

材料力学性能课后习题答案

第一章 单向静拉伸力学性能

1、 解释下列名词。

1 弹性比功：金属材料吸收弹性变形功的能力，一般用金属开始塑性变形前单位体积吸收的最大弹性变形功表示。

2．滞弹性：金属材料在弹性范围内快速加载或卸载后，随时间延长产生附加弹性应变的现象称为滞弹性，也就是应变落后于应力的现象。

3．循环韧性：金属材料在交变载荷下吸收不可逆变形功的能力称为循环韧性。

4．包申格效应：金属材料经过预先加载产生少量塑性变形，卸载后再同向加载，规定残余伸长应力增加；反向加载，规定残余伸长应力降低的现象。

5．解理刻面：这种大致以晶粒大小为单位的解理面称为解理刻面。

6．塑性：金属材料断裂前发生不可逆永久（塑性）变形的能力。

脆性：指金属材料受力时没有发生塑性变形而直接断裂的能力

韧性：指金属材料断裂前吸收塑性变形功和断裂功的能力。

7. 解理台阶：当解理裂纹与螺型位错相遇时，便形成一个高度为 b 的台阶。

8. 河流花样：解理台阶沿裂纹前端滑动而相互汇合，同号台阶相互汇合长大，当汇合台阶高度足够大时，便成为河流花样。是解理台阶的一种标志。

9. 解理面：是金属材料在一定条件下，当外加正应力达到一定数值后，以极快速率沿一定晶体学平面产生的穿晶断裂，因与大理石断裂类似，故称此种晶体学平面为解理面。

10. 穿晶断裂：穿晶断裂的裂纹穿过晶内，可以是韧性断裂，也可以是脆性断裂。

沿晶断裂：裂纹沿晶界扩展，多数是脆性断裂。

11. 韧脆转变：具有一定韧性的金属材料当低于某一温度点时，冲击吸收功明显下降，断裂方式由原来的韧性断裂变为脆性断裂，这种现象称为韧脆转变

2、 说明下列力学性能指标的意义。

答：E 弹性模量 G 切变模量 σ_r 规定残余伸长应力 $\sigma_{0.2}$ 屈服强度 δ_{gt} 金属材料拉伸时最大应力下的总伸长率 n 应变硬化指数 P15

3、 金属的弹性模量主要取决于什么因素？为什么说它是一个对组织不敏感的力学性能指标？

答：主要决定于原子本性和晶格类型。合金化、热处理、冷塑性变形等能够改变金属材料的组织形态和晶粒大小， 但是不改变金属原子的本性和晶格类型。 组织虽然改变了，原子的本性和晶格类型未发生改变， 故弹性模量对组织不敏感。【P4】

2、 现有 45、40Cr、35 CrMo 钢和灰铸铁几种材料，你选择哪种材料作为机床机身，为什么？

选灰铸铁，因为其含碳量高，有良好的吸震减震作用，并且机床床身一般结构简单，对精度要求不高，使用灰铸铁可降低成本，提高生产效率。

5、多晶体金属产生明显屈服的条件， 并解释 bcc 金属及其合金与 fcc 金属及其合金屈服行为不同的原因。

答：多晶体金属产生明显屈服的条件： 1) 材料变形前可动位错密度小，或虽有大量位错但被钉扎住，如钢中的位错为间隙原子、杂质原子或第二相质点所钉扎。2) 随塑性变形的发生，位错能快速增殖； 3) 位错运动速率与外加应力之间有强烈依存关系。

金属材料塑性变形的应变速率与位错密度、 位错运动速率和柏氏矢量成正比， 而位错运动速率又决定于外加应力的滑移分切应力。 ($\dot{\epsilon} = b \rho \bar{v}$, $\bar{v} = \left(\frac{\tau}{\tau_0}\right)^{m'}$)

塑性变形初始阶段， 由于可动位错密度少， 为了维持高的应变速率， 必须增大位错运动速率。 而要提高位错运动速率必须要有高的应力， 这对应着上屈服点。 一旦塑性变形产生，位错大量增殖，位错运动速率下降，相应的应力随之下降，从而产生了屈服现象。

对于 bcc 金属及其合金，位错运动速率应力敏感指数 m' 低，即位错运动速率变化所需应力变化大， 屈服现象明显。 而 fcc 金属及其合金， 其位错运动速率应力敏感指数高，屈服现象不明显。

6、 试述退火低碳钢、中碳钢和高碳钢的屈服现象在拉伸力 - 伸长曲线图上的区别？为什么？

答：随含碳量的增加，屈服现象越来越不明显。这是由于随含碳量高，其组织中渗碳体含量增多，对基体起强化作用，使得材料屈服强度很高，塑性降低。

7、 决定金属屈服强度的因素有哪些？【 P12】

答：内在因素：金属本性及晶格类型、晶粒大小和亚结构、溶质元素、第二相。

外在因素：温度、应变速率和应力状态。

晶粒、晶界、第二相等外界影响位错运动的因素主要从内因和外因两个方面考虑

（一）影响屈服强度的 内因素

1．金属本性和晶格类型（结合键、晶体结构）单晶的屈服强度从理论上说是使位错开始运动的临界切应力，其值与位错运动所受到的阻力（晶格阻力 - - 派拉力、位错运动交互作用产生的阻力）决定派拉力：

$$\tau_{p\cdot n} = \frac{2G}{1-\nu} e^{-\frac{2\pi u}{b(1-\nu)}} = \frac{2G}{1-\nu} e^{-\frac{2\pi u}{b}} \quad (1-13)$$

位错交互作用力

$$\tau = \frac{\alpha G b}{L} \quad (1-14)$$

（ α 是与晶体本性、位错结构分布相关的比例系数， L 是位错间距。）

2．晶粒大小和亚结构晶粒小 晶界多（阻碍位错运动） 位错塞积 提供应力 位错开动 产生宏观塑性变形。晶粒减小将增加位错运动阻碍的数目，减小晶粒内位错塞积群的长度，使屈服强度降低（细晶强化）。屈服强度与晶粒大小的关系：霍尔 - 派奇（Hall-Petch） $\sigma_s = \sigma_i + k_y d^{-1/2}$

3．溶质元素加入溶质原子（间隙或置换型）固溶体（溶质原子与溶剂原子半径不一样）产生晶格畸变 产生畸变应力场 与位错应力场交互运动 使位错受阻 提高屈服强度（固溶强化）。

4．第二相（弥散强化，沉淀强化）不可变形第二相提高位错线张力 绕过第二相 留下位错环 两质点间距变小 流变应力增大。不可变形第二相位错切过（产生界面能），使之与机体一起产生变形，提高了屈服强度。

弥散强化：第二相质点弥散分布在基体中起到的强化作用。

沉淀强化：第二相质点经过固溶后沉淀析出起到的强化作用

（二）影响屈服强度的 外因素

1．温度 一般的规律是温度升高，屈服强度降低。原因：派拉力属于短程力，对温度十分敏感

2．应变速率 应变速率大，强度增加。 $\sigma_t = C_1(\dot{\epsilon})^m$

3．应力状态 切应力分量越大，越有利于塑性变形，屈服强度越低缺口效应：试样中“缺口”的存在，使得试样的应力状态发生变化，从而影响材料的力学性能的现象。

8. 试述 两种塑性指标评定金属材料属性的优缺点

答：断后伸长率是试样拉断后标距的伸长与原始标距的百分比。

断面收缩率是试样拉断后，缩颈处横截面积的最大缩减量与原始横截面积的百分比。

对于在单一拉伸条件下工作的长形零件，无论其是否产生缩颈，都用 δ 和 ψ 评定材料的塑性，因为产生缩颈时局部区域的塑性变形量对总伸长实际上没有什么影响。

若金属机件非长形，在拉伸时形成缩颈，则用 σ_m 作为塑性指标。因为 σ_m 反映了材料断裂前的最大塑性变形量，而此时 δ 不能显示材料的最大塑性。 σ_m 是在复杂应力状态下形成的，冶金因素的变化对性能的影响在 σ_m 上更为突出，因此 σ_m 比 δ 对组织变化更为敏感。

10、试述韧性断裂与脆性断裂的区别。为什么脆性断裂最危险？【 P21】

答：韧性断裂是金属材料断裂前产生明显的宏观塑性变形的断裂，这种断裂有一个缓慢的撕裂过程，在裂纹扩展过程中不断地消耗能量；而脆性断裂是突然发生的断裂，断裂前基本上不发生塑性变形，没有明显征兆，因而危害性很大。

11、剪切断裂与解理断裂都是穿晶断裂，为什么断裂性质完全不同？【 P23】

答：剪切断裂是在切应力作用下沿滑移面分离而造成的滑移面分离，一般是韧性断裂，而解理断裂是在正应力作用以极快的速率沿一定晶体学平面产生的穿晶断裂，解理断裂通常是脆性断裂。

12. 在什么条件下易出现沿晶断裂，怎样减小沿晶断裂的倾向？

答：当晶界分布有连续或不连续的脆性第二相、夹杂物，或者有害元素如砷、锑、锡等偏聚于晶界时，容易造成沿晶断裂。

减轻措施：提高冶金质量，降低有害杂质元素的含量；细化晶粒；控制第二相的形成，避免其沿晶分布。

13、何谓拉伸断口三要素？影响宏观拉伸断口性态的因素有哪些？

答：宏观断口呈杯锥形，由纤维区、放射区和剪切唇三个区域组成，即所谓的断口特征三要素。上述断口三区域的形态、大小和相对位置，因试样形状、尺寸和金属材料的性能以及试验温度、加载速率和受力状态不同而变化。

影响因素：断口三要素的形态、大小和相对位置与试样形状、尺寸和金属材料的性能以及试验温度、加载速率和受力状态不同而变化。一般，材料强度提高，塑性降低，放射区的比例增大；试样尺寸加大，放射区增大明显，而纤维区变化不大。

14.

8、板材宏观脆性断口的主要特征是什么？如何寻找断裂源？

断口平齐而光亮，常呈放射状或结晶状，板状矩形 拉伸 试样断口中的人字纹花样的放射方向也

与裂纹扩展方向平行，其尖端指向裂纹源。

17、论述格雷菲斯裂纹理论分析问题的思路，推导格雷菲斯方程，并指出该理论的局限性。【 P32】

答： $\sigma_c = \left(\frac{2E\gamma_s}{\pi a} \right)^{\frac{1}{2}}$ ，只适用于脆性固体，也就是只适用于那些裂纹尖端塑性变形可以忽略的情况。

21、答：铁素体钢在断裂时有明显屈服现象

25. 材料成分：rs—有效表面能，主要是塑性变形功，与有效滑移系数目和可动位错有关 具有 fcc 结构的金属有效滑移系和可动位错的数目都比较多，易于塑性变形，不易脆断。凡加入合金元素引起滑移系减少、孪生、位错钉扎的都增加脆性；若合金中形成粗大第二相也使脆性增加。 杂质：聚集在晶界上的杂质会降低材料的塑性，发生脆断。温度：i--- 位错运动摩擦阻力。其值高，材料易于脆断。bcc 金属具有低温脆断现象，因为 i 随着温度的减低而急剧增加，同时在低温下，塑性变形—孪生为主，也易于产生裂纹。故低温脆性大。晶粒大小：d 值小位错塞积的数目少，而且晶界多。故裂纹不易产生，也不易扩展。所以细晶组织有抗脆断性能。 应力状态：减小切应力与正应力比值的应力状态都将增加金属的脆性 加载速度 加载速度大，金属会发生韧脆转变。

第二章 金属在其他静载荷下的力学性能

1、解释下列名词：

(1) 应力状态软性系数 —— 材料或工件所承受的最大切应力 τ_{\max} 和最大正应力 σ_{\max} 比值，即：
$$\alpha = \frac{\tau_{\max}}{\sigma_{\max}} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2\sigma_1 - 0.5(\sigma_2 + \sigma_3)}$$

(2) 缺口效应 —— 绝大多数机件的横截面都不是均匀而无变化的光滑体，往往存在截面的急剧变化，如键槽、油孔、轴肩、螺纹、退刀槽及焊缝等，这种截面

变化的部分可视为“缺口”，由于缺口的存在，在载荷作用下缺口截面上的应力状态将发生变化，产生所谓的缺口效应。【 P44 P53】

(3) 缺口敏感度 —— 缺口试样的抗拉强度 σ_{bn} 的与等截面尺寸光滑试样的抗拉强度 σ_b 的比值，称为缺口敏感度，即：
$$NSR = \frac{\sigma_{bn}}{\sigma_b}$$

(4) 布氏硬度 —— 用钢球或硬质合金球作为压头，采用单位面积所承受的试验力计算而得的硬度。【 P49 P58】

(5) 洛氏硬度 —— 采用金刚石圆锥体或小淬火钢球作压头，以测量压痕深度所表示的硬度【 P51 P60】。

(6) 维氏硬度 —— 以两相对面夹角为 136° 的金刚石四棱锥作压头，采用单位面积所承受的试验力计算而得的硬度。【 P53 P62】

(7) 努氏硬度 —— 采用两个对面角不等的四棱锥金刚石压头，由试验力除以压痕投影面积得到的硬度。

(8) 肖氏硬度 —— 采动载荷试验法，根据重锤回跳高度表证的金属硬度。

(9) 里氏硬度 —— 采动载荷试验法，根据重锤回跳速度表证的金属硬度。

2、说明下列力学性能指标的意义

(1) σ_c —— 材料的抗压强度【 P41 P48】

(2) σ_b —— 材料的抗弯强度【 P42 P50】

(3) σ_s —— 材料的扭转屈服点【 P44 P52】

(4) σ_{τ} —— 材料的抗扭强度【 P44 P52】

(5) σ_b —— 材料的抗拉强度【 P47 P55】

(6) NSR —— 材料的缺口敏感度【 P47 P55】

(7) HBW —— 压头为硬质合金球的材料的布氏硬度【 P49 P58】

(8) HRA —— 材料的洛氏硬度【 P52 P61】

(9) HRB —— 材料的洛氏硬度【 P52 P61】

(10) HRC —— 材料的洛氏硬度【 P52 P61】

(11) HV —— 材料的维氏硬度【 P53 P62】

3、试综合比较单向拉伸、压缩、弯曲及扭转试验的特点和应用范围。

试验方法	特点	应用范围
拉伸	温度、应力状态和加载速率确定，采用光滑圆柱试样，试验简单，应力状态软性系数较硬。	塑性变形抗力和切断强度较低的塑性材料。
压缩	应力状态软，一般都能产生塑性变形，试样常沿与轴线呈 45°方向产生断裂，具有切断特征。	脆性材料，以观察脆性材料在韧性状态下所表现的力学行为。
弯曲	弯曲试样形状简单，操作方便；不存在拉伸试验时试样轴线与力偏斜问题，没有附加应力影响试验结果，可用试样弯曲挠度显示材料的塑性；弯曲试样表面应力最大，可灵敏地反映材料表面缺陷。	测定铸铁、铸造合金、工具钢及硬质合金等脆性与低塑性材料的强度和显示塑性的差别。也常用于比较和鉴别渗碳和表面淬火等化学热处理机件的质量和性能。
扭转	应力状态软性系数为 0.8，比拉伸时大，易于显示金属的塑性行为；试样在整个长度上的塑性变形时均匀，没有紧缩现象，能实现大塑性变形量下的试验；较能敏感地反映出金属表面缺陷和及表面硬化层的性能；试样所承受的最大正应力与最大切应力大体相等	用来研究金属在热加工条件下的流变性能和断裂性能，评定材料的热压力加工型，并未确定生产条件下的热加工工艺参数提供依据；研究或检验热处理工件的表面质量和各种表面强化工艺的效果。

1) 单向静拉伸试验的应力状态较硬 ($\sigma_3 = 0.5$)，适用于塑变抗力与切断强度较低的塑性材料。

2) 单向压缩的应力状态软性系数 $\sigma_3 = 2$ ，主要用于拉伸时呈脆性的金属材料力学性能测定。拉伸时塑性很好的材料在压缩时只发生压缩变形而不会断裂。脆性材料拉伸时产生垂直于载荷轴线的正断，塑变量几乎为零；压缩时能产生一定量的变形，沿与轴线呈 45°方向断裂，具有切断特性。

3) 弯曲：

金属杆状试样承受弯矩作用后，其内部应力主要为正应力，杆件截面上的应力分布不均匀，表面最大，中心为零，且应力方向发生变化。

弯曲试验的试样形状简单、操作方便，常用于测定铸铁、铸造合金、工具钢及硬质合金等脆性与低塑性材料的强度和显示塑性的差别。弯曲试验时，试样表面应力最大，可较灵敏地反映材料表面缺陷。因此，常用来比较和鉴别渗碳层和表面淬火层等表面热处理机件的质量和性能。

4) 扭转

圆柱形试样在承受扭矩时，在与试样轴线呈 45°的两个截面上作用最大与最小正应力；在与轴线平行和垂直的截面上作用最大切应力。具有以下特点

扭转的应力状态软性系数 $\sigma_3 = 0.8$ ，比拉伸时的大，易于显示金属的塑性行为。

圆柱形试样扭转时，整个长度上塑性变形是均匀的，没有缩颈现象，所以能实现大塑性变形量下的试验。

能较敏感地反映出金属表面缺陷及表面硬化层的性能。

扭转试验是测定生产上所使用的大部分金属材料切断强度最可靠的方法。根据扭断断口宏观特征可以区分材料最终是正断还是切断。

4. 试述脆性材料弯曲试验的特点及其应用。

5. 缺口试样拉伸时的应力分布有何特点？【 P45 P53】

在弹性状态下的应力分布：

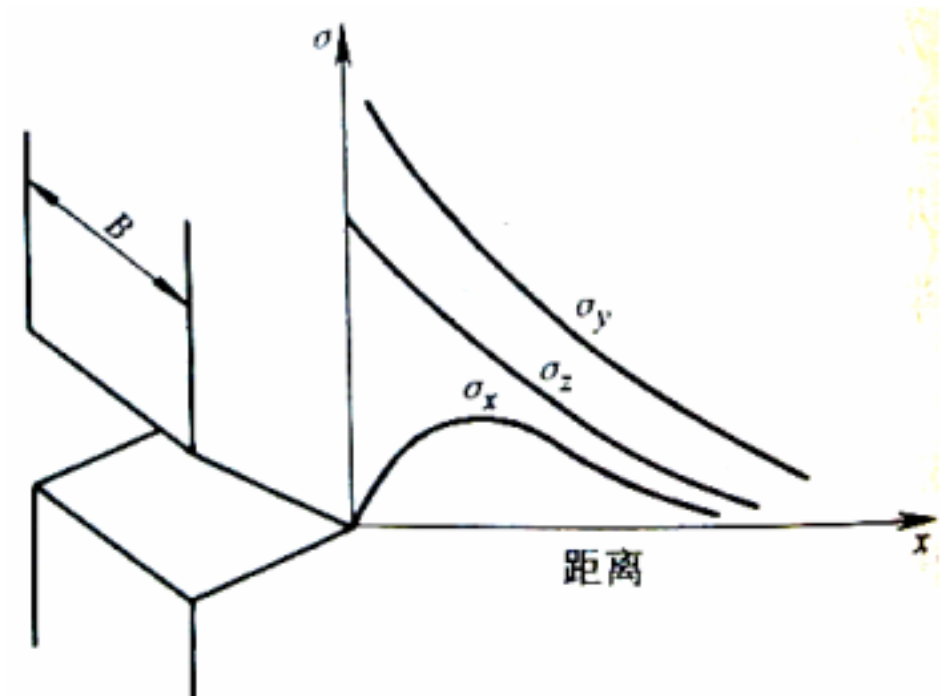
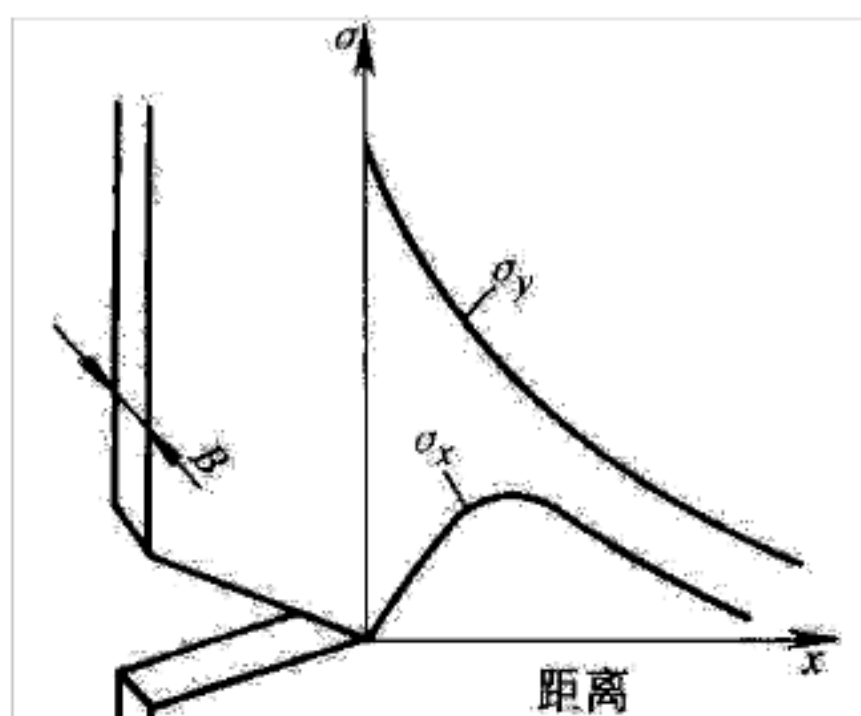
薄板：在缺口根部处于单向拉应力状态，在板中心部位处于两向拉伸平面应力状态。

厚板：在缺口根部处于两向拉应力状态，缺口内侧处三向拉伸平面应变状态。

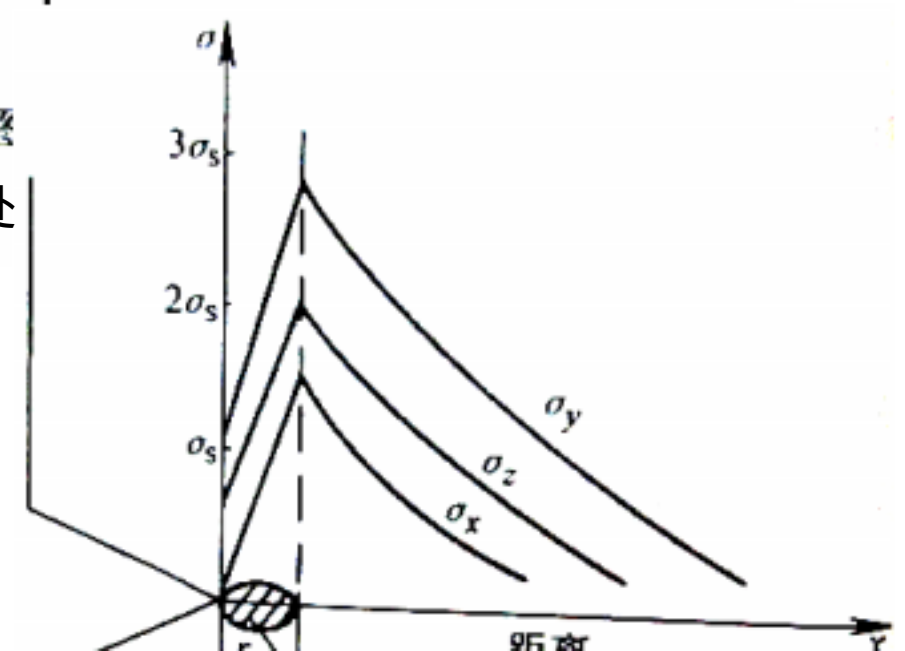
无论脆性材料或塑性材料，都因机件上的缺口造成两向或三向应力状态和应力集中而产生脆性倾向，降低了机件的使用安全性。为了评定不同金属材料的缺口变脆倾向，必须采用缺口试样进行静载力学性能试验。

具有缺口的薄板的受拉伸后，轴向应力 σ_y 在缺口根部最大，随离开根部的距离 x 增大而降低，即在缺口根部产生应力集中。由于缺口根部可以自由收缩，横向拉伸应力 $\sigma_x = 0$ ；自根部向内部发展，收缩变形阻力增大， σ_x 逐渐增大。增至一定数值后，随 σ_y 的减小而减小，因此，缺口的薄板的受拉伸其中心部分是两向拉伸的平面应力状态，缺口根部仍为单向拉伸应力状态。

有缺口厚板受拉伸作用后，在垂直于板厚方向的收缩变形受到约束， $\sigma_z \neq 0$ ， $\sigma_z = (\sigma_x + \sigma_y) \nu$ ，如图示。在缺口根部为两向拉伸应力状态，缺口内侧为三向拉伸的平面应变状态，且 $\sigma_x > \sigma_y > \sigma_z$ 。



当缺口内侧截面上局部区域产生塑变后，最大的应力已不在缺口根部，而是在其内侧一定距离 r_y 处，该处 σ_x 最大，因此 σ_y 、 σ_z 最大。越过塑变区与弹性区



交界处，应力分布与前述的弹性变形状态的应力分布稍有不同， σ 连续下降。

6、试综合比较光滑试样轴向拉伸、缺口试样轴向拉伸和偏斜拉伸试验的特点。

偏斜拉伸试验：在拉伸试验时在试样与试验机夹头之间放一垫圈，使试样的轴线与拉伸力形成一定角度进行拉伸。该试验用于检测螺栓一类机件的安全使用性能。

光滑试样轴向拉伸试验：截面上无应力集中现象，应力分布均匀，仅在颈缩时发生应力状态改变。

缺口试样轴向拉伸试验：缺口截面上出现应力集中现象，应力分布不均，应力状态发生变化，产生两向或三向拉应力状态，致使材料的应力状态软性系数降低，脆性增大。

偏斜拉伸试验：试样同时承受拉伸和弯曲载荷的复合作用，其应力状态更“硬”，缺口截面上的应力分布更不均匀，更能显示材料对缺口的敏感性。

1) 光滑圆柱试样轴向静拉伸试验：试样横截面均匀，整个截面的应力状态为均匀单向拉伸应力（若出现缩颈，则缩颈处承受三向拉伸应力），其特点是温度、应力状态和加载速率通常是确定的，通过试验可以揭示金属材料在静载下的力学行为，即弹性变形、塑性变形和断裂；测定最基本的力学性能指标，如屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 、抗拉强度 σ_b 、断后伸长率 δ 和断面收缩率 ψ 。光滑圆柱试样轴向静拉伸试验是工业上应用最广泛的金属力学性能试验方法之一。由于单向静拉伸的应力状态较硬，适用于塑变抗力与切断强度较低的塑性材料。

2) 缺口试样轴向拉伸试验：由于缺口的存在，在轴向静载作用下，缺口截面上的应力状态发生变化，产生所谓“缺口效应”，即缺口引起应力集中，并改变了缺口前方的应力状态，使缺口试样或机件中所受的应力，由原来的单向应力状态改变为两向（薄板）或三向应力状态（厚板）和材料的强度增高，塑性降低。无论塑性材料还是脆性材料，其机件上的缺口都因造成两向或三向应力状态和应力应变集中而产生变脆倾向，降低了使用的安全性，为评定不同材料的缺口变脆倾向，必须采用缺口试样进行静载力学性能试验。缺口静拉伸试验广泛用于研究高强度钢（淬火低温回火）的力学性能、钢和钛的氢脆以及研究高温合金的缺口敏感性等。金属材料的缺口敏感性指标（NSR）用缺口试样的抗拉强度 σ_{bn} 与等截面尺寸光滑试样的 σ_b 之比表示。

7、试说明布氏硬度、洛氏硬度与维氏硬度的实验原理，并比较布氏、洛氏与维氏硬度试验方法的优缺点。【 P49 P57】

原理 布氏硬度：用钢球或硬质合金球作为压头，计算单位面积所承受的试验力。

洛氏硬度：采用金刚石圆锥体或小淬火钢球作压头，以测量压痕深度。

维氏硬度：以两相对面夹角为 136° 的金刚石四棱锥作压头，计算单位面积所承受的试验力。

布氏硬度优点：实验时一般采用直径较大的压头球，因而所得的压痕面积比较大。压痕大的一个优点是其硬度值能反映金属在较大范围内各组成相得平均性能；另一个优点是实验数据稳定，重复性强。缺点：对不同材料需更换不同直径的压头球和改变试验力，压痕直径的测量也较麻烦，因而用于自动检测时受到限制。

洛氏硬度优点：操作简便，迅捷，硬度值可直接读出；压痕较小，可在工件上进行试验；采用不同标尺可测量各种软硬不同的金属和厚薄不一的试样的硬度，因而广泛用于热处理质量检测。缺点：压痕较小，代表性差；若材料中有偏析及组织不均匀等缺陷，则所测硬度值重复性差，分散度大；此外用不同标尺测得的硬度值彼此没有联系，不能直接比较。

维氏硬度优点：不存在布氏硬度试验时要求试验力 F 与压头直径 D 之间所规定条件的约束，也不存在洛氏硬度试验时不同标尺的硬度值无法统一的弊端；维氏硬度试验时不仅试验力可以任意取，而且压痕测量的精度较高，硬度值较为准确。缺点是硬度值需要通过测量压痕对角线长度后才能进行计算或查表，因此，工作效率比洛氏硬度法低的多。

八. 今有如下零件和材料需要测定硬度，试说明选择何种硬度实验方法为宜。

(1) 渗碳层的硬度分布 ---- HK 或- 显微 HV

(2) 淬火钢 -----HRC

(3) 灰铸铁 -----HB

(4) 鉴别钢中的隐晶马氏体和残余奥氏体 ----- 显微 HV或者 HK

(5) 仪表小黄铜齿轮 -----HV

(6) 龙门刨床导轨 -----HS (肖氏硬度) 或 HL(里氏硬度)

(7) 渗氮层 -----HV

(8) 高速钢刀具 -----HRC

(9) 退火态低碳钢 -----HB

(10) 硬质合金 ----- HRA

第三章 金属在冲击载荷下的力学性能

冲击韧性：材料在冲击载荷作用下吸收塑性变形功和断裂功的能力。【 P57】

冲击韧度： U形缺口冲击吸收功 A_{KU} 除以冲击试样缺口底部截面积所得之商，称为冲击韧度， $ku=A_{KU}/S$ (J/cm²)，反应了材料抵抗冲击载荷的能力，用 a_{KU} 表示。 P57 注释/P67

冲击吸收功： 缺口试样冲击弯曲试验中，摆锤冲断试样失去的位能为 mgH_1-mgH_2 此即为试样变形和断裂所消耗的功，称为冲击吸收功，以 A_K 表示，单位为 J。 P57/P67

低温脆性： 体心立方晶体金属及合金或某些密排六方晶体金属及其合金，特别是工程上常用的中、低强度结构钢（铁素体 - 珠光体钢），在试验温度低于某一温度 t_k 时，会由韧性状态变为脆性状态，冲击吸收功明显下降，断裂机理由微孔聚集型变为穿晶解理型，断口特征由纤维状变为结晶状，这就是低温脆性。

韧性温度储备：材料使用温度和韧脆转变温度的差值，保证材料的低温服役行为。

韧脆转变温度 ——材料呈现低温脆性的临界转变温度。

2. (1) A_K ：冲击吸收功。含义见上面。冲击吸收功不能真正代表材料的韧脆程度，但由于它们对材料内部组织变化十分敏感，而且冲击弯曲试验方法简便易行，被广泛采用。

A_{KV} (CVN)：V型缺口试样冲击吸收功。

A_{KU} ：U型缺口冲击吸收功。

(2) FATT50: 冲击试样断口分为纤维区、放射区（结晶区）与剪切唇三部分，在不同试验温度下，三个区之间的相对面积不同。温度下降，纤维区面积突然减少，结晶区面积突然增大，材料由韧变脆。通常取结晶区面积占整个断口面积 50%时的温度为 t_k ，并记为 50%FATT 或 FATT50% t_{50} 。（新书 P61，旧书 P71）或：结晶区占整个断口面积 50%是温度定义的韧脆转变温度。

(3) NDT: 以低阶能开始上升的温度定义的韧脆转变温度，称为无塑性或零塑性转变温度。

(4) FTE: 以低阶能和高阶能平均值对应的温度定义 t_k ，记为 FTE

(5) FTP: 以高阶能对应的温度为 t_k ，记为 FTP

3.W18Cr4V Cr12MoV 3Cr2W8V 铸铁 球铁 工具钢 （脆性材料）不要开缺口
40CrNiMo 30CrMnSi 20CrMnTi 要开缺口

4、试说明低温脆性的物理本质及其影响因素

低温脆性的物理本质：宏观上对于那些有低温脆性现象的材料，它们的屈服强度会随温度的降低急剧增加，而断裂强度随温度的降低而变化不大。当温度降低到某一温度时，屈服强度增大到高于断裂强度时，在这个温度以下材料的屈服强度比断裂强度大，因此材料在受力时还未发生屈服便断裂了，材料显示脆性。从微观机制来看低温脆性与位错在晶体点阵中运动的阻力有关，当温度降低时，位错运动阻力增大，原子热激活能力下降，因此材料屈服强度增加。

影响材料低温脆性的因素有（P63, P73）：

1．晶体结构：对称性低的体心立方以及密排六方金属、合金转变温度高，材料脆性断裂趋势明显，塑性差。

2．化学成分：能够使材料硬度，强度提高的杂质或者合金元素都会引起材料塑性和韧性变差，材料脆性提高。

3．显微组织：

晶粒大小，细化晶粒可以同时提高材料的强度和塑韧性。因为晶界是裂纹扩展的阻力，晶粒细小，晶界总面积增加，晶界处塞积的位错数减少，有利于降低应力集中；同时晶界上杂质浓度减少，避免产生沿晶脆性断裂。

金相组织：较低强度水平时强度相等而组织不同的钢，冲击吸收功和韧脆转变温度以马氏体高温回火最佳，贝氏体回火组织次之，片状珠光体组织最差。钢中夹杂物、碳化物等第二相质点对钢的脆性有重要影响，当其尺寸增大时均使材料韧性下降，韧脆转变温度升高。

5. 试述焊接船舶比铆接船舶容易发生脆性破坏的原因。

焊接容易在焊缝处形成粗大金相组织气孔、夹渣、未熔合、未焊透、错边、咬边等缺陷，增加裂纹敏感度，增加材料的脆性，容易发生脆性断裂。

7. 试从宏观上和微观上解释为什么有些材料有明显的韧脆转变温度，而另外一些材料则没有？

宏观上，体心立方中、低强度结构钢随温度的降低冲击功急剧下降，具有明显的韧脆转变温度。而高强度结构钢在很宽的温度范围内，冲击功都很低，没有明显的韧脆转变温度。面心立方金属及其合金一般没有韧脆转变现象。

微观上，体心立方金属中位错运动的阻力对温度变化非常敏感，位错运动阻力随温度下降而增加，在低温下，该材料处于脆性状态。而面心立方金属因位错宽度比较大，对温度不敏感，故一般不显示低温脆性。

体心立方金属的低温脆性还可能与迟屈服现象有关，对低碳钢施加一高速到高于屈服强度时，材料并不立即产生屈服，而需要经过一段孕育期（称为迟屈时

间)才开始塑性变形,这种现象称为迟屈服现象。由于材料在孕育期中只产生弹性变形,没有塑性变形消耗能量,所以有利于裂纹扩展,往往表现为脆性破坏。

bcc 类金属及其合金或有明显的低温脆性,而 fcc 金属及其合金一般没有低温脆性。

宏观上说,这是由于 bcc 类金属及其合金的屈服强度随温度降低急剧增加而 fcc 金属的屈服强度随温度降低只缓慢的增加。

微观上说,对于 bcc 金属,其派纳力较 fcc 金属高很多,而派纳力在屈服强度中占有很大比例,派纳力对温度非常敏感,随温度降低急剧升高,派纳力的增加,增大了位错运动阻力,使得位错运动需要更大的外加应力,其屈服强度随之提高。因此 bcc 金属的屈服强度随温度降低而急剧增加,而解理断裂强度 σ_c 随温度变化不敏感,高于 t_k , $\sigma_c > \sigma_s$, 材料受载后先屈服再断裂,为韧断;在低于 t_k 时,材料受载后先达到断裂强度,表现为脆断。

第四章 金属的断裂韧性

一、解释下列名词

(1) 低应力脆断: 在屈服应力以下发生的断裂。

(2) 张开型 (I 型) 裂纹: 拉应力垂直作用于裂纹扩展面, 裂纹沿作用力方向张开, 沿裂纹面扩展。

(3) 应力场: 应力在空间的分布情况。

应变场: 应变在空间的分布情况。

(4) 应力强度因子 K_I : 表示应力场的强弱程度。“I”表示 I 型裂纹。

(5) 小范围屈服: 塑性尺寸较裂纹尺寸及净截面尺寸为小, 小一个数量级以上的屈服。

(6) 塑性区: 金属材料在裂纹扩展前, 其尖端附近总要先出现一个或大或小的塑性变形区, 塑性区内应力应变之间就不再是线性关系。

(7) 有效屈服应力: 裂纹在发生屈服时的应力

(8) 有效裂纹长度：将原有的裂纹长度与松弛后的塑性区相合并得到的裂纹长度（因裂纹尖端应力的分布特性，裂尖前沿产生有塑性屈服区，屈服区内松弛的应力将叠加至屈服区之外，从而使屈服区之外的应力增加，其效果相当于因裂纹长度增加 r_y 后对裂纹尖端应力场的影响，经修正后的裂纹长度即为有效裂纹长度： $a+r_y$ 。）

(9) 裂纹扩展 K 判据：裂纹在受力时只要满足 $K_I \geq K_{IC}$ ，就会发生脆性断裂。反之，即使存在裂纹，若 $K_I < K_{IC}$ 也不会断裂。

(10) 裂纹扩展能量释放率 G_I ：I 型裂纹扩展单位面积时系统释放势能的数值。

(11) 裂纹扩展 G 判据： $G_I \geq G_{IC}$ ，当 G_I 满足上述条件时裂纹失稳扩展断裂。

(12) J 积分：裂纹尖端区的应变能，即应力应变集中程度（有两种定义或表达式：一是线积分；二是形变功率差。）

(13) 裂纹扩展 J 判据： $J_I \geq J_{IC}$ ，只要满足上述条件，裂纹（或构件）就会断裂。

(14) COD 裂纹尖端沿应力方向张开所得到的位移。（COD 判据： $\delta \geq \delta_c$ ，当满足上述条件时，裂纹开始扩展。 P91/P103）

COD判据： $\delta \geq \delta_c$

2、说明下列断裂韧性指标的意义及其相互关系

K_{IC} 和 K_{IC}

答：临界或失稳状态的 K_I 记作 K_{IC} 或 K_{IC} ， K_{IC} 为平面应变下的断裂韧性，表示在平面应变条件下材料抵抗裂纹失稳扩展的能力。 K_{IC} 为平面应力断裂韧性，表示在平面应力条件下材料抵抗裂纹失稳扩展的能力。

它们都是 I 型裂纹的材料裂纹韧性指标，但 K_{IC} 值与试样厚度有关。当试样厚度增加，使裂纹尖端达到平面应变状态时，断裂韧性趋于一稳定的最低值，即为 K_{IC} ，它与试样厚度无关，而是真正的材料常数。 P71/P82

G_{IC} 答：P77/P89 当 G_I 增加到某一临界值时， G_I 能克服裂纹失稳扩展的阻力，则裂纹失稳扩展断裂。将 G_I 的临界值记作 G_{IC} ，称断裂韧性，表示材料阻止裂纹失稳扩展时单位面积所消耗的能量，其单位与 G_I 相同， $MPa \cdot m$

J_{IC} ：是材料的断裂韧性，表示材料抵抗裂纹开始扩展的能力，其单位与 G_{IC} 相同。 P90/P102

δ_c ：是材料的断裂韧性，表示材料阻止裂纹开始扩展的能力。 P91/P104

J 判据和 δ 判据一样都是裂纹开始扩展的裂纹判据，而不是裂纹失稳扩展的裂纹判据。 P91/P104

3、试述低应力脆断的原因及防止方法。

答：低应力脆断的原因：在材料的生产、机件的加工和使用过程中产生不可避免的宏观裂纹，从而使机件在低于屈服应力的情况发生断裂。 预防措施：将断裂判据用于机件的设计上，在给定裂纹尺寸的情况下，确定机件允许的最大工作应力，或者当机件的工作应力确定后，根据断裂判据确定机件不发生脆性断裂时所允许的最大裂纹尺寸。

4、为什么研究裂纹扩展的力学条件时不用应力判据而用其它判据？

答：由 4—1 可知，裂纹前端的应力是一个变化复杂的多向应力，如用它直接建立裂纹扩展的应力判据，显得十分复杂和困难；而且当 $r \rightarrow 0$ 时，不论外加平均应力如何小，裂纹尖端各应力分量均趋于无限大，构件就失去了承载能力，也就是说，只要构件一有裂纹就会破坏，这显然与实际情况不符。这说明经典的强度理论单纯用应力大小来判断受载的裂纹体是否破坏是不正确的。因此无法用应力判据处理这一问题。因此只能用其它判据来解决这一问题。

5、试述应力场强度因子的意义及典型裂纹 K_I 的表达式

答：新书 P69 旧书 P80 参看书上图（应力场强度因子的意义见上） 几种裂纹的 K_I

表达式，无限大板穿透裂纹： $K_I = \sigma \sqrt{\pi a}$ ；有限宽板穿透裂纹： $K_I = \sigma \sqrt{\pi a} f\left(\frac{a}{b}\right)$ ；

有限宽板单边直裂纹： $K_I = \sigma \sqrt{\pi a} f\left(\frac{a}{b}\right)$ 当 $b \geq a$ 时， $K_I = 1.2 \sigma \sqrt{\pi a}$ ；受弯单边裂纹

梁： $K_I = \frac{6M}{(b-a)^{3/2}} f\left(\frac{a}{b}\right)$ ；无限大物体内部有椭圆片裂纹，远处受均匀拉伸：

$K_I = \frac{\sigma \sqrt{\pi a}}{\Phi} (\sin^2 \beta + \frac{a^2}{c^2} \cos^2 \beta)^{1/4}$ ；无限大物体表面有半椭圆裂纹，远处均受拉伸：

A 点的 $K_I = \frac{1.1 \sigma \sqrt{\pi a}}{\Phi}$ 。

6、试述 K 判据的意义及用途。

答：K 判据解决了经典的强度理论不能解决存在宏观裂纹为什么会产生低应力脆断的原因。K 判据将材料断裂韧性同机件的工作应力及裂纹尺寸的关系定量地联系起来，可直接用于设计计算，估算裂纹体的最大承载能力、允许的裂纹最大尺寸，以及用于正确选择机件材料、优化工艺等。 P71/P83

7、试述裂纹尖端塑性区产生的原因及其影响因素。

答：机件上由于存在裂纹，在裂纹尖端处产生应力集中，当 σ_y 趋于材料的屈服应力时，在裂纹尖端处便开始屈服产生塑性变形，从而形成塑性区。

影响塑性区大小的因素有：裂纹在厚板中所处的位置，板中心处于平面应变状态，塑性区较小；板表面处于平面应力状态，塑性区较大。但是无论平面应力或平面应变，塑性区宽度总是与 $(K_{IC}/\sigma_s)^2$ 成正比。

8、试述塑性区对 K_I 的影响及 K_I 的修正方法和结果。

由于裂纹尖端塑性区的存在将会降低裂纹体的刚度，相当于裂纹长度的增加，因而影响应力场和及 K_I 的计算，所以要对 K_I 进行修正。

最简单而适用的修正方法是在计算 K_I 时采用“有效裂纹尺寸”，即以虚拟有效裂纹代替实际裂纹，然后用线弹性理论所得的公式进行计算。

基本思路是：塑性区松弛弹性应力的作用于裂纹长度增加松弛弹性应力的作用是等同的，从而引入“有效长度”的概念，它实际包括裂纹长度和塑性区松弛应力的作用。

(4—15)的计算结果忽略了在塑性区内应变能释放率与弹性体应变能释放率的差别，因此，只是近似结果。当塑性区小时，或塑性区周围为广大的弹性区所包围时，这种结果还是很精确。但是当塑性区较大时，即属于大范围屈服或整体屈服时，这个结果是不适用的。

11 COD的意义：表示裂纹张开位移。表达式 $\delta = \frac{8\sigma_s a}{\pi E} \ln \sec\left(\frac{\pi\sigma}{2\sigma_s}\right)$ 。P91/P103

13、断裂韧性 K_{IC} 与强度、塑性之间的关系：

总的来说，断裂韧性随强度的升高而降低。详见新 P80/P93

14 试述 K_{Ic} 和 A_{kv} 的异同及其相互之间的关系。

相同点：断裂韧性与冲击韧性都反映了材料的韧性性能。

不同点： K_{Ic} 能满足平面应变的要求， A_{kv} 一般不能满足，应力状态不同，应变速率不同，冲击是在应变速率高的冲击载荷下对材料的组织缺陷等因素反映更加灵敏， K_{Ic} 反映材料抵抗裂纹失稳扩展的能力，而冲击 A_{kv} 则反映裂纹形成和扩展过程所消耗的能量，应用不同， A_{kv} 是安全性能指标， K_{Ic} 用于定量。

关系：中高强钢 K_{Ic} 与 A_{kv} 及 0.2 的关系

15、影响 K_{IC} 的冶金因素：

内因：1、化学成分的影响；2、晶粒结构和晶粒大小的影响；

3、杂质及第二相的影响；4、显微组织的影响。

外因：1、温度；2、应变速率。P81/P95

16. 有一大型板件，材料的 $\sigma_s=1200\text{MPa}$, $K_{Ic}=115\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ，探伤发现 20mm 长的横向穿透裂纹，若在平均轴向拉应力 900MPa 下工作，试计算 K_I 及塑性区宽度 R_0 ，并判断该件是否安全？

解：由题意知穿透裂纹受到的应力为 $\sigma=900\text{MPa}$

根据 σ/σ_s 的值，确定裂纹断裂韧性 K_{IC} 是否需要修正

因为 $\sigma/\sigma_s=900/1200=0.75>0.7$ ，所以裂纹断裂韧性 K_{IC} 需要修正

对于无限板的中心穿透裂纹，修正后的 K_I 为：

$$K_I = \frac{\sigma\sqrt{\pi a}}{\sqrt{1-0.177(\sigma/\sigma_s)^2}} = \frac{900\sqrt{0.01\pi}}{\sqrt{1-0.177(0.75)^2}} = 168.13$$

(MPa·m^{1/2})

塑性区宽度为：
$$R_0 = \frac{1}{2\sqrt{2\pi}} \left(\frac{K_I}{\sigma_s} \right)^2 = 0.004417937(\text{m}) = 2.21(\text{mm})$$

比较 K_I 与 K_{Ic}：

因为 K_I=168.13 (MPa·m^{1/2})

K_{Ic}=115 (MPa·m^{1/2})

所以：K_I>K_{Ic}，裂纹会失稳扩展，所以该件不安全。

17. 有一轴件平行轴向工作应力 150MPa, 使用中发现横向疲劳脆性正断，断口分析表明有 25mm 深度的表面半椭圆疲劳区，根据裂纹 a/c 可以确定 =1，测试材料的 σ_{0.2}=720MPa，试估算材料的断裂韧性 K_{IC} 为多少？

解：因为 σ/σ_{0.2}=150/720=0.208<0.7，所以裂纹断裂韧性 K_{IC} 不需要修正
对于无限板的中心穿透裂纹，修正后的 K_I 为：K_{IC}=Y c a c^{1/2}

对于表面半椭圆裂纹，Y=1.1 √π / √π =1.1 √π

所以，K_{IC}=Y c a c^{1/2}=1.1 √π × 150 × √25 × 10⁻³ =46.229 (MPa·m^{1/2})

第五章 金属的疲劳

1. 名词解释：

应力幅 a: a=1/2(σ_{max}-σ_{min}) p95/p108

平均应力 m: m=1/2(σ_{max}+σ_{min}) p95/p107

应力比 r: r=σ_{min}/σ_{max} p95/p108

疲劳源：是疲劳裂纹萌生的策源地，一般在机件表面常和缺口，裂纹，刀痕，蚀坑相连。 P96

疲劳贝纹线：是疲劳区的最大特征，一般认为它是由载荷变动引起的，是裂纹前沿线留下的弧状台阶痕迹。 P97/p110

疲劳条带：疲劳裂纹扩展的第二阶段的断口特征是具有略程弯曲并相互平行的沟槽花样，称为疲劳条带（疲劳辉纹，疲劳条纹） p113/p132

挤出脊和侵入沟：在拉应力作用下，位错源被激活，使其增殖的位错滑移到表面，形成滑移台阶，应力不断循环，多个位错源引起交互滑移，形成“挤出”和“侵入”的台阶。

驻留滑移带：用电解抛光的方法很难将已产生的表面循环滑移带去除，当对试样重新循环加载时，则循环滑移带又会在原处再现，这种永留或再现的循环滑移带称为驻留滑移带。 P111

过渡寿命：弹性应变幅 - 寿命线和塑性应变幅 - 寿命线的交点对应的寿命。

热疲劳：机件在由温度循环变化时产生的循环热应力及热应变作用下的疲劳。

K: 材料的疲劳裂纹扩展速率不仅与应力水平有关，而且与当时的裂纹尺寸有关。K是由应力范围 $\Delta\sigma$ 和 a 复合为应力强度因子范围， $K=K_{\max}-K_{\min}=Y_{\max}\Delta\sigma\sqrt{a}-Y_{\min}\Delta\sigma\sqrt{a}$ p105/p120

da/dN : 疲劳裂纹扩展速率，即每循环一次裂纹扩展的距离。 P105

疲劳寿命：试样在交变循环应力或应变作用下直至发生破坏前所经受应力或应变的循环次数 p102/p117

过载损伤：金属在高于疲劳极限的应力水平下运转一定周次后，其疲劳极限或疲劳寿命减小，就造成了过载损伤。 P102/p117

疲劳缺口敏感度 q_f ：金属在交变载荷下的缺口敏感性。

过载损伤界：在不同过载应力下，损伤累积造成的裂纹尺寸达到或超过 a_0 应力的“非扩展裂纹”尺寸的循环次数。

疲劳门槛值 K_{th} ：疲劳裂纹不扩展的 K 临界值，表示材料阻止疲劳裂纹开始扩展的性能。

2. 揭示下列疲劳性能指标的意义

疲劳强度 σ_{-1} ， σ_{-p} ， σ_{-1} ， σ_{-1N} ，P99,100,103/p114

σ_{-1} : 对称应力循环作用下的弯曲疲劳极限； σ_{-p} : 对称拉压疲劳极限； σ_{-1} : 对称扭转疲劳极限； σ_{-1N} : 缺口试样在对称应力循环作用下的疲劳极限。

疲劳缺口敏感度 q_f P103/p118

金属材料在交变载荷作用下的缺口敏感性，常用疲劳缺口敏感度来评定。

$Q_f=(K_f-1)/(K_t-1)$ 。其中 K_t 为理论应力集中系数且大于一， K_f 为疲劳缺口系数。 $K_f=(\sigma_{-1}/\sigma_{-1N})$

过载损伤界 由实验测定，测出不同过载应力水平和相应的开始降低疲劳寿命的应力循环周次，得到不同试验点，连接各点便得到过载损伤界。 P102,103/p117

疲劳门槛值 K_{th} 在疲劳裂纹扩展速率曲线的 K_{th} 区，当 $K=K_{th}$ 时， $da/dN=0$ ，表示裂纹不扩展；只有当 $K>K_{th}$ 时， $da/dN>0$ ，疲劳裂纹才开始扩展。因此， K_{th} 是疲劳裂纹不扩展的 K 临界值，称为 疲劳裂纹扩展门槛值。

3. 试述金属疲劳断裂的特点 p96/p109

(1) 疲劳是低应力循环延时断裂，机具有寿命的断裂

(2) 疲劳是脆性断裂

(3) 疲劳对缺陷（缺口，裂纹及组织缺陷）十分敏感

4. 试述疲劳宏观断口的特征及其形成过程 （新书 P96~98, 旧书 P109~111)

答：典型疲劳断口具有三个形貌不同的区域—疲劳源、疲劳区及瞬断区。

(1) 疲劳源是疲劳裂纹萌生的策源地，疲劳源区的光亮度最大，因为这里在整个裂纹亚稳扩展过程中

断面不断摩擦挤压，故显示光亮平滑，另疲劳源的贝纹线细小。

(2) 疲劳区的疲劳裂纹亚稳扩展所形成的断口区域，是判断疲劳断裂的重要特征证据。特征是：断口比较光滑并分布有贝纹线。断口光滑是疲劳源区域的延续，但其程度随裂纹向前扩展逐渐减弱。贝纹线是由载荷变动引起的，如机器运转时的开动与停歇，偶然过载引起的载荷变动，使裂纹前沿留下了弧状台阶痕迹。

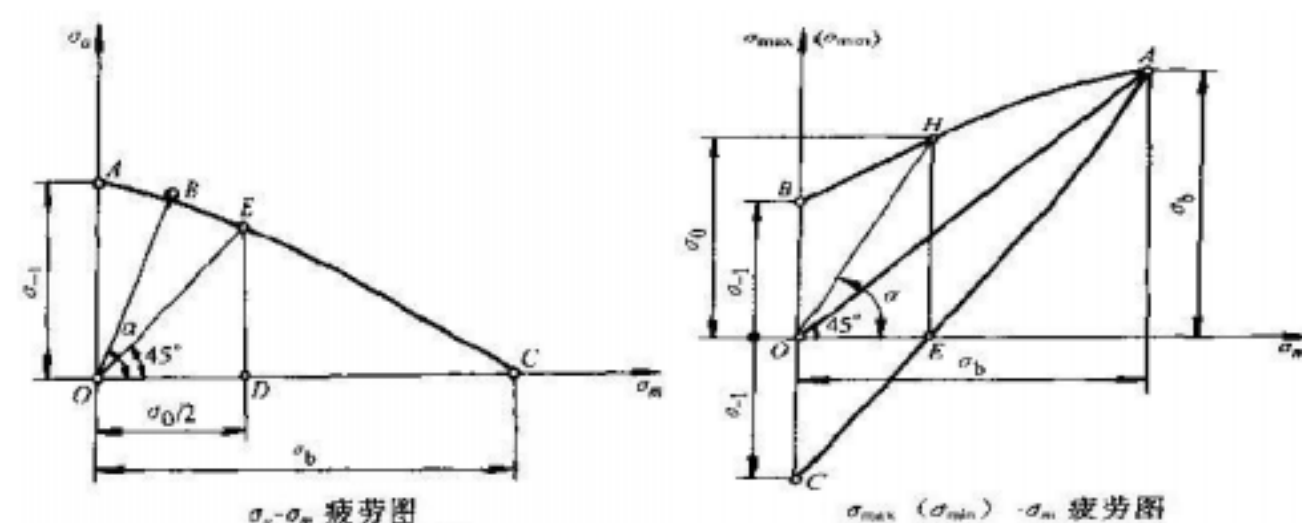
(3) 瞬断区是裂纹最后失稳快速扩展所形成的断口区域。其断口比疲劳区粗糙，脆性材料为结晶状断口，韧性材料为纤维状断口。

6. 试述疲劳图的意义、建立及用途。（新书 P101~102, 旧书 P115~117)

定义：疲劳图是各种循环疲劳极限的集合图 / 也是疲劳曲线的另一种表达形式。

意义：很多机件或构件是在不对称循环载荷下工作的，因此还需知道材料的不对称循环疲劳极限，以适应这类机件的设计和选材的需要。通常是用工程作图法，由疲劳图求得各种不对称循环的疲劳极限。

1、 $\sigma_a - \sigma_m$ 疲劳图



建立：这种图的纵坐标以 σ_a 表示，横坐标以 σ_m 表示。然后，以不同应力比 r 条件下将 σ_{\max} 表示的疲劳极限 σ_r 分解为 σ_a 和 σ_m ，并在该坐标系中作 ABC 曲线，即

为 $\sigma_a - \sigma_m$ 疲劳图。其几何关系为：

$$\tan \alpha = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} = \frac{\frac{1}{2}(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})}{\frac{1}{2}(\sigma_{\max} + \sigma_{\min})} = \frac{1-r}{1+r}$$

(用途)：我们知道应力比 r ，将其代入试中，即可求得 $\tan\alpha$ 和 α ，而后从坐标原点 O 引直线，令其与横坐标的夹角等于 α 值，该直线与曲线 ABC 相交的交点 B 便是所求的点，其纵、横坐标之和，即为相应 r 的疲劳极限 σ_{rB} ， $\sigma_{rB} = \sigma_{aB} + \sigma_{mB}$ 。

2、 $\sigma_{\max}(\sigma_{\min}) - \sigma_m$ 疲劳图

建立：这种图的纵坐标以 σ_{\max} 或 σ_{\min} 表示，横坐标以 σ_m 表示。然后将不同应力比 r 下的疲劳极限，分别以 $\sigma_{\max}(\sigma_{\min})$ 和 σ_m 表示于上述坐标系中，就形成这种疲劳图。

几何关系为：
$$\tan\alpha = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_m} = \frac{2\sigma_{\max}}{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}} = \frac{2}{1+r}$$

(用途)：我们只要知道应力比 r ，就可代入上试求得 $\tan\alpha$ 和 α ，而后从坐标原点 O 引一直线 OH ，令其与横坐标的夹角等于 α ，该直线与曲线 AHC 相交的交点 H 的纵坐标即为疲劳极限。

7. 试述疲劳裂纹的形成机理及阻止疲劳裂纹萌生的一般方法。

7. 机理：1、滑移带开裂产生裂纹。金属在循环应力长期作用下，即使其应力低于屈服应力，也会发生循环滑移并形成循环滑移带，这种循环滑移是极不均匀的，总分布在某些局部薄弱

区，这种循环滑移带具有持久驻留性，称为驻留滑移带，随着加载循环次数增加，循环滑移带会不断地加宽，当加宽到一定程度时，由于位错的塞积和交割作用，便在驻留滑移带处形成微裂纹。

2、相界面开裂产生裂纹。材料中的第二相或夹杂物易引发疲劳裂纹。

3、晶界开裂产生裂纹。对晶体材料由于晶界的存在和相邻晶粒的不同取向性，位错在某一晶粒内运动时会受到晶界的阻碍作用，在晶界处发生位错塞积和应力集中现象，在应力不断循环下，晶界处的应力集中得不到松弛时，则应力峰越来越高，当超过晶界强度时就会在晶界处产生裂纹。

阻止方法：1、固溶强化，细晶强化，提高材料的滑移抗力，均可以阻止疲劳裂纹的萌生，提高疲劳强度。

2、控制第二相或夹杂物的数量、形态、大小和分布，使之“少、圆、小、匀”，均可抑制或延缓疲劳裂纹在第二相或夹杂物附近萌生。

3、晶界强化，净化 and 细化晶粒均可抑制晶界裂纹形成。

8. 试述影响疲劳裂纹扩展速率的主要因素。

答：1、应力比 r （或平均应力 σ_m ）的影响：Forman提出
$$\frac{da}{dN} = \frac{c(\Delta K)^n}{(1-r)K_c - \Delta K}$$

残余压应力因会减小 r ，使 $\frac{da}{dN}$ 降低和 ΔK_{th} 升高，对疲劳寿命有利；而残余拉应力

因会增大 r ，使 $\frac{da}{dN}$ 升高和 ΔK_{th} 降低，对疲劳寿命不利。

2、过载峰的影响：偶然过载进入过载损伤区内，使材料受到损伤并降低疲劳寿命。但若过载适当，有时反而是有益的。

3、材料组织的影响：

晶粒大小：晶粒越粗大，其 ΔK_{th} 值越高， $\frac{da}{dN}$ 越低，对疲劳寿命越有利。

组织：钢的含碳量越低，铁素体含量越多时，其 ΔK_{th} 值就越高。当钢的淬火组织中存在一定量的残余奥氏体和贝氏体等韧性组织时，可以提高钢的 ΔK_{th} ，降低 $\frac{da}{dN}$ 。 喷丸处理：喷丸强化也能提高 ΔK_{th} 。

9. 试述疲劳微观断口的主要特征。（新书 P113~P114, 旧书 P132）

答：断口特征是具有略呈弯曲并相互平行的沟槽花样，称疲劳条带（疲劳条纹、疲劳辉纹）。疲劳条带是疲劳断口最典型的微观特征。滑移系多的面心立方金属，其疲劳条带明显；滑移系少或组织复杂的金属，其疲劳条带短窄而紊乱。

疲劳裂纹扩展的塑性钝化模型（Laird 模型）：

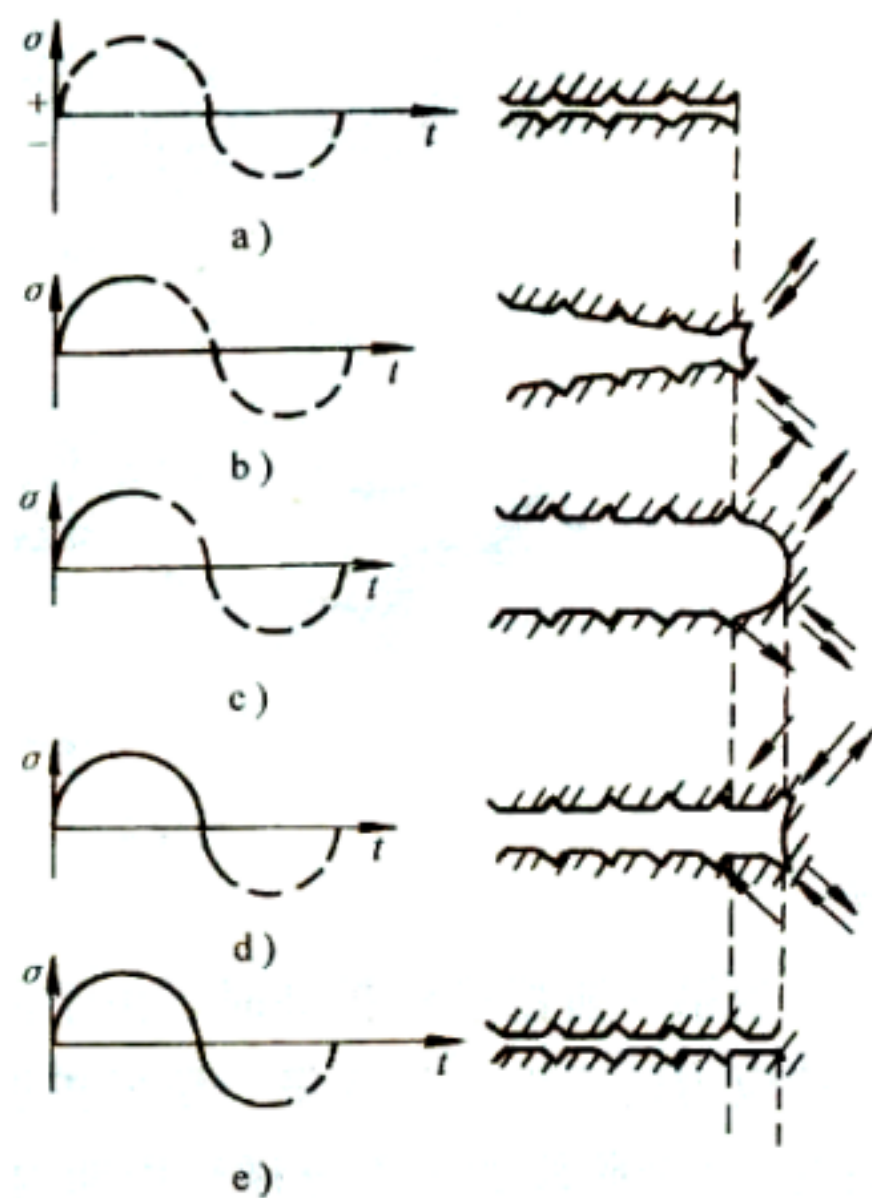
图中(a)，在交变应力为零时裂纹闭合。

图(b)，受拉应力时，裂纹张开，在裂纹尖端沿最大切应力方向产生滑移。

图(c)，裂纹张开至最大，塑性变形区扩大，裂纹尖端张开呈半圆形，裂纹停止扩展。由于塑性变形裂纹尖端的应力集中减小，裂纹停止扩展的过程称为“塑性钝化”。

图(d)，当应力变为压缩应力时，滑移方向也改变了，裂纹尖端被压弯成“耳状”切口。

图(e)，到压缩应力为最大值时，裂纹完全闭合，裂纹尖端又由钝变锐，形成一对尖角。



疲劳条带是疲劳断口最典型的微观特征，略呈弯曲并相互平行的沟槽花样。每一条疲劳条带可以视作一次应力循环的扩展痕迹，裂纹的扩展方向与条带垂直。

形成模型：塑性钝化模型

疲劳裂纹扩展的第二阶段是在应力循环下，裂纹尖端钝锐交替变化的过程，疲劳条带就是这种疲劳裂纹扩展所留下的痕迹。

10.

试述疲劳裂纹扩展寿命和剩余寿命的估算方法和步骤。

- 1、用无损检验探伤方法确定初始裂纹尺寸 a_0 及形状、位置和取向。
- 2、确定构件交变应力 σ_{\max} , σ_{\min} ，从而得 σ_r 。
- 3、确定应力场强度因子幅值 K_I 的表达式。
- 4、根据材料的断裂韧性及工作应力确定构件的临界裂纹尺寸 a_c 。

5、选择或试验确定疲劳 裂纹 扩展速率表达式 (c, n)。

6、用积分方法计算从 a_0 到 a_c 所需的循环周次，即疲劳剩余寿命 N_f 。

12. 试述金属表面强化对疲劳强度的影响。

答：表面强化处理可在机件表面产生有利的残余压应力，同时还能提高机件表面的强度和硬度。这两方面的作用都能提高疲劳强度。

表面强化方法，通常有表面喷丸、滚压、表面淬火及表面化学热处理等。

(1) 表面喷丸及滚压

喷丸是用压缩空气将坚硬的小弹丸高速喷打向机件表面，使机件表面产生局部形变硬化；同时因塑变层周围的弹性约束，又在塑变层内产生残余压应力。

表面滚压和喷丸的作用相似，只是其压应力层深度较大，很适于大工件；而且表面粗糙度低，强化效果更好。

(2) 表面热处理及化学热处理

他们除能使机件获得表硬心韧的综合力学性能外，还可以利用表面组织相变及组织应力、热应力变化，使机件表面层获得高强度和残余压应力，更有效地提高机件疲劳强度和疲劳寿命。

13. 试述金属的硬化与软化现象及产生条件。

金属材料在恒定应变范围循环作用下，随循环周次增加其应力不断增加，即为循环硬化。

金属材料在恒定应变范围循环作用下，随循环周次增加其应力逐渐减小，即为循环软化。

金属材料产生循环硬化与软化取决于材料的初始状态、结构特性以及应变幅和温度等。

循环硬化和软化与 b/s 有关：

$b/s > 1.4$ ，表现为循环硬化；

$b/s < 1.2$ ，表现为循环软化；

$1.2 < b/s < 1.4$ ，材料比较稳定，无明显循环硬化和软化现象。

也可用应变硬化指数 n 来判断循环应变对材料的影响， $n < 1$ 软化， $n > 1$ 硬化。

退火状态的塑性材料往往表现为循环硬化，加工硬化的材料表现为循环软化。

循环硬化和软化与位错的运动有关：

退火软金属中，位错产生交互作用，运动阻力增大而硬化。

冷加工后的金属中，有位错缠结，在循环应力下破坏，阻力变小而软化。

第六章 金属的应力腐蚀和氢脆断裂

一、名词解释

1、应力腐蚀：金属在拉应力和特定的化学介质共同作用下，经过一段时间后所产生的低应力脆断现象。

- 2、氢脆：由于氢和应力共同作用而导致的金属材料产生脆性断裂的现象。
- 3、白点：当钢中含有过量的氢时，随着温度降低氢在钢中的溶解度减小。如果过饱和的氢未能扩散逸出，便聚集在某些缺陷处而形成氢分子。此时，氢的体积发生急剧膨胀，内压力很大足以将金属局部撕裂，而形成微裂纹。
- 4、氢化物致脆：对于 B 或 B 族金属，由于它们与氢有较大的亲和力，极易生成脆性氢化物，是金属脆化，这种现象称氢化物致脆。
- 5、氢致延滞断裂：这种由于氢的作用而产生的延滞断裂现象称为氢致延滞断裂。

二、说明下列力学性能指标的意义

- 1、 scc ：材料不发生应力腐蚀的临界应力。
- 2、 K_{Iscc} ：应力腐蚀临界应力场强度因子。
- 3、 da/dt ：应力腐蚀裂纹扩展速率。

三. 试述金属产生应力腐蚀的条件及机理。

条件：应力，化学介质，金属材料三者共存

机理：1、对应力腐蚀敏感的合金在特定的化学介质中，首先在表面形成一层钝化膜，使金属

不致进一步受到腐蚀，即处于钝化状态。

2、在拉应力作用下，使裂纹尖端地区产生局部塑性变形，滑移台阶在表面露头时钝化膜破裂，显露出新鲜表面。

3、露出的新鲜表面在电解质溶液中成阳极，而其余具有钝化膜的金属表面为阴极，从而形成腐蚀微电池，阳极金属变成正离子进入电解质中而产生阳极溶解，于是在金属表面形成蚀坑。

4、拉应力在蚀坑或原有裂纹尖端形成应力集中，使阳极电位降低，加速阳极金属的溶解，如果裂纹尖端的应力集中始终存在，那么微电池反。

四、应力腐蚀裂纹扩展速率曲线：分析应力腐蚀裂纹扩展速率 da/dt 与 K_I 关系曲线，并与疲劳裂纹扩展速率曲线进行比较。

第一阶段：当 K_I 刚超过 K_{Isc} 时，裂纹经过一段孕育期后突然加速扩展， $da/dt-K_I$ 曲线几乎与纵坐标轴平行。

第二阶段：曲线出现水平阶段， da/dt 与 K_I 几乎无关。

第三阶段：裂纹长度已接近临界尺寸， da/dt 又明显地依赖于 K_I ，随 K_I 增大而急剧增大。 疲劳裂纹扩展速率曲线：

第一阶段：裂纹初始扩展阶段， da/dN 很小，从 K_{th} 开始，随 K 增加 da/dN 快速提高，因 K 变化范围小， da/dN 提高有限。

第二阶段：裂纹扩展主要阶段， da/dN 较大，且 K 变化范围大， da/dN 均匀提高，扩展寿命长。

第三阶段：裂纹扩展最后阶段， da/dN 很大，并随 K 增加而快速增大。

6. 何谓氢致延滞断裂？为什么高强度钢的氢致延滞断裂是在一定的应变速率下和一定的温度范围内出现？

答：高强度钢中固溶一定量的氢，在低于屈服强度的应力持续作用下，经过一段孕育期后，金属内部形成裂纹，发生断裂。 ---- 氢致延滞断裂。

因为氢致延滞断裂的机理主要是氢固溶于金属晶格中，产生晶格膨胀畸变，与刃位错交互作用，氢易迁移到位错拉应力处，形成氢气团。

当应变速率较低而温度较高时，氢气团能跟得上位错运动，但滞后位错一定距离。因此，气团对位错起“钉扎”作用，产生局部硬化。当位错运动受阻，产生位错塞积，氢气团易于在塞积处聚集，产生应力集中，导致微裂纹。

若应变速率过高以及温度低的情况下，氢气团不能跟上位错运动，便不能产生“钉扎”作用，也不可能到位错塞积处聚集，产生应力集中，导致微裂纹。

所以氢致延滞断裂是在一定的应变速率下和一定的温度范围内出现的。

3、为什么高强度钢的氢致延滞断裂是步进式的？

氢原子一般偏聚在裂纹尖端塑性区与弹性区的界面上，当偏聚浓度再次达到临界值时，便使这个区域明显脆化而形成新裂纹，新裂纹与原裂纹的尖端相汇合，裂纹便扩展一段距离，随后又停止，以后是再孕育，再扩展，最后，当裂纹经亚稳扩展达到临界尺寸时，便失稳扩展而断裂，故氢致延滞断裂的扩展方式为步进式。

7. 如何识别氢脆与应力腐蚀？

答：氢脆和应力腐蚀相比，其特点表现在：

- 1、实验室中识别氢脆与应力腐蚀的一种办法是，当施加一小的阳极电流，如使开裂加速，则为应力腐蚀；而当施加一小的阴极电流，使开裂加速者则为氢脆。
- 2、在强度较低的材料中，或者虽为高强度材料但受力不大，存在的残余拉应力也较小这时其断裂源都不在表面，而是在表面以下的某一深度，此处三向拉应力最大，氢浓集在这里造成断裂。
- 3、氢脆断裂的主裂纹没有分枝的情况。这和应力腐蚀的裂纹是截然不同的。
- 4、氢脆断口上一般没有腐蚀产物或者其量极微。
- 5、大多数的氢脆断裂（氢化物的氢脆除外），都表现出对温度和形变速率有强烈的依赖关系。氢脆只在一定的温度范围内出现，出现氢脆的温度区间决定于合金的化学成分和形变速率。

第七章 金属的磨损与耐磨性

1. 名词解释

磨损：机件表面相互接触并产生相对运动，表面逐渐有微小颗粒分离出来形成磨屑，使表面材料逐渐损失、造成表面损伤的现象。

接触疲劳：两接触面做滚动或滚动加滑动摩擦时，在交变接触压应力长期作用下，材料表面因疲劳损伤，导致局部区域产生小片金属剥落而使材料损失的现象。

【P153】

蠕变：在长时间的恒温、恒载荷作用下缓慢地产生塑性变形的现象。

等强温度（TE）：晶粒强度与晶界强度相等的温度。

蠕变极限：在高温长时间载荷作用下不致产生过量塑性变形的抗力指标。该指标与常温下的屈服强度相似。

持久强度极限：在高温长时载荷作用下的断裂强度 --- 持久强度极限。

3. 粘着磨损产生的条件、机理及其防止措施

粘着磨损 ----- 又称为咬合磨损，在滑动摩擦条件下，摩擦副相对滑动速度较小，因缺乏润滑油，摩擦副表面无氧化膜，且单位法向载荷很大，以致接触应力超过实际接触点处屈服强度而产生的一种磨损。

磨损机理：

实际接触点局部应力引起塑性变形，使两接触面的原子产生粘着。粘着点从软的一方被剪断转移到硬的一方金属表面，随后脱落形成磨屑

旧的粘着点剪断后，新的粘着点产生，随后也被剪断、转移。如此重复，形成磨损过程。

一、和常温下力学性能相比，金属材料在高温下的力学行为有哪些特点？

答案：1、首先，材料在高温将发生蠕变现象。材料在高温下不仅强度降低，而且塑性也降

低。应变速率越低，载荷作用时间越长，塑性降低得越显著。

2、高温应力松弛。

3、产生疲劳损伤，使高温疲劳强度下降。

二、提高材料的蠕变抗力有哪些途径？

答案：加入的合金元素阻止刃位错的攀移，以及阻止空位的形成与运动从而阻止其扩散。