



甘肃农业大学



# 食品冷冻新技术





## ◆ 冷冻干燥技术

冷冻干燥又称真空冷冻干燥、冷冻升华干燥、分子干燥等。它是将含水物质先冻结至冰点以下，使水分变为固态冰，然后在较高的真空度下，将冰直接转化为蒸汽而除去，物料即被干燥。





## ■ 冷冻干燥技术的特点

- ✓ 冷冻干燥是在低于水的三相点压力(609Pa)下进行的干燥。其对应的相平衡温度低，因而物料干燥温度低，且处于真空状态下。特别适用于热敏食品以及易氧化食品的干燥，可以保留新鲜食品的色、香、味及维生素C等营养物质。
- ✓ 由于物料中水分存在的空间，在水分升华以后基本维持不变，故干燥后制品不失原有的固体框架结构，保持原有的形状。
- ✓ 由于物料中水分在预冻结后以冰晶形态存在，原来溶于水中的无机盐被均匀地分配在物料中，而升华时，溶于水中的无机盐就地析出，可避免了一般干燥方法因物料内部水分向表面扩散所携带的无机盐所造成的表面硬化现象。因此，冷冻干燥制品复水后易于恢复原有的性质和形状。
- ✓ 因物料处于冰冻的状态，升华所需的热可采用常温或温度稍高的液体或气体为加热剂，所以热能利用经济。干燥设备往往无需绝热，甚至希望以导热性较好的材料制成，以利用外界的热量。
- ✓ 由于操作是在高真空和低温下进行，需一整套高真空获得设备和制冷设备，投资费和操作费都大，因而产品成本高。





## ■ 冷冻干燥的原理

水的相平衡：物质有固、液、汽三态。物质聚集态的变化取决于分子重新排列、密度突变及其它物理性质的变化。物质的相态转变过程可用相平衡图表示（图3-1为水的相平衡图）。图中AB、AC、AD三条曲线分别表示冰和水蒸气、冰和水、水和水蒸气两相共存时其压力和温度间的关系。分别称为升华、溶解和汽化曲线，此三条曲线将图面分成三个区，分别称为固相区、液相区和气相区。箭头1、2、3分别表示冰升华成水蒸气、冰溶化成水、水汽化成水蒸气的过程；曲线AD的顶端有一点K，其温度为 $374^{\circ}\text{C}$ ，称为临界点。若水蒸气的温度高于临界点 $374^{\circ}\text{C}$ 时，无论怎样加大压力，水蒸气也不能变成水。三曲线交点A，为固、液、汽三相共存的状态，称为三相点，其温度为 $0.01^{\circ}\text{C}$ ，压力为 $610\text{Pa}$ 。对于一定的物质，三相点是不变的，即具有一定的温度和压力。

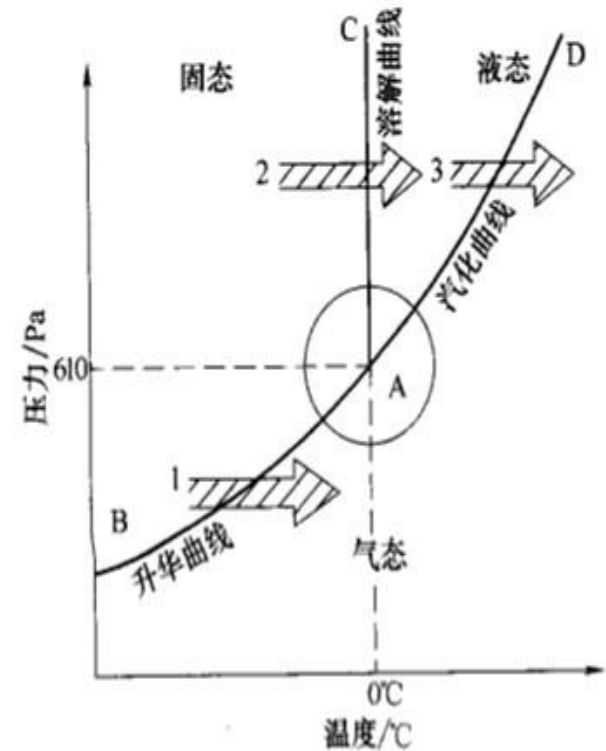


图 3-1 水的相平衡图





## ■ 冷冻干燥的原理

冰的压温图：升华现象是物质从固态不经液态而直接转变为汽态的现象。只有在压力低于三相点压力以下，升华才有可能发生。升华干燥即基于此原理。当压力高于三相点压力时，固态转变为气态必须经过液态方能达成。随着物质聚集态的变化，由于相内分子重新排列要消耗能量，故需要放出或吸收相变潜热。因此，物质聚集态的变化是根据物质的物理性质，由一态转变为另一态时的转换条件是在一定的温度下进行的。在转变过程中，要发生体积变化及热效应。升华相变的过程一般为吸热过程，这种相变潜热称为升华热。

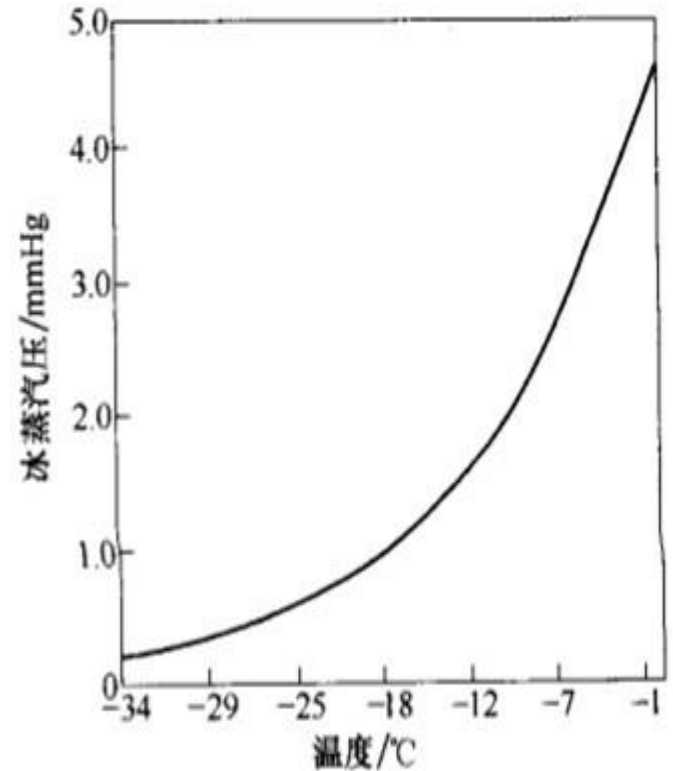


图 3-2 冰的蒸汽压与温度的关系

1mmHg=133.322Pa





## ● 物料中水分的冻结

- 纯水结冰时体积要增加9%。纯水结冰的温度随条件的变化而不同。若先有晶核存在，结冰过程可在略低于0℃（常压下）下开始。但若无晶核则在冻结之前需先冷却至-3.9℃。对含有杂质的水冻结的温度为-2.5~-6℃。
- 生物组织中的结合水是指与生物聚合物有紧密约束的水分，它具有与主体水分极不相同的特性。如某些结合水分是通过氢键的作用与生物聚合物的极性基团相连接的。但也有结合水分存在于非极性基团的周围形成被覆的结构水分。
- 也有将以无定型状态凝固的水分归之为结合水分。如血浆冷冻干燥时，血浆中一部分水分在冷却时以无定型的状态出现或称为玻璃体水分。生物物料的冻结过程中存在着一种玻璃体状态的过渡。而这种玻璃体状态过渡又与冷却速度等条件有关。冷却速度越快，玻璃体过渡越明显，所得无定型状态水分越多。反之，冷却越慢，玻璃体过渡越不明显，称为反玻璃体化现象。





## ● 物料中水分的冻结

➤ 生物物料冷冻时，组织细胞会受到破坏，且细胞的破坏与冷却速度有关。

冷却速度对生物细胞的破坏表现为两种情况：

✓ 机械效应：是细胞内部冰晶生长的结果。当细胞悬浮液缓慢冷却时，冰晶开始出现于细胞外部的介质，细胞会逐渐脱水。当快速冷却时与此相反，细胞内发生结晶。若冷却非常急速则形成的晶体可能极小，若超速冷却则出现细胞内水分的玻璃体化现象。

✓ 溶质效应：冷却初期细胞外的冻结会产生细胞间液体的浓缩，随之产生强电解质和其它溶质增浓，细胞内对离子的渗透性增加，因而细胞外离子便进入细胞并改变细胞内外的pH。

生物组织的冻结，起主要作用的过程是两方面—冰晶的成长和细胞间液体的浓缩。因此，能促进生物组织中无定型相态生长并使之稳定的条件都对细胞免受破坏有利。但无定型相态的出现对生物组织的干燥是不利的。





## ● 物料中水分的冻结

- 在生物物料的冻结过程中，所形成的冰晶类型主要取决于冷却速度和冷却温度以及物料浓度。在 $0^{\circ}\text{C}$ 附近开始冻结时，冰晶呈六角对称形，在六个主轴方向向前生长，同时还会出现若干副轴，所有冰晶连接起来，在溶液中形成一个网络结构，随着过冷度的增加，冰晶将逐渐丧失容易辨认的六角对称形式，加之成核数多，冻结速度快，可能形成一种不规则的树枝形，它们有任意数目的轴向柱状体，而不像六方晶型那样只有六条。最高冷却速度时获得渐消球晶，通过重结晶可以再完成其结晶过程。
- 生物物料的结晶型式对冷冻干燥速率有直接影响。冰晶升华后留下的空隙是后续冰晶升华时水蒸气的逸出通道，大而连续的六方晶体升华后形成的空隙通道大，水蒸气逸出的阻力小，因而制品干燥速度快；反之，树枝形和不连续的球状冰晶通道小或不连续，水蒸气靠扩散或渗透才能逸出，因而干燥速度慢。  
因此，仅从干燥速率角度来说，以慢冻为好。





## ■ 冷冻干燥的装置

按装置的结构技术特征冷冻干燥装置系统可分为制冷系统、真空系统、加热系统、干燥系统等；而按使用目的来分，则可分为预冻系统、蒸汽和不凝结气体排除系统、供热系统以及物料预处理系统等。

✓ 应避免物料因冻结预冻系统：物料的预冻直接影响产品的品质。冷冻干燥物料预冻可采用多种方法进行，包括气流式、液体浸泡式、接触式、液氮法、液态二氧化碳法、真空冻结式等。冻结须具备如下的条件和技术：

✓ 而引起的破坏和损害。

✓ 解除共晶混合液（即低共熔混合液）的过冷度，确定低共熔温度以及防止冻结层熔解。

✓ 控制冻结过程的条件，使生成的纯冰晶的形状、大小和排列适当，以利于干燥的进行，又可以获得质量好的多孔性制品。

✓ 冻结体的形状要好。





## ■ 冷冻干燥的装置

升华的水分须迅速排除，一般情况下采用低温冷凝器（冷阱）。冷阱内的温度必须保持低于被干燥物料的温度，使物料冻结层表面的蒸汽压大于冷阱内的蒸汽分压。物料中升华的水蒸气在冷阱中大部分结霜除去后，还有部分的水蒸气和不凝结气体必须通过真空泵抽走。这就构成了冷阱—真空泵的组合系统。

✓ 带有冷阱的真空系统的特点：利用冷阱除去大量水蒸气，避免真空泵抽气的负担过重和真空泵的泵油变质。

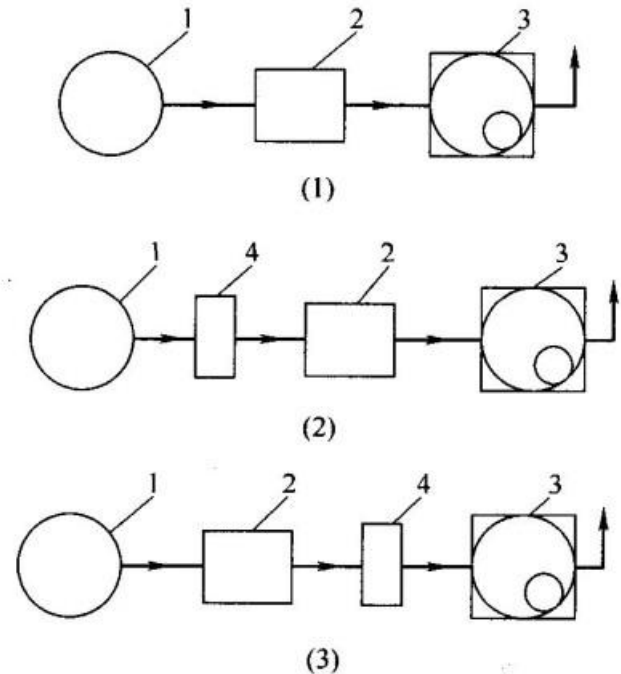


图 3-3 带有冷阱和机械真空泵的系统

(1) 机械真空泵 (2) 中间增压泵-冷阱-机械真空泵

(3) 冷阱-中间增压泵-机械真空泵

1—干燥箱 2—冷阱 3—机械真空泵

4—罗茨泵





## □ 蒸汽喷射泵的真空系统

- ✓ 采用多级水蒸气喷射泵系统具有抽吸大量水蒸气的 ability，无须配备冷阱，也可达到升华干燥所要求的真空度。
- ✓ 直接采用蒸汽喷射泵的真空系统中，蒸汽喷射升压泵相当于中间增压泵；若在多级喷射泵与干燥器之间放置冷阱时就可利用冷阱先除去大量水蒸气，毋需蒸汽升压泵直接与多级蒸汽喷射泵相联结。除上述真空系统外，还有中间增压泵—水力喷射泵，中间增压泵—水环泵，水蒸气喷射泵—水力喷射泵，水蒸气喷射泵—水环泵等。

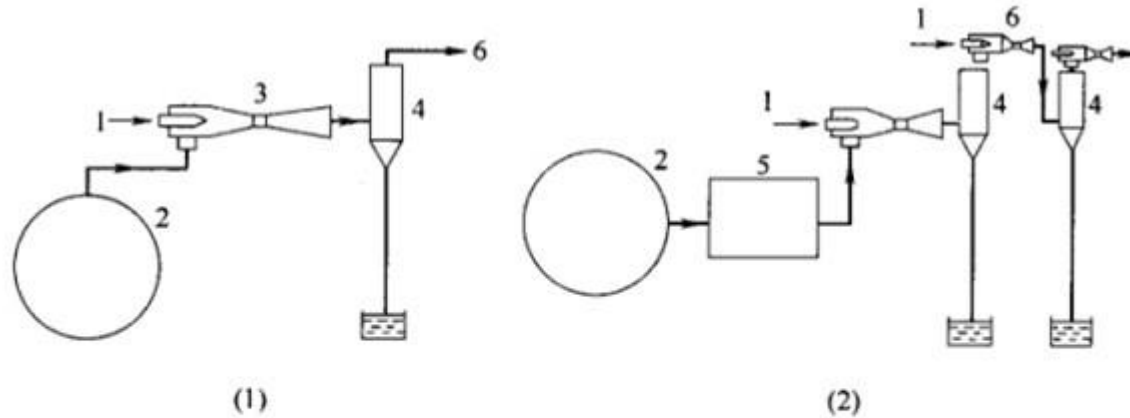


图 3-4 采用多级蒸汽喷射泵的真空系统

(1) 蒸汽喷射泵系统 (2) 冷阱和蒸汽喷射泵的组合

1—工作蒸汽 2—干燥箱 3—蒸汽喷射升压泵 4—冷凝器 5—冷阱 6—多级蒸汽喷射真空泵





## □ 供热系统

为使制品冻结后水分不断升华需供热系统供给干燥器内冰的升华潜热及冷阱内积霜的熔解热。

冷冻干燥的传热方式主要采用传导和辐射两种。冷冻干燥主要采用传导加热的系统，是利用载热体通过加热板来实现。一般采用的热源有电流、煤气、石油、天然气和煤等，常用的载热体有水、水蒸气、矿物油、乙二醇等。也有用水蒸气作为中间热源，以水作为载热体，采用两者直接混合实现其热交换。常用的喷射混合换热法。

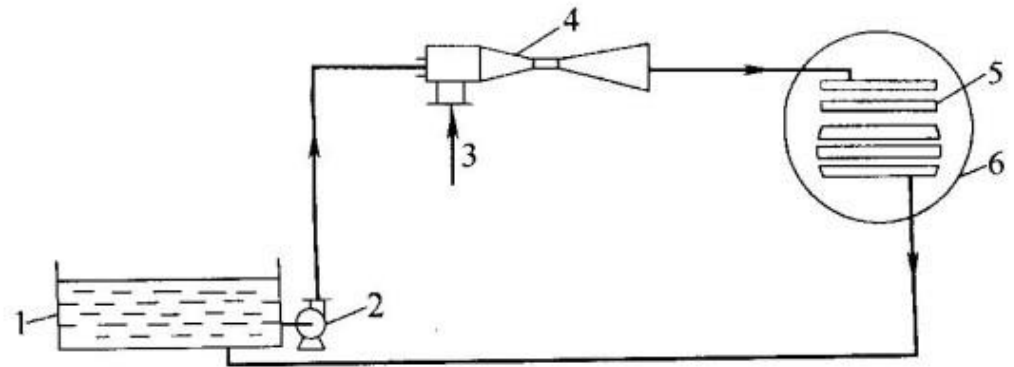


图 3-5 蒸汽喷射加热流程图

1—水槽 2—水泵 3—蒸汽 4—蒸汽喷射器 5—加热板 6—真空泵





## ■ 冷冻干燥的主要设备

设备的型式多样，基本构成为干燥箱、水汽凝结器、加热器、真空泵等。

### □ 干燥箱

- ✓ 真空密闭容器，其内部主要有搁置制品的搁板，搁板的温度根据要求而定。
- ✓ 干燥箱的形状有圆柱形和矩形两种，从强度考虑，圆柱形优于矩形，但考虑空间利用率，则矩形优于圆柱形。

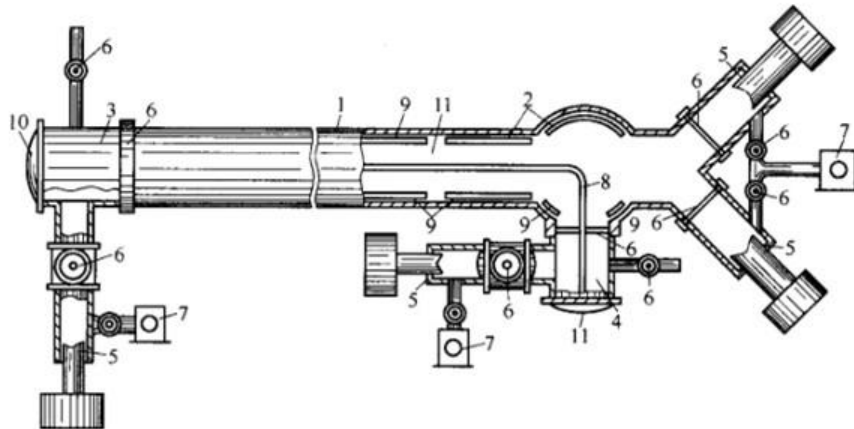


图 3-6 圆柱形干燥箱结构示意图

1—干燥箱 2—加热板 3—进料腔 4—出料腔 5—冷阱 6—阀门 7—真空泵  
8—输送机轨道 9—加热板 10—进料口 11—出料口

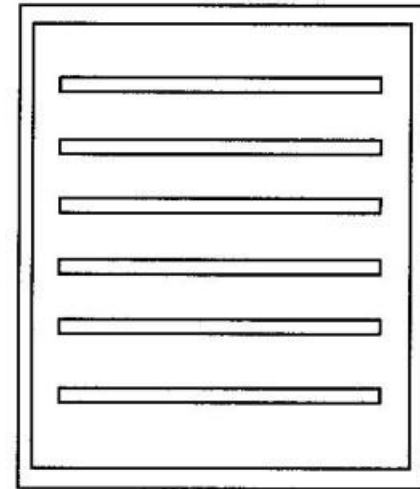


图 3-7 矩形干燥箱





## ❑ 干燥机搁板的制冷与加热形式

- ✓ 直接制冷、直接加热：这种形式的搁板一般采用铝合金材料，内埋钢管或铜管，制冷剂在管内直接蒸发。加热可用电热丝，直接对搁板加热，也有采用微波或红外线加热。优点：温度均匀；缺点：热惰性大。
- ✓ 直接制冷、间接加热：即制冷剂在搁板内的制冷管中直接蒸发，而利用各种加热热源在外部先将载热介质加热，再用泵送入搁板内。常用载热介质有硅油、三氯乙烯、丁基二乙醇、白油以及乙醇、乙二醇和水的混合物等。加热介质的热惰性比前一种隔板小。

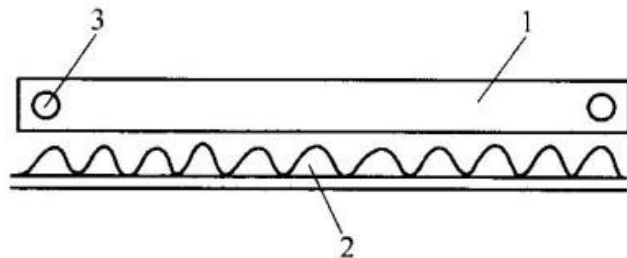


图 3-8 直接制冷，直接加热搁板

1—搁板 2—加热器 3—蒸发管

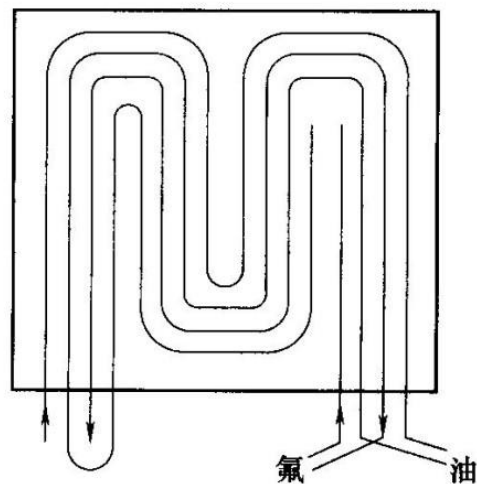


图 3-9 直接制冷，间接加热搁板





## □ 干燥机搁板的制冷与加热形式

- ✓ 间接制冷、直接加热：制冷剂在蒸发器中冷却中间介质，然后将被冷却的介质用泵送入隔板，加热如同第一种搁板形式，采用较少。
- ✓ 间接制冷、间接加热：使用普遍，被冷却和加热的中间介质都是同一种介质，中间介质的冷却和加热都在箱外进行，然后用泵将中间介质送入搁板，这种搁板可以用不锈钢板焊接成中空的带有多流道的中空板。由于这种搁板与流体的接触面积大，板内换热介质流量大，进出口温差小，因此温度均匀，但由于采用中间介质，与直接制冷相比，设备体积大，功耗增加。





## 水汽凝结器

水汽凝结器的结构种类多样，按放置的方式分有立式与卧式；按筒体内凝结面的形状分有列管式、螺旋管式、板式等。

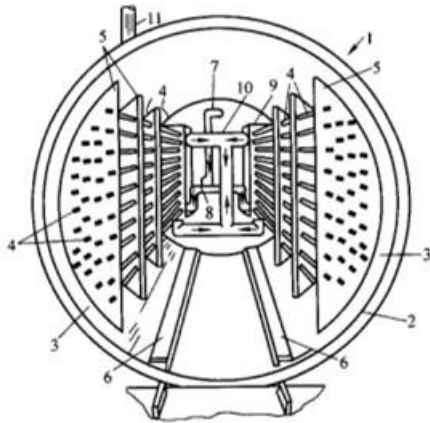


图 3-10 列管式水汽凝结器

1—真空干燥箱 2—真空干燥箱前端平面边缘 3—一组冷凝管 4—冷凝管 5—支撑板 6—产品排架车轨道  
7—制冷剂入口管 8—制冷剂入口端 9—末端连接器 10—出口端 11—出口管

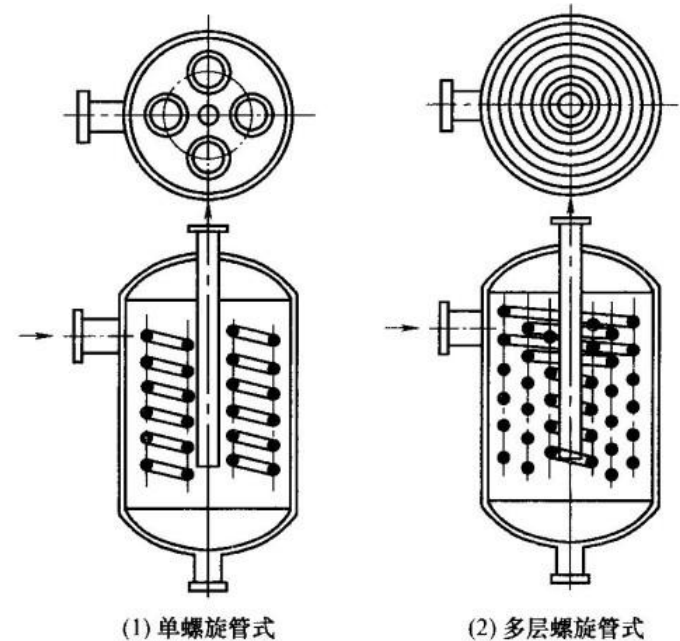


图 3-11 螺旋管式水汽凝结器





# 水汽凝结器

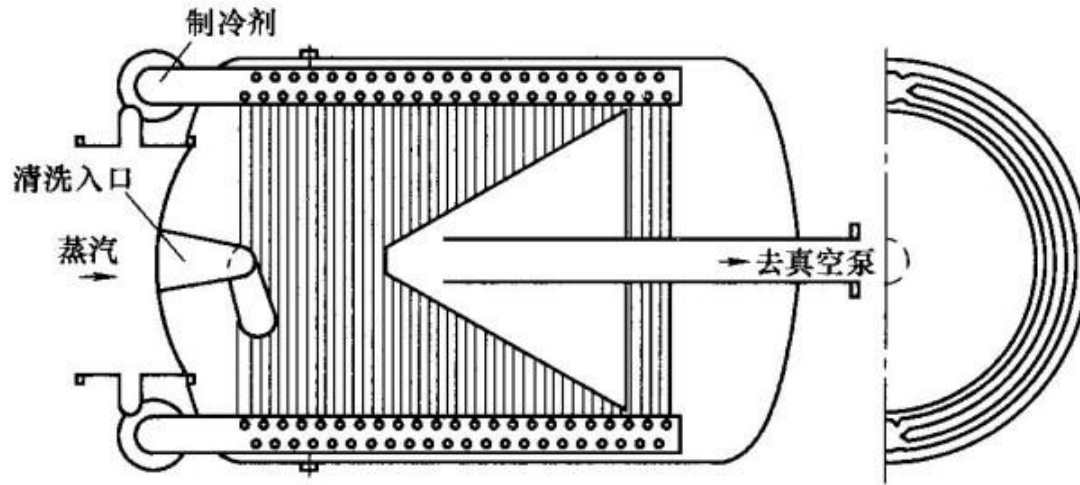


图 3-12 盘管式水汽凝结器

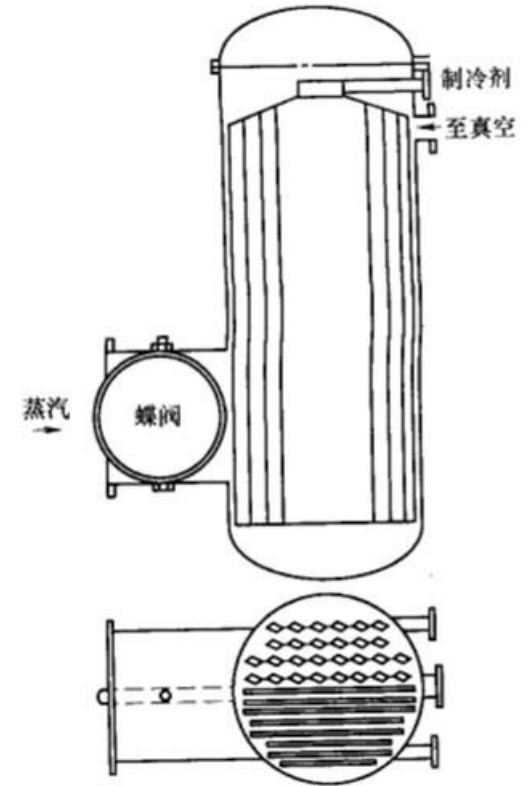


图 3-13 板式水汽凝结器 (立式)





# 水汽凝结器

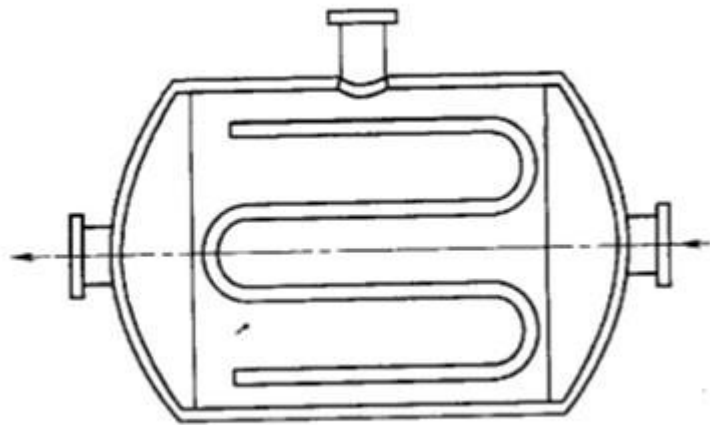


图 3-15 蛇形管式水汽凝结器

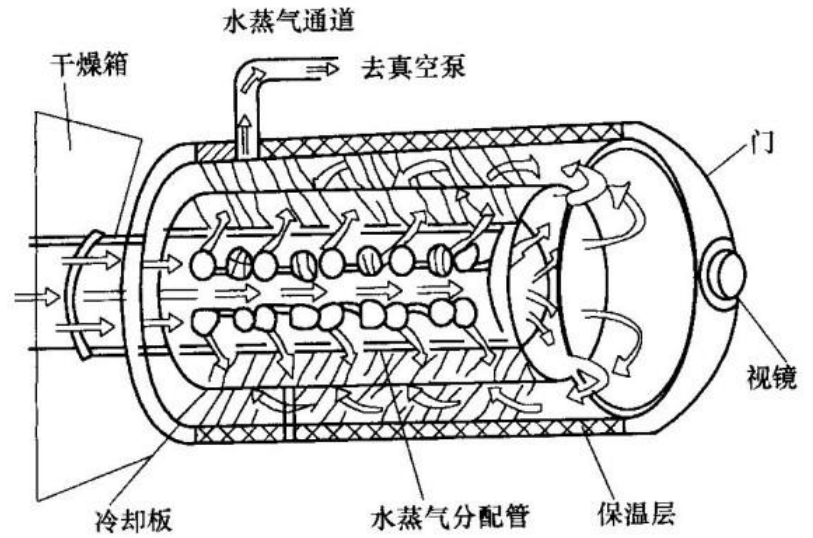


图 3-16 HULL 圆筒形水汽凝结器





## □ 喷雾冻结

喷雾冻结是将液体物料从喷嘴中呈雾状喷到一空腔内，当容器是真空时，则由于水汽的蒸发使之冻结。

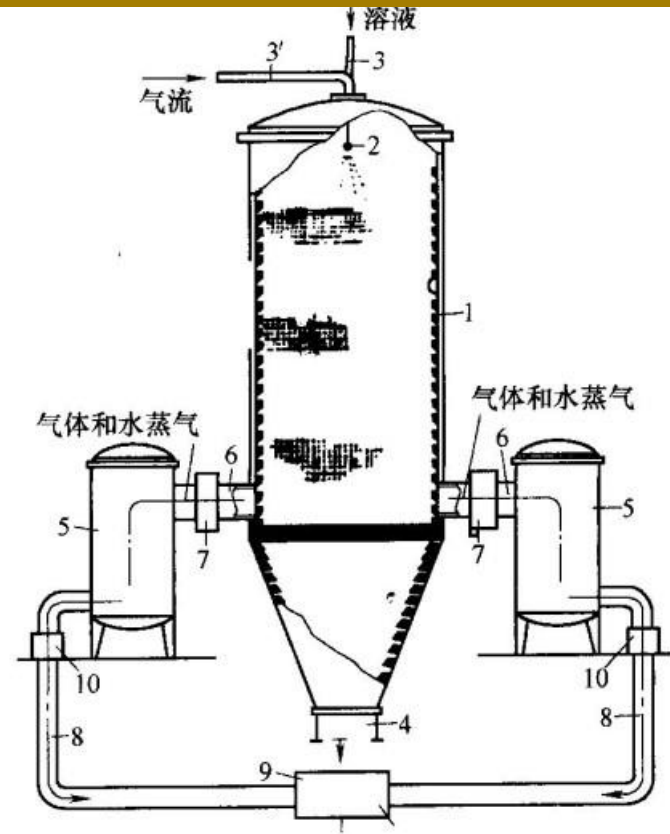


图 3-17 喷雾冻结装置示意图

1—喷雾塔 2—喷嘴 3—料液入口管 3'—高速气流入口管 4—卸料口 5—冷凝器 6—连接管  
7—阀门 8—排气管 9—抽真空装置 10—过滤器





## □ 加热装置

冷冻干燥装置为使冻结后制品的水汽不断升华必须提供所需的热量—加热装置。按热量提供方式不同，可分为直接和间接加热两类。

直接加热方式一般采用电加热、微波加热或红外加热。

间接加热是最常使用的加热方式。它是用载热体先加热载热介质，再将载热介质用泵送入搁板。载热体可以是蒸汽或压缩机排气，或用电加热器。载热介质常用无腐蚀性、无毒无害的流体，如水、甘油等。

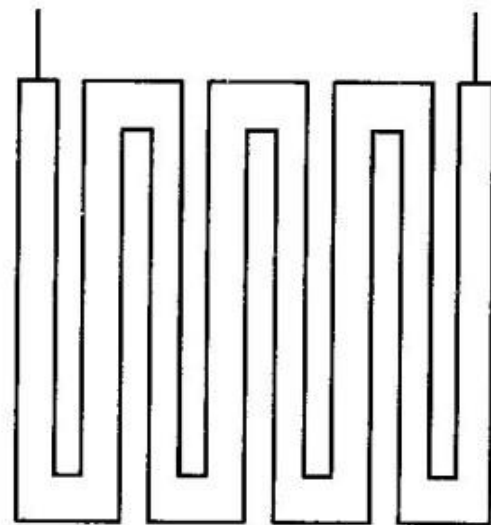


图 3-18 片式电加热器型式





## ■ 冷冻干燥装置的型式

### □ 间歇式冷冻干燥装置

优点：

- ①适应多品种小产量的生产，特别是适合于季节性强的食品生产；
- ②单机操作，如一台设备发生故障，不会影响其它设备的正常运行；
- ③便于设备的加工制造和维修保养；
- ④便于控制物料干燥时不同阶段的加热温度和真空度的要求。

缺点：

- ①由于装料、卸出、起动等预备操作所占用的时间，故设备的利用率较低；
- ②要满足一定产量的要求，往往需要多台的单机，并要配备相应的附属系统，这样设备投资费用和操作费用就增加。





## □ 间歇式冷冻干燥装置

间歇式冷冻干燥装置中的干燥箱与一般的真空干燥箱相似，属盘架式。干燥箱有各种形状，多数为圆筒形。盘架多为固定式，也可做成小车出入干燥箱，料盘置于各层加热板上。

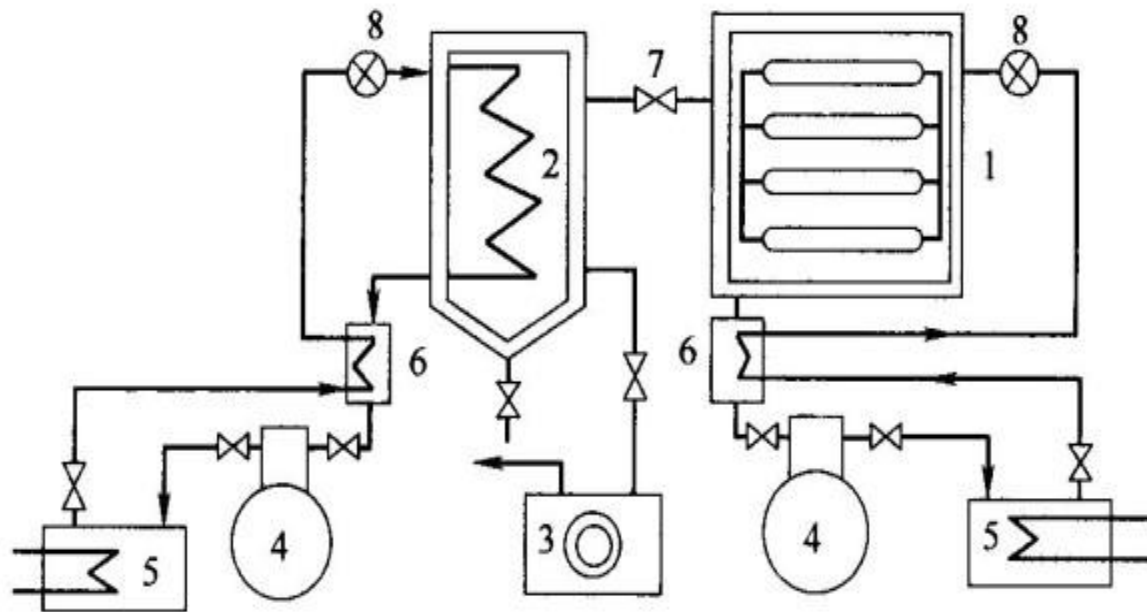


图 3-20 间歇式冷冻干燥装置

1—干燥箱 2—水汽凝结器 3—真空泵 4—制冷压缩机  
5—冷凝器 6—热交换器 7—水汽凝结器进阀 8—膨胀阀





## □ 多箱间歇式和隧道式冷冻干燥装置

**多箱间歇式设备**由一组干燥箱构成使每两箱的操作周期互相错开。系统中各箱的加热板加热、水汽凝结器供冷及真空抽气均利用同一系统，每箱可单独控制。

**隧道式设备**升华干燥过程是在大型隧道式真空箱内进行的，料盘以间歇方式通过隧道一端的大型真空密封门进入箱内，以同样方式从另一端卸出。

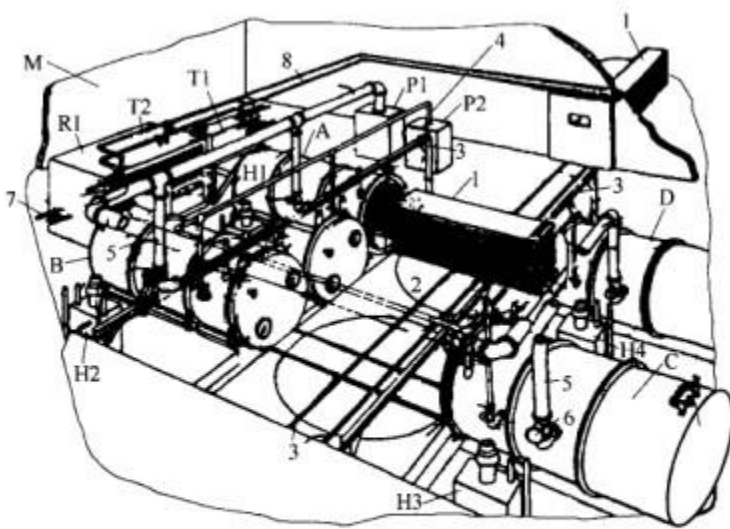


图 3-22 多箱间歇式冷冻干燥装置

A、B、C、D—干燥箱 M—外壳 P1、P2—真空泵 R1—冷凝器 T1—主供热器 T2—辅供热器

H1、H2、H3、H4—分加热器 1—载物车 2—转盘 3—地面导轨 4—空中导轨 5—通 P1 P2 的管路 6—阀门

7—制冷剂入口管路（主管、分管） 8—制冷剂出口主管、分管

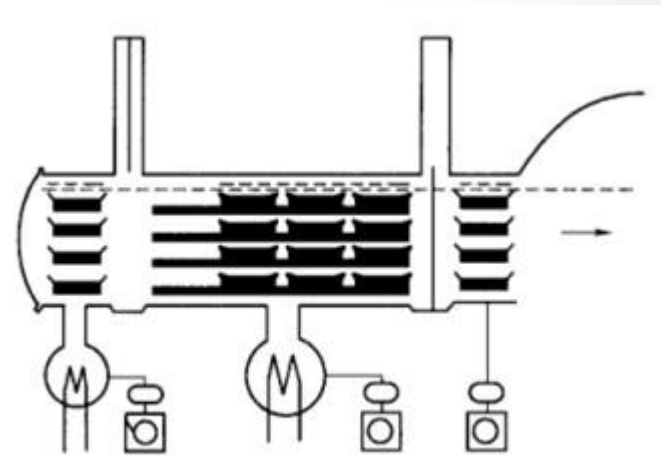


图 3-23 隧道式冷冻干燥装置





## □ 连续式冷冻干燥装置

连续式冷冻干燥装置有多种，左图作为一种在浅盘中进行干燥的连续冷冻干燥器。所用料盘为简单的平盘，制品装成薄层，这样干燥速度快。采用辐射加热法，辐射热由水平的加热板产生，加热板又分成不同温度的若干区段。

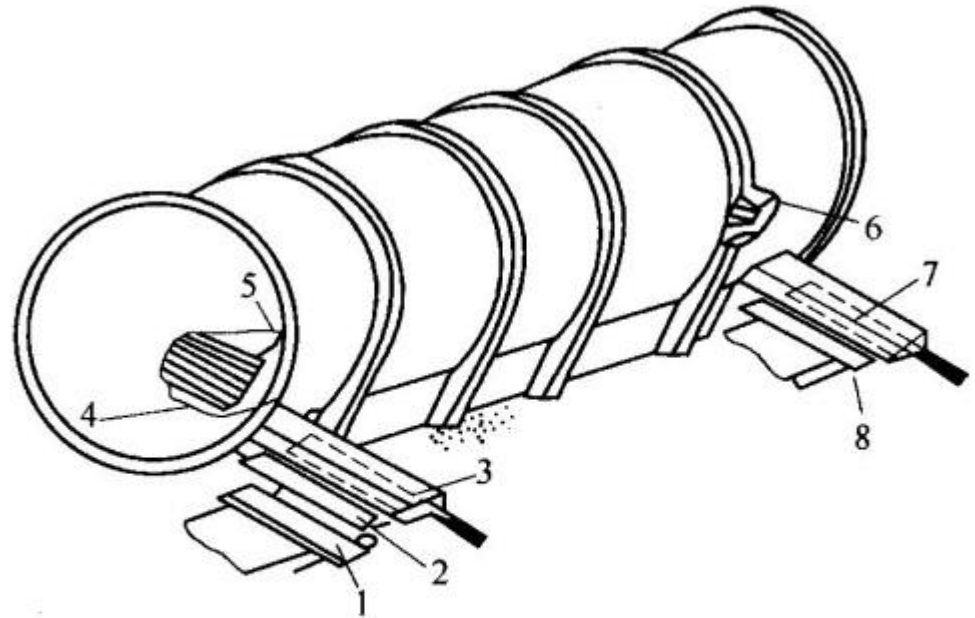


图 3-24 连续式冷冻干燥装置

- 1—密封门前 2—密封门正前方 3—密封门  
4—进口升降器 5—加热板 6—出口升降器  
7—出口密封室 8—出口





## □ 连续式冷冻干燥装置

包括物料冻结在内的全部连续化的冷冻干燥装置。在这种干燥装置中，冻结和干燥两部分的容器壳体结合成为整体的密闭真空。真空室内分两区，即冻结室和升华室。在两区之间，通过屏蔽隔板的下缘形成互相沟通的通道。

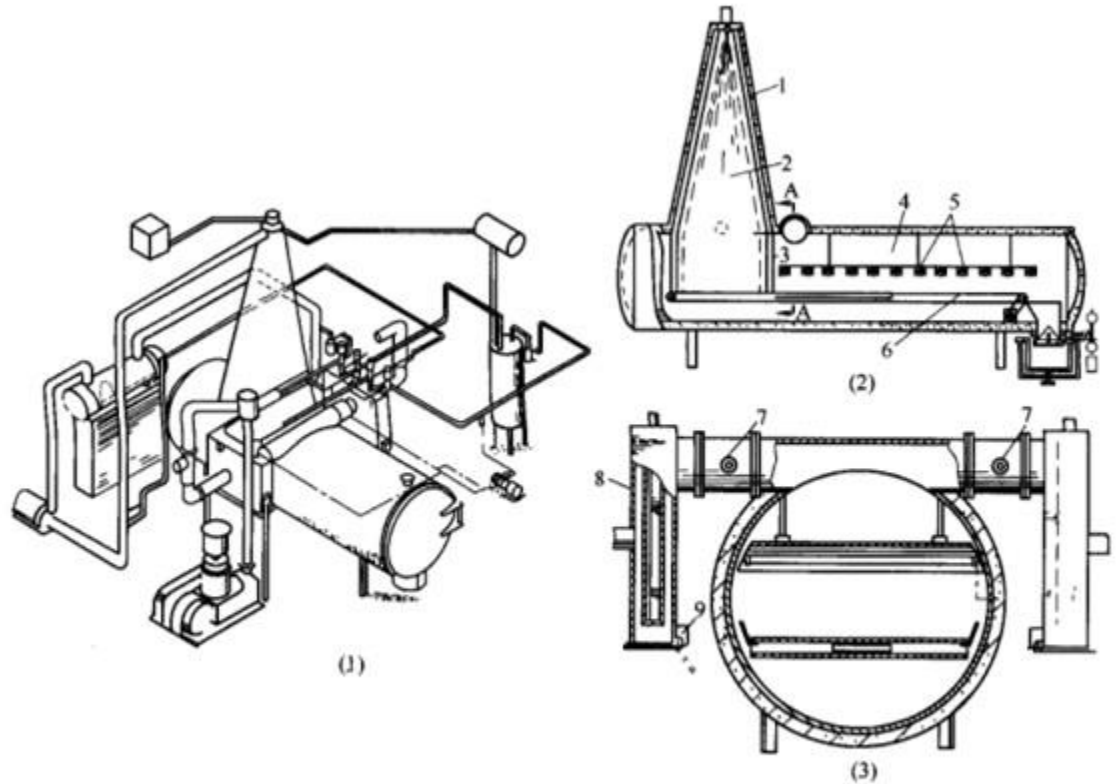


图 3-25 冻结干燥一体化的连续冷冻干燥装置示意图  
(1)流程图 (2)主真空室剖视图 (3)A-A 剖视图  
1—冷冻剂通道 2—冻结室 3—隔板 4—干燥室 5—红外线灯泡  
6—输送带 7—蝶阀 8—冷凝器 9—电动机





## □ 连续式冷冻干燥装置

左图作为一种连续冷冻干燥器，为不使用浅盘干燥颗粒制品的。将经预冻的颗粒从顶部进料口加到顶部的圆形加热板上，利用中央立轴上带铲的搅拌器旋转搅动物料，使物料向中心方向移至加热板内缘而落入第二块板上，然后铲子迫使物料不断向加热板外方移动（板的内缘为封闭态），直至从加热板边缘落下到直径较大的第三块加热板上。如此物料逐板下落，到最低一块加热板掉落并从出料口卸出。这种干燥器加热板的温度可固定于不同的数值，使冷冻干燥按一种适当的温度程序来进行。

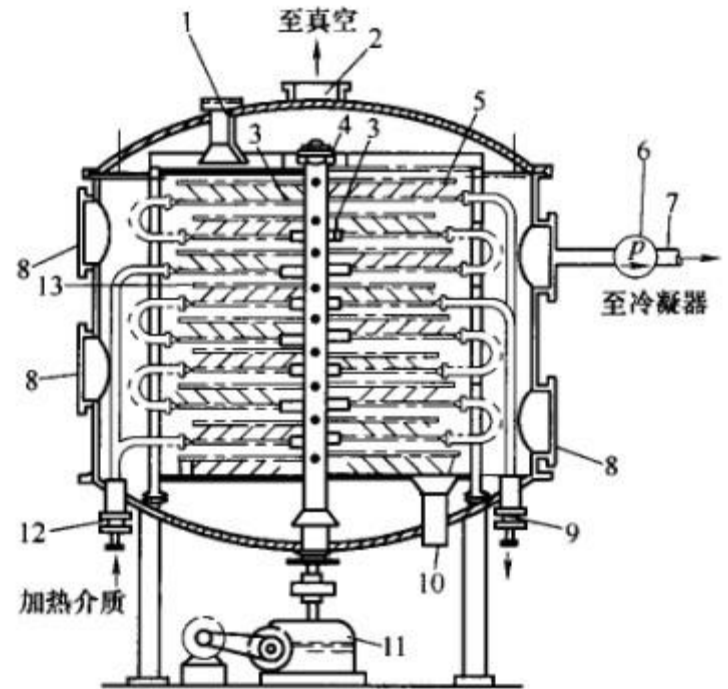


图 3-26 连续冷冻干燥器（塔盘式）

- 1—进料口 2—抽真空接口 3—加热板内缘落料孔
- 4—中央立轴 5—搅拌器 6—泵 7—冷阱接口
- 8—维修、观察入口 9—加热介质出口
- 10—出料口 11—电机
- 12—加热介质入口 13—加热板





# ■ 冷冻干燥技术在食品工业中的应用

## ➤ 冷冻干燥技术在咖啡、茶加工中的应用

原料→预处理→冷冻浓缩→冷冻干燥→成品

## ➤ 冷冻干燥技术在肉类加工中的应用

原料→预处理（清洗、切片或切丁、调味等）→冷冻干燥→成品

➤ 冷冻干燥技术在水果加工中的应用：水果干可作为一种休闲食品，也可用水复原成原果，还可作为某些食品的配料之一，如奶油水果、水果麦片等。采用冷冻干燥法生产的水果干具有保持原有水果风味、色泽、复原性能好等特点。新鲜的果汁经冷冻干燥后，可得到品质极其优良的果粉。

➤ 冷冻干燥技术在蔬菜加工中的应用：可冷冻干燥的蔬菜种类很多，如胡萝卜、青豆、芦笋、豌豆、菠菜、蘑菇、葱、姜、蒜等。





## ◆ 冷冻浓缩技术

冷冻浓缩是利用冰与水溶液之间的固液相平衡原理的一种浓缩方法。采用冷冻浓缩方法，溶液的浓缩浓度是有限的。当溶液中溶质浓度超过低共熔浓度时，过饱和溶液冷却的结果表现为溶质转化成晶体析出，此即结晶操作的原理。这种操作，不但不会提高溶液中溶质的浓度，相反却会降低溶质的浓度。但是当溶液中所含溶质浓度低于低共熔浓度时，则冷却结果表现为溶剂（水分）成晶体（冰晶）析出。随着溶剂成晶体析出的同时，余下溶液中的溶质浓度显然就提高了，此即冷冻浓缩的基本原理。





## ■ 冷冻浓缩过程

冷冻浓缩与常规冷却法结晶过程的不同之处在于：只有当水溶液的浓度低于低共熔点E时，冷却的结果才是冰晶析出而溶液被浓缩，此即冷冻浓缩操作的一般原理。而当溶液浓度高于低共熔点E时，冷却的结果是溶质结晶析出，而溶液变得更稀，此即常规的冷却法结晶过程的一般原理。

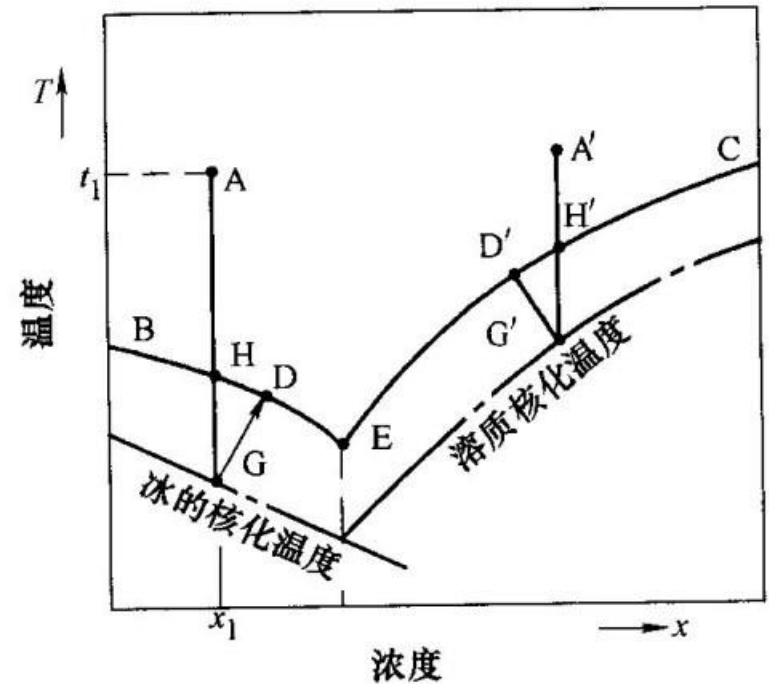


图 3-28 氯化钠水溶液的温度-浓度图





## ■ 冷冻浓缩中的结晶过程与分离

冷冻浓缩过程的结晶有两种形式：一种是在管式、板式、转鼓式以及带式设备中进行的，称为层状冻结；另一种发生在搅拌的冰晶悬浮液中，称为悬浮冻结。

□ 层状冻结：层状冻结又称规则冻结，是晶层依次沉积在先前由同一溶液所形成的晶层之上，是一种单向的冻结。冰晶长成针状或棒状，带有垂直于冷却面的不规则断面。

□ 悬浮冻结：悬浮冻结是在受搅拌的冰晶悬浮液中进行的。悬浮冻结如果是在连续操作的结晶器内进行，则所产生的晶体粒度与溶液浓度、溶液主体过冷度、晶体在结晶器内停留时间等因素有关。

□ 冰晶—浓缩液的分离：分离的原理主要是悬浮液过滤。





## ■ 冷冻浓缩装置的构成

冷冻浓缩装置主要由结晶和分离设备两部分构成。结晶设备包括管式、板式、搅拌夹套式、刮板式等热交换器及真空结晶器、内冷转鼓式结晶器、带式冷却结晶器等设备；分离设备有压滤机、过滤式离心机、洗涤塔及由这些设备组合而成的分离装置等。在实际应用中，根据不同的物料性质及生产要求采用不同的装置系统。

□ 结晶装置：冷冻浓缩用的结晶器有直接冷却式和间接冷却式两种。直接冷却式可利用水分部分蒸发的方法，也可利用辅助冷媒（如丁烷）蒸发的方法；间接冷却式是利用间壁将冷媒与被加工料液隔开的方法。食品工业上所用的间接冷却式设备又可分为内冷式和外冷式两种。





## ● 结晶装置

➤ 直接冷却式真空冻结器：  
优点是不必设置冷却面；  
缺点是蒸发掉的部分芳香物质会随同蒸汽或惰性气体一起损失。  
食品工业中直接冷却法冻结装置的应用由于芳香物质损失受到限制。但是，这种冻结器若与适当的吸收器组合起来，可以显著减少芳香物质的损失。左图为带有芳香回收的真空冻结装置。

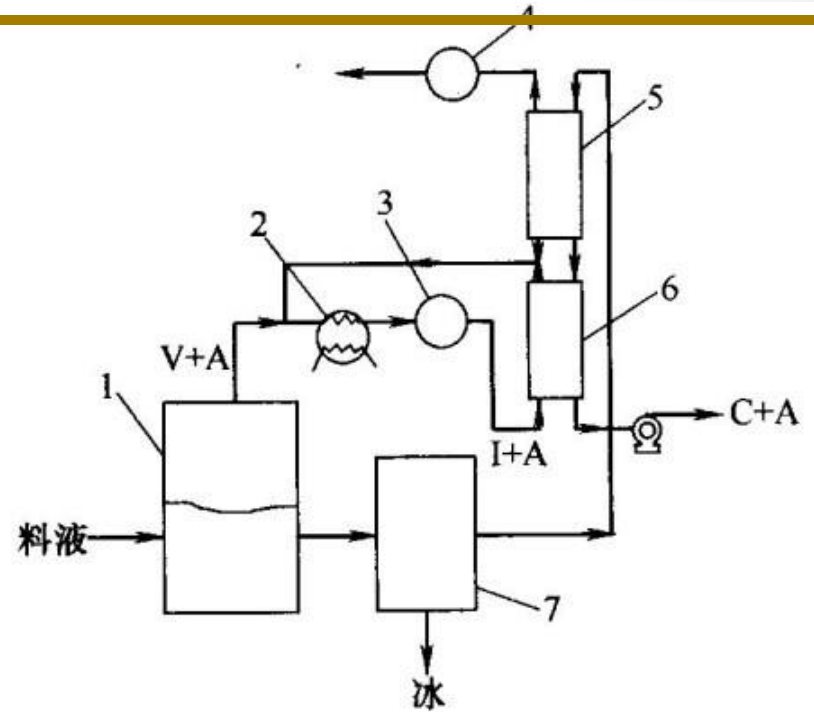


图 3-29 带有芳香回收的真空结晶装置流程

- 1—空结晶器 2—冷凝器 3—干式真空泵  
4—湿式真空系 5—吸收器Ⅱ 6—吸收器Ⅰ  
7—冰晶分离量 V—水蒸气 A—芳香物  
C—浓缩液 I—惰性气体





## ● 结晶装置

➤ 内冷式结晶器分为两种：

✓可产生固化悬浮液的结晶器：其结晶原理属于层状冻结。由于预期厚度的晶层的固化，晶层可在原地进行洗涤或作为整个板晶或片晶移出后在别处加以分离。由于部分固化，即使稀溶液也可浓缩到40%以上，此外具有洗涤简便的优点。

✓可产生可泵送的浆液的结晶器：采用结晶操作和分离操作分开的方法。由一个大型内冷却不锈钢转鼓和一个料槽所组成，转鼓在料槽内转动，固化晶层由刮刀除去。因冰晶很细，故冰晶和浓缩液分离很困难。此法的另一种演变是将料液以喷雾形式喷溅到旋转缓慢的内冷却转鼓式转盘上，并且作为片冰而排出。





## ● 结晶装置

### ➤ 外冷式结晶器有三种主要型式：

- ✓ 第一种型式：料液先经过外部冷却器作过冷处理（过冷度高达 $6^{\circ}\text{C}$ ），然后在结晶器内形成晶核并使晶体增大，为避免液体流动的堵塞，冷却器的传热壁必须高度抛光，从结晶器出来的液体可利用泵使之在换热器和结晶器之间进行循环，而泵的吸入管线上装有过滤机将晶体截留在结晶器内。
- ✓ 第二种型式：将全部悬浮液在结晶和换热器之间进行再循环。晶体在换热器中的停留时间比在结晶器中短，故晶体主要是在结晶器内长大。
- ✓ 第三种型式：先在外部热交换器中生成亚临界晶体，后将部分不含晶体的料液在结晶器与换热器之间进行再循环。换热器形式为刮板式，由于浆料在换热器中停留时间短（几秒钟），故所产生的晶体极小。当其进入结晶器后，即与结晶器内含大晶体的悬浮液均匀混合，在器内的停留时间至少有 $0.5\text{h}$ ，故小晶体溶解，其溶解热就消耗于供大晶体成长。





# ● 分离装置

冷冻浓缩操作的分离设备有压榨机、过滤式离心机和洗涤塔等。

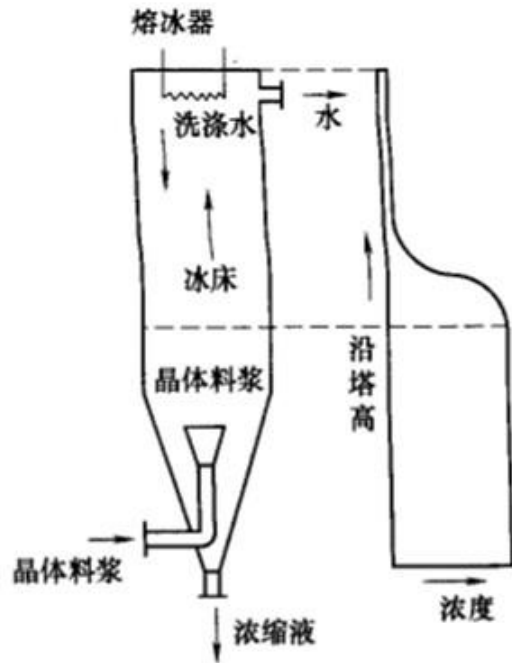


图 3-33 连续洗涤塔工作原理

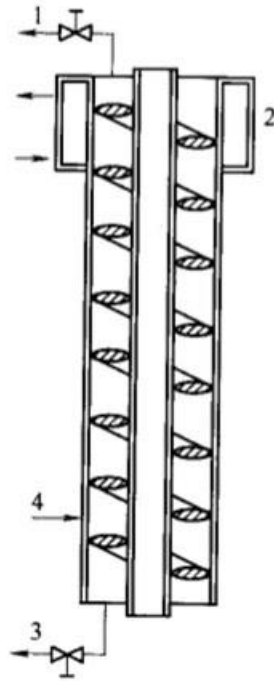


图 3-34 螺旋洗涤塔示意图  
1—熔化水 2—熔冰器 3—浓缩液 4—料浆

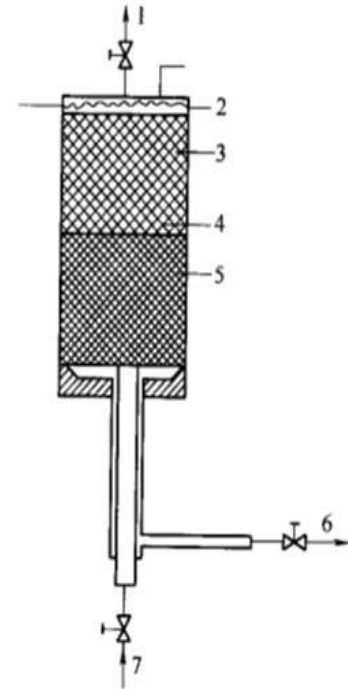


图 3-35 活塞床洗涤塔示意图  
1—水 2—熔水器 3—冰晶在熔水中 4—洗涤前沿  
5—冰晶在浓缩液中 6—浓缩液 7—来自结晶器的悬浮液





## ■ 冷冻浓缩装置系统

➤ **单级冷冻浓缩装置系统：** 下图为采用洗涤塔分离方式的单级冷冻浓缩装置系统示意图。它主要由刮板式结晶器、混合罐、洗涤塔、溶冰装置、贮罐、泵等组成。

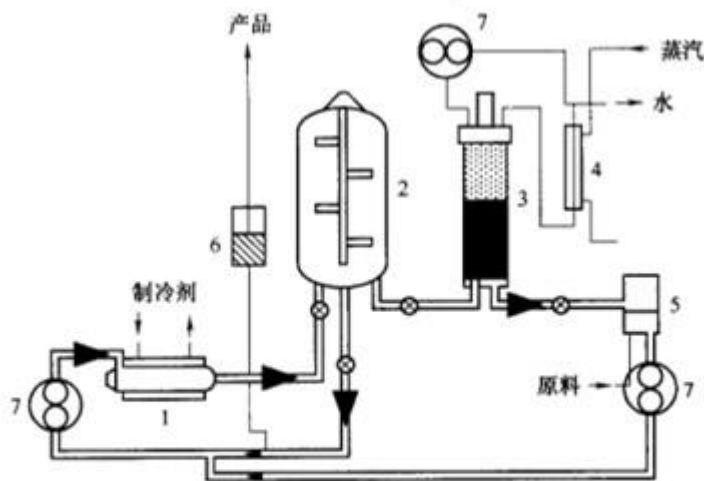


图 3-37 单线冷冻浓缩装置系统示意图

1—旋转刮板式结晶器 2—混合罐 3—洗涤塔 4—溶冰装置 5—贮罐 6—成品罐 7—泵





## ■ 冷冻浓缩装置系统

### ➤ 多级冷冻浓缩装置系统:

多级冷冻浓缩是指将上一级浓缩得到的浓缩液作为下一级的原料进行再次浓缩的一种冷冻浓缩操作。下图为咖啡的二级冷冻浓缩装置流程。

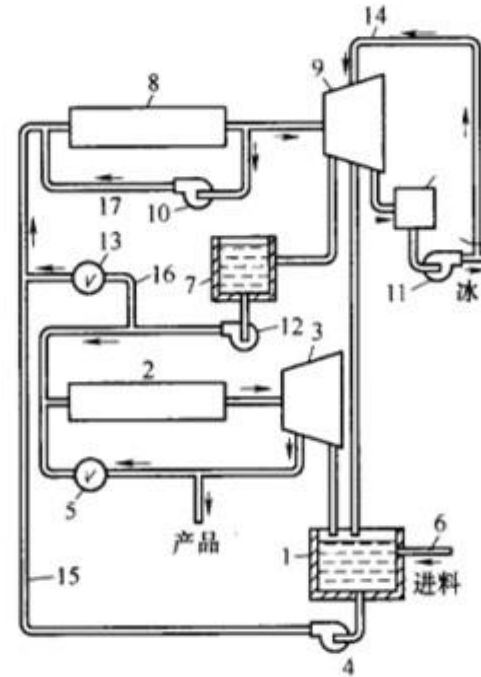


图 3-38 二级冷冻浓缩装置流程示意图

1,7—贮料罐 2,8—结晶器 3,9—分离机 4,10,11,12—泵 5,13—调节阀 6—进料管  
14—熔冰水进入管 15,17—管路 16—浓缩液分支管





## ■ 流化速冻技术

速冻是指使食品尽快通过其最大冰晶生成区，并使平均温度尽快达到 $-18^{\circ}\text{C}$ 而迅速冻结的方法。大多数食品在温度降到 $-1^{\circ}\text{C}$ 时开始冻结，并在 $-4\sim-1^{\circ}\text{C}$ 之间大部分水成为冰晶，即最大冰晶生成区在 $-4\sim-1^{\circ}\text{C}$ 之间。快速冻结要求此阶段的冻结时间尽量缩短，以最快速度排除这部分冰晶生成所产生的热量。

食品流化速冻是实现食品单体速冻的理想方法。适用于快速冻结颗粒状、片状和块状等类食品。冻结速度快，具有产品具有质量好、包装和食用方便等优点。

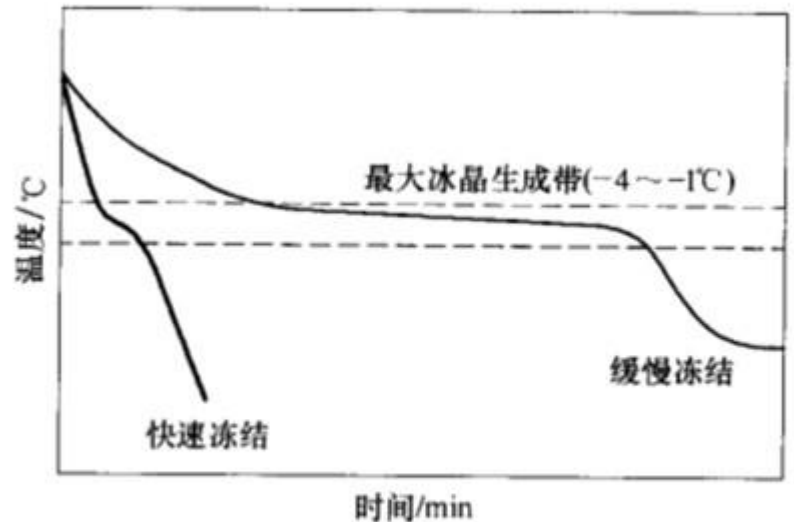


图 3-40 快速冻结与缓慢冻结的冻结曲线





## ● 快速冻结的途径

- 提高冷却介质与食品初温之间的温差：机械制冷方式降低冷却介质的温度范围不大；非机械冷却介质如液氮，有很低的温度（ $-196^{\circ}\text{C}$ ），可以大大缩短食品的冻结时间。但液氮速冻毕竟是一种高成本的操作，因此应用范围有限。
- 改善换热条件，增大放热系数：在表面换热成为食品冻结速度限制因素的场合，通过加快冷却介质流经食品的相对速度可以收到这种效果。例如，在 $-18^{\circ}\text{C}$ 静止的空气中，水果和小块鱼片等小型食品的冻结时间大约需要3h，若将空气流速增加到 $1.25\text{m/s}$ ，冻结时间将下降到1h左右，如空气流速再增加到 $5\text{m/s}$ ，则冻结时间也将进一步缩短到40min左右。
- 减小食品的体积，即增加食品的比表面积：可强化食品与冷却介质间的换热，而且由于体积的减少，食品中心到表面的距离缩短了，也就缩短了食品冻结所需的时间。





## ● 流态化速冻的方法

在一定流速的冷空气作用下使食品在流态化操作条件下得到快速冻结的冻结方法。流态化是固体颗粒在流体的作用下，变成具有一定流动性的形态。由于食品处于流化状态，因此，冻结过程中时，食品颗粒间彼此在作相对运动。流态化冻结是一种实现食品单体快速冻结的理想方法。食品流态化速冻的前提：冷空气具有足够的流速且自下而上通过食品，单个食品的体积不能太大。

因此，食品流化速冻装置中，进入食品层的冷空气流都是自下而上的，而单个体积较大的食品，在冻结前，要切成块或片。根据食品层悬浮状态，可以将食品流化速冻中的流态化操作分为半流态化与全流态化操作。





## ● 流态化速冻的方法

➤ 半流态化操作：半流态化操作指置于传送带上的食品层被速度低于临界值的冷气吹成离网不高的悬浮状态，食品颗粒的运动形式随传送带的移动而移动。

➤ 全流态化操作：包括气力流态化和振动流态化。

✓ 气力流态化：食品颗粒置于带孔的固定斜槽上靠上扬的冷风克服自身的重力而成沸腾状态，并向前流动，这种操作方式称作气力流态化。

适用于加工颗粒均匀、较小的食品

✓ 振动流态化：食品在带孔的槽体上按一定振幅和频率呈跳跃式抛物线型向前运动，并辅以自下而上的冷风，造成食品层沸腾而成流态化，从而实现单体快速冻结的方法称作振动流态化冻结方法。振动有**连杆式机械振动**和**双轴惯性机械振动**。





## ■ 流化速冻装置

流化速冻装置的构成由物料传送系统、冷风系统、冲霜机构、围护结构、进料机构和控制系统等组成。

➤ 带式流化速冻装置： 传送带往往由不锈钢网带制成。按传送带的条数可以在冻结装置内安排为单流程和多流程形式。按冻结区分可分为一段和两段的带式速冻装置。

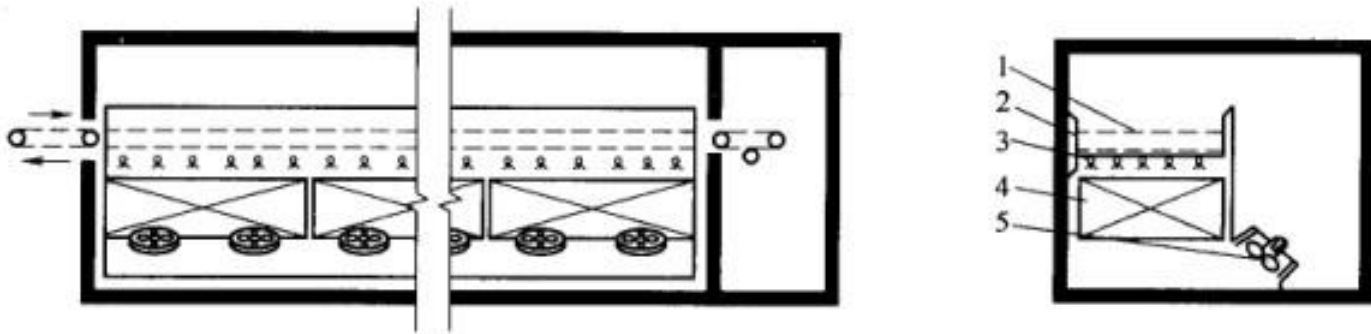


图 3-41 单流程一段带式流化速冻装置示意图

1—传送带 2—导板 3—除霜水喷嘴 4—空气冷却器 5—风机

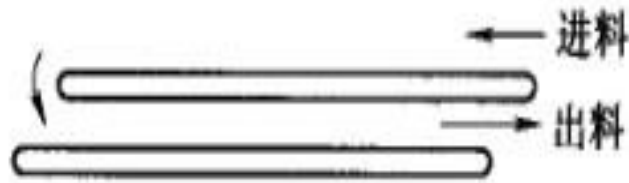




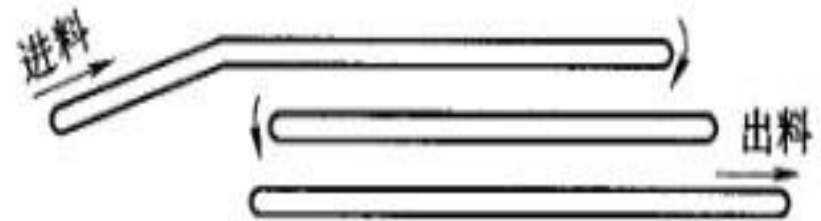
## ■ 流化速冻装置

多程一段带式流态化冻结装置也只有一个冻结区段，但有多条或两条以上的传送带，传送带摆放位置为上下串联式。

两段带式流态化冻结装置是将食品分成两区段冻结，第一区段为表层冻结区；第二区段为深层冻结区。



(1) 双流程



(2) 三流程

图 3-42 多流程一段带式流化速冻装置传送带的排列





## ■ 流化速冻装置

➤ 振动流化速冻装置：以振动槽作为物料水平向传输手段的流化速冻装置。物料在冻结区的行进是通过振动传输槽的作用实现的。由于物料在行进过程中受到振动作用，因此这类形式的速冻装置可显著地减少冻结过程中的黏结现象出现。振动槽传输系统主要由两侧带有挡板的振动筛和传动机构构成。

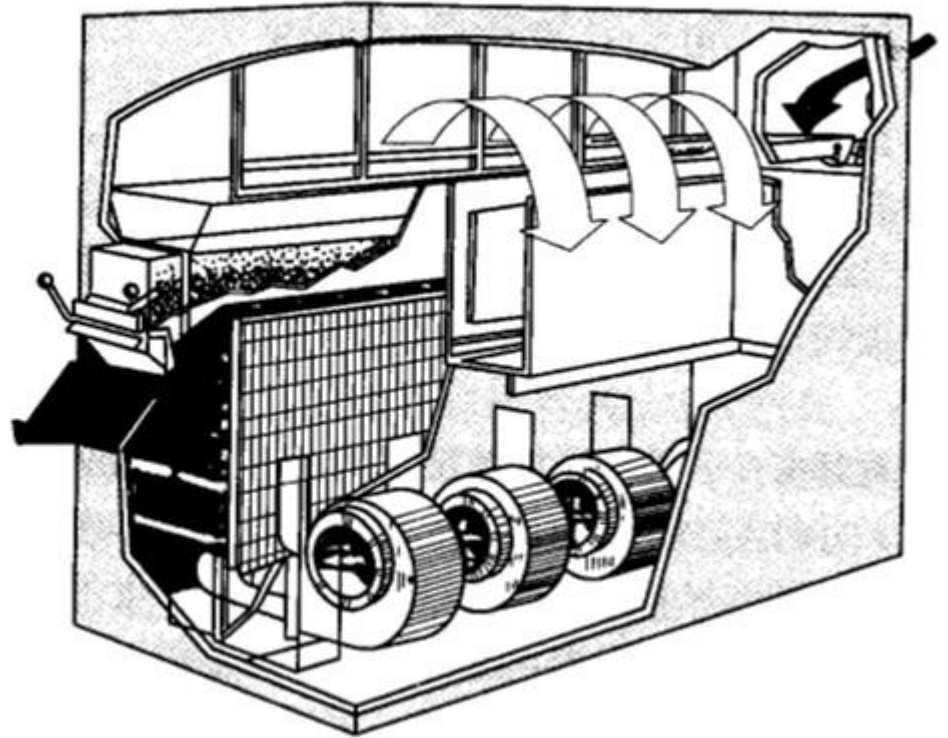


图 3-43 MA 型往复式振动流化速冻装置





## ■ 流化速冻装置

➤ 斜槽式流态化冻结装置：斜槽式流态化冻结装置对物料所进行的是全流态化（或纯流态化）速冻。食品颗粒完全依赖于上吹的高压冷气流形成像流体一样的流动状态，并借助于带有一定倾斜角的槽体（打孔底板）向出料端流动。料层厚度通过出料口导流板调整，以控制装置的冻结能力。

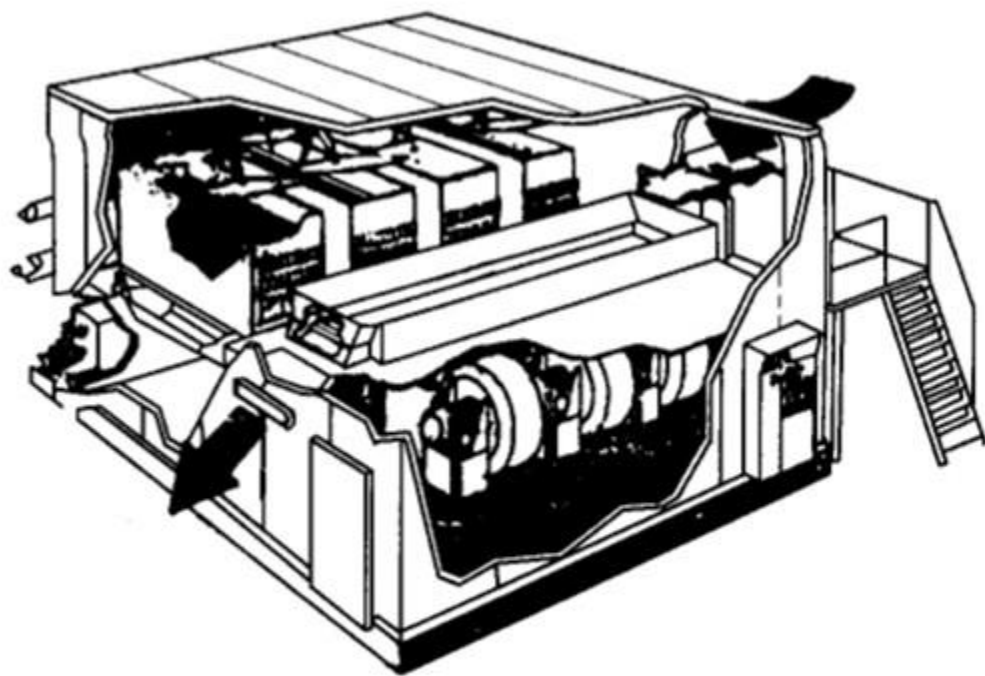


图 3-44 W 型流化速冻装置

