

VI

输送与仓储

6.1 粉体输送基础知识

a1 粉体的摩擦特性

➤ 粉体的输送与存储与粉体的流变性密切相关，其中颗粒群从运动状态变为静止状态所形成的角是表征粉体流动状况的重要参数。

➤ 安息角

粉体在自然堆积状态下，通过自重运动，粉体层的自由表面与水平面形成一夹角，此时物料在堆放时能够保持自然稳定状态的最大角度称为安息角，可用排出角法、注入角法、滑动角法等测定。

➤ 粉体摩擦角

由于颗粒间的摩擦力和内聚力而形成的角统称为摩擦角，即颗粒处于运动状态时，其运动状态与摩擦状态相关。

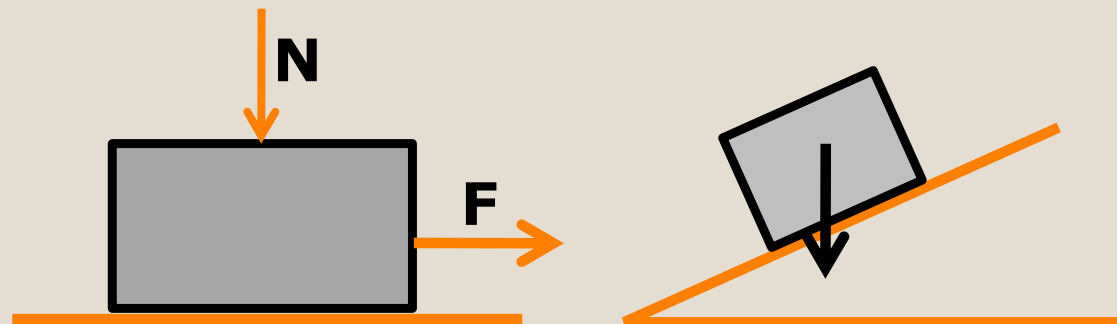
● 内摩擦角：

内摩擦角是粉体在外力作用下，达到规定密实状态，在此状态下受到强制剪切时所形成的角。

内摩擦角反映了散粒物料间摩擦特性和抗剪强度，它是确定料仓仓壁压力以及设计重力流动和料斗的重要设计参数。

粉体在外力作用下达到规定的密实状态，当粉体所受作用力小于颗粒间的作用力时，粉体层保持静止不动，当作用力达到某极限值时，粉体层将突然出现崩坏，该崩坏前后的状态称为极限应力状态。这一极限应力状态由一对压应力和剪应力组成，即在粉体任意面上加以垂直应力，并逐渐增加该层面的剪应力，当剪应力达到某一值时，粉体层将沿此面滑移。

内摩擦角在力学上可以理解为块体在斜面上的临界自稳角，在这个角度内，块体是稳定的，大于这个角度，块体就会产生滑动



物体在平面与斜面上的运动示意图

□ 内摩擦角测定：

根据莫尔理论，如果散粒物料在两向应力作用下沿着某一平面产生破坏，则在这个平面内存在着一定的正应力 σ 和剪应力 τ 的组合，破坏平面内正应力和剪应力可由力平衡求出：

$$\sigma = \sigma_1 \cos\theta + \sigma_3 \sin\theta$$

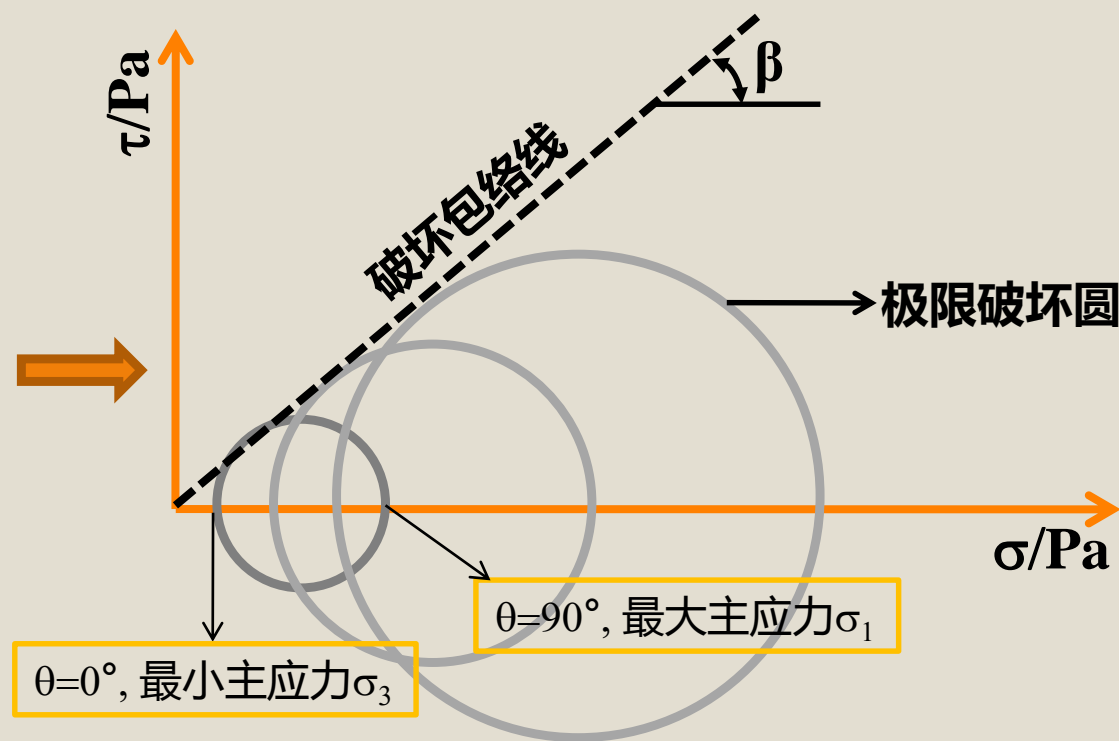
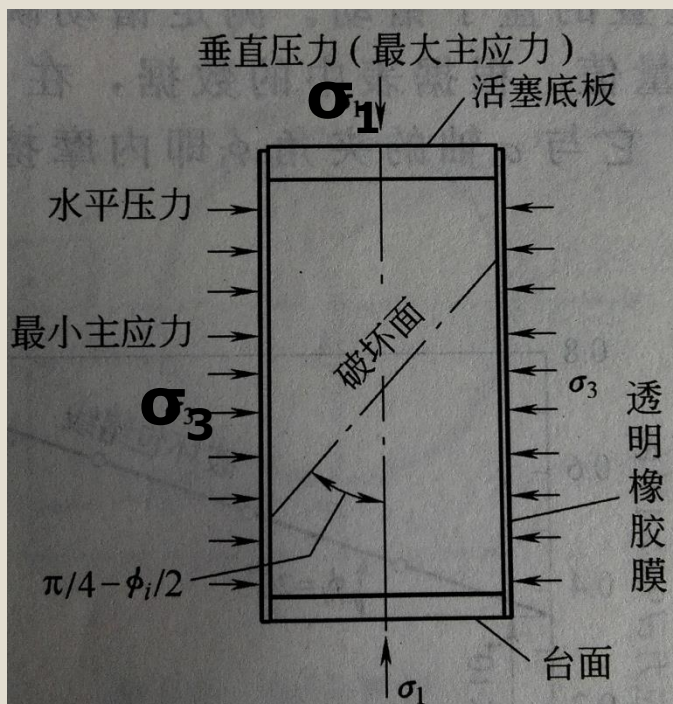
$$\tau = (\sigma_1 - \sigma_3) \cos\theta \sin\theta$$

} σ_1 与 σ_3 分别为最大和最小主应力, θ 为破坏平面与最大主应力平面之间夹角

对同一种物料在不同的 σ_3 情况下作实验，可得到散粒物料发生破坏时一系列 σ_1 (仪器记录)，从而作出莫尔圆和莫尔包络线相切的点表示散粒物料发生破坏时的平面方位及平面上的应力状态，它表示了散粒物料的强度条件

$$\tau = c + \sigma \tan\beta \quad (c \text{ 为散粒体粘聚力, } \beta \text{ 为内摩擦角})$$

三轴
压缩
实验



□ 内摩擦角与安息角的区别

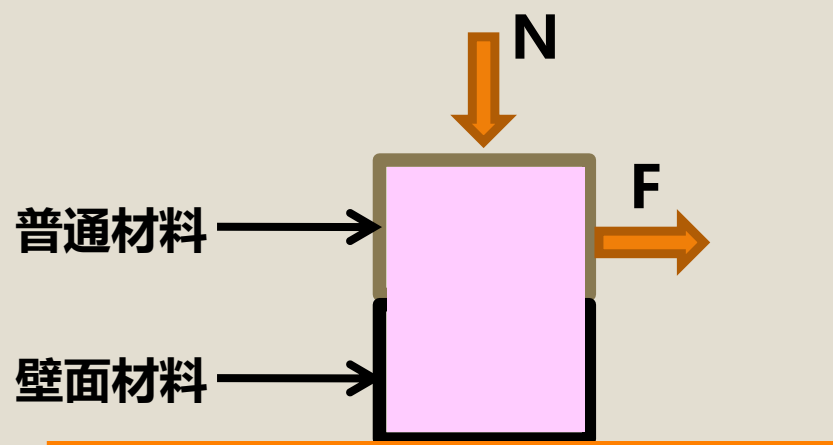
(1) 安息角与内摩擦角均反映了散粒物料的内摩擦特性

(2) 安息角与内摩擦角两者概念不同：内摩擦角反映散粒物料间的摩擦特性，安息角则表示单粒物料在物料堆上的滚落能力，是内摩擦特性的外观表现；

(3) 数值不同：对于无附着性的粉体而言，安息角与内摩擦角虽然在数值上几乎相等；但是由于受到粒度分布、水分含量、颗粒性质、颗粒形状等因素的影响，一般安息角都要大于内摩擦角。即安息角除了考虑粉体颗粒摩擦因素外，还同样受到其它因素综合影响，它是内摩擦特性的宏观表现。

- **壁摩擦力：**

它是粉体与壁面间的摩擦角，具有重要的实用特性。它的测量方法是下部箱体用壁面材料代替，对上部装满粉体的箱体施加作用力 F ，测得的拉力即可换算成壁摩擦力。



- **滑动摩擦角：**

物料在倾斜面上滑落时的最小角称为滑动角，它表示每个颗粒与壁面的摩擦；而物料层与固体壁面之间的摩擦角称为壁面摩擦角

一般来说，物料全部滑落时的角度通常比开始滑动时的角度大 10° 以上。

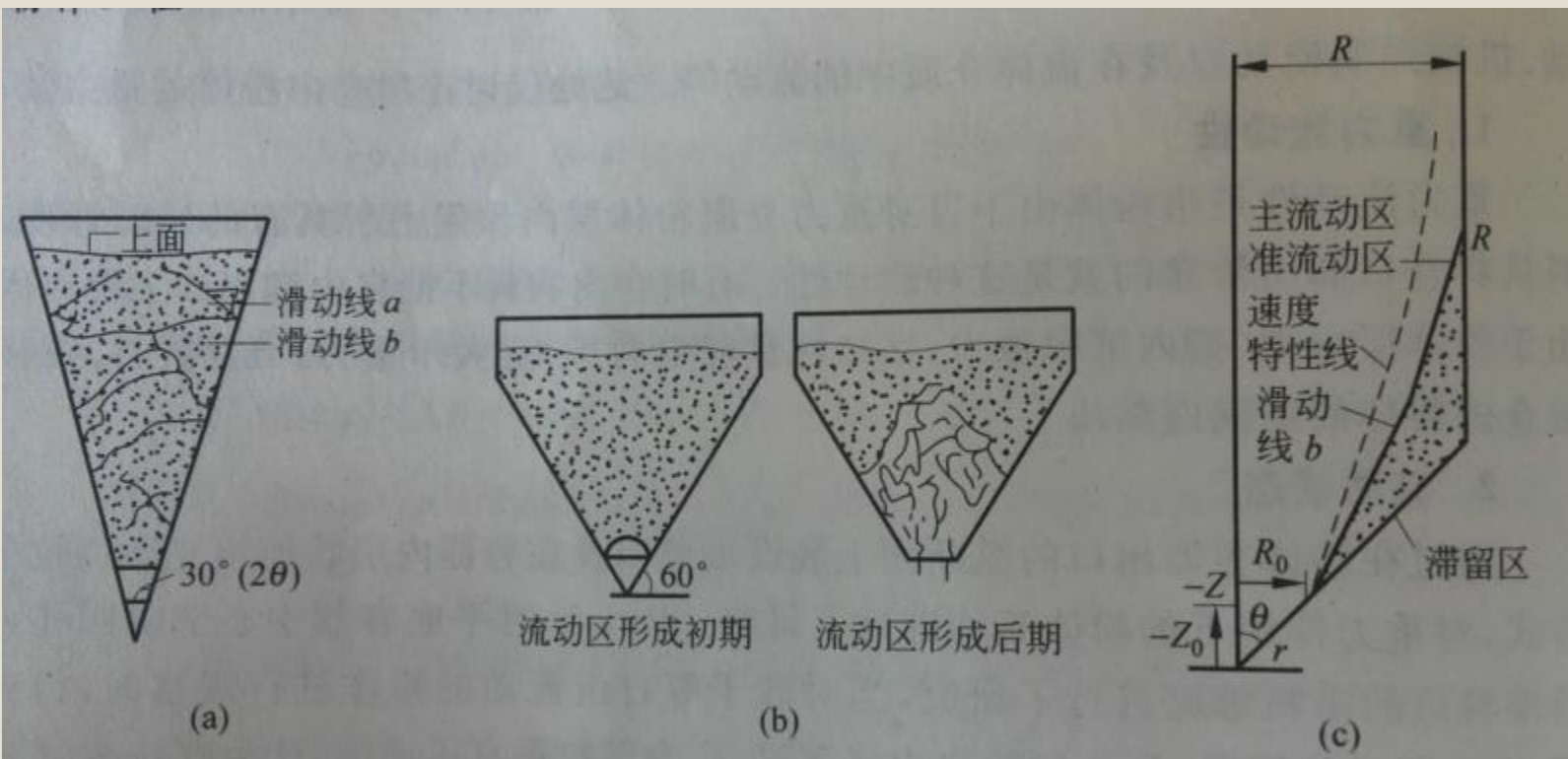
a2 粉体的重力流动

➤ **粉体的流动**是指粉体层沿剪切面的滑动和位移，按操作条件可分为重力流动，振动流动，机械强制流动以及流体介质中的流动等。

➤ **重力流动：**

粉体由于自身重力克服粉体层内作用力所具有的流动性质，物料从料仓口卸出依靠的就是这种流动性，而料层不能自由卸料的原由可能就是粉体层内力(内部摩擦力，粘结力，静电力等)远大于重力，这些内力作用往往导致仓内粉体结拱或结块。

➤ **流动形式：**



a中 θ 角小，存在大量的滑动线快速传递到顶部，整个料斗全为滑动区；
b中 θ 角增大，滑动线周围流动区间断形成，逐渐传播到顶部，后期顶部物料堆积，下降速度降低；
c中边缘 θ 角增大导致存在主流动区、准流动区和滞留区

料斗流动形式

➤ 排料速度：

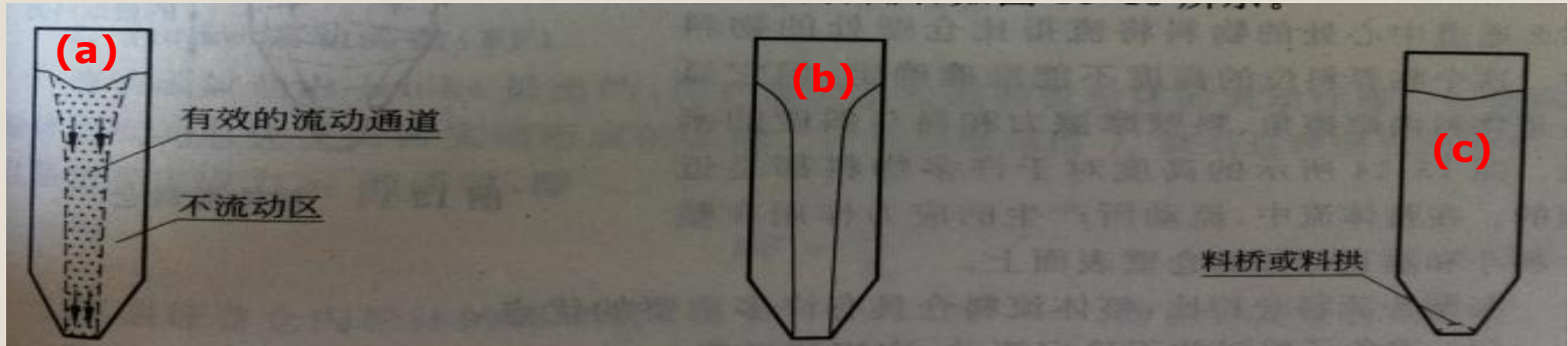
与液体不同，粉体流出速度与料层高度无关，因为孔口上部粉体颗粒相互挤压形成的拱构造承受着来自上部的粉体压力。流动中形成的料拱为**动态拱**，与静态拱不同，在卸料过程中，构成动态拱颗粒不断落下，而替代的新颗粒又不断地补充进来形成新的平衡。

质量排料速度经验公式： $u = k\rho_v D_0^n$

其中k与粉体物料有关的常数， ρ_v 为粉体容积密度； D_0 为卸料口有效尺寸， $n=2.5-3.0$ 。

➤ 粉体在料仓中的流动模式：

■ **漏斗流**：也称为“核心流动”，发生在平底的料仓或带料斗的料仓中，但料斗斜度太小或料斗壁面很粗糙以致物料难以沿料斗壁面滑动。



a 贯穿整个料仓的漏斗流，通道近似圆锥，下部直径近似等于出口有效面积最大直径，上部直径逐渐增加；

b 粉料固结，物料密实，流动性差，有效流动通道卸空物料后，形成穿孔或管道；

c 物料在卸料口上方形成拱桥或料拱，阻碍物料下落

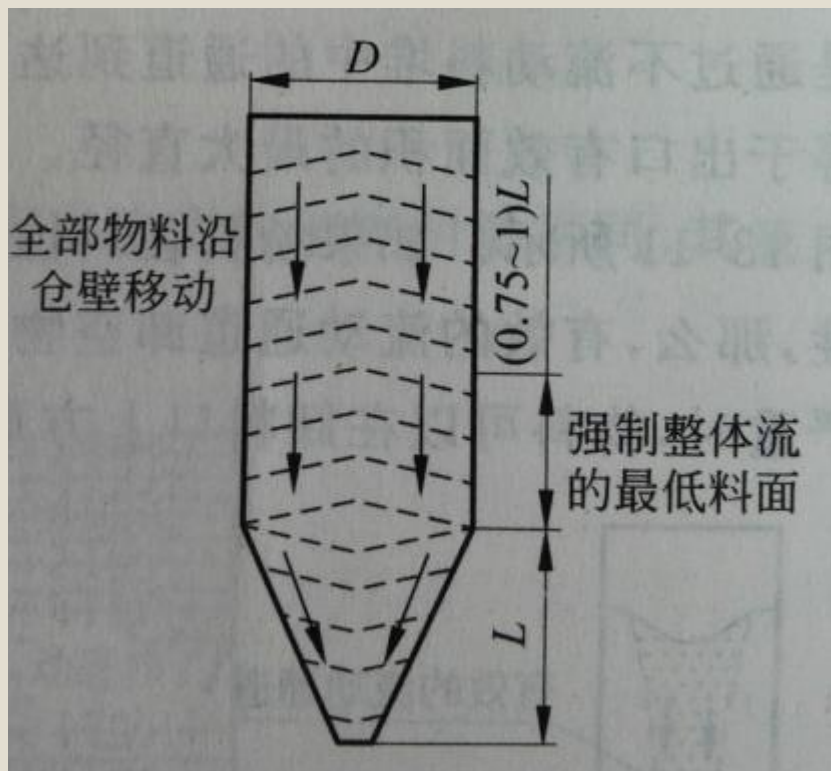
缺点

出料口流速不稳定；料拱或穿孔崩塌时，细粉料会无法控制的倾泻出来；
密实应力下，不流动区留下的粉料可以变质或结块；沿料仓壁的长度安装的料位指示器处于不流动区的物料下面，不能正确指示料仓下部的料位

■ 整体流

发生在带有相当陡峭而光滑的料斗筒仓内，物料从出口全面积卸出。整体流中，流动通道与料仓壁或料斗壁是一致的，全部物料都处于运动状态，并贴着垂直部分的仓壁和收缩的料斗壁滑移。

如果料位高于料斗与圆筒转折处上面某个临界距离时，那么料仓垂直部分的物料就可以整体流的形式均匀向下运动。如果料位降到该处以下，那么通道中心处的物料将流得比仓壁出的物料快，这个临界料位的高度不能准确确定，但与粉体物料内摩擦角、料壁摩擦力以及料斗斜度密切相关。



整体流料仓

与漏斗流料仓相比，整体流料仓优点：

- (1)避免了粉料的不稳定流动
- (2)消除了筒仓内的不流动区
- (3)形成了先进先出的流动，降低存储期间结块、变质和偏析问题
- (4)颗粒偏析被大大减少或杜绝
- (5)消除料位差对粉料密度的影响
- (6)保证物料在不同界面的流动性、物料密实程度、透气性和均匀性。

a3 粉体物料的储存

➤ 在生产过程中，由于下列因素造成了物料在工序间储存的必要性。

■ 外界条件的限制

受矿山开发、运输以及气候季节性的影响，原料进厂总是间歇性的，因而需要一定储备

■ 设备检修和停车

保证连续生产需求，应考虑满足下一步工序足够的储存量

■ 质量均化

对进厂原料或半成品的水分、组分或化学成分进行均化

■ 设备能力的平衡

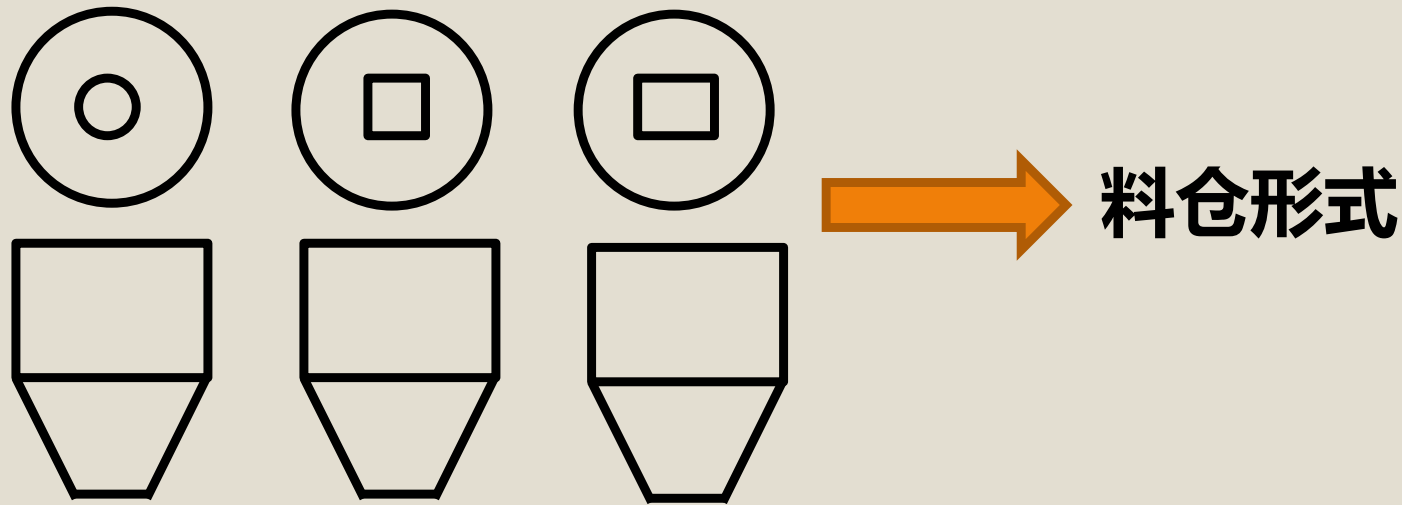
不同设备的加工能力、运转效率都不一致；储料设备大致可以分为以下两类：

(1) 用于存放粒状、块状料的堆场、堆棚和吊车库

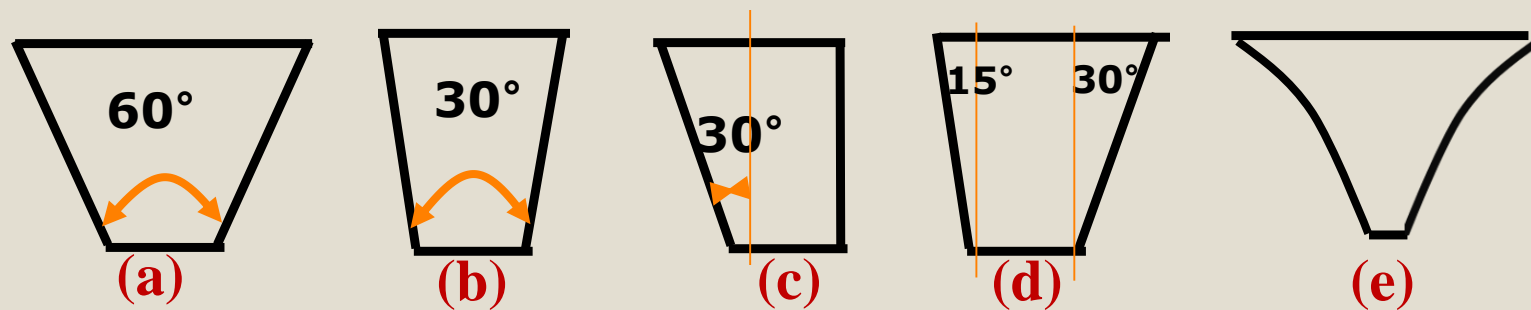
(2) 用于储存粉料的储料容器，如料库，使用收齐为一周甚至一个月以上；料仓，使用周期以天或小时计；料斗，容量较小，用以改变料流方向和速度，能顺利的进入下一道工序的设备内

a4 料仓与料斗的结构

➤ 料仓与料斗在形状和结构上没有严格界限，料仓由筒仓和料斗两部分组合而成，最常用的料仓横断面形状为方形、矩形和圆形。



➤ 料斗的设计对于料仓的功能好坏非常重要，料斗改变了料仓中物料的流动方向，同时，料斗的构造形式决定了物料流向卸料口方向的收缩能力，常用的料斗形状是与圆形料斗仓结合使用的圆锥形料斗。



附着性粉体排出容易程度： $c > b > a > d > e$

a5 料仓常见故障及对策

➤ 粉体的偏析及防治措施

■ **偏析**：粉体在运动、成堆、卸料时因理化性质（粒径、颗粒密度、颗粒形状、表面性状等）差异导致物料发生分级和分离效应，使粉体层组织呈不均质现象。

■ 偏析现象在粒度分布范围宽的自由流动粉体物料中经常发生，但在粒度小于 $70\mu\text{m}$ 的粉料中却很少见；一般粘性物料不易发生偏析，而包含粘性以及非粘性两种成分的粉料很容易发生偏析；

■ 偏析机理

(1)**附着偏析**：粉体进入料仓，由于一定落差，在重力沉降过程中，粗料与细料分开，细料重力小，吸附于仓壁，在外力振动时附着料层剥离，使卸料前后粉体粒度分布不均；对静电感应强的微粉附着作用更严重

(2)**填充偏析**：物料在仓内以偏析角堆积，加料速度慢时，偏析角表面大颗粒如同筛网将小颗粒截留，而大颗粒下落至底部，产生偏析，因此提高粉体落料速度可削弱填充偏析。

(3)**滚落偏析**：粗颗粒滚动摩擦系数小于细颗粒，因此粗颗粒沿静止粉体层表面滚落速度大于细颗粒，形成粒度偏析。

a5 料仓常见故障及对策

■ 防止偏析措施

(1) 均匀投料法

- ✓ 设多个投料口，使多种粒度的各种组分能够均匀分布在料仓中部和边缘区域。投料速度越快，越有利于避免偏析，所以要尽可能缩短投料流径；

(2) 料仓的构造

- ✓ 采用细高料仓，即在相同料仓容积条件下，采用直径小而高度大的料仓；
- ✓ 在料仓中采用挡板将直径大的料仓分割成若干个小料仓；
- ✓ 设置中央孔管，即在管壁上设置若干窗孔，粉体由不同窗孔进入料仓不同位置，起到了多点装料的效果；
- ✓ 侧孔卸料，即粉体从垂直料仓侧面的孔卸出，可获得比较均一的料流。

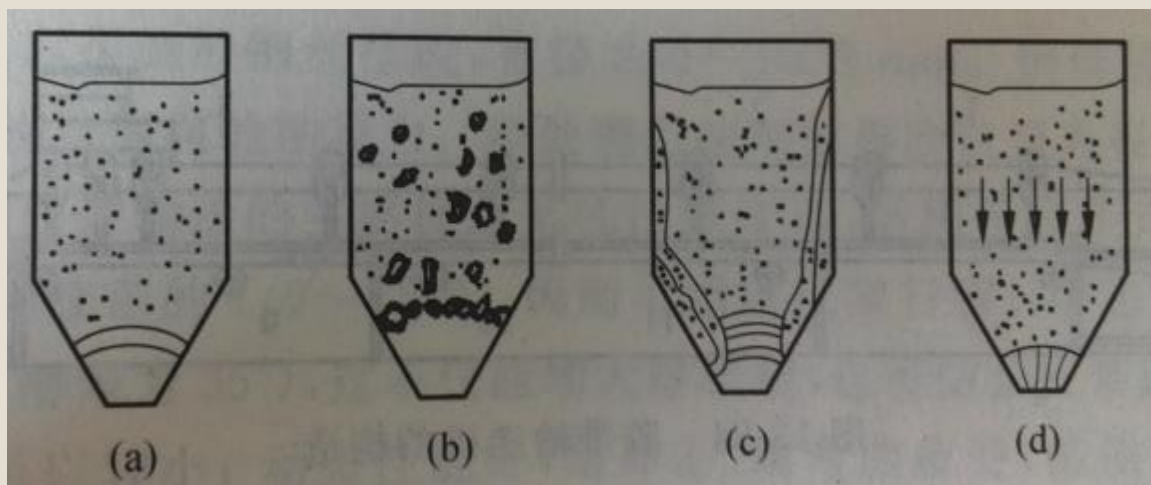
(3) 物料改性

- ✓ 将物料破碎到尽可能均一的粒度或粉末到尽可能细，都能有效消除偏析。当物料以湿态储存且不影响其性质时，可以通过团聚现象消除粒度偏析。

➤ 粉体静态拱及防治措施

料仓内粉体由于受附着力和摩擦力作用，在某一料层可以产生向上的支持力，当与上方物料向下的压力达到平衡时，这一料层下方称为静平衡，造成料仓内物料不能正常卸出。静态拱一般可分为四类：

- **压缩拱**：粉体受料仓压力，使固结强度增加导致结拱
- **楔形拱**：不规则块状物料相互啮合架桥成拱
- **粘结粘附拱**：粘结性强物料因受潮、静电吸附等作用而粘附于仓壁
- **气压平衡拱**：料仓气密性差，空气从底部漏入仓内，上下压力平衡而成拱



静态拱的类型

a压缩拱；b楔形拱；c粘结粘附拱；d气压平衡拱

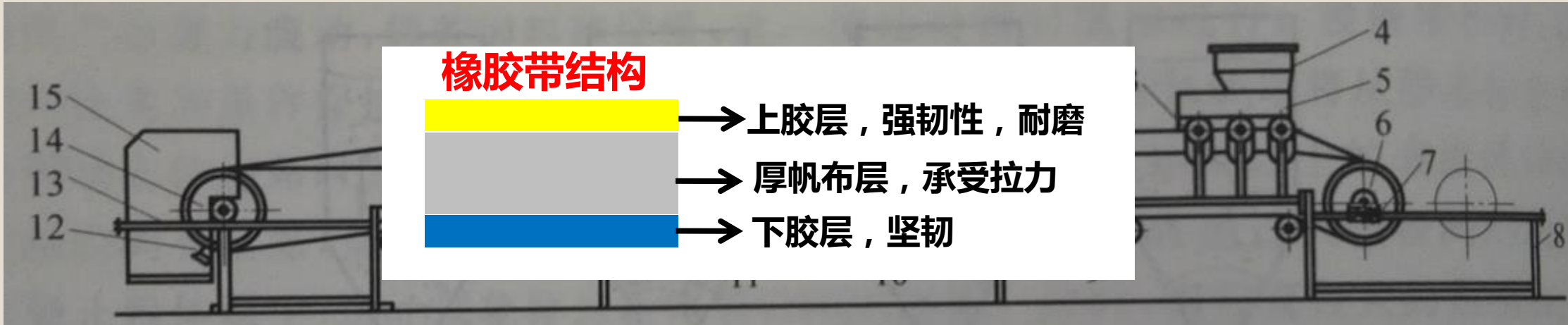
防止措施

- (1) 改变料仓性质、尺寸、加大卸料口等
- (2) 降低料仓内粉体压力
- (3) 减少仓壁摩擦阻力
- (4) 采用助流装置，如仓内搅拌器，仓壁振荡器等

6.2 粉体的输送

a1 胶带输送机

- 工业过程中应用最普遍的连续式输送机械之一，可用于水平方向和坡度不大的倾斜方向输送粉体和成件物料的输送。具有生产效率高、运输距离长、工作平稳可靠、结构简单、操作方便等优点。
- 按机架结构不同，可以分为固定式、可搬式和运行式三种，工作部分相同，机架部分不同



胶带输送机的构造

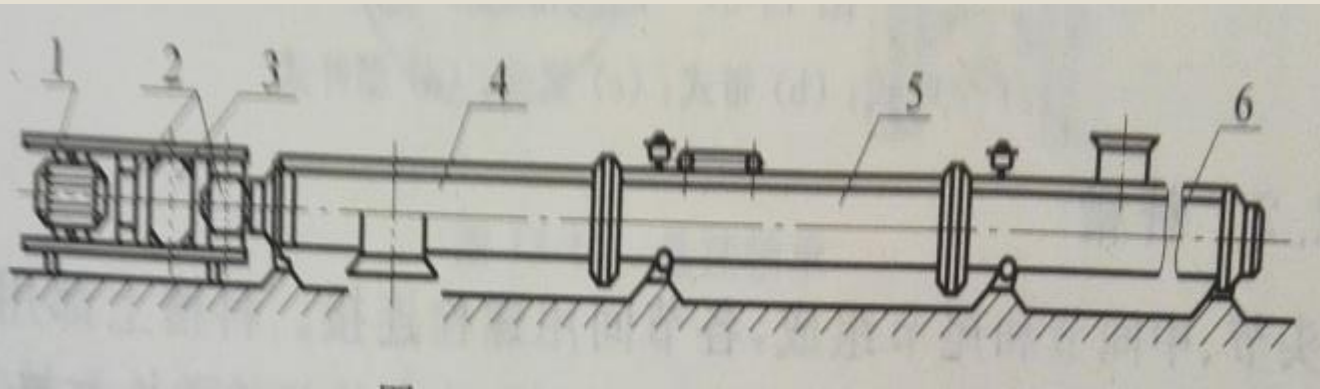
1胶带；2上托辊；3缓冲托辊；4漏斗；5导料槽；6传动滚筒；7螺旋拉紧装置；8尾架；9空段清扫器；10下托辊；11中间架；12弹簧清扫器；13头架；14传动滚筒；15头罩

输送带**有橡胶带和聚氟乙烯塑料带**两种，橡胶带由若干层帆布与橡胶复合而成；
托辊用于**支撑**运输带和带上物料的质量，减小输送带的下垂度，**保证平稳的运行**；
拉紧装置：拉紧胶带、**保证带与传动滚筒之间产生足够的摩擦牵引力**
清扫器：**清扫输送带上粘附的物料**（对粘湿物料尤为有效），保证有效的输送物料。

a2 螺旋输送机

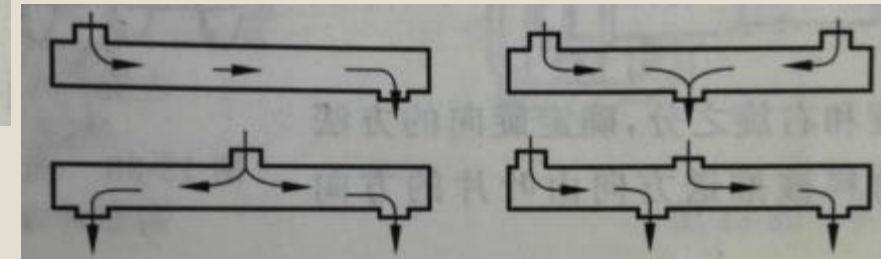
■ **优点：**构造简单、除传动装置外，无其他转动部件、占地面积小、易密封、管理、操作简单、便于多点装料和多点卸料。

■ **缺点：**运行阻力大，能耗高，机件磨损快，不适宜输送块状、磨损性大的物料，只适用于较低或中等生产率的生产中，且输送距离不宜太长。

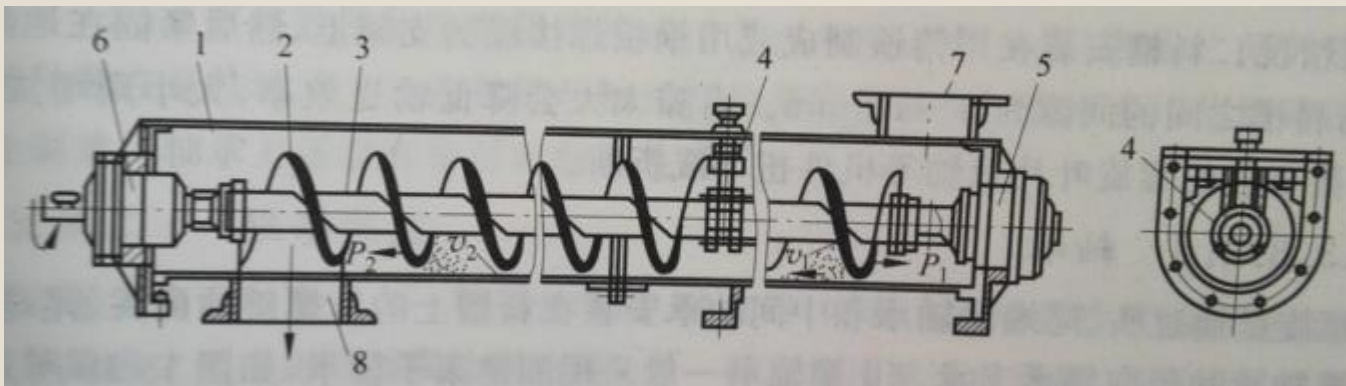


螺旋输送机结构

1电动机；2连轴器；3减速器；4头节；5中间节；6尾节



螺旋输送机装料和卸料的几种布置形式



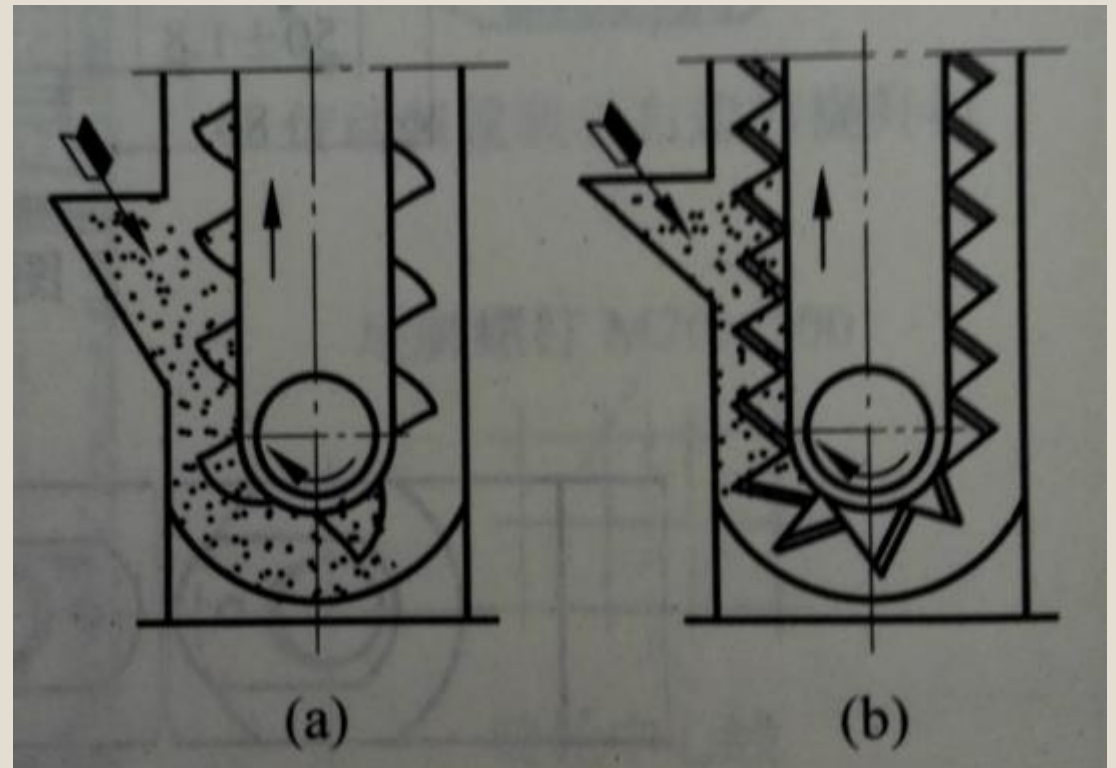
螺旋输送机内部结构

1料槽；2叶片；3转轴；4悬挂轴承；56端部轴承；7进料口；8出料口



a3 斗式提升机

- **优点：**结构简单、横截面的外形尺寸小、占地面积小、系统布置紧凑、具有良好的密封性、提升高度大等。
- 按牵引构件形式可分为**带式**和**链式提升机**。前者用胶带牵引，后者用链条牵引。
- ✓ **带式优缺点：**成本低、自重小、工作平稳无噪声、运行速度高、处理量大、但料斗在胶带上固定弱，不适用于输送难以舀取的物料；
- ✓ **链式优缺点：**不受物料种类限制、提升高度大，但运转时，链结间由于灰尘而磨损，降低寿命，增加检修次数

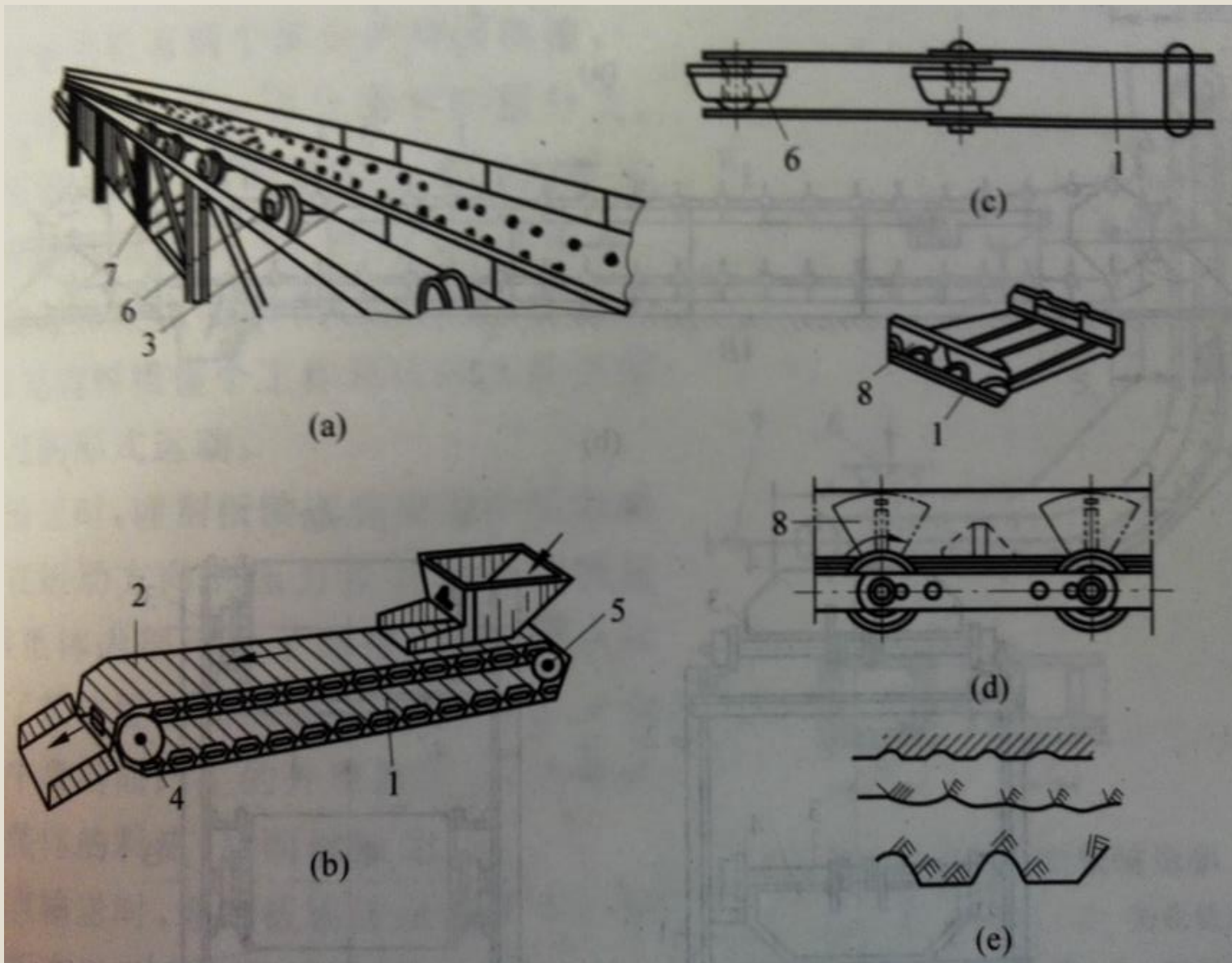


物料装载方式
(a)掏取式；(b)流入式

a4 链板输送机

➤根据输送物料种类与承载构件不同，主要有**板式**、**刮板**和**埋刮板**输送机三种。

■ **板式输送机**：输送能力大，能水平和倾斜输送物料、输送距离长，适合输送沉重、大块、易磨和炽热的物料（温度不超过 200°C ）；但结构复杂、成本高、维护工作繁重，一般只用于输送灼热、沉重物料

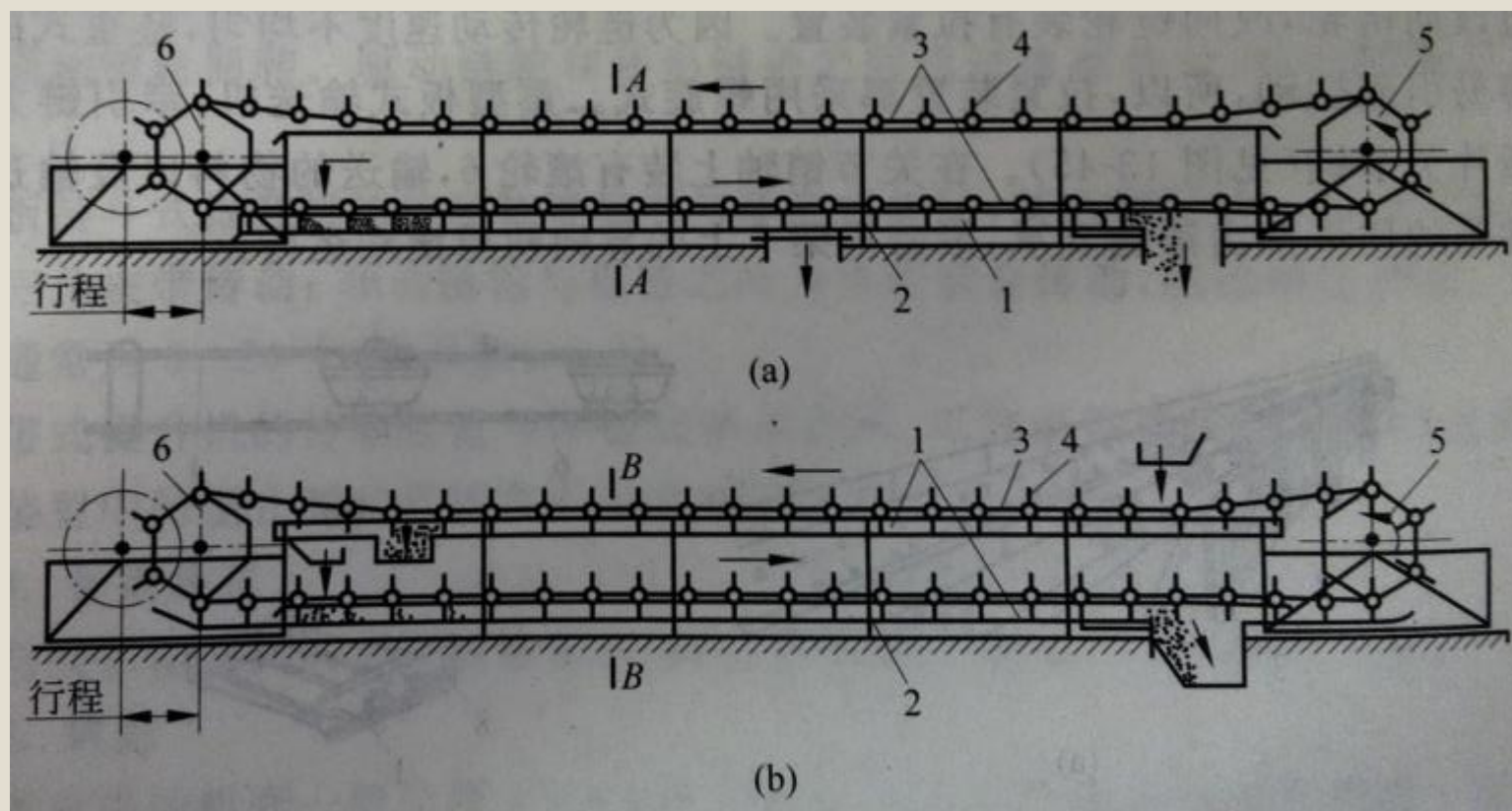


板式输送机

1牵引链；2平板；3槽形板；
4驱动链轮；5改向链轮；6
滚轮；7机架；8拦板

(a) 有固定拦板；(b) 无拦
板；(c) 平板片；(d) 槽形板
片；(e) 波浪形板片

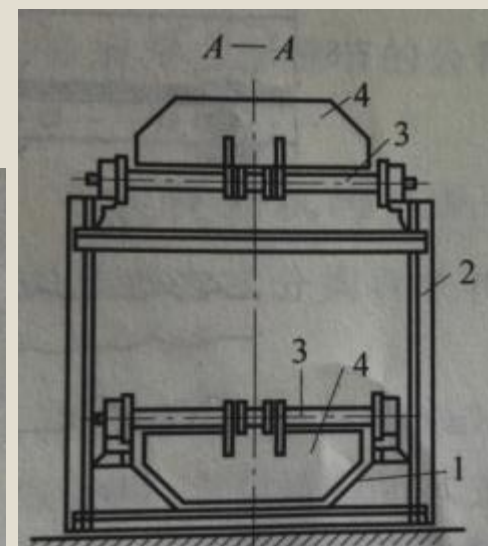
■ **刮板输送机**：链条牵引刮板在料槽内运动对物料进行输送。结构简单、可在任意位置装载和卸载，适合在水平或小倾角方向输送散、粒状物料，如碎石，煤和水泥熟料；但料槽和刮板磨损快，功率消耗大，不适宜输送易碎，有粘性和易被挤压成块的物料。



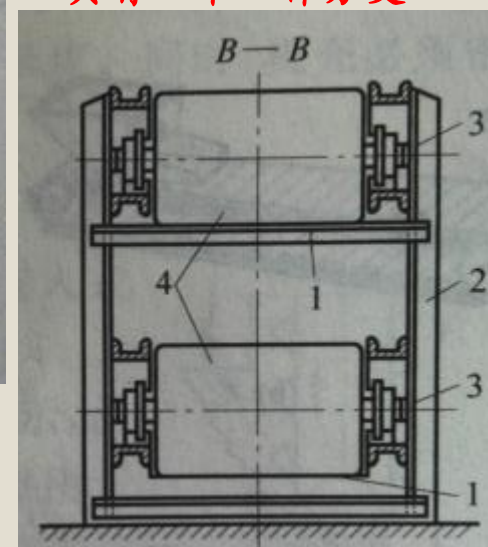
间歇式刮板输送机

1料槽；2机座；3牵引链；4刮板；5驱动链轮；6改向链轮

(a) 具有一个工作分支；(b) 具有两个工作分支

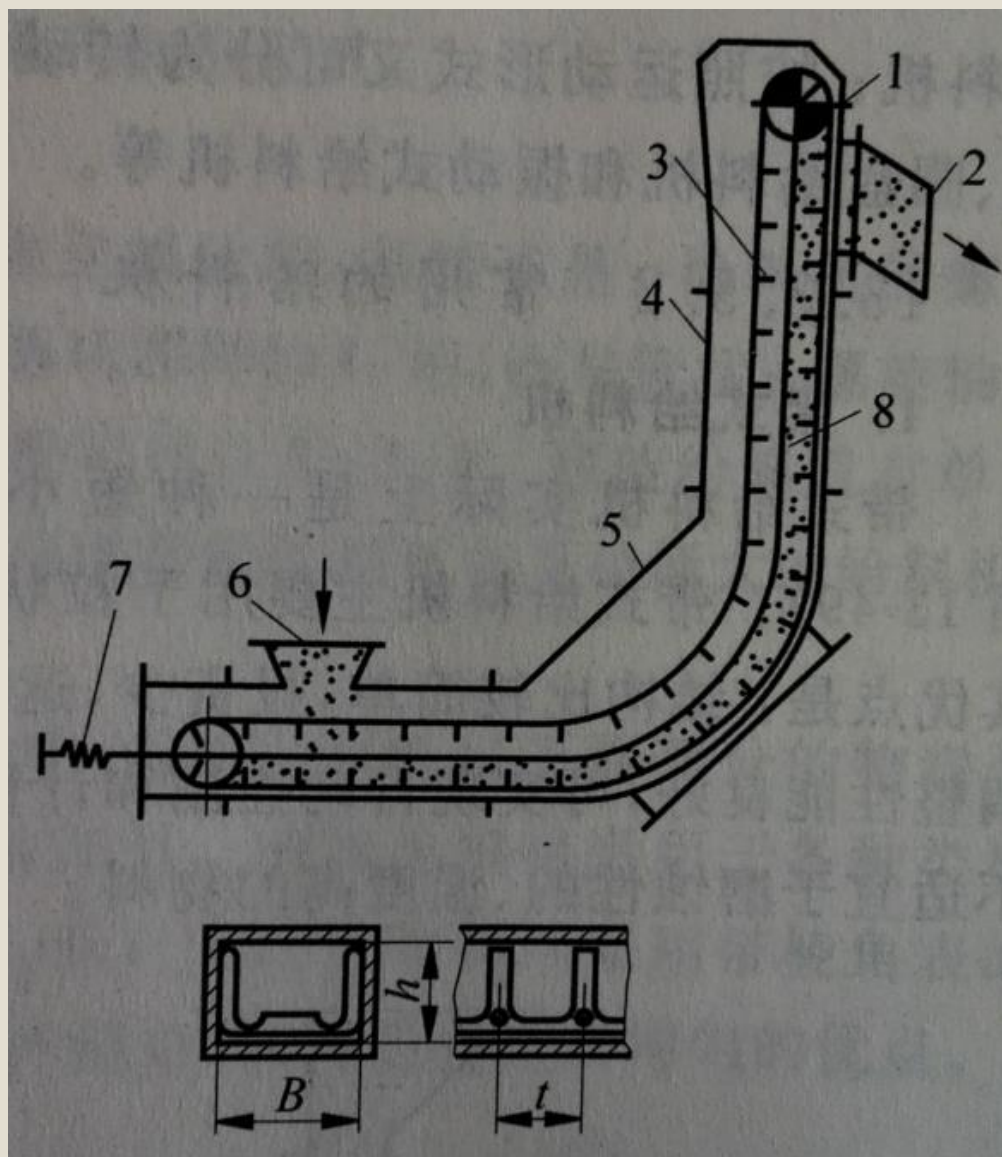


具有一个工作分支



具有两个工作分支

■ **埋刮板输送机**：在水平方和垂直方向都能很好地输送粉体和散粒状物料。主要用于输送粒状、小块状或粉状物料，物料在机壳内封闭运输，扬尘少，布置灵活，可多点装料和卸料，设备简单、运行平稳，电耗低。不适用于输送磨损性和硬度大的块状物料，也不适用于输送粘性大的物料，对于流动性特强的物料，由于物料的内摩擦系数小，难以形成足够的内摩擦力来克服外部阻力和自重，因而难以运输。



埋刮板输送机

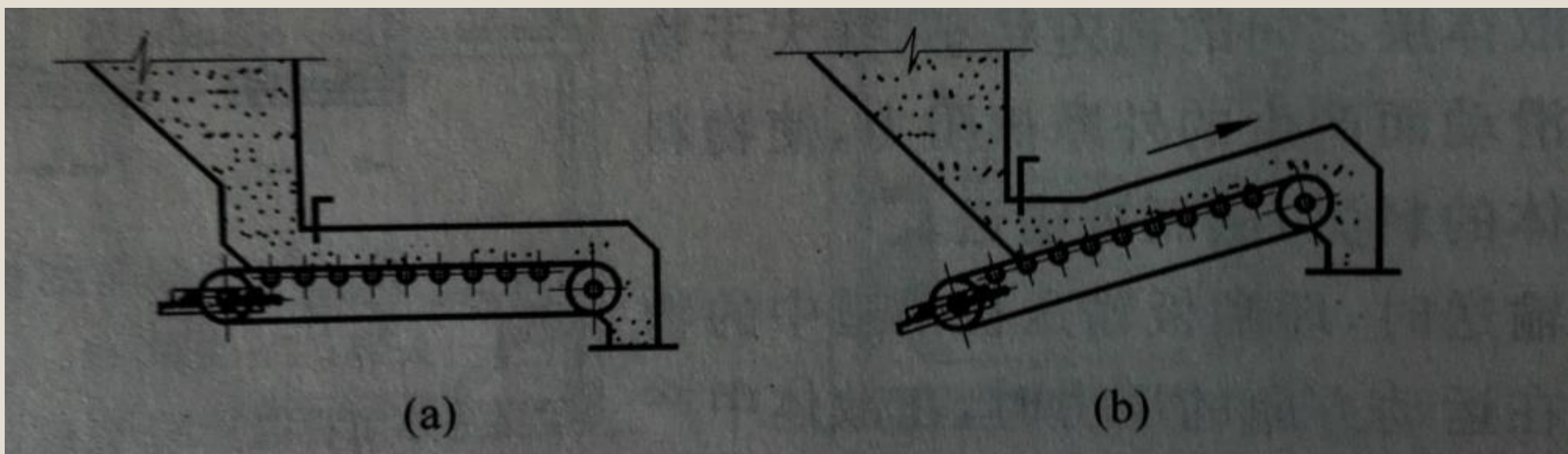
1头部；2卸料口；3刮板链条；4中间机壳；5弯道；
6加料段；7尾部拉紧装置；8槽道

a5 给料机

➤给料机又称为**加料机**、**喂料机**和**卸料机**等，一般装设于存仓的卸料口，依靠物料的重力作用以及给料设备的工作机构的强制作用，将库仓内的物料卸出并连续均匀的给入后续设备。

■ **带式给料机**：一种短小的带式输送机，可水平或倾斜安装，主要用于粒状和小块状的物料，很少用于中等块度的物料。

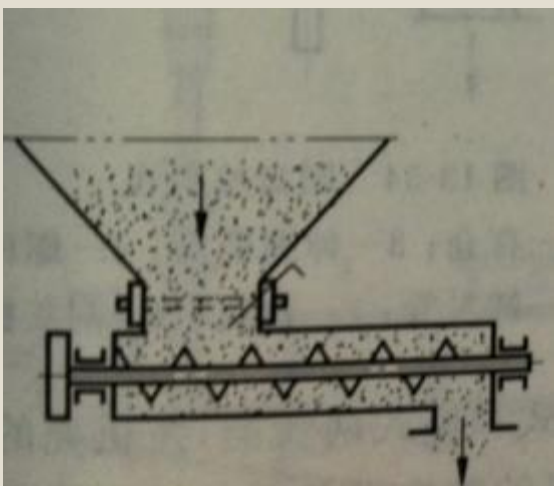
优点：结构简单、投资少、运行可靠、在稳定运行时所需功率较低，给料量调整性能好，可实现自动控制和计量，但需要占据较大空间，胶带易磨损，不适用于磨蚀性、温度高的物料



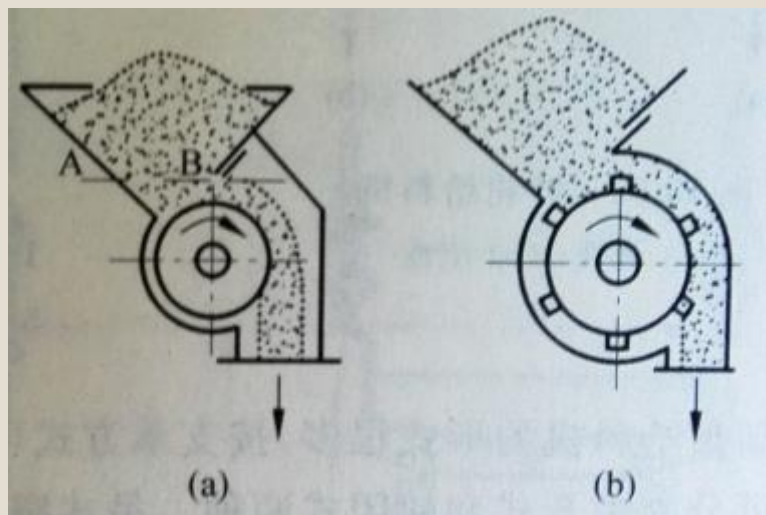
带式给料机

■ **转动式给料机**：主要用于粉状物料的输送，其特点是工作构件绕着固定轴转动，包括螺旋式、滚筒式、叶轮式、圆盘式和振动式。

优点：结构简单、投资少、运行可靠、在稳定运行时所需功率较低，给料量调整性能良好，可实现自动控制和计量，但需要占据较大空间，胶带易磨损，不适用于磨蚀性、温度高的物料

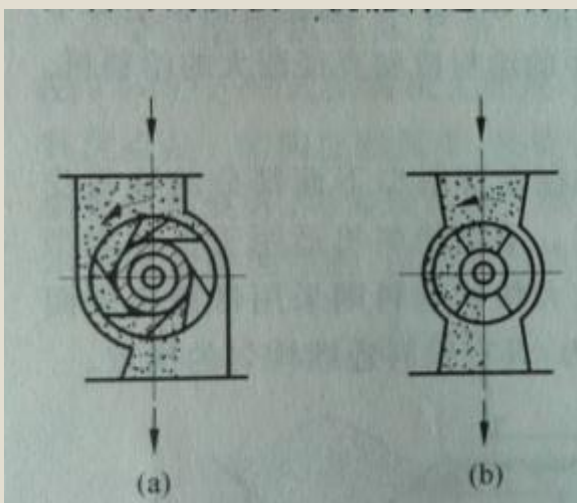


螺旋式给料机

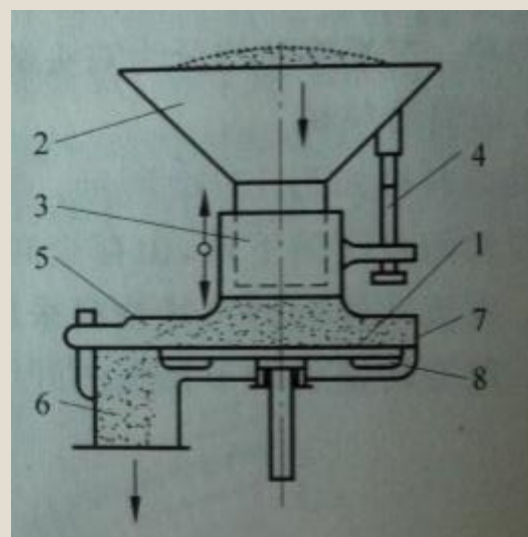


滚筒给料机

(a) 平滑型；(b) 齿轮型

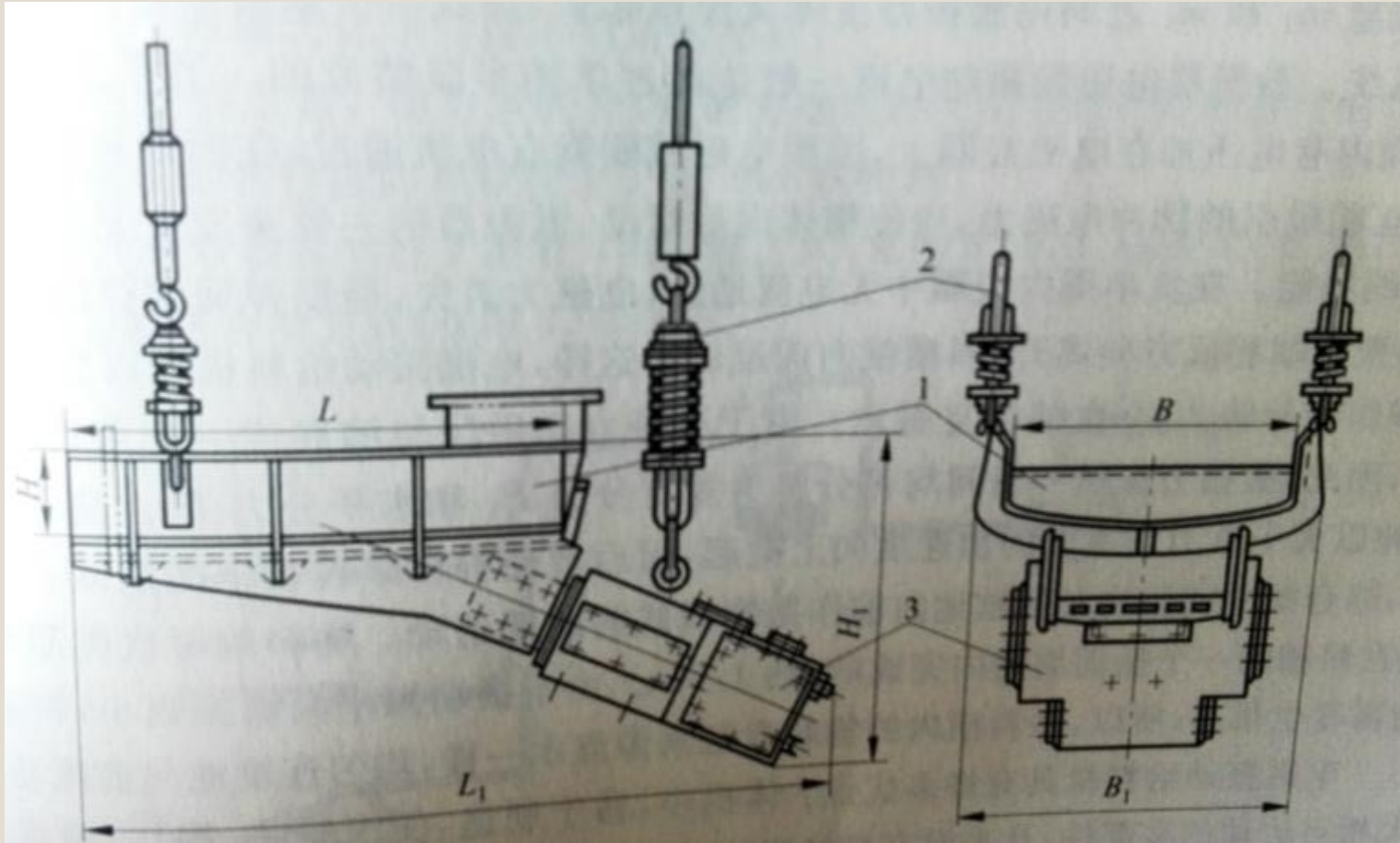


叶轮给料机



1圆盘；2库仓；
3伸缩套筒；4螺
杆；5刮板；6卸
料管；7盘壳；8
刮灰板

圆盘给料机



电磁振动给料机

1料槽；2电磁激振器；3减振器

优点：体积小、易于制造，
便于安装、操作、维修方便，几乎无机械摩擦，无润滑点、密封性好，功率消耗低，设备运转费用低，可在湿热环境下工作，用于供给高温、腐蚀性物料，可连续平稳调节给料速度，给料均匀。

缺点：安装调试要求高，电压变化影响给料准确性，不宜供送极细粉料，也不宜供送粘性、潮湿物料

6.2 气力输送

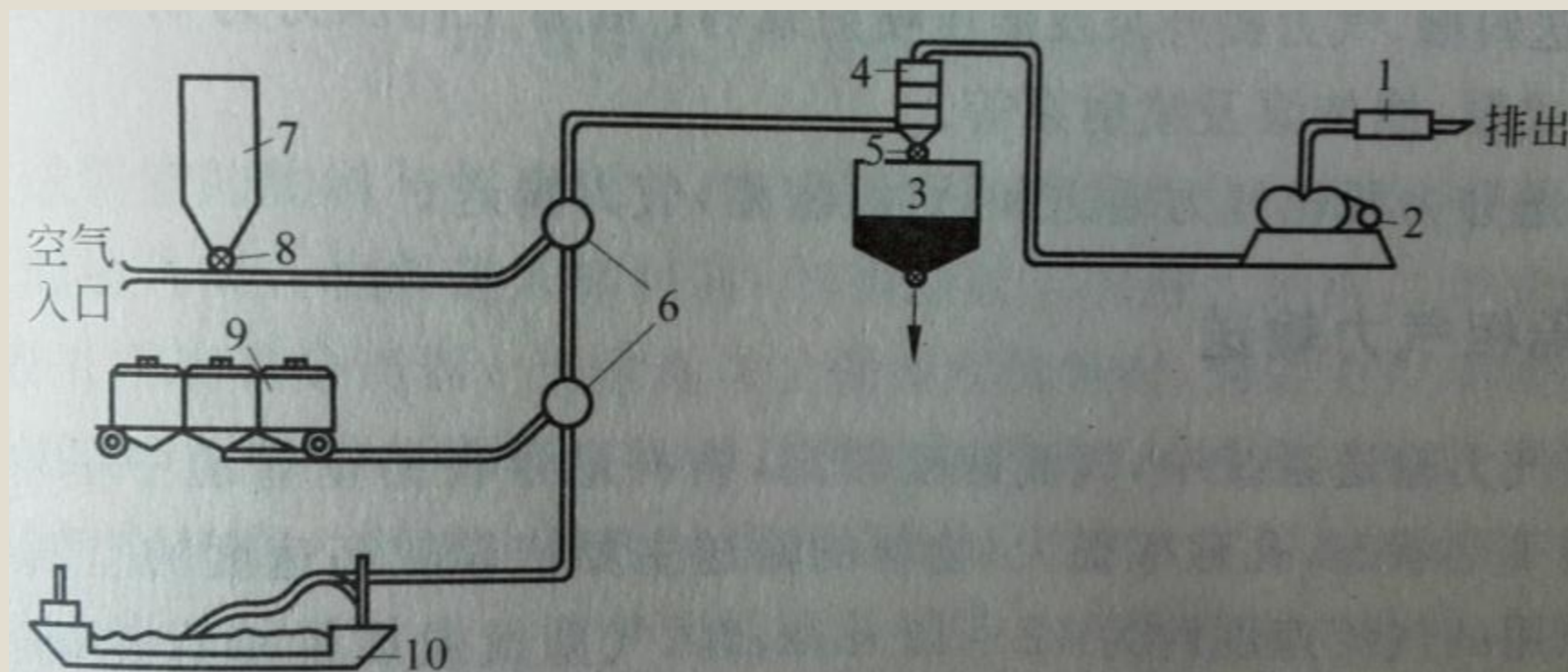
a1 简介

➤ **气力输送**是借助空气或气体在管道内流动来输送干燥的散装固体颗粒或颗粒物料的输送方法。空气或气体的流动直接给管内物料提供所需的能量，管内空气的流动则是由于两端压力差来推动。

➤ **优点**：直接输送散装物料，不需要包装，**作业效率高**；**设备简单、占地面积小、维修费用低**；可实现自动化遥控，管理费用少；**输送管道布置灵活**，使工厂配制合理化；输送过程中能**同时进行物料的混合，分级，干燥，除尘，冷却和分离过程**；可方便实现集中、分散、大高度、长距离，**适应各种输送地形**，可采用冻性气体输送化学性能不稳定的物料。

➤ **缺点**：**动力消耗大**、短距离输送时尤为显著，需配备压缩空气系统，**不宜输送粘附性强和粒度大于30mm的物料**。

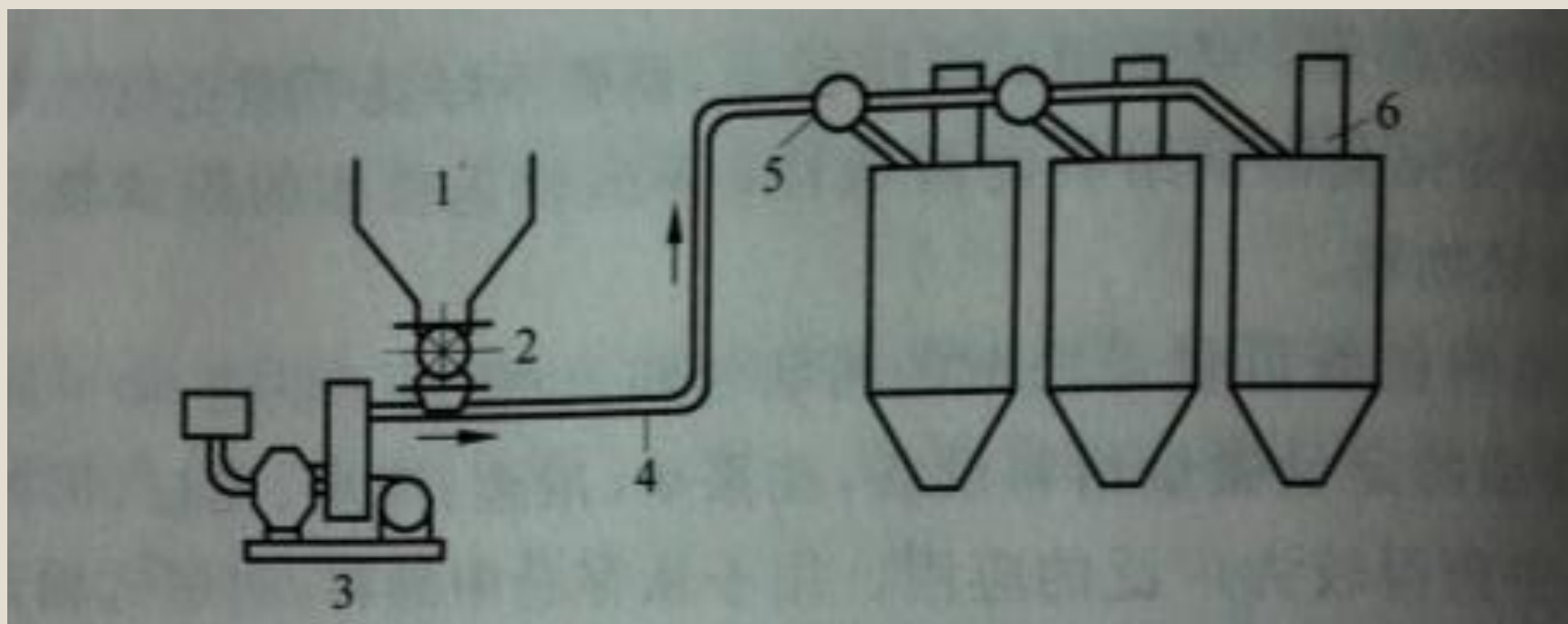
➤ **分类**：吸送式、压送式和吸送、压送相结合的方式。



吸送式气力输送系统

1消声器；2引风机；3料仓；4除尘器；5卸料闸阀；
6转向阀；7加料仓；8加料阀；9铁路漏斗车；10船舱

特点：系统较简单，无粉尘飞扬，可同时多点取料，工作压力较低（ $<0.1\text{MPa}$ ），但输送距离较短，气固分离器密封要求严格。



压送式气力输送系统

1料仓；2供料器；3鼓风机；4输送管；5转向阀；6除尘器

特点：工作压力较大（ $0.1\sim 0.7\text{ MPa}$ ），输送距离长，对分离器密填充要求低，但易混入油水等杂物，系统较复杂。

压送式又分为低压输送和高压输送，前者工作压力小于 0.1 MPa ，供料设备有空气输送斜槽、气力提升泵及低压提升泵等，后者工作压力为 $0.1\sim 0.7\text{ MPa}$ ，供料设备有仓式、螺旋、喷式泵等。

思考

- 粉体偏析机理及防治措施
- 气力输送原理是什么？有什么优缺点。