

第2章 机械零件的设计

- 2.1 机械零件的失效形式和设计准则概述
- 2.2 机械零件设计的基本要求和一般程序
- 2.3 机械零件材料的选用原则及常用材料





2.1 机械零件的失效形式和设计准则概述

2.1.1 机械零件的主要失效形式

失效:机械零件在设计预定的期间内和规定条件下，不能完成正常的功能。

机械零件失效的形式:**整体断裂、塑性变形、
腐蚀、磨损、胶合和接触疲劳**

一般设计机械零件的判据:**静强度、疲劳强度、
摩擦磨损**



1. 静强度失效

机械零件在受拉、压、弯、扭等外载荷作用时，由于某一危险截面上的**静应力**超过零件的强度极限而发生断裂或破坏。例如，螺栓受拉后被拉断和键或销的剪断或压溃等均属于此类失效。

静应力:不随时间变化的应力

此外，当作用于零件上的应力超过了材料的屈服极限，则零件将产生**塑性变形**。塑性变形将导致精度下降或定位不准等，严重影响零件的正常工作，因此也属于失效。




2. 疲劳强度失效

大部分机械零件是在**变应力**条件下工作的，变应力的作用可以引起零件疲劳破坏而导致失效。

变应力:随时间不断变化的应力

另外，零件表面受到接触变应力长期作用也会产生裂纹或微粒剥落的现象。**疲劳破坏**是随工作时间的延续而逐渐发生的失效形式，是**引起机械零件失效的重要原因**。例如，轴受载后由于疲劳裂纹扩展而导致断裂、齿根的疲劳折断和点蚀以及链条的疲劳断裂等都是典型的疲劳破坏。



机械零件的静强度失效是由于静力超过了屈服极限，并在断裂发生之前，往往出现很大的变形，因此静强度失效往往是可以发现，并可以预知的。

疲劳强度失效逐步形成但很难事先预知，因此它危害更大。




3. 摩擦学失效

摩擦学失效主要是腐蚀、磨损、打滑、胶合和接触疲劳。

腐蚀是发生在金属表面的一种电化学或化学侵蚀现象，其结果将使零件表面产生锈蚀而使零件的抗疲劳能力降低。

磨损是两个接触表面在作相对运动的过程中，表面物质丧失或转移的现象。

胶合是由于两相对运动表面间的油膜被破坏，在高速、重载的工作条件下，发生局部粘在一起的现象，当两表面相对滑动时，相粘结的部位被撕破而在表面上沿相对运动方向形成沟痕，称为胶合。



接触疲劳是受到接触变应力长期作用的表面产生裂纹或微粒剥落的现象。

有些零件只有在满足某些工作条件下才能正常工作。例如，液体摩擦的滑动轴承，只有在存在完整的润滑油膜时才能正常地工作，否则滑动轴承将发生过热、胶合、磨损等形式的失效，属于摩擦学失效。

又如，带传动的打滑和螺纹的微动磨损也是摩擦学失效的例子。



4. 其他失效

除了以上指出的主要失效形式，机械零件还有其他一些失效形式，如变形过大的刚度失效、不稳定失效等等。


此外，机械零件的具体失效形式还取决于该零件的工作条件、材质、受载状态及所产生的应力性质等多种因素。即使同一种零件，由于工作情况及机械的要求不同，也可能出现多种失效形式。例如齿轮传动可能出现轮齿折断、磨损、齿面疲劳点蚀、胶合或塑性变形等失效形式。



2.1.2 机械零件的设计准则

1. 静强度准则

静强度是保证机械零件在静载荷工况条件下能正常工作的基本要求。零件的强度不够，就会出现整体断裂或塑性变形等失效形式而丧失其工作能力，甚至导致安全事故。



强度准则就是指零件中的最大应力小于或等于许用应力，即

$$\sigma \leq [\sigma] \quad (2.1a)$$

或

$$\tau \leq [\tau] \quad (2.1b)$$

$$[\sigma] = \frac{\sigma_{\lim}}{S}$$

$$[\tau] = \frac{\tau_{\lim}}{S}$$


式中， σ 、 τ —是零件的工作正应力和剪应力；

$[\sigma]$ 、 $[\tau]$ —材料的许用正应力和许用剪应力，它们可以通过将材料的屈服极限（塑性材料）或是强度极限（脆性材料）除以适当的安全系数得到。



2. 疲劳强度准则

疲劳强度是保证机械零件在变载荷工况条件下，能正常工作一定时间的基本要求。零件疲劳强度不够，就会在其工作寿命期间内出现疲劳断裂、疲劳点蚀等失效形式而丧失工作能力，甚至导致安全事故。



疲劳强度准则与式（2.1）类似，但是疲劳强度的许用应力要按下式计算：

$$\begin{aligned} [\sigma] &= \frac{\sigma_{\lim}}{S_{\sigma}} & (2.2a) \\ \text{或} \quad [\tau] &= \frac{\tau_{\lim}}{S_{\tau}} & (2.2b) \end{aligned}$$

式中， S_{σ} 、 S_{τ} —疲劳强度的正应力和剪应力的安全系数；

σ_{\lim} 、 τ_{\lim} —材料的疲劳极限正应力和剪应力。



特别需要指出：按疲劳强度设计时，因为载荷是变化的，零件的工作应力不再是简单的正应力或剪应力，除了必须考虑应力的均值和变化幅值的大小外，还必须考虑**载荷变化规律的影响**。另外，疲劳强度与许多因素（如载荷性质、零件尺寸、表面加工精度、应力集中情况等）有关，因此在这类机械零件的设计过程中必须根据具体工况加以修正。

3. 摩擦学设计准则

耐磨性是指作相对运动零件的工作表面抵抗磨损的能力。机械零件磨损后，将改变其尺寸与形状，降低机械的工作精度，削弱其强度。据统计，由于磨损而导致失效的零件约占全部报废零件的80%。

由于目前对磨损的计算尚无可靠、定量的计算方法，因此常采用条件性计算。

验算压强 p 不超过许用值，以保证工作面不致产生过度磨损；

验算压强和速度乘积 pV 值不超过许用值，以限制单位接触表面上单位时间内产生的摩擦功不致过大，可防止发生胶合破坏；

验算工作速度 V 。



以上准则可写成:

$$p \leq [p] \quad (2.3a)$$

$$pv \leq [pv] \quad (2.3b)$$

$$v \leq [v] \quad (2.3c)$$

式中, p —工作表面的压强, MPa;

$[p]$ —材料的许用压强, MPa;

V —工作速度, m/s;

$[pv]$ — pv 的许用值, MPa·m/s;

$[v]$ — v 的许用值, m/s。




4. 其他准则

(1) 刚度准则

刚度：零件在载荷作用下抵抗弹性变形的能力。

若零件刚度不够，其弯曲挠度或扭转角超过允许的限度后，将影响机械系统正常工作。例如车床主轴的弹性变形过大，将影响加工精度；齿轮轴的挠度过大，将影响一对齿轮的正确啮合，并会增加载荷沿齿宽分布的不均匀性。



机械零件在载荷作用下所产生的弹性变形量应小于或等于机器工作时所允许的弹性变形量的极限值，即

$$y \leq [y] \quad (2.4a)$$

$$\theta \leq [\theta] \quad (2.4b)$$

$$\varphi \leq [\varphi] \quad (2.4c)$$

式中， y 、 θ 、 φ —零件工作时的挠度、偏转角和扭转角；

$[y]$ 、 $[\theta]$ 、 $[\varphi]$ —零件的许用挠度、许用偏转角和扭转角。



（2）可靠性准则

满足强度要求的一批完全相同的零件，在规定的工作条件下和规定的使用期限内，并非所有零件都能完成规定的功能，必有一定数量的零件会丧失工作能力而失效。

可靠度：机械零件在规定的工作条件下和规定的使用时间内完成规定功能的概率。

可靠度是衡量**机械零件可靠性**的一个特征量，零件的可靠度本身是一个**时间的函数**。为了保证所设计的零件具有所需的可靠度，就要对零件进行可靠性设计。



2.2 机械零件设计的基本要求和一般程序

2.2.1 机械零件设计的基本要求

1. 强度

机械零件的强度不够，就会在工作中发生断裂或不允许的残余变形等。因此具有适当的**强度**是设计机械零件时必须满足的**最基本要求**。



提高机械零件的强度措施：

- (1) 采用强度高的材料。
- (2) 使零件有足够的截面尺寸。
- (3) 合理设计零件的截面形状，以增大截面的惯性矩。
- (4) 采用热处理和化学处理的方法来提高材料的机械强度特性。
- (5) 提高运动零件的制造精度，以降低工作时的动载荷。
- (6) 合理地配置机器中各零件的相互位置，以降低作用于零件上的载荷。



2. 刚度

机械零件在工作时所产生的弹性变形量不超过允许的程度，就满足了刚度要求。通常只有当弹性变形过大就要影响机器工作性能的零件（如机床主轴、导轨等），才需要满足这项要求。对于这类零件，设计时除了要作强度计算外，还必需作刚度计算。实践证明，能满足刚度要求的零件，通常其强度总是足够的。



提高机械零件的刚度措施:

- (1)增大零件截面尺寸或增大截面的惯性矩。
- (2)缩短支承跨距或采用多支点结构，以减小挠曲变形。
- (3)增大贴合面以降低压力，可提高接触刚度。
- (4)采用精加工以降低表面不平度。



3. 寿命

寿命：机械零件不发生失效而正常工作所延续的时间。

影响零件寿命的主要因素有：零件的受载情况、工作条件 and 环境、材料的疲劳、腐蚀以及相对运动零件接触表面的磨损等。



4. 可靠性

对于绝大多数的机械来说，失效的发生都是随机性的。

造成失效具有随机性的原因，主要是由于零件所受的载荷、环境、温度等工况条件是随机变化的，零件本身的物理及机械性能也是随机变化的，因此为了提高零件的可靠性，就应当在工作条件和零件性能两个方面使其随机变化尽可能地小。此外，在使用中加强维护和对工作条件进行监测，也可以提高零件的可靠性。



5. 结构工艺性

机械零件应具有良好的结构工艺性，以便于加工和装配。为此，应对机械零件进行合理而正确的结构设计；此外零件的结构工艺性还应从毛坯制造、机械加工和装配几个生产环节来综合考虑。



6. 经济性

机械零件的经济性主要表现在零件本身的生产成本上。设计时应力求设计出成本最低的零件。零件的成本包括材料的消耗、零件的加工制造等。设计时尽量采用简单的零件结构以减少加工工时；选择适当的材料（如用廉价材料代替贵重材料）和合理的工艺；尽量采用标准件等，都将对降低零件成本有显著的作用。

2.2.2 机械零件设计的一般程序

不同种类的机械零件，其设计计算方法不同，设计步骤亦不同，通常可按图2.1所示的设计步骤进行：

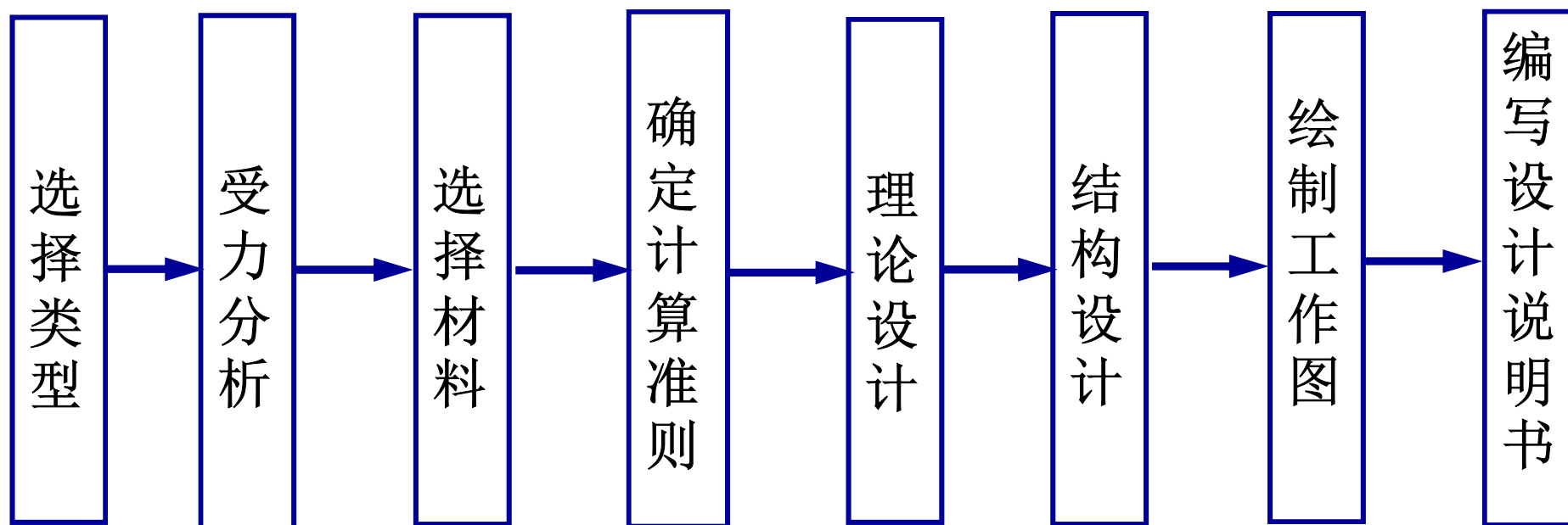
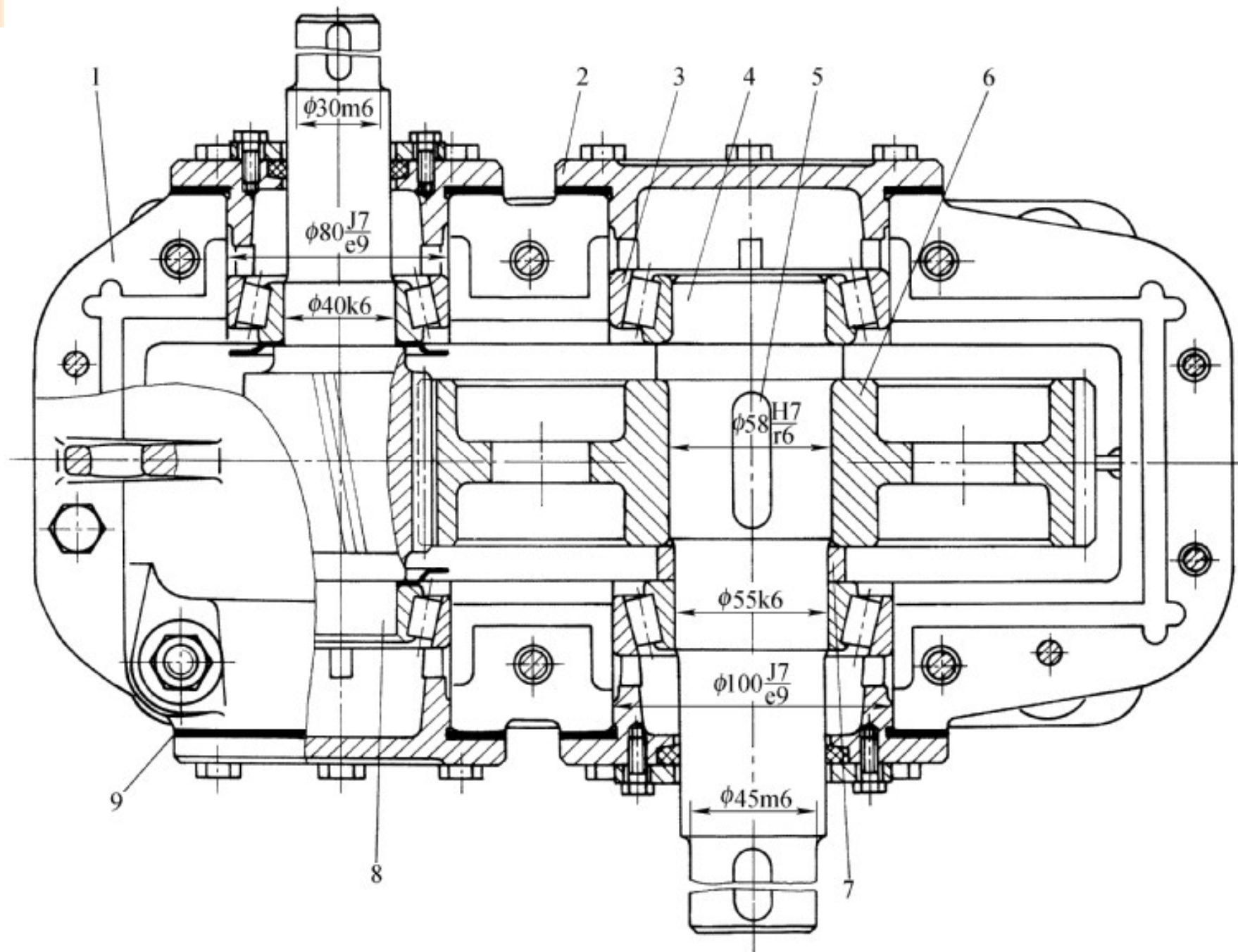


图2.1 机械零件设计步骤





1. 选择类型

主要根据工况条件、载荷性质及尺寸大小选择零件的类型。

2. 受力分析

通过受力分析求出作用在零件上的载荷的性质、大小、方向，以便进行设计计算。

3. 选择材料

根据零件工况条件及受载情况，选择合适的材料及热处理方法，确定材料的硬度和许用应力。

4. 确定计算准则

分析机械零件的失效形式，确定其设计计算准则。



5. 设计计算

根据设计准则得到设计或校核计算公式，确定机械零件的主要几何尺寸及参数。如螺栓的小径，齿轮的齿数、模数，轴的最小直径等。

6. 结构设计

结构设计即将机械零件的功能转化为具体结构的设计过程。设计中应考虑零件的强度、刚度、加工和装配工艺性等要求。使设计的零件满足尺寸小、重量轻、结构简单等基本要求。



7. 绘制工作图

工作图必须符合制图标准，要求尺寸齐全并标上必要的尺寸公差、形位公差、表面粗糙度及技术条件。

8. 编写设计计算说明书

将设计计算资料整理成设计计算说明书，作为技术文件存档。



2.3 机械零件材料的选用原则及常用材料

2.3.1 机械零件材料的选用原则

从各种各样的材料中选择出合用的材料，是一个较复杂的技术经济问题，通常主要考虑以下三方面的要求。



1. 使用要求

满足使用要求是选择材料的最基本原则。

使用要求通常包括零件所受载荷大小、性质及其应力状况。

若零件尺寸取决于强度，且尺寸和重量又受到限制时，应选用强度较高的材料或强度极限与密度的比值较高的材料；


承受拉伸载荷的零件宜选钢材；

承受压缩载荷的零件宜选铸铁；

受冲击载荷的零件，宜选用韧性好的材料；

承受静应力的零件，宜选用屈服极限较高的材料；

在变应力条件下工作的零件，宜选用疲劳强度较高的材料。



若零件尺寸取决于刚度，且尺寸重量受到限制时，应选用弹性模量较大的材料或弹性模量与密度之比值较高的材料。

若零件的尺寸取决于接触强度时，应选用可进行表面强化处理的材料，如齿轮齿面经渗碳、氮化或碳氮共渗等热处理后，其接触强度比正火或调质处理的钢大为提高。对在滑动摩擦条件下工作的零件，应选用减摩性能好的材料。在腐蚀介质中工作的零件应选用耐腐蚀的材料。对于重要零件，应选用综合性能较好的材料。



2. 工艺要求

所选材料应与机件结构的复杂程度、尺寸大小以及毛坯的制造方法相适应。如外形复杂、尺寸较大的机件，若考虑用铸造毛坯，则应选用适合铸造的材料，若考虑用焊接毛坯，则应选用焊接性能较好的材料；尺寸小、外形简单、批量大的机件，适于冲压或模锻，应选用塑性较好的材料。



3. 经济性要求

在机械的成本中，材料费用约占**30%**以上，有的甚至达到**50%**，可见选用廉价材料有重大的意义。选用廉价材料，**节约原材料，特别是贵重材料，是机械设计的一个基本原则**。为了使零件的综合成本最低，除了要考虑原材料的价格外，还要考虑零件的制造费用。例如铸铁虽比钢材价廉，但对一些单件生产的机座，采用钢板型材焊接往往比用铸铁铸造快而且成本低。



降低零件成本的措施：

- (1) 尽量采用高强度铸铁（如球墨铸铁）来代替钢材；
- (2) 采用热处理、化学处理或表面强化处理（如喷丸、滚压）等工艺，以充分发挥材料的潜在机械性能。
- (3) 合理采用表面处理方式（如镀铬、镀铜、发黑等）以延缓和减轻腐蚀或磨损，延长零件的使用寿命。
- (4) 在很多情况下，机件在其不同部位对材料有不同要求，可采用组合式结构，使零件的工作部分采用贵重材料，其它非直接工作部分则可采用廉价的材料。
- (5) 改善工艺方法，实现少或无切削加工，省料又省工，提高材料利用率以降低成本。



2.3.2 机械零件的常用材料

机械零件常用的材料有钢、铸铁、有色金属、非金属材料 and 复合材料。

1. 钢


钢是机械制造中应用最广和极为重要的材料。按照化学成份，钢可分为碳素钢和合金钢；按照零件加工工艺，可分为铸钢和锻钢；按照用途，可分为结构钢、工具钢和特殊钢。



碳素结构钢在机械设计中最为常用。

碳素结构钢分普通碳素钢和优质碳素钢两类。

对于受力不大，而且基本上承受静应力的不太重要的零件，可以选用普通碳素钢。普通碳素钢（如Q215、Q235等）只保证机械性能，不保证其化学成份，并且不适宜作热处理，故一般用于不太重要的或不需热处理的机件和工程结构件。



碳素钢的性能主要决定于其含碳量。

低碳钢（含碳量低于**0.25%**）可淬性较差，一般用于退火状态下强度不高的零件（如**螺钉、螺母、小轴**），也用于锻件和焊接件。低碳钢经渗碳处理可用于制造表面硬、耐磨并承受冲击负荷的零件。


中碳钢（含碳量**0.25% ~ 0.6%**）可淬性以及综合机械性能均较好，可进行淬火、调质或正火处理，用于制造受力较大的**螺栓、键、轴、齿轮**等零件。

高碳钢（含碳量大于**0.6%**）可淬性更好，经热处理后有较高的硬度和强度，主要用于制造**弹簧、钢丝绳**等高强度零件。**优质碳素钢**（如**15、45、50**号钢）可同时保证其机械性能和化学成份，可用于制造需经热处理的较重要的零件。



合金钢是由碳钢在其中加入某些合金元素冶炼而成。


每一种合金元素含量低于2%或合金元素总含量低于5%的称低合金钢，每一种合金元素含量为2%~5% 或合金元素总含量为5%~10% 的称中合金钢，每一种合金元素含量高于5%或合金元素总含量高于10%的称高合金钢。



合金元素不同时，钢的机械性能有较大的变动并具有各种特殊性质。

例如，**铬**能提高钢的硬度，并能在高温时防锈耐酸；**镍**使钢具有很高的强度、塑性与韧性；**钼**能提高钢的硬度和强度，特别能使钢具有较高的耐热性；**锰**能使钢具有良好的淬透性、耐磨性。同时含有几种合金元素的合金钢（如铬锰钢、铬钒钢、铬镍钢），其性能的改变更为显著。但合金钢较碳素钢价贵，对应力集中亦较敏感，通常在碳素钢难于胜任工作时才考虑采用。

此外，合金钢如不经热处理，其机械性能并不明显优于碳素钢，因此，**合金钢零件一般都需进行热处理，以充分发挥材料的潜在机械性能。**



无论是碳素钢还是合金钢，用浇铸法所得的铸件毛坯均称为**铸钢**。铸钢主要用于制造承受重载的大型铸件。铸钢强度明显高于铸铁，与碳素钢接近。铸钢的弹性模量约为铸铁的**2**倍，因此减振性不如铸铁。

铸钢存在易于产生**缩孔**等缺陷，铸造工艺性不如铸铁。铸钢品种很多，有碳素铸钢、低合金铸钢、耐蚀铸钢、耐热铸钢等。附表**1.1**为常用钢的机械性能及应用举例。



2. 铸铁


含碳量大于2%的铁碳合金称为铸铁。铸铁是用量最多的机械结构材料。铸铁成本低廉，耐磨和减振性能好。

铸铁一般分为灰铸铁、球墨铸铁、可锻铸铁和特殊性能铸铁等。其中最常用的是灰铸铁。



灰铸铁（HT）主要用于中等载荷以下的结构件、复杂的薄壁件和润滑条件下的摩擦副零件等。

灰铸铁的强度极限随壁厚增加而减小，设计时应考虑工艺需要使壁厚尽可能一致。灰铸铁的抗压强度与抗拉强度比约为4：1，因此在结构上应当尽量使铸件受压缩，不受或少受拉伸或弯曲。灰铸铁的弹性模量比钢低，刚度比钢差。灰铸铁减振性能好，常用于机器的机座及机体等。灰铸铁属脆性材料，不适宜承受冲击载荷，也不能辗压和锻造，不易焊接。



球墨铸铁（**QT**）基体中的石墨呈球状，提高了基体强度和承受应力集中的能力，其强度比灰铸铁高一倍和普通碳素钢接近。球墨铸铁价格比钢便宜，广泛用于受冲击载荷的高强度铸件，如曲轴、齿轮等。


可锻铸铁（**KT**）主要用于尺寸太小、形状复杂、不能用铸钢和锻钢制造，而灰铸铁又不能满足强度和高延伸率要求时的情况，它是铸件而不是锻件。可锻铸铁强度和塑性近似于普通碳素钢和球墨铸铁。



3. 有色金属合金

有色金属合金具有某些特殊性能，如良好的减摩性、跑合性、抗腐蚀性、抗磁性、导电性等。

铝合金强度与密度比值比钢高，具有比较高的机械强度；但硬度低、抗压强度低、不耐磨、对应力集中敏感、铸造性能稍差、弹性模量低、线膨胀系数高、不能承受大的表面载荷。选用铝合金时应从结构上尽量消除应力集中和考虑铸造工艺性；与钢铁零件一起使用时要注意选择合适的配合公差。



铜合金具有良好的导电性、导热性、耐蚀性和延展性，是良好的减摩和耐磨材料。

铜合金可分为黄铜和青铜两类。黄铜是铜和锌的合金，不生锈、不腐蚀、具有良好的塑性及流动性，能辗压和铸造成各种型材和机件。青铜分锡青铜和无锡青铜两种。锡青铜是铜、锡合金，而铜和铝、铁、铅、硅、锰、铍等合金统称为无锡青铜。无锡青铜的机械性能比锡青铜高，但减摩性较差。黄铜、青铜均可铸造和辗压。


轴承合金为铜、锡、铅、铋的合金，其减摩性、导热性、抗胶合性都很好，但强度低且较贵，常浇注在强度较高的基体金属表面形成减摩表层使用。



4. 非金属材料

机械制造中应用的非金属材料种类很多，有塑料、橡胶、陶瓷、木材、毛毡、皮革等。其中，塑料是非金属材料中发展最快、应用最广的材料。

工业上常用的塑料有：聚氯乙烯、尼龙、聚甲醛、酚醛、环氧树脂、玻璃钢、聚四氟乙烯等。



塑料的重量轻、绝缘、耐磨、耐蚀、消声、抗振，有良好的自润滑性及尺寸稳定性，易于加工成形，加入填充剂后可以获得较高的机械强度，因而可以代替金属作支架、盖板、阀件、管件、承受轻载的齿轮、蜗轮、凸轮等。但一般工程塑料耐热性差，且因逐步老化而使性能逐渐变差。

此外橡胶也是应用广泛的非金属材料。橡胶富有弹性，有较好的缓冲、减振、耐磨、绝缘等性能，常用作弹性元件及密封装置中。



5. 复合材料

复合材料是由两种或两种以上性质不同材料组合而成。可以是不同非金属材料相互复合，也可以是非金属材料与金属材料相互复合。

复合材料既可保持组成材料各自原有的一些最佳特性，又可具有组合后的新特性；这样就可根据零件对材料性能的要求进行材料设计，从而最合理地利用材料。

例如，在普通碳素钢板外面贴复合塑料或不锈钢，可以获得强度高而耐腐蚀的塑料复合钢板或金属复合钢板，用以代替价格较贵的不锈钢耐酸钢板。复合材料是一种很有前途的新型材料。