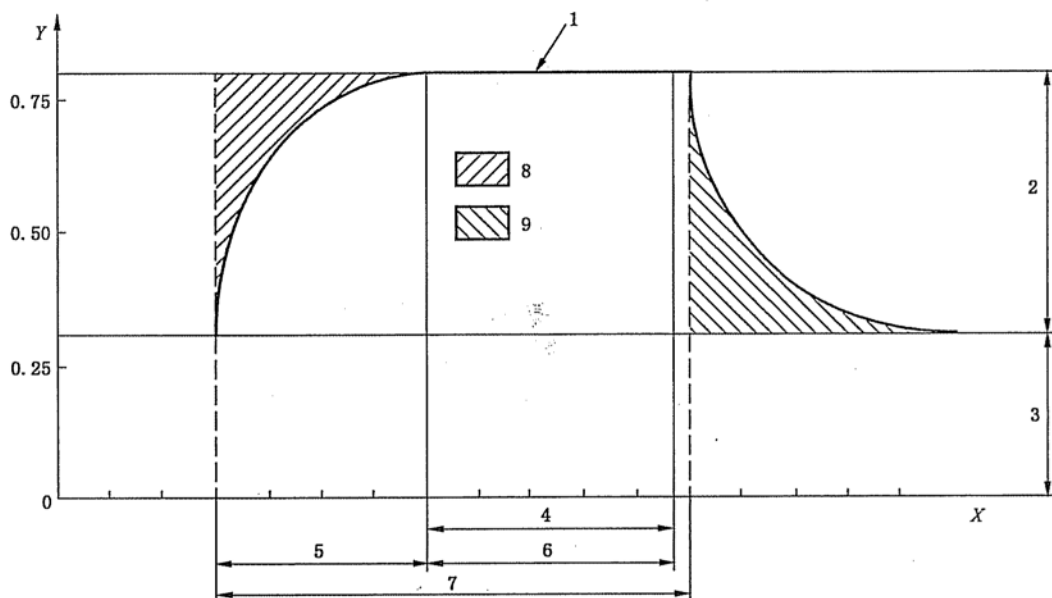
——完整法，用于短时间的高强度工作。

使用上述两种方法的合理性可从下列方法证明：

对于轻微的和中等强度的工作，摄氧量在短时间的工作之后即能达到稳定状态并等于需氧量。

对于高强度工作，需氧量超出了长期最大有氧代谢能力的上限，对于超高强度工作，则超过了最大有氧代谢能力。高强度工作期间，摄氧量不能满足需氧量要求。氧债在工作停止后才得以抵消。因此，测量应包括工作时间和后续的时间。整体法适用于耗氧率超过 60 L/h，相当于每分钟 1 升氧气。

图 2 给出了部分法的实施步骤。由于工作开始后 3 min~5 min 后耗氧率才能达到稳定状态，在不妨碍作业的前提下，呼出气的收集要在 5 min(初始阶段)后进行。工作再继续 5 min~10 min(主要阶段)。气体采集工作既可以是完全采集(例如采用道格拉斯袋)，也可以是定期采集(例如采用气体流量计)。工作停止时结束采集。



X——时间, min;

Y——摄氧率, L/min。

1——需氧量;

2——工作导致的代谢率增加量;

3——基础代谢率;

4——测量时间;

5——初始阶段;

6——主要阶段;

7——工作阶段;

8——亏氧量;

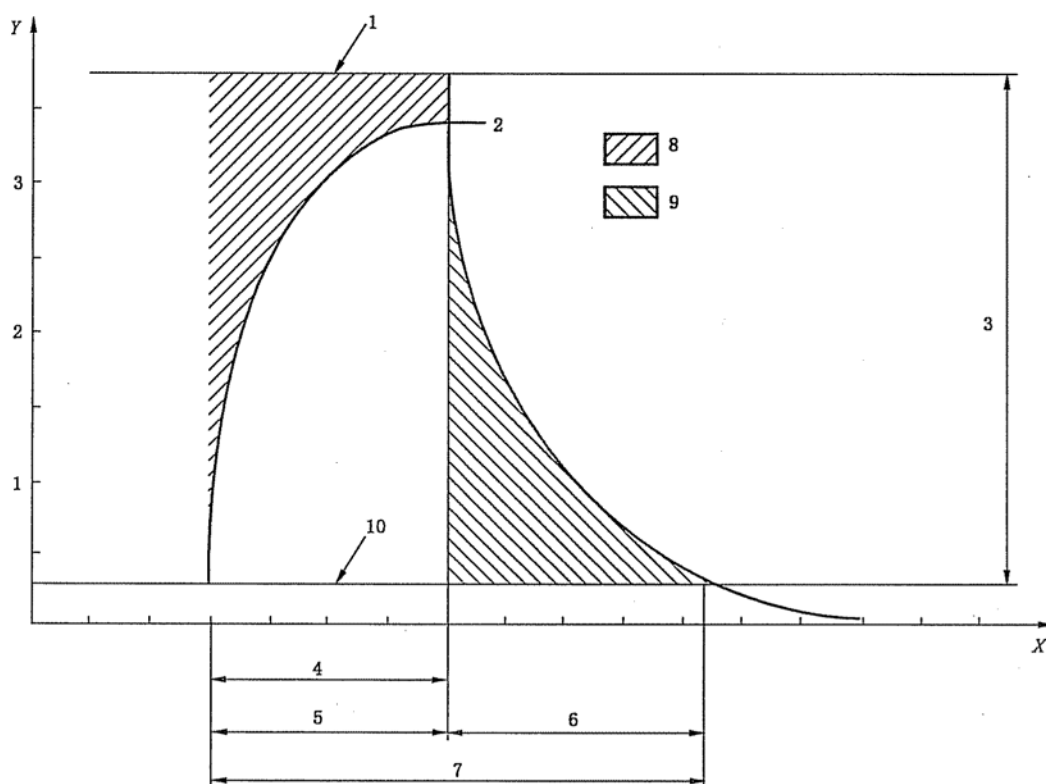
9——氧债补偿。

图 2 用部分法测定代谢率

用整体法(见图 3),呼出气在工作开始后就立即收集,工作继续一定时间后,通常不多于 2 min~

3 min(主要阶段)。在工作结束时,让被试者坐下,测量继续进行直至恢复到休息的数值。在恢复阶段,工作中的氧债逐渐得到补偿。由于测量包括工作过程(主要阶段)和坐着过程(恢复阶段),所测代谢率数值应减去坐姿时的所需代谢率,以取得只与作业有关的代谢率。

有必要记录作业过程(操作与工时研究)和活动的重复率,以便进一步评价结果并与文献中的代谢率数据进行比较。附录 D 中给出了计算代谢率的实例。



- X——时间, min;
Y——摄氧率, L/min。
1——需氧量;
2——最大有氧代谢能力;
3——工作导致的代谢率增加;
4——工作阶段;
5——主要阶段;
6——恢复阶段;
7——测量阶段;
8——亏氧量;
9——氧债补偿;
10——基础代谢率。

图3 用整体法测量代谢率

7.1.2 通过耗氧率测定代谢率

由于人体只能储存很少的氧,所以需要通过呼吸作用不断地从大气中摄取氧。如果不能直接供给氧,肌肉在无直接供氧的情况下只能工作很短的时间(无氧工作)。但是,相对于较长时间的工作,氧化代谢是其主要能量来源。通过测量耗氧率可以确定代谢率。从耗氧率到代谢率的换算中,要引用能量当量(EE)的概念。

能量当量取决于表征代谢作用类型的呼吸商(RQ)。测定代谢率时,采用取值为 0.85 的平均呼吸商,进而能量当量取值为 $5.68 \text{ W} \cdot \text{h/L}(\text{O}_2)$ 通常比较充分。在这种情况下,不要求测量 CO_2 的生成速率。可能出现的最大误差为 $\pm 3.5\%$,但通常误差不超过 1% 。

代谢率可由式(8)、式(9)、式(10)测定:

$$\text{RQ} = \frac{\dot{V}_{\text{CO}_2}}{\dot{V}_{\text{O}_2}} \quad \dots\dots\dots(8)$$

$$\text{EE} = 5.88 \cdot (0.23\text{RQ} + 0.77) \quad \dots\dots\dots(9)$$

$$M = \text{EE} \times \dot{V}_{\text{O}_2} \times \frac{1}{A_{\text{Du}}} \quad \dots\dots\dots(10)$$

式中:

RQ——呼吸商;

\dot{V}_{O_2} ——耗氧率, $\text{L}(\text{O}_2)/\text{h}$;

\dot{V}_{CO_2} —— CO_2 生成速率, $\text{L}(\text{CO}_2)/\text{h}$;

EE——能力当量, $\text{W} \cdot \text{h/L}(\text{O}_2)$;

M——代谢率, W/m^2 ;

A_{Du} ——体表面积,单位为平方米(m^2);由 Du Bois 公式(式 11)给出:

$$A_{\text{Du}} = 0.202 \times W_b^{0.425} \times H_b^{0.725} \quad \dots\dots\dots(11)$$

式中:

W_b ——体重,单位为千克(kg);

H_b ——身高,单位为米(m)。

7.1.3 摄氧量的测定

7.1.3.1 标准状态气体体积换算系数的计算

摄氧量的确定需要测量以下资料或记录:

- a) 个人资料:性别、体重、身高、年龄;
- b) 测量方法;
- c) 测量时间
 - 部分法:主要阶段;
 - 整体法:主要阶段和恢复阶段;
- d) 大气压力;
- e) 呼出气体积;
- f) 呼出气温度;
- g) 呼出气中 O_2 的体积分数,测定 RQ 时需要用;
- h) 呼出气中 CO_2 所占百分数。

气体体积需按标准状态(STPD 状态, $\theta=0^\circ\text{C}$, $p=101.3 \text{ kPa}$, 干燥气体)来计算。由于所收集的气体都是饱和水蒸气(其饱和水蒸气压力是温度的函数),而测量温度为室温条件(ATPS 状态:大气温度与大气压力,水蒸气饱和),换算系数 f 可由式(12)利用水蒸气分压计算(见表 2):

$$f = \frac{273 \times (p - p_{\text{H}_2\text{O}})}{(273 + \theta) \times 101.3} \quad \dots\dots\dots(12)$$

式中:

f ——标准状态气体体积换算系数;

p ——测量的大气压,单位为千帕(kPa);

$p_{\text{H}_2\text{O}}$ ——饱和水蒸气的分压(见表 2),单位为千帕(kPa);

θ ——呼出气的温度(在气体流量计中或用道格拉斯袋时测量的大气温度),单位为摄氏度(°C)。

如果收集到的呼出气在环境中受热高于 37 °C 以上,需用 37 °C 的饱和水蒸气压 6.27 kPa。如果收集到的呼出气温度不高于 37 °C,其饱和水蒸气压见表 2。

表 2 10 °C ~ 37 °C 范围内(间隔为 1 °C)饱和水蒸气压

单位为千帕

温度/°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	1.23	1.31	1.40	1.50	1.60	1.70	1.82	1.94	2.06	2.20
20	2.34	2.49	2.64	2.81	2.98	3.17	3.36	3.56	3.78	4.00
30	4.24	4.49	4.75	5.03	5.32	5.62	5.94	6.27		—

7.1.3.2 呼出气体积按标准状态($\theta=0$ °C, $p=101.3$ kPa, 干燥气体)计算

呼出气标准状态($\theta=0$ °C, $p=101.3$ kPa, 干燥气体)下的体积由式(13)计算:

$$V_{\text{exSTPD}} = V_{\text{exATPS}} \times f \quad \dots\dots\dots (13)$$

式中:

V_{exSTPD} ——呼出气体积,单位为升(L) ($\theta=0$ °C, $p=101.3$ kPa, 干燥气体状态下);

V_{exATPS} ——呼出气体积,单位为升(L) (大气温度与大气压力,水蒸气饱和状态下);

f ——标准状态气体体积换算系数。

7.1.3.3 呼出气体积流量的计算

呼出气体积流量由式(14)计算:

$$\dot{V}_{\text{ex}} = \frac{V_{\text{exSTPD}}}{t} \quad \dots\dots\dots (14)$$

式中:

\dot{V}_{ex} ——单位时间呼出气体积,单位为升每小时(L/h);

t ——采气时间,即部分法中的主要阶段及整体试验中的主要阶段和恢复阶段,单位为小时(h)。

7.1.3.4 耗氧速率的计算

耗氧速率由式(15)计算:

$$\dot{V}_{\text{O}_2} = \dot{V}_{\text{ex}} \times (0.209 - F_{\text{O}_2}) \quad \dots\dots\dots (15)$$

式中:

\dot{V}_{O_2} ——耗氧量,单位为升每小时(L/h);

F_{O_2} ——呼出气中氧的体积分数。

7.1.3.5 CO₂ 生成速率的计算

CO₂ 生成速率由式(16)计算:

$$\dot{V}_{\text{CO}_2} = \dot{V}_{\text{ex}} \times (F_{\text{CO}_2} - 0.0003) \quad \dots\dots\dots (16)$$

式中:

\dot{V}_{CO_2} ——CO₂ 的生成速率,单位为升每小时(L/h);

F_{CO_2} ——呼出气中 CO₂ 的体积分数。

7.1.3.6 呼出气体积的收缩效应

如 RQ 不等于 1,吸入与呼出气体积不相等,可利用式(17)、式(18)考虑收缩效应。

$$\dot{V}_{\text{O}_2} = \dot{V}_{\text{ex}} [0.265 \times (1 - F_{\text{O}_2} - F_{\text{CO}_2}) - F_{\text{CO}_2}] \quad \dots\dots\dots (17)$$

$$\dot{V}_{\text{CO}_2} = \dot{V}_{\text{ex}} [F_{\text{CO}_2} - (1 - F_{\text{O}_2} - F_{\text{CO}_2}) \times 0.380 \times 10^{-3}] \quad \dots\dots\dots (18)$$

7.1.4 代谢率的计算

7.1.4.1 部分法

利用式(5)可从摄氧量及能量当量确定代谢率。