

第六讲 液压缸

- 6.1 液压缸的类型和特点
- 6.2 液压缸的典型结构和组成
- 6.3 液压缸的设计和计算



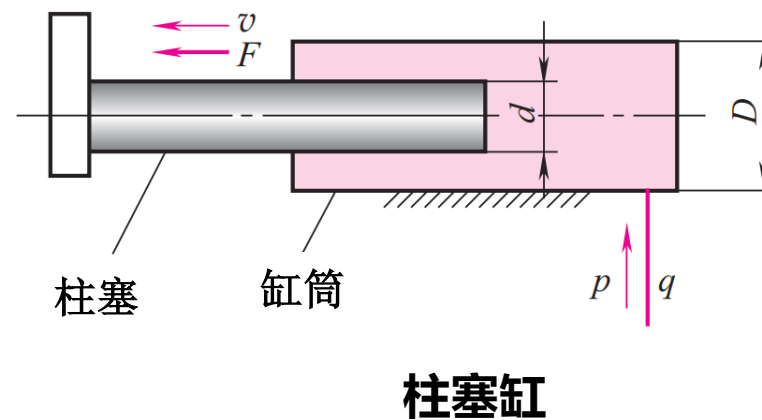
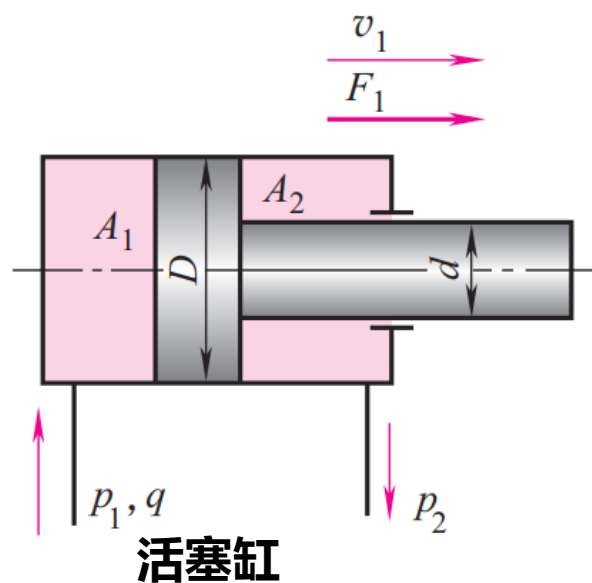
6.1 液压缸的类型和特点

液压缸

液压缸是液压系统中使负载作直线往复运动的执行元件。

- 液压能—>直线运动机械能
- 输入压力和流量，输出推力和速度

液压缸的类型



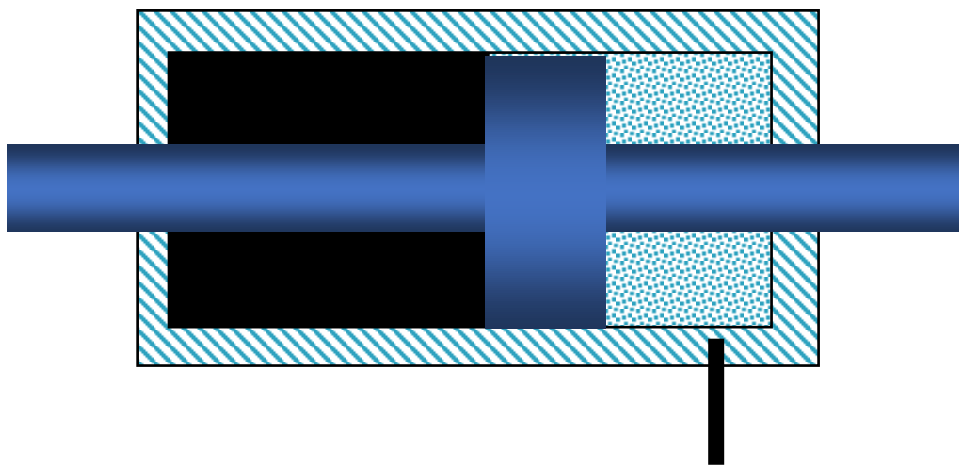
单杆活塞缸



6.1 液压缸的类型和特点

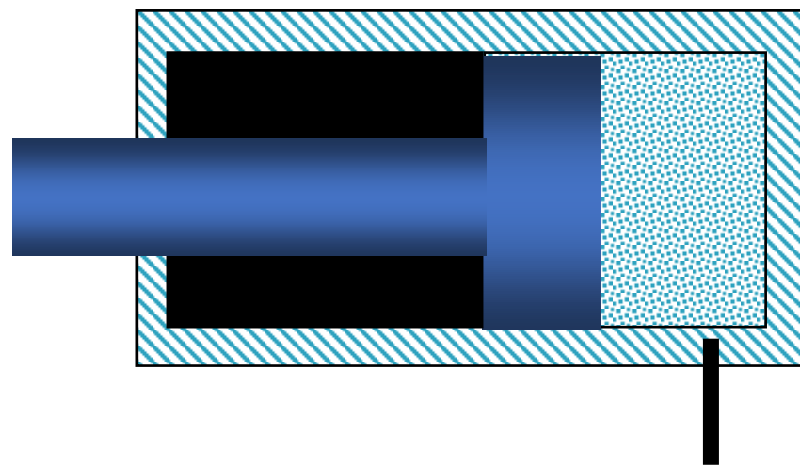
活塞式液压缸

可分为**双杆活塞缸**与**单杆活塞缸**。



双杆活塞缸

两腔面积相等

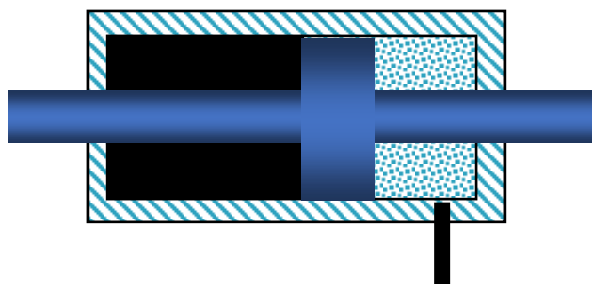


单杆活塞缸

两腔面积不相等

6.1 液压缸的类型和特点

双杆活塞缸 输出计算



双杆活塞缸

推力:

$$F_1 = F_2 = (p_1 - p_2)A\eta_m = (p_1 - p_2)\frac{\pi}{4}(D^2 - d^2)\eta_m$$

速度:

$$v_1 = v_2 = \frac{q}{A}\eta_v = \frac{4q\eta_v}{\pi(D^2 - d^2)}$$

- 推力可由两面**压力差**计算得到
- 速度可由**流量与面积比值**计算得到

流量决定速度

负载决定压力

A ——活塞的有效面积

D 、 d ——活塞和活塞杆的直径

q ——输入流量

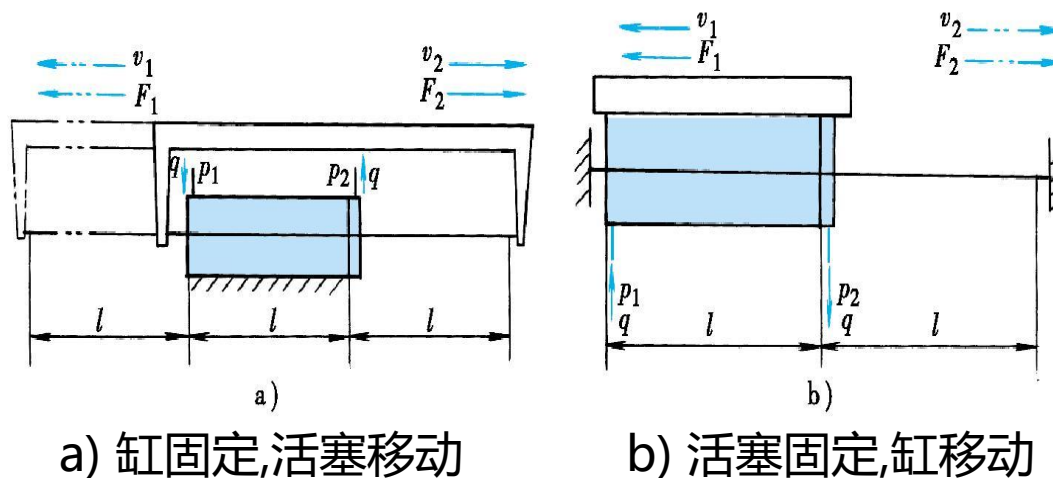
p_1 、 p_2 ——缸的进出口压力

η_m 、 η_v ——缸的机械效率、容积效率

6.1 液压缸的类型和特点

双杆活塞缸

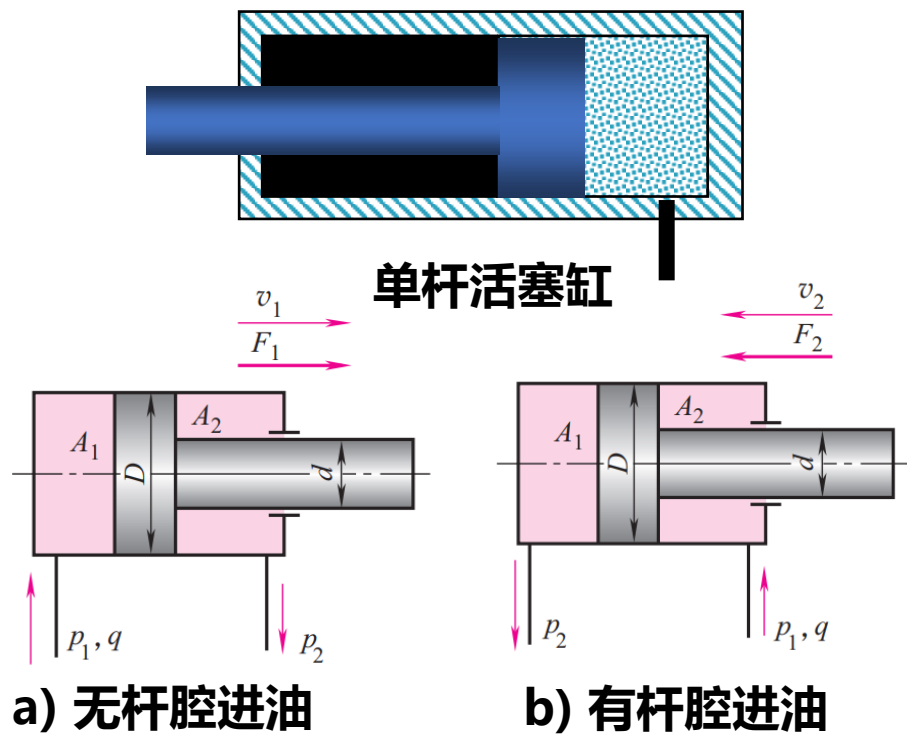
双杆活塞缸具有两种安装方式



- 当缸筒固定时，运动部件移动范围是活塞**有效行程的三倍**，适于中小型机械。
- 当活塞杆固定时，运动部件移动范围是活塞**有效行程的两倍**，可用于较大型机械。

6.1 液压缸的类型和特点

单杆活塞缸 输出计算



无杆腔进油时的推力:

$$F_1 = (p_1 A_1 - p_2 A_2) \eta_m = \frac{\pi}{4} [(p_1 - p_2) D^2 + p_2 d^2] \eta_m$$

速度:

$$v_1 = \frac{q}{A_1} \eta_v = \frac{4q\eta_v}{\pi D^2}$$

有杆腔进油时的推力:

$$F_2 = (p_1 A_2 - p_2 A_1) \eta_m = \frac{\pi}{4} [(p_1 - p_2) D^2 - p_1 d^2] \eta_m$$

速度:

$$v_2 = \frac{q}{A_2} \eta_v = \frac{4q\eta_v}{\pi (D^2 - d^2)}$$

A_1, A_2 ——无杆腔和有杆腔的有效面积

D, d ——活塞和活塞杆的直径

q ——输入流量

p_1, p_2 ——缸的进出口压力

η_m, η_v ——缸的机械效率、容积效率

由于**无杆腔面积大于有杆腔**($A_1 > A_2$):

- 伸出时, 推力较大, 速度较小
- 缩回时, 推力较小, 速度较大

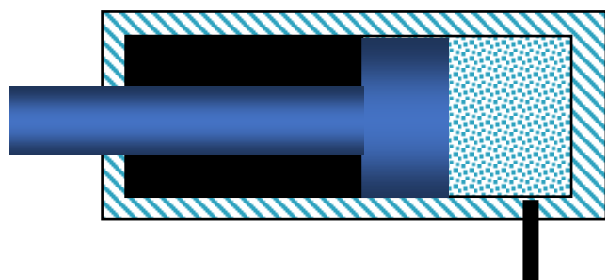
6.1 液压缸的类型和特点



浙江大学
ZHEJIANG UNIVERSITY

单杆活塞缸 往复速比

单杆活塞缸的往复速比同**活塞缸直径**与**活塞杆直径**比值相关。



单杆活塞缸

往复速比: $\lambda_v = \frac{v_2}{v_1} = \frac{D^2}{D^2 - d^2}$

活塞杆直径: $d = D \sqrt{\frac{\lambda_v - 1}{\lambda_v}}$

λ_v ——往复速比

v_1 、 v_2 ——伸出速度/缩回速度

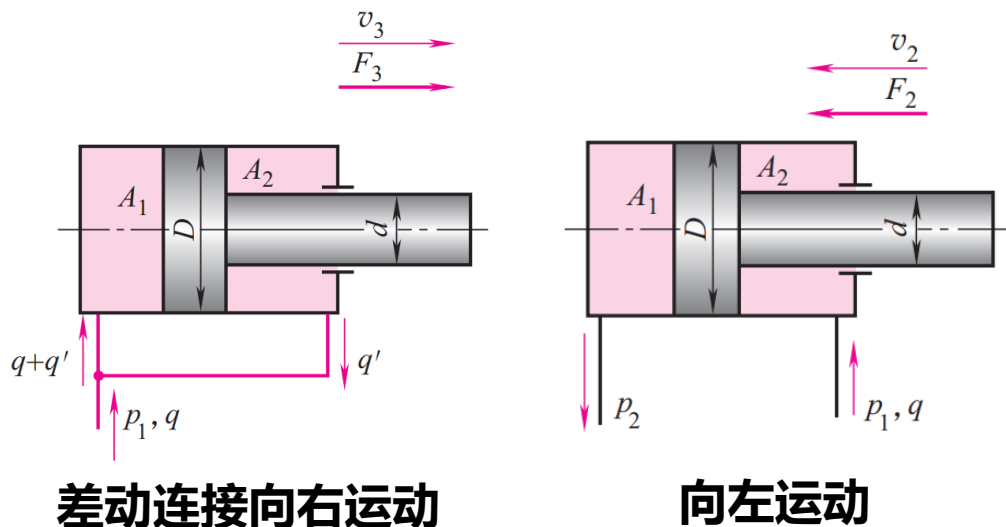
D 、 d ——活塞和活塞杆的直径

- 可由要求的**往复速比**计算确定活塞杆直径

6.1 液压缸的类型和特点

单杆活塞缸 差动连接

活塞两端同步加压，通过**面积差**产生压力差。



推力:

$$F_3 = p_1 (A_1 - A_2) \eta_m = p_1 \frac{\pi}{4} d^2 \eta_m$$

速度:

$$A_1 v_3 = q + A_2 v_3$$
$$v_3 = \frac{q}{A_1 - A_2} \eta_v = \frac{4q}{\pi d^2} \eta_v$$

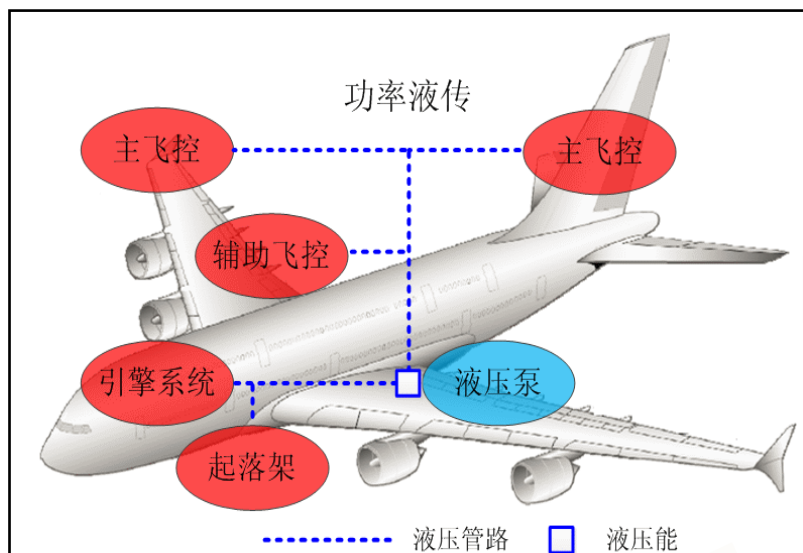
若要使差动缸向右和向左运动速度相同:

$$v_3 = v_2 \rightarrow D = \sqrt{2}d$$

- 差动连接时活塞只能向**一个方向**产生推力
返程需要使用**其他连接方式**产生推力;
- 流量一定的情况下, 差动连接能实现**快速运动**

6.1 液压缸的类型和特点

➤ 国际前沿：基于电动化的**分布式液压系统** → 高安全、高效能

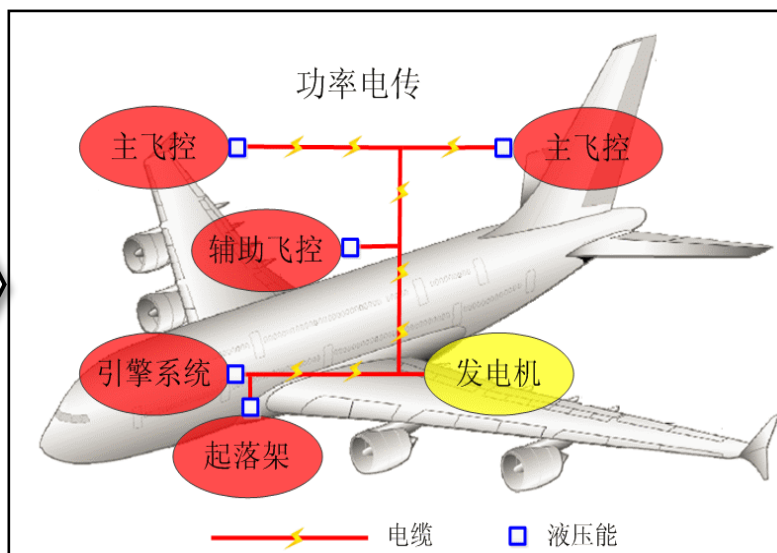


集中式液压系统 (功率液传)

- ※ 单泵↔多执行器
- ※ 高压管路易疲劳
- ※ 阀口节流调速

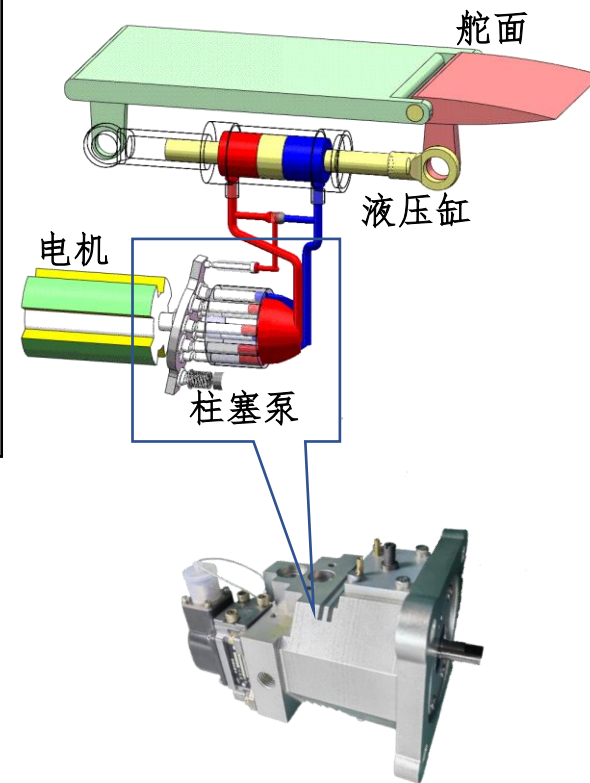


发动机驱动泵



分布式液压系统 (功率电传)

- ✓ 单泵↔单执行器
- ✓ 无复杂长管路
- ✓ 泵控容积调速



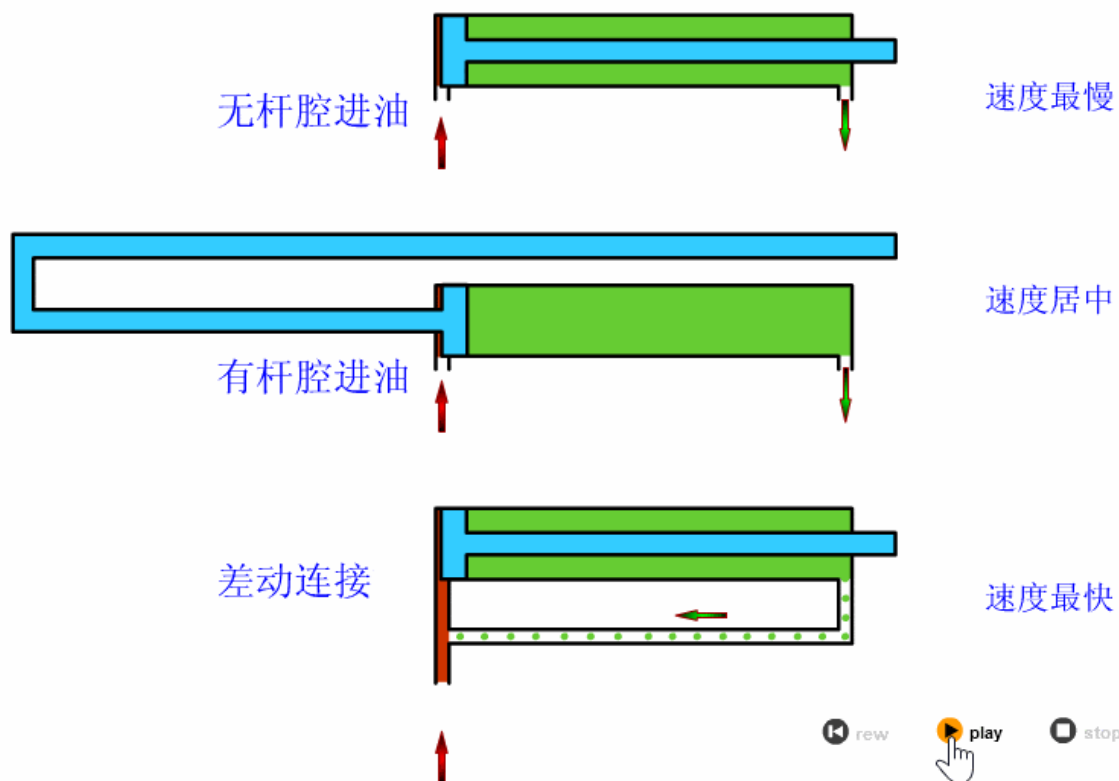
超高速轴向柱塞泵/马达

超高速轴向柱塞泵/马达是分布式液压系统的关键部件

6.1 液压缸的类型和特点

单杆活塞缸 差动连接

同流量的条件下，三种进油方式中，**差动连接**的速度最快（需要 $A_1 - A_2 < A_2$ ）



作用：减少流量输入、减少能量消耗

$$v_1 = \frac{q}{A_1} \eta_v$$

$$v_2 = \frac{q}{A_2} \eta_v$$

$$v_3 = \frac{q}{A_1 - A_2} \eta_v$$

A_1, A_2 ——无杆腔和有杆腔的有效面积

q ——输入流量

η_v ——缸的容积效率

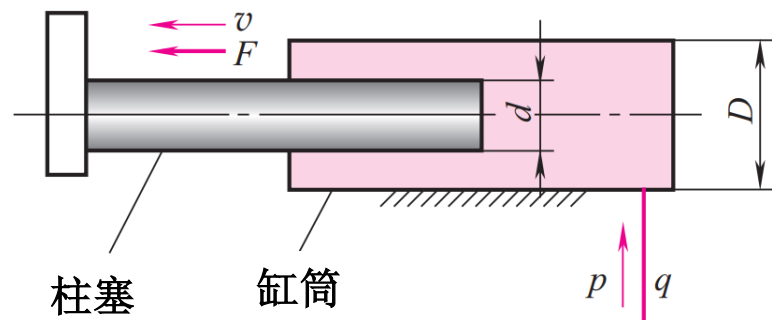
6.1 液压缸的类型和特点

柱塞缸

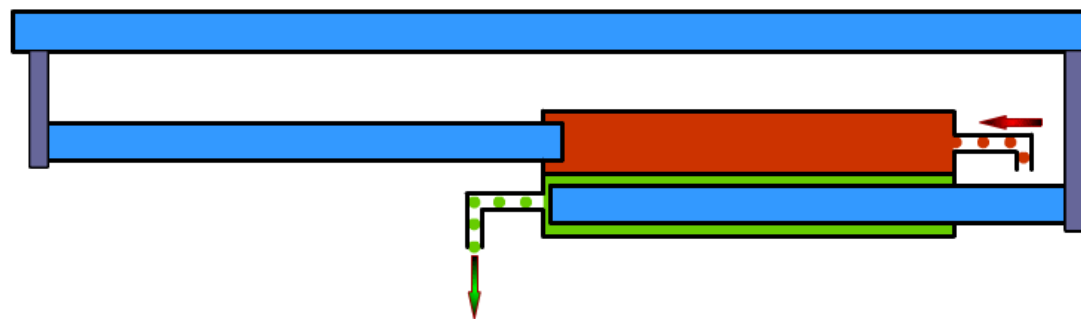
- 一个柱塞缸只能实现**一个方向**的运动，反向运动需要依靠外力
- 两个柱塞缸组合，也可实现往复运动
- 柱塞缸使用**导向套导向**，缸筒内壁不需要精加工，适用于**行程较长**的场合

推力: $F = pA\eta_m = p \frac{\pi}{4} d^2 \eta_m$

速度: $v = \frac{q\eta_v}{A} = \frac{4q\eta_v}{\pi d^2}$



单柱塞缸

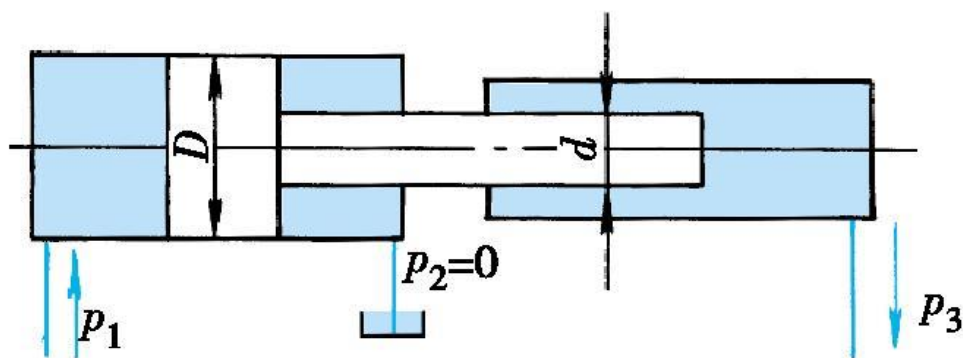


双柱塞缸

6.1 液压缸的类型和特点

增压缸

- 利用活塞和柱塞**有效面积不同**，实现加压
- 低压液压能→高压液压能



增压缸

输出压力:
$$p_1 \frac{\pi}{4} D^2 \eta_m = p_3 \frac{\pi}{4} d^2$$

p ——缸的进出口压力

D 、 d ——活塞和柱塞杆的直径

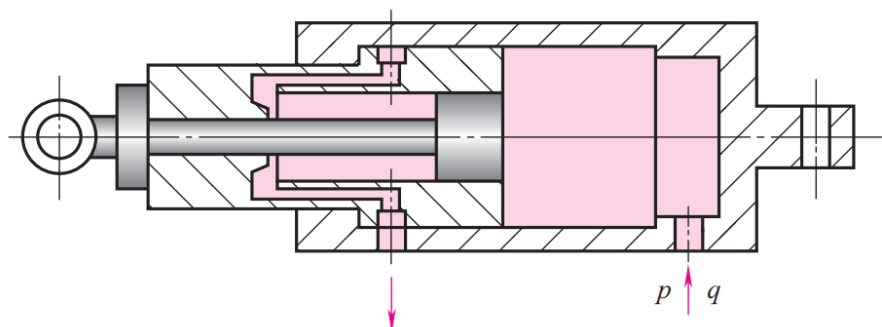
η_m ——缸的机械效率

6.1 液压缸的类型和特点

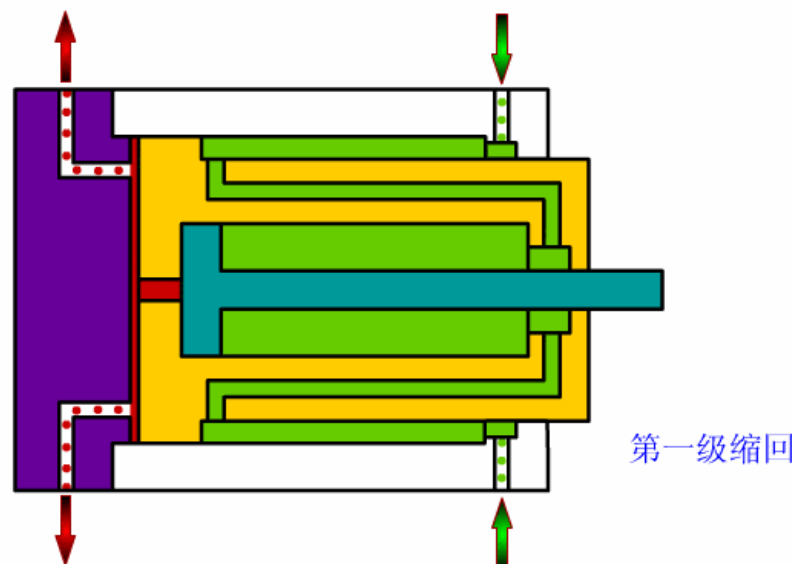


伸缩缸

- 由两个或多个活塞套装组成
- 各级活塞按**有效面积的大小顺序**依次动作、输出推力逐级减小、速度逐级增大
- **工作行程长、缩回尺寸很小**



双作用式两级伸缩缸

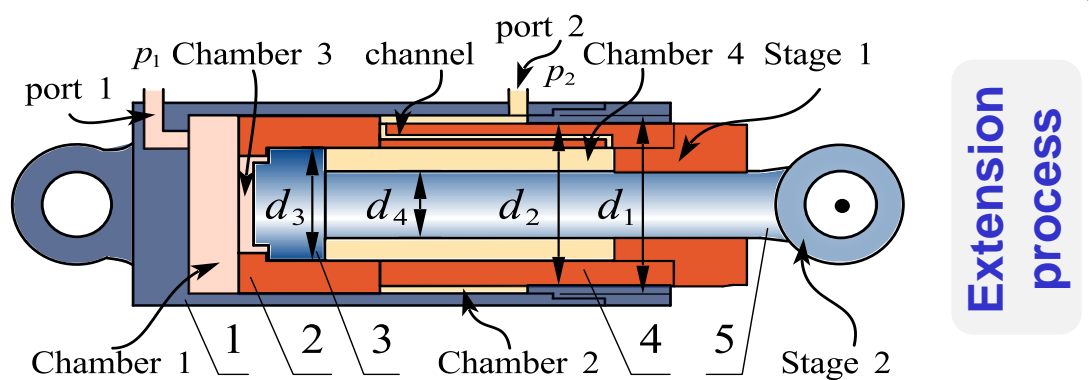


两级伸缩缸

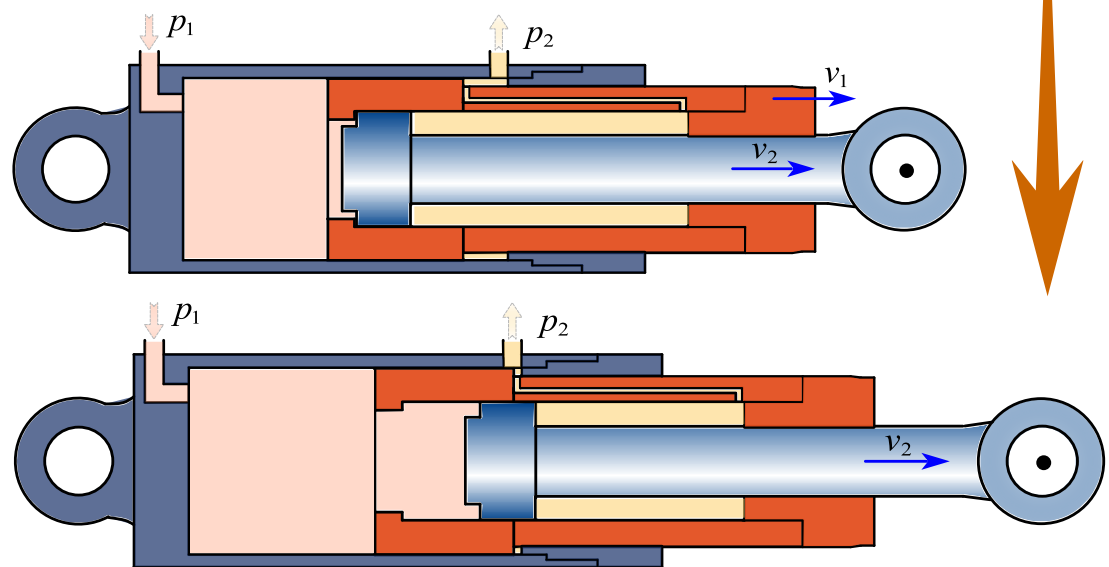


伸出

6.1 液压缸的类型和特点



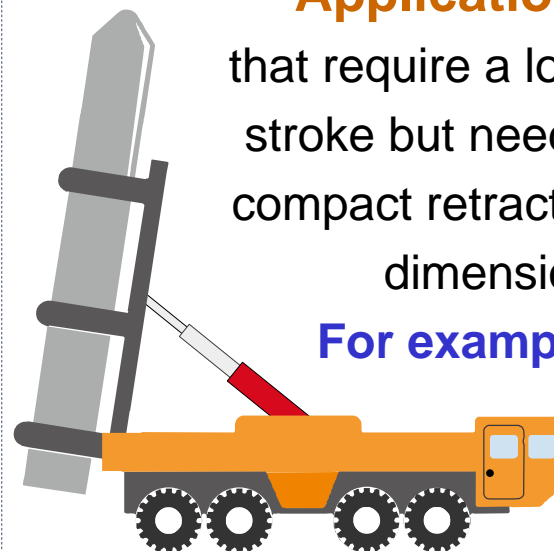
1-barrel, 2-piston 1, 3-piston 2, 4-piston rod 1, 5-piston rod 2 Figure 1 Schematic view of DATHC



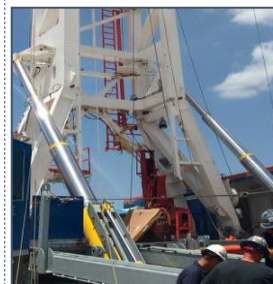
Applications

that require a long stroke but need a compact retracted dimension.

For example:



missile and rocket launchers

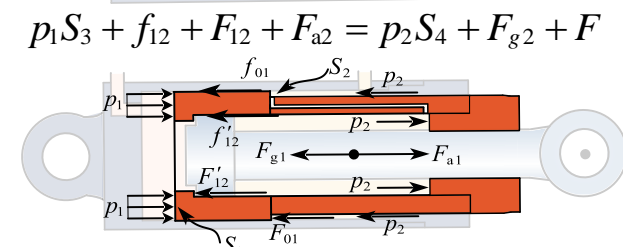
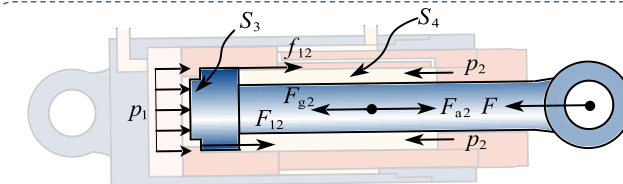


oil rigs

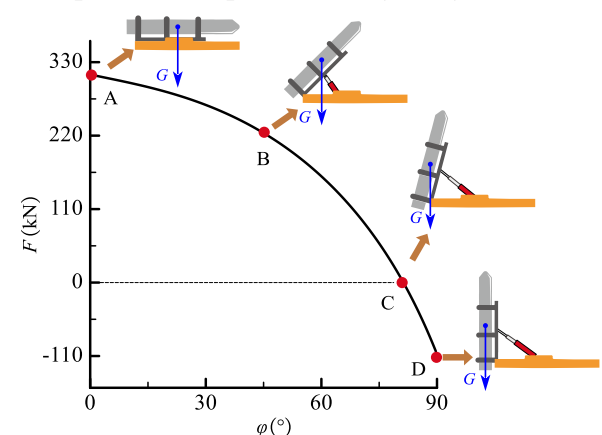


garbage trucks

Force analysis



$$p_1 S_1 + p_2 S_4 + F_{a1} = p_2 S_2 + F'_{12} + f'_{12} + f_{01} + F_{01} + F_{g1}$$

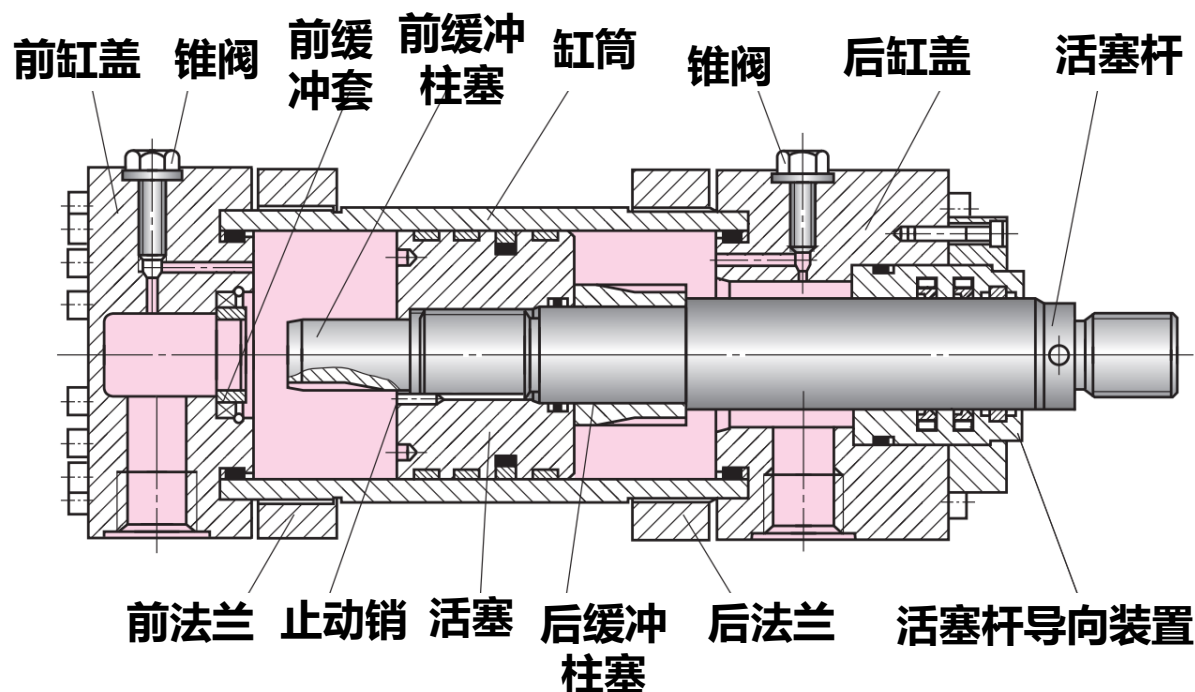


External load-angle relationship

6.2 液压缸的典型结构组成

液压缸结构组成

液压缸的结构基本上可以分为缸筒和缸盖、活塞和活塞杆、缓冲装置、排气装置和密封装置五个部分



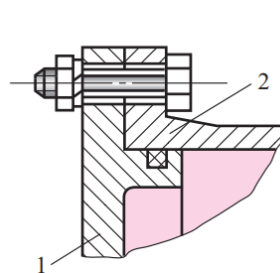
单杆活塞式液压缸结构

6.2 液压缸的典型结构组成

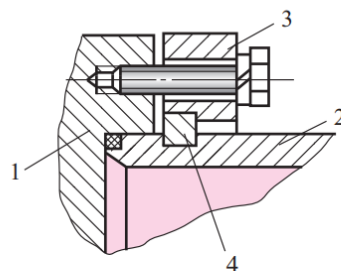


缸筒与缸盖

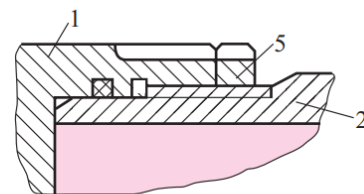
- **缸筒**：主要是由钢材制成，缸筒内要经过精细加工，以减少密封件的摩擦。
- **缸盖盖板**：通常由钢材制成，有前端盖和后端盖，安装在缸筒的前后两端。



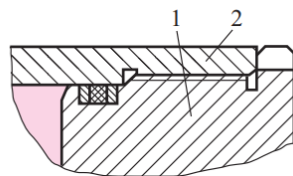
a) 法兰式连接



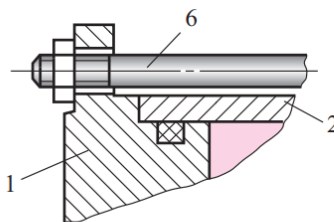
b) 半环式连接



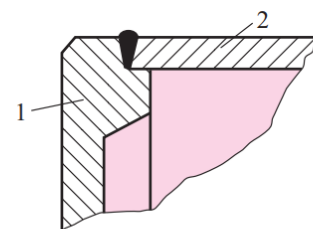
c) 外螺纹式连接



d) 内螺纹式连接



e) 拉杆式连接



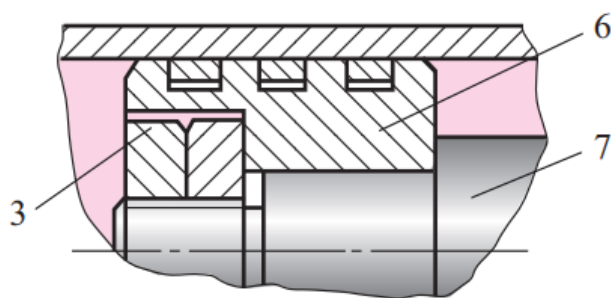
f) 焊接式连接

缸筒的连接形式

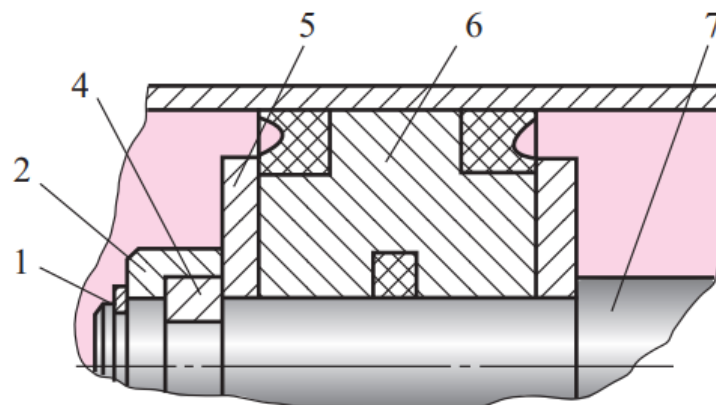
6.2 液压缸的典型结构组成

活塞与活塞杆

- 活塞：有整体活塞和分体活塞。
- 活塞杆：有实心活塞杆和空心活塞杆。
- 活塞与活塞杆的连接：有螺纹式和半环式等



a)
螺纹式



b)
半环式

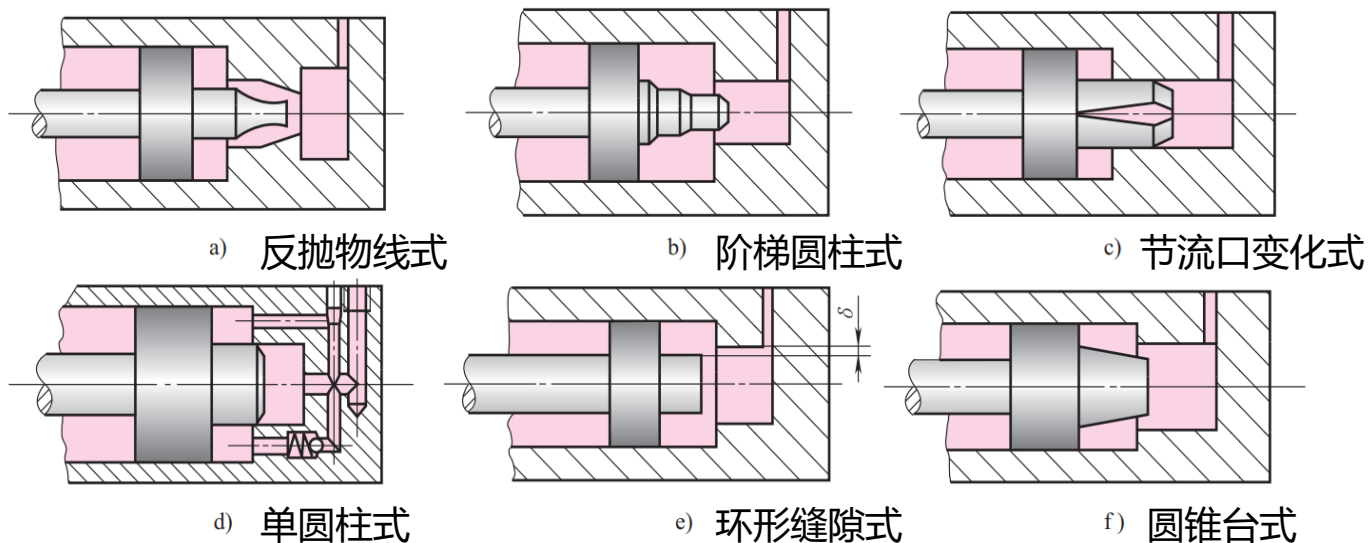
- 1—弹簧卡圈
- 2—轴套
- 3—螺母
- 4—半环
- 5—压板
- 6—活塞
- 7—活塞杆

6.2 液压缸的典型结构组成

缓冲装置

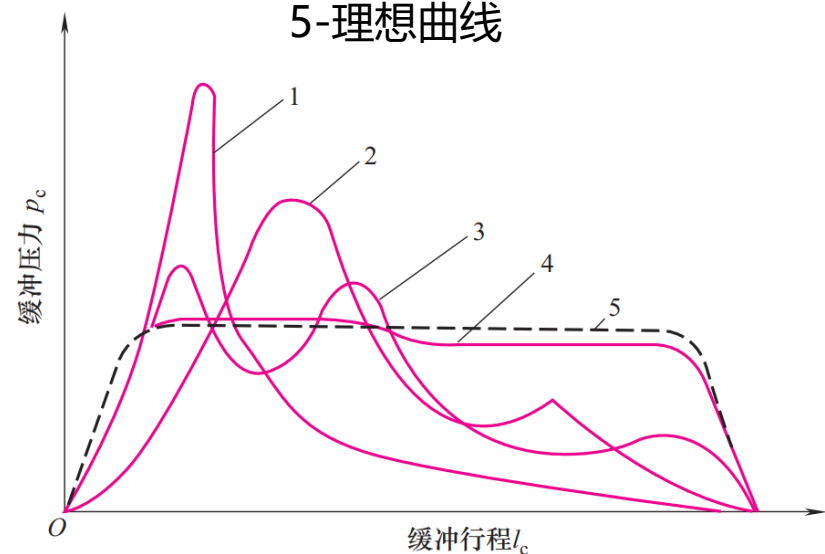
利用**节流方法**在液压缸的回油腔产生阻力，减小速度，避免撞击。

- 理想的缓冲装置应在其整个工作过程中保持**缓冲压力恒定不变**，实际的缓冲装置则很难做到这点。



缓冲柱塞的形式

- 1-单圆柱式 2-圆锥台式
3-阶梯圆柱式 4- 反抛物线式
5-理想曲线



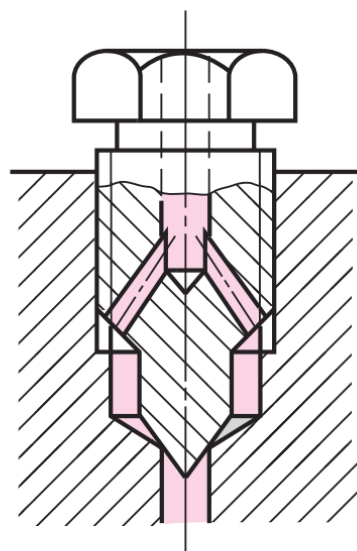
缓冲压力曲线

6.2 液压缸的典型结构组成

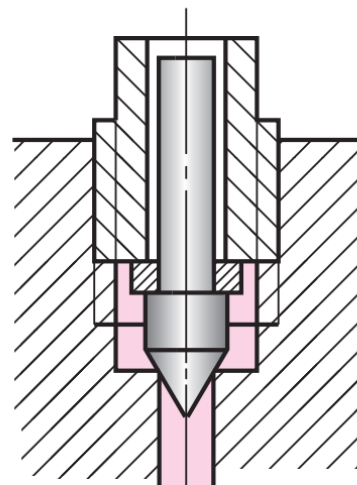
排气装置

排气装置可以排除缸内空气，需**安装在两端盖的最高处**。

- 存留空气将使液压缸**低速时**产生**爬行、颤抖**现象，**换向时**易引起**冲击**。



排气阀



排气塞

6.2 液压缸的典型结构组成

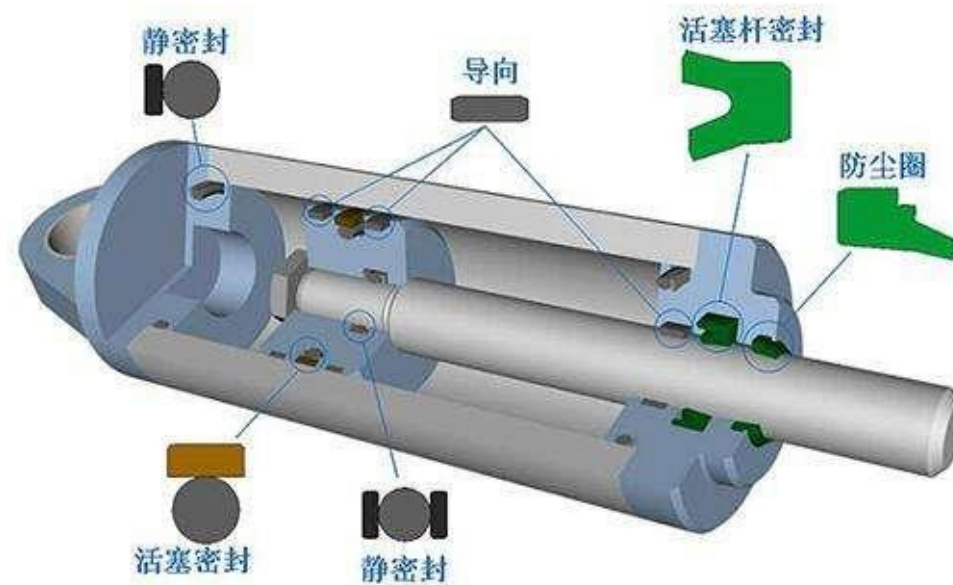
密封装置

液压缸的密封主要是指活塞、活塞杆处的**动密封**和缸盖等处的**静密封**

- 防止液压缸工作介质的泄漏和外界尘埃与异物的侵入
 - 缸**内泄漏**引起**工作压力**和**容积效率**下降
 - 缸**外泄漏**造成**工作介质浪费**和**污染环境**

常用密封方法

- 1. 间隙密封
- 2. 密封件密封
 - 常用密封件
 - 新型密封件
 - 组合密封件
- 3. 防尘圈



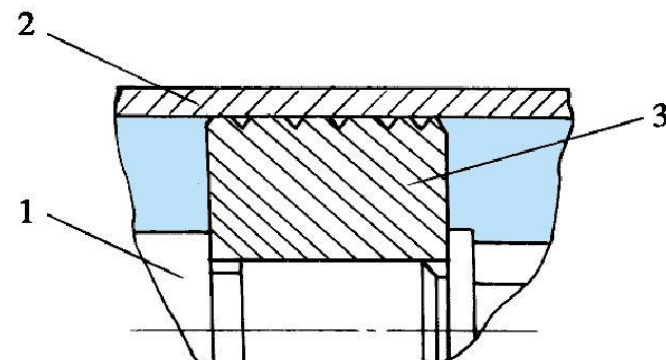
6.2 液压缸的典型结构组成

间隙密封

- 结构简单，**摩擦阻力小**，可耐高温
 - 泄漏大**，加工要求高
 - 磨损后无法恢复
- 适用**尺寸较小、压力较低、相对运动速度较高**的缸筒和活塞

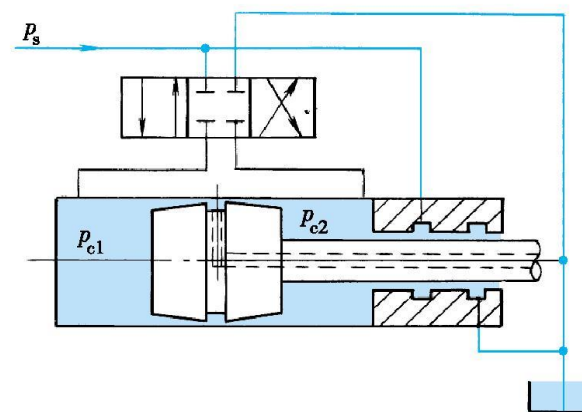
采用间隙密封设计的低摩擦缸：

- 实现液体摩擦
- 提高机械效率和低速性能



间隙密封

1-活塞杆 2-缸筒
3-活塞

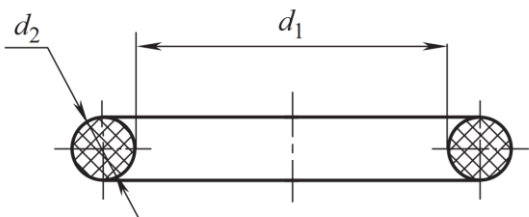


低摩擦液压缸

6.2 液压缸的典型结构组成

密封件密封

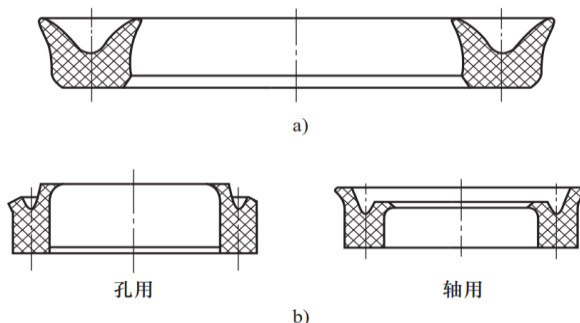
- 常用密封件：**O型密封圈**、**Y型密封圈**、**V型密封件**
- 结构简单，制造方便，磨损后有自动补偿能力，性能可靠



O型密封圈

静、动密封均可，使用最广泛

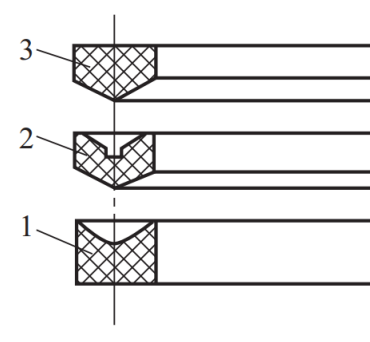
- 结构小巧，安装紧凑
- 可对两个方向起密封作用
- 价格低廉



Y型密封圈

宜作大直径的往复运动密封件

- 密封性能良好
- 摩擦阻力小，运动平稳
- 耐压性好，适用压力范围广



V型密封件

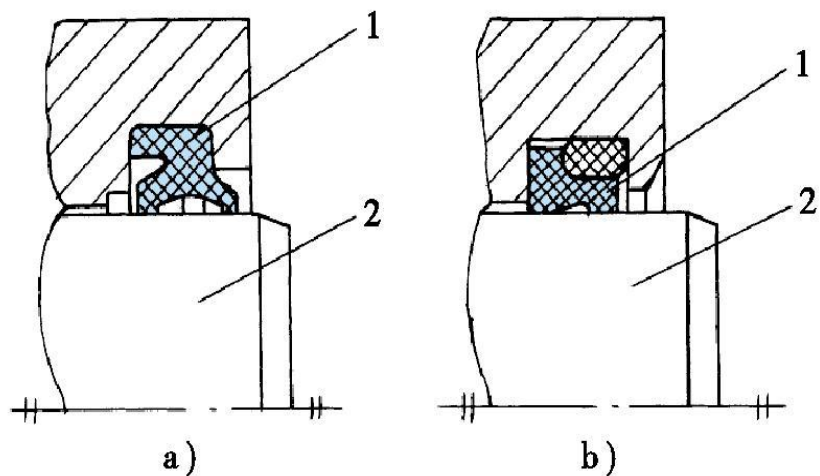
用于活塞和活塞杆的往复动密封

- 摩擦阻力小，运动平稳
- 密封装置的轴向尺寸大，摩擦阻力大
- 可多个组合使用

6.2 液压缸的典型结构组成

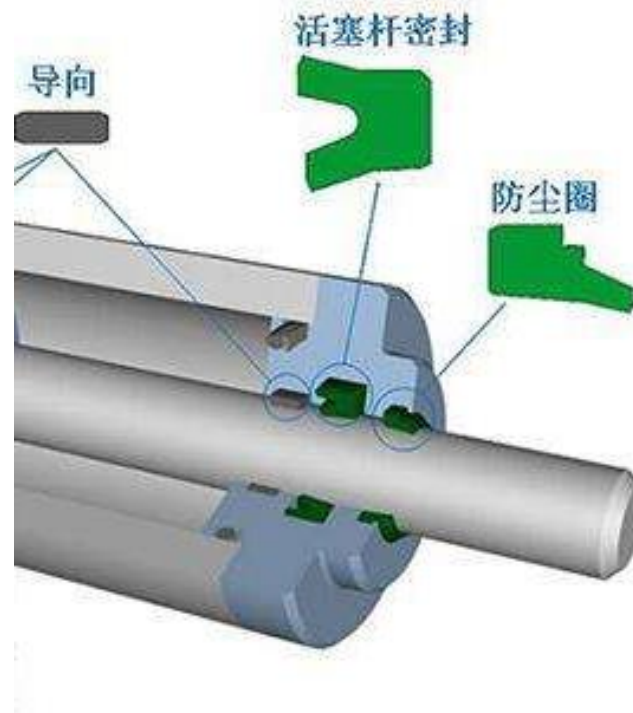
防尘圈

- 活塞杆外伸部分很容易把脏物带入液压缸,使油液受污染,密封件被磨损
- 需在活塞杆密封处增添防尘圈



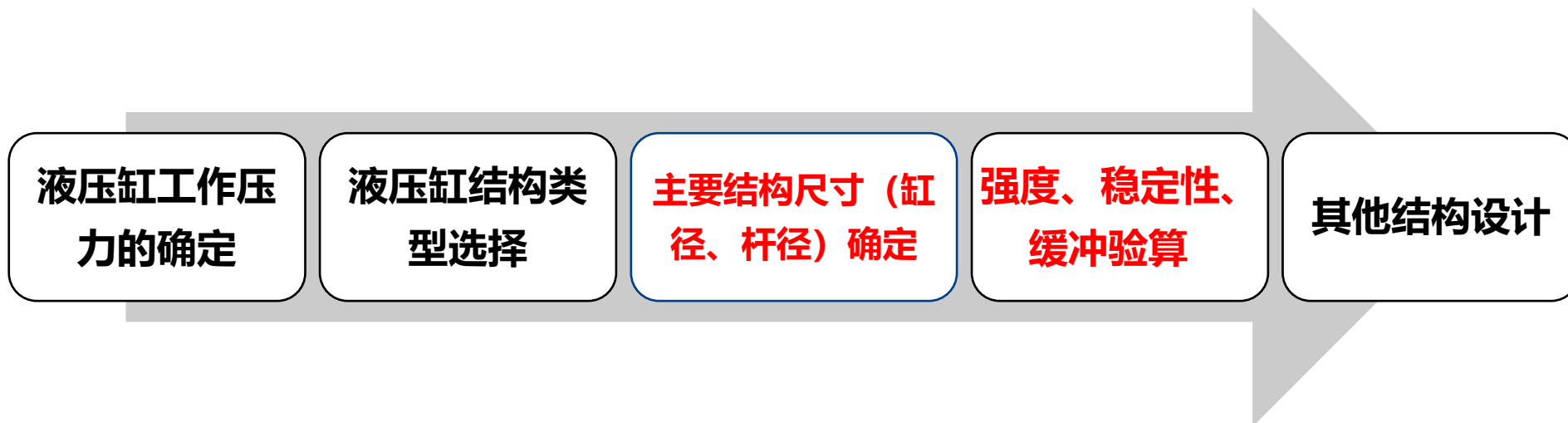
a) 普通型防尘圈 b) Z形Turcon防尘圈

1—防尘圈 2—活塞杆



6.3 液压缸设计与计算

液压缸设计与计算



主要尺寸确定

- 确定缸筒内径 D 、活塞杆直径 d 、液压缸缸体长度 L

■ 液压缸内径 D

- 根据**最大总负载**和**选取的动作压力**来确定
- 计算所得值应**圆整为标准值**

对于单杆液压缸

无杆腔进油且不考虑机械效率时有： $F_1 = p_1 A_1 - p_2 A_2 = \frac{\pi}{4} [(p_1 - p_2) D^2 + p_2 d^2]$

可解得方程缸筒直径 D 的表达式：
$$D = \sqrt{\frac{4F_1}{\pi(p_1 - p_2)} - \frac{d^2 p_2}{p_1 - p_2}}$$

取回油背压 $p_2 = 0$ ，可简化为：

$$D = \sqrt{\frac{4F_1}{\pi p_1}}$$

主要尺寸确定

■ 活塞杆直径d

- 根据工作时**受力情况**来确定

活塞杆受力情况	受拉伸	受压缩 工作压力≤5MPa	受压缩 5MPa≤工作压力≤7MPa	受压缩 工作压力≥7MPa
活塞杆直径d	(0.3-0.5) D	(0.5-0.55) D	(0.6-0.7) D	0.7D

- 对单杆活塞缸，d值也可由**内径D**和**往复速比 λ_v** 来决定
$$d = D \sqrt{\frac{\lambda_v - 1}{\lambda_v}}$$
- 计算所得值应**圆整为标准值**

■ 液压缸缸体长度L

- 根据最大工作行程确定

6.3 液压缸设计与计算

强度校核

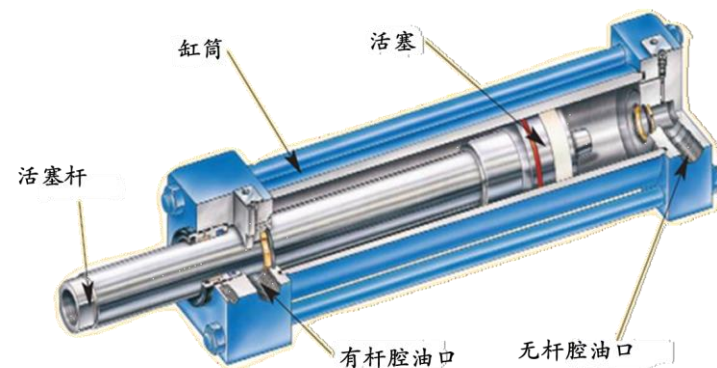
包括缸筒壁厚 δ 校核、活塞杆直径 d 校核、缸盖固定螺栓 d_s 校核

■ 缸筒壁厚 δ 校核

当液压缸采用铸造缸筒时，
壁厚由铸造工艺确定，按厚壁圆筒公式验算壁厚。

当 $\delta/D=0.08 \sim 0.3$ 时，用式 $\delta \geq \frac{p_{max} D}{2.3[\sigma] - 3p_{max}}$ 进行验算

当 $\delta/D \geq 0.3$ 时，用式 $\delta \geq \frac{D}{2} \left(\sqrt{\frac{[\sigma] + 0.4p_{max}}{[\sigma] - 0.3p_{max}}} - 1 \right)$ 进行验算



强度校核

包括缸筒壁厚 δ 校核、活塞杆直径 d 校核、缸盖固定螺栓 d_s 校核

■ 活塞杆直径 d 校核

校核公式:
$$d \geq \sqrt{\frac{4F}{\pi[\sigma]}}$$

F ——活塞杆上作用力

$[\sigma]$ ——活塞杆材料的许用应力

■ 缸盖固定螺栓 d_s 校核

校核公式:
$$d_s \geq \sqrt{\frac{1.2kF}{\pi z[\sigma]}}$$

F ——液压缸负载

k ——螺纹拧紧系数 $k = 1.12 \sim 1.5$

$[\sigma]$ ——活塞杆材料的许用应力

z ——固定螺栓个数

稳定性校核

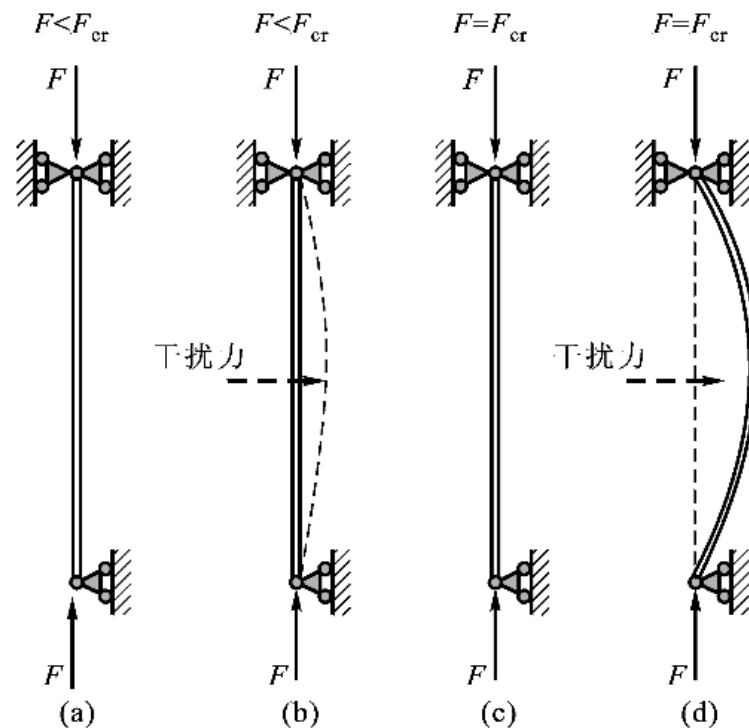
一根**受压**的直杆，在轴向负载 F 超过稳定临界力时，受到**微小干扰**就会失去原有直线状态下的平衡，该状态称**失稳**。

- 对液压缸，其稳定条件为：

$$F \leq \frac{F_k}{n_k}$$

n_k ——安全系数，一般取2~4

F_k ——压杆稳定临界值，由安装方式，活塞杆材料强度等决定



压杆失稳示意图

6.3 液压缸设计与计算

缓冲计算

估算缓冲过程中**最大冲击压力**，校核缸筒强度、制动距离

缓冲时背压腔内液压能 $E_1 = p_c A_c l_c$

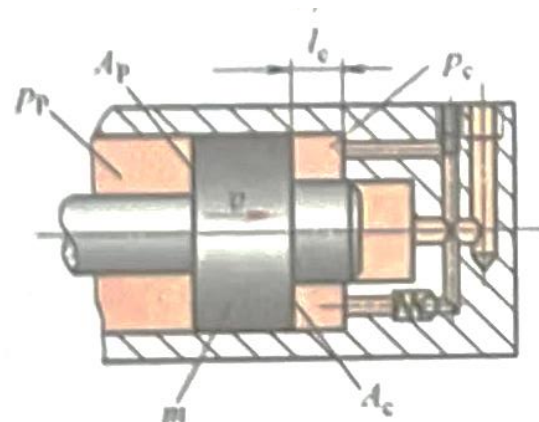
缓冲时工作部件机械能 $E_2 = p_p A_p l_c + \frac{1}{2}mv^2 - F_f l_c$

工作部件机械能全部被缓冲腔液体吸收 $E_1 = E_2$

$$p_c = \frac{E_2}{A_c l_c}$$

缓冲装置为节流口可调式，缓冲过程中最大缓冲压力即冲击压力

$$p_{cmax} = p_c + \frac{mv^2}{2A_c l_c}$$



p_c -缓冲腔平均缓冲压力； p_p -高压腔油液压力；
 l_c -缓冲行程长度； A_c 、 A_p -缓冲腔、高压腔有效工作面积；
 m -工作部件质量； v -工作部件运动速度； F_f -摩擦力；

6.3 液压缸设计与计算

拉杆计算

对于缸筒和两端缸盖由**拉杆**组装**一体式结构液压缸**，拉杆端部螺母固紧，校验缸盖和缸筒应不会在工作压力下松开产生泄漏。

令 F_1 为预加拉杆拉力，拉杆变形伸长量 $\delta_T = \frac{F_1}{K_T}$ 缸筒变形压缩量 $\delta_c = \frac{F_1}{K_C}$

液压缸工作压力 p ，拉杆拉力增大至 F_T ，缸盖和缸筒间接触力 F_c

$$F_T = F_c + pA_P$$

拉杆变形量增加 $\Delta_T = \frac{F_T - F_1}{K_T}$ 缸筒变形量改变 Δ_c $\delta_c - \Delta_c = \varepsilon_c L_c$

$$\varepsilon_c = \frac{F_c}{A_c E_c} - \frac{\mu(\sigma_h + \sigma_r)}{E_c} = \frac{F_c}{A_c E_c} - \frac{2\mu p A_P}{A_c E_c}$$

$$\Delta_T = \Delta_c \quad \rightarrow \quad F_T = F_1 + \frac{(1 - 2\mu) p A_P}{1 + \frac{K_c}{K_T}} = F_1 + \varepsilon p$$

液压缸压力到分离压力 p_s 缸筒缸盖分离， $F_T = p_s A_P$

拉杆应施加的预加载荷

$$F_1 = A_P(1 - \xi)p_s$$

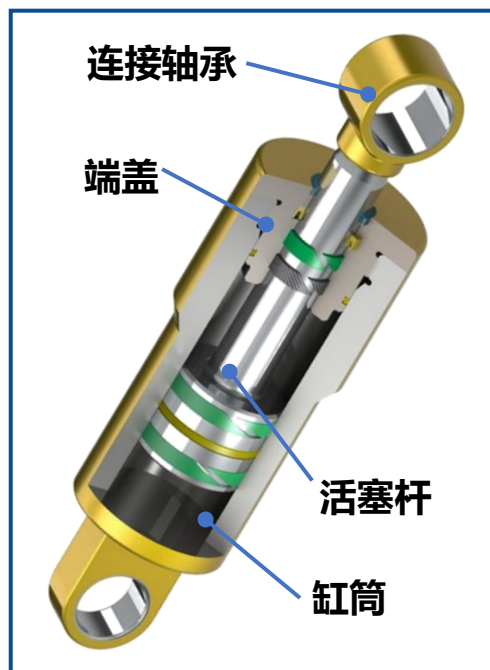
k_c -缸筒刚度；
 A_c 、 l_c -缸筒筒壁界面剂和长度；
 E_c -缸筒材料弹性模量；
 A_p -活塞有效工作面积；
 σ_h 、 σ_r -筒壁切向和径向应力

压力负载系数

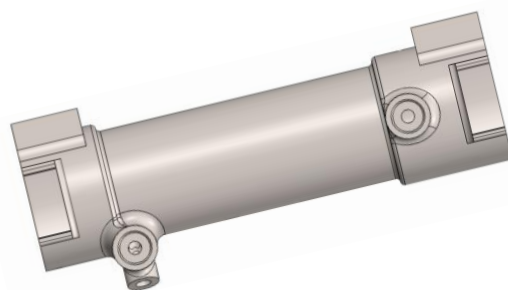
$$\xi = \frac{1 - 2\mu}{1 + \frac{A_c E_c L_T}{A_T E_T L_c}}$$

6.2 液压缸的典型结构组成

轻量化是提升液压足式机器人动态性能的有效途径
液压缸作为直接出力元件，耐高压前提下兼顾轻量化和安全可靠



压力28MPa
行程50-200mm
力重比 $\geq 10000\text{N/kg}$



金属缸筒

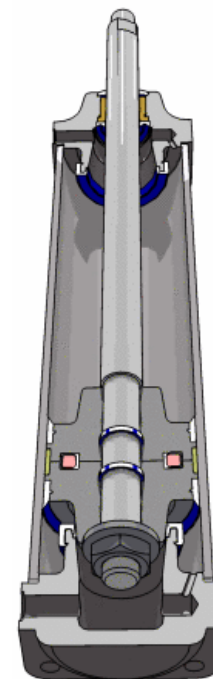
- 45#钢等
- 重量占比45%
- 含进、出油口等
- 呈薄壁圆筒状

轻量化方法：高强度材料、结构优化



金属活塞杆

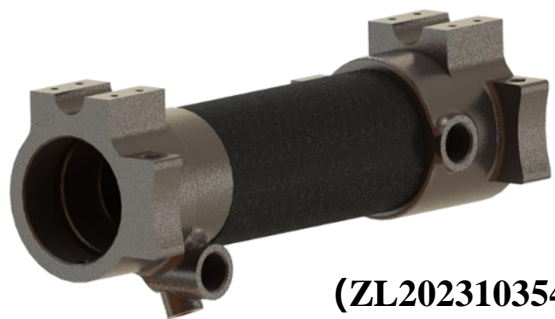
- 40CrMo等
- 重量占比35%
- 密封圈、导向套等
- 类阶梯轴外形



6.2 液压缸的典型结构组成

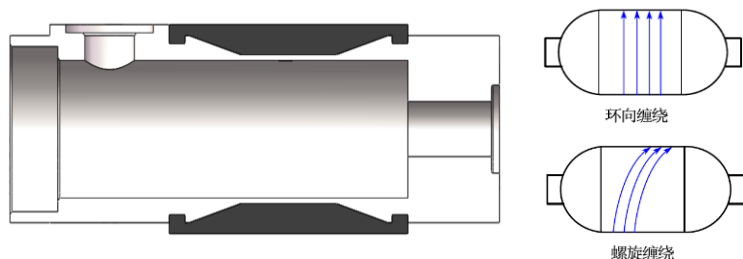
提出**金属-复材**的多材料设计方法，确保强度的同时实现轻量化

金属复材无损连接



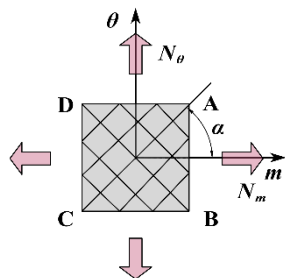
(ZL202310354754.6)

碳纤维复合材料缸筒

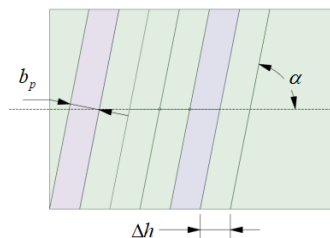


预留沟槽+非光滑界面+组合缠绕

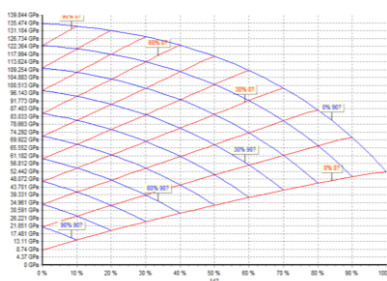
纤维铺层参数优化



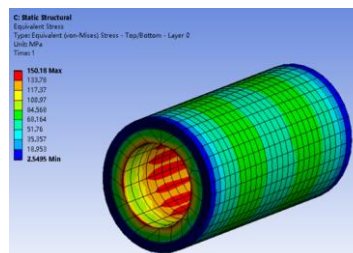
环向：螺旋=2:1



螺旋缠绕角度



铺层次序和比例



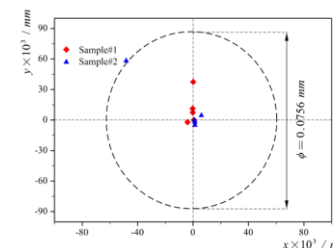
应力应变校核

(ZL202211046821.X、202010023674.9)

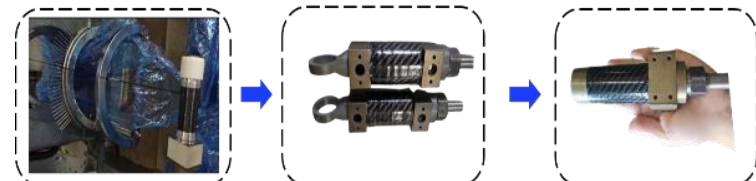
薄壁内衬变形控制



铝合金内衬+可调节涨套



缠绕过程中变形量在
0.0756 mm以内，小于
预留过渡层厚度0.3 mm



(ZL202211032458.6、2022101151516、
2022101151535)

缸筒重量减轻60%，完整的碳纤维缸筒的结构设计-校核-制造-测试方法

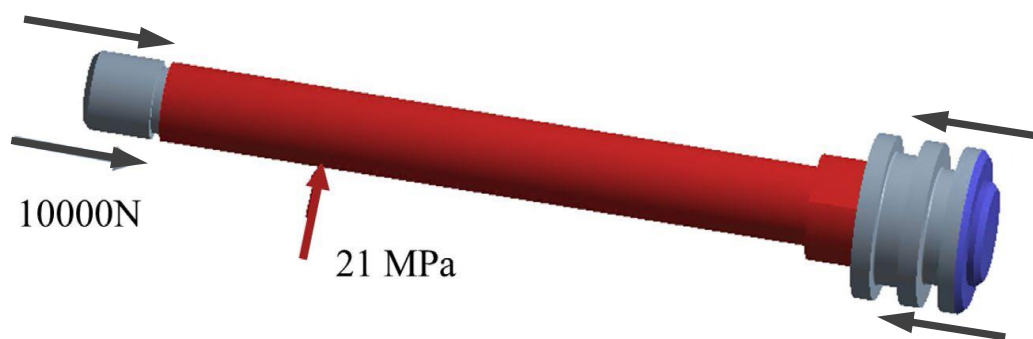
6.2 液压缸的典型结构组成



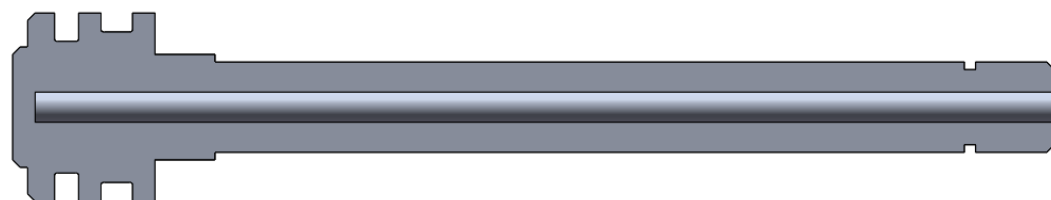
浙江大学
ZHEJIANG UNIVERSITY

提出**晶格填充式**活塞杆，确保强度的同时实现轻量化

活塞杆：主要承力部件

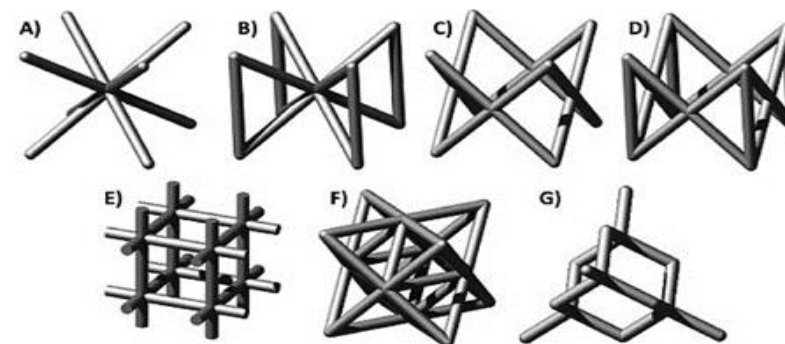


轴向的拉、压力，侧向弯曲力时有发生

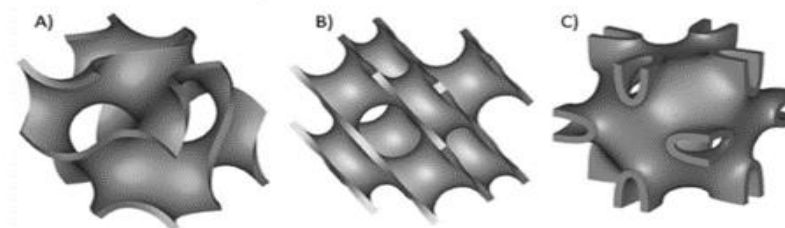


中空结构、呈细长型考虑压杆稳定性

晶格结构：出色的轻量化效果



a) 杆件组成的晶格结构



b) 三阶最小曲面结构

弯曲、压缩、能量吸收

尺寸不变的情况下，改变不同杆径实现**强度定制**

更大的**中空区域**+定制的晶格结构填充→更高的轻量化

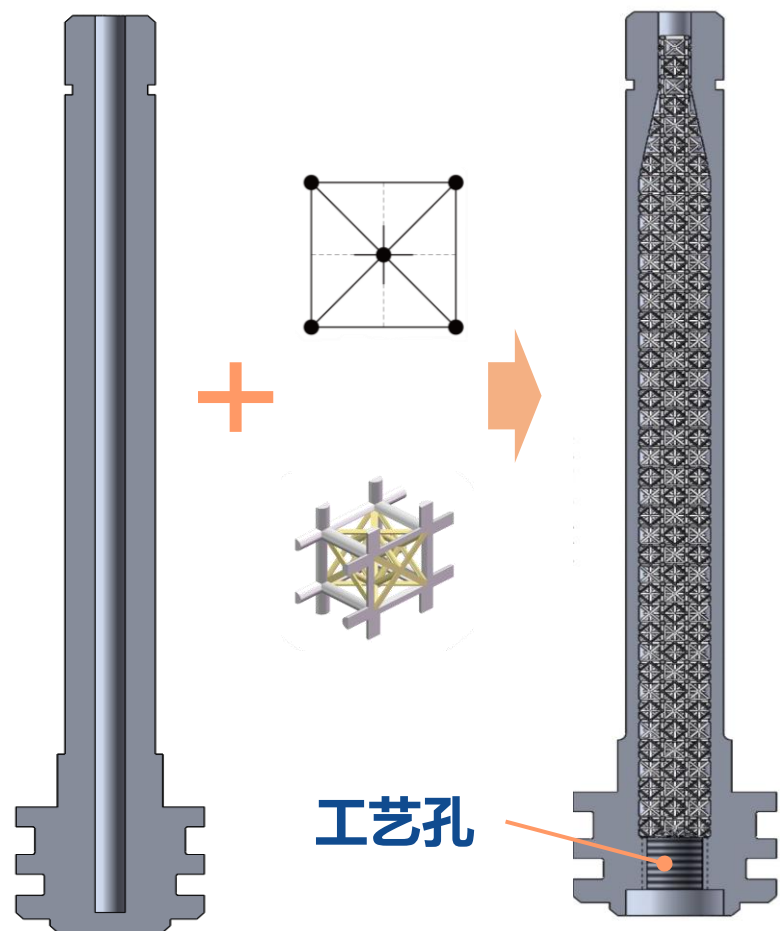
6.2 液压缸的典型结构组成



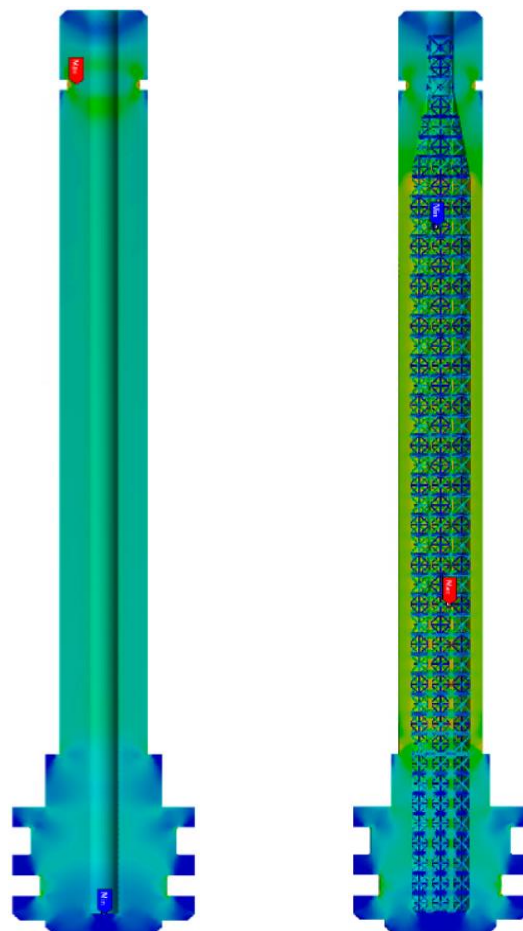
浙江大学
ZHEJIANG UNIVERSITY

混合晶格活塞杆**减重53.7%**，**平均应力降低了15.3%**

混合晶格活塞杆设计



有限元分析



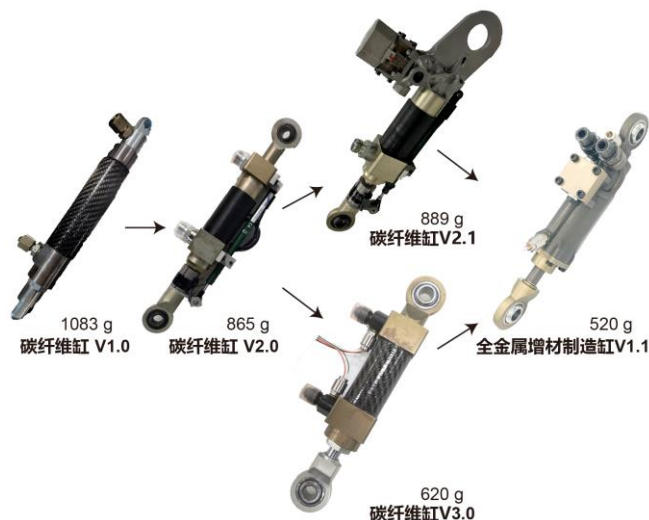
增材活塞杆



6.2 液压缸的典型结构组成

与全金属液压缸相比，碳纤维壳体+晶格活塞杆液压缸结构减重45.7%

轻量化方向的持续探索



耐压: 63 MPa
力重比: 20000 N/kg
密封: 1滴/10000循环

类型	缸筒	活塞杆	其他	重量
金属液压缸	560.5 g	120.3 g	205.3 g	886.1 g
轻量化液压缸	220.5 g	55.7 g	205.3 g	481.5 g

亮点成果



第四届
研究生机
器人创新
设计大赛
特等奖