

24

工业节能

陈铭诤 主编



国防工业出版社

工业节能

陈铭净 主编

国防工业出版社

内 容 简 介

本书着重从工业生产用能的物理过程来讨论生产工艺与用能的关系，从而根据生产过程的用能本质来分析工业节能的途径。通过掌握这些基本内容，可以根据本单位的具体情况，抓住主要影响因素，制定切实可行的节能规划、方案。书中也介绍了具有代表性的节能措施，其中有的是行之有效的节能方法，有的是节能技术的发展方向。书中提供了许多用能数据，这些数据在研究、分析和制定节能措施时很有参考价值。

本书可供节能管理部门的技术干部以及从事工业用能方面的科研、设计人员和大专院校师生参考。

工 业 节 能

陈铭铮 主编

国防工业出版社出版、发行

(北京市车公庄西路老虎庙七号)

新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印刷

850×1168 1/32 印张13³/₄ 363千字

1989年3月第一版 1989年3月第一次印刷 印数：0,001—2,680册

ISBN 7-118-00389-1/TK10 定价：7.00元

前 言

工业节能和管理、设备、工艺、原料、材料以及整个生产体系等许多方面有关，既要有宏观的、符合科学规律的技术方案，也要有切实可行的措施。如果以每项产品来讨论节能，则会因工业产品种类如此繁多而不胜其烦，而且节能的基本道理又会不断重覆。本书则主要从工业生产用能的物理过程来讨论生产与用能的关系，从而分析工业节能的途径。

节能必须分析用能的情况。在导论中就介绍与分析及考核用能有关的一些概念，其中又主要介绍能的品位，因为节能工作的深入一步，必然涉及到热力学第二定律。焓（有效能）分析是评价合理用能，揭示本质的重要方法，对焓作了重点介绍。能量平衡是考核企业用能的基础性工作，在导论中也涉及到有关概念。

我国工业生产现状是冶金工业为我国第一耗能大户，其中有85%是用于钢铁工业。因此第二章中的大部分篇幅是从钢铁冶金生产全过程中的主要工序——烧结、炼铁、炼钢、初轧、轧钢等来分析用能与节能的物理内容与相应的措施。有色金属冶炼中，铝、铜、铅、锌耗能占有色金属总能耗的90%，本章中关于有色冶金则以铝、铜的冶炼工序节能为代表。对于冶炼中的电热设备和电解设备的节电放在第六章中统一分析。冶金工业中余能、余热的回收利用，因其品位较高、数量较多，潜力大，专门有一节介绍这方面先进技术。

化学工业（包括石油化工）是我国第二耗能大户，又是产品种类最多的工业部门。综合化工生产的基本用能过程，着重从合理用能的方式、工艺过程节能的基本方向和方法来讨论节能，可以抓住本质，能够系统化和深入一步。化学工业的反应过程及相应的工艺流程是比较复杂的，因此操作的控制是化学工业节能的

重要方面，节能工作的深入更会注意到这一特点。

建材生产用能的特点是窑炉为主要的生产设备。在第四章中则以窑炉的类型为对象来讨论用能过程及节能方法。能量平衡是分析窑炉耗能的有效方法，从而可以深入到化学反应、传热、相变等基本过程去了解能源浪费的原因和应当采取的措施。能量平衡的计算方法成为这一章的主要内容。

前面几章对我国主要耗能工业部门分别作了介绍。从整个工业领域来看，工业用能的主要形式就是功（电）和热。综合起来，就带有普遍性的用电和用热的节能作专门论述，其他工业部门就不再作细致讨论。以蒸汽或热水作为加热工质是许多工业，如纺织、造纸等轻工业用的最多的供热方式。因此在第五章中专门叙述工业锅炉节能。锅炉从设计上如何考虑节能是锅炉制造厂家的事，这里主要是从工业锅炉用户使用和技术改造上来讨论。

各个工业部门都要用电，在第六章工业节电中，把工厂的配电系统、电力拖动、电热设备、电解设备以及照明设备的节能分别作了讨论。先介绍节电的电工原理，再讨论节电方法。发电系统和工业部门用电没有直接关系，因此发电的节能没有包括在这一章中。

一项设备、一个工艺流程的节能很重要，但整个企业中电和热的综合利用也是工业节能的发展方向，这就是称之为总能系统的节能。热电并供是其中最重要的方面。因此在第七章中对热电并供作了专门介绍。

本书各章编写的分工为：第一章，陈铭净、何耀文；第二章，徐业鹏；第三章，何耀文；第四章，李应开；第五章，陈铭净；第六章，吕砚山；第七章，陈铭净。

目 录

第一章 导论	1
第一节 我国的能源消费结构	1
第二节 分析与评价能源有效利用的一些有关概念	4
第三节 烟(有效能)	14
参考文献	32
第二章 冶金工业节能	33
第一节 冶金工业用能综述	33
第二节 钢铁冶金工序节能	47
第三节 有色冶金工业节能	92
第四节 冶金工业余能的回收和利用	102
参考文献	123
第三章 化学工业节能	124
第一节 我国化工生产用能概况	124
第二节 合理用能的原则与方式	127
第三节 工艺过程节能	170
第四节 化工节能的重要措施	226
参考文献	240
第四章 建材工业节能	243
第一节 建材工业能源利用概况	243
第二节 我国建材工业耗能高的原因分析	244
第三节 建材工业窑炉的能量平衡(热平衡)计算	253
第四节 硅酸盐工厂降低热耗的途径	278
参考文献	293
第五章 工业锅炉	294
第一节 工业锅炉的耗能	294
第二节 锅炉的燃烧	297
第三节 影响锅炉效率的参数	300

第四节 提高锅炉效率的装置	311
第五节 锅炉检查、维护与节能	322
参考文献	332
第六章 工业节电	333
第一节 电能在工业生产中的应用	333
第二节 耗电量和节电途径分析	340
第三节 工厂配电系统节电	351
第四节 电力拖动节电	359
第五节 电阻设备节电	375
第六节 电解设备节电	391
第七节 照明节电	395
参考文献	404
第七章 热电并供与联合循环	405
第一节 热电并供	405
第二节 联合循环	428
参考文献	432

第一章 导 论

第一节 我国的能源消费结构

能源的消费数量和使用情况标志着人类社会经济发展的规模和人民的生活水平。

20 世纪以来, 世界上的能源消费有很大增长。1900 年世界总的能源消费量约为 22.7×10^{15} kJ (775 Mt 标准煤), 每人年平均消费量为 14.5×10^6 kJ (493 kg 标准煤)。到 1979 年, 总消费量增长到 289×10^{15} kJ (9.86 Gt 标准煤), 每人年平均消费量约为 65.7×10^6 kJ (2241 kg 标准煤)。预测到 2000 年, 总消费量将超过 586×10^{15} kJ (20 Gt 标准煤), 每人年平均消费量可达到 117×10^6 kJ (4000 kg 标准煤)。除了消费量的增长外, 能源消费的构成也发生了变化, 即由以煤为主的时代改变为以石油、天然气为主的时代, 未来新能源将占有一定的数量。

中华人民共和国成立以来, 我国能源的生产和消费的增长速度是很快的。1984 年我国一次能源的总产量为 22.8×10^{15} kJ (778 Mt 标准煤), 其中原煤产量 789 Mt, 石油 114 Mt, 天然气 12.4×10^9 m³, 水电 86.8×10^9 kw·h; 为 1949 年总产量的 33 倍。我国能源的进、出口量很少, 1984 年能源的消费量为 20.7×10^{15} kJ (707 Mt 标准煤)。

为了比较我国与世界各国能源生产、消费以及利用的情况, 下面引出一些数据供参考。表 1-1 为 1984 年几个国家的能源消费量及构成^[1-1]。表 1-2 为几个国家在七十年代和 1983 年的按部门消费的比例^[1-2, 1-3]。表 1-3 给出了几个国家的能源利用率^[1-2]。表 1-4 给出了 1975 年世界各个国家和地区的能源生产和消费总量, 人口数量以及 1976 年的年人平均消费量的情况^[1-4]。

表1-1 1984年几个国家的能源消费

	美	苏	中	日	西德	英	法	世界平均
一次能源消费量 10 ¹⁵ kJ (100Mt标准煤)	77.8 (26.5)	52.8 (18)	20.7 (7.07)	17.6 (6.0)	11.0 (3.78)	9.1 (3.12)	8.0 (2.73)	30.2 (10.3)
消费构成%								
石油	42.1	36.2	17.7	59.9	42.0	43.1	45.3	39.5
天然气	24.4	34.4	2.3	9.3	15.6	24.8	12.3	19.6
煤	23.3	25.3	75.1	18.8	31.7	25.2	13.2	30.3
水电	5.1		4.9	4.1	1.8	0.7	5.0	6.7
核电	4.8	1.8	—	7.9	7.9	6.2	22.2	3.9
其他	0.2	2.3	—	—	1.0	—	2.0	—

表1-2 几个国家能源消费按部门分配比例^①(%)

	美		英		日		中
工 业	32.0	27.1	29.1	31.0	38.4	47.0	51.0
交通运输	25.2	35.0	14.5	25.8	20.0	20.1	7.9
民用与商业	24.5	34.7	26.1	40.6	16.1	27.9	16.3 ^②
其 他	18.3		30.3		25.5		24.8
非能用途		3.3		2.7		5.0	
统计年份	1970	1983	1973	1983	1975	1983	1978

① 七十年代的分配按一次能源的使用，“其他”一项中包括一些损失。1983年为使用终端的消费。两者统计数据引自不同出处。

② 包括农业用能。

表1-3 几个国家的能源利用率%

	美	英	日	中
总利用率	51	40	48	30
工 业	78	67	77	39
(电力)	(31)	(27)	(36)	(27)
交通运输	25	20	25	20
民 用	80	70	80	20
统计年份	1970	1973	1975	1978

表1-4 世界各个国家和地区的能源生产、消费、年人均耗能

	中	南亚 东南亚	日	美	苏	加	西欧	东欧	拉美	中东	澳大利亚	非洲
能源产量 (1975) 10^{16} kJ	16.7	9.34	1.05	57.1	46.3	7.54	18.7	13.4	11.8	42	3.27	12.8
能源消费量 (1975) 10^{16} kJ	16.2	10.8	14.2	72.3	42.8	8.16	50.3	16.8	12.5	4.06	3.06	5.02
人口 (1975) 10^8	839	1,306	111	214	255	23	367	106	324	109	21	292
年人均耗能 (1976) 10^6 kJ/人	20.5	8.79	134	355	176	367	143	165	40.6	40.2	151	18.4

由以上的数据对比和分析，可以看到当前我国能源消费和使用的特点。

1. 能源消费构成以煤为主。我国以煤为主要能源的特点至少要持续到本世纪末。这是一个很重要的特征。煤和油相比有许多不利因素：煤是固体，输送不方便、它的分子结构复杂，反应速度慢，能量利用率低，杂质多，直接燃烧对环境污染较大。这样在提高能源有效利用方面带来一些困难。

2. 分部门能源消费构成中，工业耗能占总耗能的一半（不包括火力发电排放到环境中的热）。按所占比例来说，比世界所有工业发达国家都高了许多。而工业耗能中重工业耗能比例大，冶金、化工用能最多。

3. 运输业和民用能源比例小。这几年我国交通运输的耗能所占总消耗的百分数，仅为同期工业发达国家百分数的1/3~1/2。绝对数量就更少了。比例数小是反映了我国交通运输的紧张，所以近几年一直强调发展交通运输业。一般工业发达国家民用耗能占总耗能的25%左右，我国则占12%左右。我国广大农村生活

用能主要靠非商品能源，森林植被遭到破坏，秸秆不能还田，影响自然生态环境。一些轻工业部门的原料来源受到影响。

4. 能源利用率低。这主要是工业部门管理不善，有些设备陈旧，工艺落后，一些耗能高的中小企业占比例较大（以后各章中都有介绍）。另外，由于我国能源价格偏低，耗能高在产品的经济效果上影响不大，节能还不是考核企业水平的主要指标；再加上有些节能工作要有一笔较大的投资；致使许多企业并不重视节能工作。

5. 每人年平均耗能低。1983年我国平均每人消费商品能源为 $19.6 \times 10^6 \text{kJ}$ (670kg 标准煤)，这个数字仅仅是世界平均水平的 $1/4$ 多一点。预计到2000年，我国平均每人消费商品能源为 $29.3 \times 10^6 \text{kJ}$ (1000kg 标准煤)。这也是一个重要特征，应当千方百计地用好这些可贵的能源。

因此根据我国的具体情况，工业耗能是主要大户，能源利用率又低，要在本世纪末实现能源生产翻一番，工农业生产总值翻两番的目标，工业节能就显得非常重要。

第二节 分析与评价能源有效 利用的一些有关概念

我们在考虑采用节能技术措施或研究比较节能效果时，一定要对考查的对象进行分析，下面介绍的内容会对分析问题有一定帮助。

一、能的品位

直接来自自然界的能源有许多种，一般通称为一次能源；其中薪柴、煤、石油、天然气、风力、水力等已经利用了多年，称为常规能源；而太阳能、地热、海洋能、核能是近些年来开始利用的，称为新能源（有人把风力也看作新能源）。常规能源中的煤、石油、天然气都是从化石演变而成的燃料，所以也有时统称

为化石燃料。目前及以后一段时期内，化石燃料是人类生产活动的主要能源。

人类在生产生活中需要从一次能源中得到各种形式的能。能量守恒定律告诉我们，能量不能无中生有，也不能白白消失，各种能量的形式是可以互相转化的。但是各种形式的能之间的转化有不对等性，即有难易之分。难就是要付出一定的代价，不能把这种形式的能的全部数量以任意的程度转化为另一种形式的能。容易就是可以全部或多数的这种形式的能方便地转化为另一种形式的能。因此就有了能的品位的概念。

各个工业部门的生产过程中都需用电（或机械功）和热，图1-1给出了各工业部门用电和热的数量比（纵坐标）和用热数量（横坐标）的典型情况。但是电和热是能的两种不同形式，它们的品位也是不一样的。

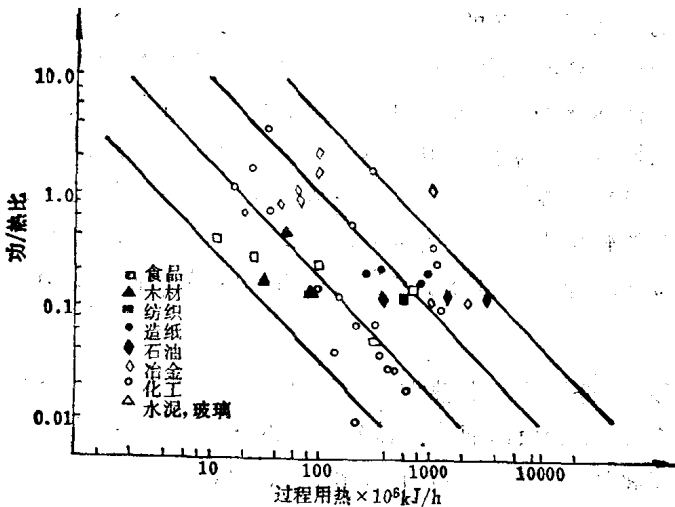


图1-1 各工业部门的用电与用热

生产过程中使用最多、最广泛的能的形式是热。人们可以从自然界中得到热的途径有多种，太阳能、地热可以直接供热，草、木、秸秆等以及有机物产生的沼气可以在空气中燃烧把化学能转化为热，核能则通过反应堆转化为热。但是人类生产和生活中大

多数的用热是用化石燃料与空气一起燃烧由化学能转化而来。这种取得热的方法最常见的是用各种各样的炉子。为了有效地利用热，在炉子中我们可以使燃烧很完全，对外散热损失很少，炉子排烟温度尽可能接近大气温度，那么在理论上这个炉子的能量转化效率可以接近百分之百。

热除了被直接使用外，又可以用化石燃料或其他热源通过热机经过热力学循环转化为机械功。在热机中，我们也可以使燃烧很完全，传热效率很高，对外散热损失很少，热机的排烟温度尽可能的低，但是理论上，热机的能量转化效率只能接近于经典热力学中卡诺循环的理想热效率。这是由于根据热力学第二定律，完成热机的热力学循环必须有一部分热传给低温热源，即由高温热源得到的热只能有一部分转化为机械功。所以热转化为机械能就难，而反过来机械能可以全部转化为热。例如热学中介绍的测定热功当量的方法，即著名的焦耳试验，就是由机械功全部转化为热。因此机械能与热相比是高品位的能。化石燃料的化学能转化为热容易，而热转化为化学能就难，因此化学能的品位比热高。

对于热源本身来说，根据热力学第二定律，由热转化为机械能，当低温热源温度一定，高温热源的温度越高则热机的热效率越高，即热转化为功的比例越多。因此温度高的热源比温度低的热源品位高。理论上由高温热源可以得到的最大功 w_{\max} 为

$$w_{\max} = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) Q \quad (1-1)$$

其中 T 和 T_0 分别为高温热源和周围环境的温度（即作为低温热源的温度）， Q 为由高温热源传给热机的热量，见图 1-2。

如果将图 1-2 的热机反向工作，热机成为一个热泵，由外界输入功将热由低温热源传递到高温热源。理论上，当输入功为一定时，则高温热源所得到热的最大值 Q_{\max} 为

$$Q_{\max} = \frac{T}{T - T_0} w \quad (1-2)$$

其中 w 为外界输入的功。

现在考查向一个被加热体系温度为 T_2 的加热方式，高温热

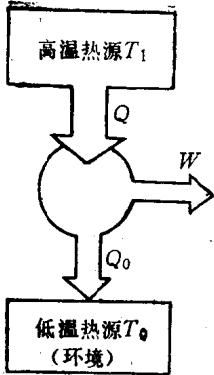


图1-2 热机的热力学循环

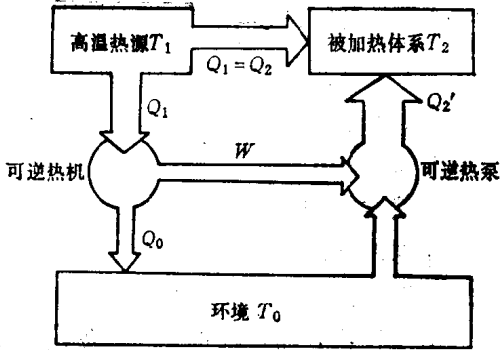


图1-3 可逆热机—可逆热泵系统供热

源温度为 T_1 ，环境温度为 T_0 。一种方法是由高温热源向被加热体系直接传热，传热量为 Q_1 ，见图 1-3。另一种方式是通过可逆热机—可逆热泵系统供热。如果高温热源向可逆热机的传热量仍为 Q_1 ，则得到的功为

$$w = \frac{T_1 - T_0}{T_1} Q_1 \tag{1-3}$$

以得到的功 w 再驱动可逆热泵，使加热体系所得的热（温度为 T_2 ）则为

$$Q_2 = \frac{T_2}{T_2 - T_0} w = \frac{T_2}{T_2 - T_0} \cdot \frac{T_1 - T_0}{T_1} Q_1 \tag{1-4}$$

由于 $T_1 > T_2$ ，则 $Q_2 > Q_1$ 。例如 $T_1 = 1000^\circ\text{C}$ ， $T_2 = 150^\circ\text{C}$ ， $T_0 = 25^\circ\text{C}$ ，则 $Q_2 = 2.59Q_1$ 。 Q_2 比 Q_1 多出来的部分是由于机械功的作用能使环境中的一部分热也给了被加热体系，尽管 $T_0 < T_2$ 。这样对于高温热源来说，用同样数量的 Q_1 ，以两种不同的方式，可以获得温度为 T_2 的热的数量不同。即高温热有条件通过热机-热泵系统得到数量更多的低温热，因此高温热与低温热是不等价的。由此看来，一个较低温度的用热过程，用高温热源（或燃料燃烧后得到高温）直接传热方式供热，即使这个传热过程没有任何损失（包括燃料完全燃烧），这部分热的利用也不是很有效的。没有发挥高温热作为较高品位的能的作用。

水力，风力在自然界中以机械能的形式（势能、动能）存在，它们可以通过水轮机、风车直接输出机械功，因此水力、风力是属于高品位的能源。由于这种从自然界能源中得到机械功的方式容易、设备简单、又是可再生能源，因此人类早期的历史上就开始应用了。

当然水力的利用有一定地理条件的限制。风力由于在单位空间或面积内给出的功率低和气候条件的约束，不容易得到量大的恒定的能量供应。不过这是不同于能的品位概念的另外的问题。

电是转化和输送都很方便的能的形势，电能通过电动机很容易地转化为机械能，转化效率也很高，电能通过电灯转化为光。此外电加工工艺、电化学工艺等都广泛地应用电能。电能可从其他形式的能转化而来，如燃料电池、光电池、水力发电、风力发电等，但当前的电能主要来源是依靠化石燃料、通过热机转化为机械功再带动发电机。因此电是高品位的能源，来之不易，在用电方面的节约就更加重要。

关于能的品位的概念在下面讨论的内容时会得到更为确切的含义。

二、体系（或系统）

把科学原理用于工程分析中，必须把考虑的对象能够清楚地确定下来是很有必要的。我们把研究的对象的一些物质或物体作为一个特定的集合或它们所占有空间的某一个区域来定义为体系，或称为系统。这样体系就形成了一个边界，体系边界以外的都称为外界。这个边界可以是实际的壁面，也可以是所确定的研究对象所划定的空间范围。有时我们确定的区域中包括场（例如电场、磁场），也可能两个体系占有同样的空间。体系有的很简单，有的很复杂，但是不论哪一种情况，体系所包括的内容都是由分析者为研究问题的需要为目的来确定的，因此体系的确定很重要。在实际工作中，对某一工程技术来分析节能效果时，有时引起的争端常常是由于没有弄清楚所考查的体系不同，或者是体系

与外界的相互作用没有弄清楚。

一般体系，可以分为闭口体系，开口体系和孤立体系。闭口体系是体系的物质不能穿过体系的边界，即体系和外界不发生物质的交换，因此体系的质量是恒定不变的。但是闭口体系能够以热或其他能的形式与外界进行能量交换，体系对外界作功或外界对体系作功。开口体系则是物质可以通过边界出入，同时也会通过边界与外界有能量的交换和功的输入或输出。孤立体系，则是体系和外界完全没有任何作用，既没有物质通过边界，又与外界没有能量交换以及功的输入与输出。常常有这样的情况，同一个基本定律，体系的形式不相同，表达式也有所不同，在开口体系应用的方程式不能套用到闭口体系。后面将介绍三个基本定律在开口体系和闭口体系的表达方式，以提醒注意。

三、热力平衡

分析工业节能的问题常常是要考查体系与外界的传热和功的相互作用，因此要用到体系热力平衡的概念。

当体系处在外界的环境中，如果体系的状态不再发生变化，即它的宏观性质不随时间而变化，那么这个体系是处于平衡的状态，也就是没有不平衡的位势迫使体系状态发生变化。这种迫使体系状态变化的位势可以是机械的、热的、化学的或电的等等，因此体系的平衡分成几类。一种叫作体系的机械平衡，是指一个体系如果它的内部没有不平衡的力，同时作用在边界上的力被外力所平衡。一种叫做体系的热平衡，即体系的温度到处均匀一致，而且等于外界的温度。一种叫作体系的化学平衡，是指体系内的化学成分不再发生化学变化（如果体系中物质是复相的则应处于相的平衡态）。一种叫作体系的电平衡，即体系没有电的位势梯度。一般在热力学的研究范围内不包括电场和磁场的作用，一个体系满足机械平衡、热平衡和化学平衡的三个条件则称这个系统为热力平衡。

当体系处于热力平衡态，则体系的所有状态参数不再变化，

即这个体系的所有状态参数都各有其唯一确定的量值。平衡是经典热力学中一个重要而基本的概念，这是一个抽象的概念，实际的热力体系从来都不是处于严格的平衡状态。在分析实际工程技术问题时，要弄清楚在哪些情况下一个体系可以简化看成为接近于热力平衡，过程可以看作准平衡态过程，可以用热力学的理论去分析运算。而有些情况下是远离热力平衡状况，仅用工程热力学的知识是不够的或者有的并不适用。

四、质量守恒原理在几种体系中的表达形式

质量守恒以及下面提到的热力学第一、第二定律都是大家所熟悉的，没有必要重复论述。这里仅仅把在三个体系形式中的具体表达形式提一下，以引起具体应用时的注意。

在工业节能所讨论的范围内认为质量守恒原理与能量守恒定律无关，即还涉及不到爱因斯坦著名的公式 $E = mc^2$ (E 、 m 、 c 分别表能量、质量和光速)。

对于任何一个体系有

加入的质量 - 带走的质量 = 体系内质量的变化

对于孤立体系可表示为

$$dm_e = 0$$

即在孤立体系内不会有质量的增加或缩减。

对于闭口体系可表示为

$$dm = 0$$

即闭口体系和外界没有质量的交换。

对于开口体系可表示为

$$\sum m_{in} - \sum m_{out} = \Delta m_{system}$$

即出入开口体系边界的质量的总和等于开口体系内质量的变化。

对于定常流动的开口体系则可表示为

$$\sum m_{in} - \sum m_{out} = 0$$

即定常流动开口体系内的质量没有变化。