

第 1 篇 机械工程材料

第 1 章 金属材料的性能

【教学目标】

1. 知识目标

- ◆ 熟悉并掌握金属材料的常用力学性能。
- ◆ 了解金属材料的物理、化学及工艺性能。
- ◆ 掌握常用硬度的测试方法和适用范围。
- ◆ 掌握冲击韧性、疲劳强度的概念及二者衡量指标。

2. 能力目标

- ◆ 能够根据强度和塑性值分析材料的承载能力。
- ◆ 能够根据材料和热处理状态选择硬度测试方法。

3. 素质目标

- ◆ 通过对金属材料性能的学习,培养学生分析问题、解决问题的能力。
- ◆ 锻炼学生的观察能力、动手能力。
- ◆ 引入中国大飞机制造案例,培育学生爱国主义精神和社会主义核心价值观。



引例

这是一次载入史册的飞行。

2023 年 5 月 28 日 12 点 31 分,东方航空使用中国商飞全球首架交付的国产大飞机 C919 大型客机执行 MU9191 航班,平稳降落在北京首都国际机场,穿过象征民航最高礼仪的“水门”,引起现场热烈欢呼,如图 1-1 所示。



图 1-1 C919 大型客机穿过“水门”

国产大飞机 C919 是我国首次按照国际通行适航标准自行研制、具有自主知识产权的

喷气式干线客机。机上近 130 名旅客共同见证了 C919 圆满完成的首个商业航班飞行,标志着该机型正式进入民航市场,开启市场化运营、产业化发展的新征程。

通过 C919 的设计研制,我国掌握了民机产业五大类、20 个专业、6000 多项民用飞机技术,带动新技术、新材料、新工艺群体性突破。与此同时,数字技术、智能装备的应用也为国产商用飞机的设计研制和试飞试验赋能。

材料在常温、静载作用下的宏观力学性能是确定各种工程设计参数的主要依据。这些力学性能均须用标准试样在材料试验机上按照规定的试验方法和程序测定,并可同时测定材料的应力-应变曲线。随着工业的迅速发展,如何有效地利用有限资源成为当今材料界关注的重点。在设计构件时,充分利用材料的力学性能不但能够保证安全使用,还能提高资源的利用效率。

1.1 金属材料的力学性能

金属材料的性能包括使用性能和工艺性能。使用性能是指材料在使用过程中表现出来的性能,它包括力学性能、物理性能和化学性能等;工艺性能是指材料对各种加工工艺适应的能力,它包括铸造性能、锻造性能、焊接性能、切削加工性能和热处理性能等。本节主要介绍金属材料的力学性能。

金属的力学性能是指材料在各种载荷(静载荷、冲击载荷、疲劳载荷等)作用下表现出来的抵抗变形和破坏的能力。常用的力学性能指标有强度、塑性、硬度、冲击韧度和疲劳强度等。

1.1.1 强度

金属材料在载荷作用下所表现出来的抵抗变形或断裂的能力称为强度。强度指标一般可通过金属拉伸试验来测定,而静载荷拉伸试验是工业上最常用的试验方法之一。按《金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验法》(GB/T 228.1—2021)规定,把标准试样装夹在试验机上,在对试样逐渐施加拉伸载荷的同时连续测量力和相应的伸长量,直至把试样拉断为止,依据测出的拉伸曲线,求出相关的力学性能。标准拉伸试样如图 1-2 所示。

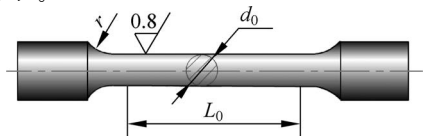


图 1-2 标准拉伸试样

1. 拉伸曲线

材料的性质不同,拉伸曲线的形状也不相同。图 1-3 所示为退火低碳钢的拉伸曲线,图中纵坐标表示力 F ,单位为 N;横坐标表示绝对伸长 ΔL ,单位为 mm。以退火低钢拉伸曲线为例说明

拉伸过程中几个变形阶段。

1) OE——弹性变形阶段

试样的伸长量与载荷成正比增加,此时若卸载,试样能完全恢复原状。 F_e 为能恢复原状最大拉力。

2) ES——屈服阶段

当载荷超过 F_e 时,试样除产生弹性变形外,开始出现塑性变形,此时若卸载,试样的伸长只能部分恢复。当载荷增加到 F_s 时,图形上出现平台,即载荷不增加,试样继续伸长,材料丧失了抵抗变形的能力,这种现象叫屈服。

3) SB——均匀塑性变形阶段

载荷超过 F_s 后,试样开始产生明显塑性变形,伸长量随载荷增加而增大。 F_b 为试样拉伸试验的最大载荷。

4) BK——缩颈阶段

载荷达到最大值 F_b 后,试样局部截面开始急剧缩小,出现“缩颈”现象,由于截面积减小,试样变形所需载荷也随之降低,K 点时试样发生断裂。

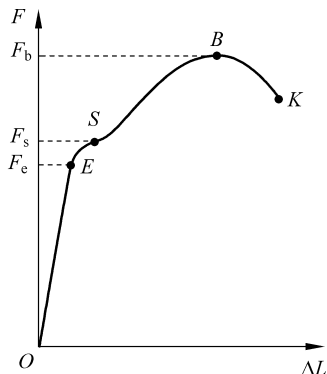


图 1-3 低碳钢的拉伸曲线

2. 强度指标

金属材料的强度是用应力来衡量的,即单位截面积上的内力称为应力,用 σ 表示。常用的强度指标有屈服点和抗拉强度。

(1) 屈服点 σ_s 为材料产生屈服时的最小应力,单位为 MPa。

$$\sigma_s = \frac{F_s}{S_0} \quad (1-1)$$

式中, F_s 为屈服时的最小载荷(N); S_0 为试样原始截面积(mm^2)。

对于无明显屈服现象的金属材料(如铸铁、高碳钢等)测定 σ_s 很困难,通常规定产生 0.2% 塑性变形时的应力作为条件屈服点,用 $\sigma_{0.2}$ 表示。

屈服点表征金属发生明显塑性变形的应力,因此它是机械设计的主要依据。

(2) 抗拉强度 σ_b 为材料在拉断前所承受的最大应力。

$$\sigma_b = \frac{F_b}{S_0} \quad (1-2)$$

式中, F_b 为试样断裂前所承受的最大载荷(N); S_0 为试样断裂处截面积。

抗拉强度表示材料抵抗均匀塑性变形的最大能力,是设计机械零件和选材的主要依据。



阅读材料

纽约世界贸易中心大楼位于曼哈顿闹市区南端,是美国纽约市最高、楼层最多的摩天大楼。它由日本的建筑师山崎实设计,于 1966 年开工,历时 7 年,1973 年竣工后,以 411m 的高度,作为 110 层的摩天“巨人”而载入史册。它是由 5 幢建筑物组成的综合体。其主楼呈双塔形,塔柱边宽 63.5m。大楼采用钢结构,用钢 $7.8 \times 10^4 \text{t}$,楼的外围有密置的钢柱,墙面由铝板和玻璃窗组成,素有“世界之窗”之称。

美国东部时间 2001 年 9 月 11 日上午 8 时 45 分,一架起飞质量达 160t 的波音 767 型飞机直接撞击纽约世界贸易中心北塔,18min 后,又一架起飞质量为 100t 的波音 757 型飞机几乎拦腰撞击世界贸易中心南塔。

在高达 1000°C 的烈焰煎熬下,撞击后的 1.5h 内,两幢塔楼最终还是坍塌了,如图 1-4 所示。随后,关于大楼坍塌的原因有了很多种说法,但较一致的观点是世贸中心大楼的双塔并不是由于撞击,而是由于喷气燃料的剧烈燃烧而坍塌的。撞击发生后,在撞击过程中没有立即燃尽的喷气燃料向下流去,由于碰撞,在几分钟之内又燃烧起来。钢结构表面的保护层绝缘面板随之脱落。双塔的钢结构因此完全暴露于大火之中,当时大火温度已接近于钢的软化点。据宾夕法尼亚州立大学的秦德·库朗萨玛(QDe Kuransama)教授推测,燃烧的喷气燃料的温度高达 $1000\sim 3000^{\circ}\text{F}$ ($538\sim 1649^{\circ}\text{C}$)。而钢在 1000°F 下就会失去将近一半的强度而弯曲变形,在 1400°F 下只能剩下 $10\%\sim 20\%$ 的强度。燃烧的高温使钢柱软化,而被撞击层以上的楼层在重力作用下,以雷霆万钧之势,造成了世界贸易中心遇袭后的必然结果——坍塌。

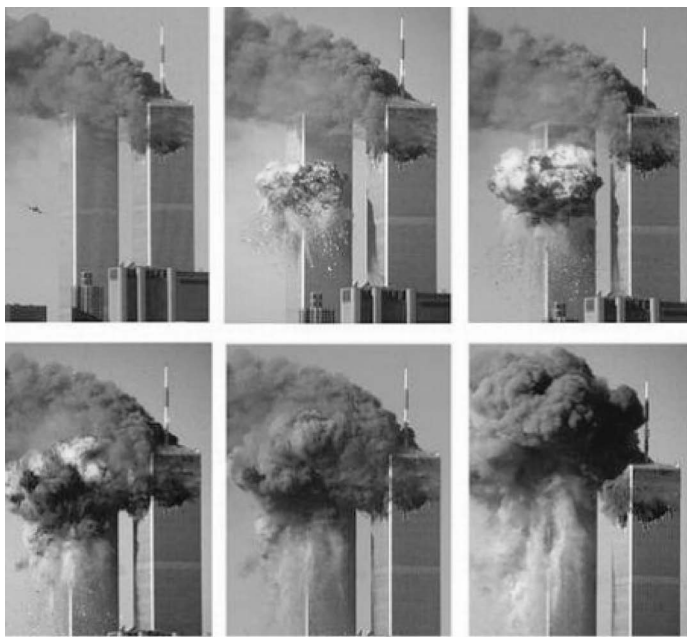


图 1-4 纽约世界世贸中心大楼被撞击瞬间及坍塌过程

“9·11”恐怖袭击发生后,美国联邦紧急事务管理局和美国民用工程师协会曾联合发表了一份调查报告。报告认为,大楼的最终倒塌是飞机冲撞和随后引发大火共同作用。“喷气燃料燃烧放出的热量似乎并不能使大楼崩塌,但是,随着燃烧的喷气燃料向双塔各层的扩散,引着了众多的楼内物品,同时发生了多起火灾。这场大火放出的热量可以和大规模商业发电所发出的电力相匹敌。高温使已经破损的钢结构框架产生更大应力的同时软化了钢结构框架。这个附加的载荷及其产生的危害足以使双塔崩塌。”

1.1.2 塑性

金属材料在载荷作用下产生塑性变形而不断裂的能力称为塑性,塑性指标也是通过拉伸试验测定的。常用的指标有断后伸长率和断面收缩率。

1) 断后伸长率 δ

$$\delta = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \times 100\% \quad (1-3)$$

式中, L_0 、 L_1 分别为试样原始标距和被拉断后的标距(mm)。

2) 断面收缩率 ϕ

$$\phi = \frac{S_0 - S_1}{S_0} \times 100\% \quad (1-4)$$

式中, S_0 、 S_1 分别为试样原始截面积和断裂后缩颈处的最小截面积(mm^2)。

δ 、 ϕ 数值越大, 表明材料的塑性越好。



阅读材料

利用塑性变形不仅可以把材料加工成各种形状和尺寸的制品(图 1-5 所示为冲压成型的车门, 图 1-6 所示为冲压焊接成型的车身), 还可以改变材料的组织和性能。如广泛应用的各类钢材, 根据断面形状的不同, 一般分为型材、板材、管材和金属制品四大类。通过压力加工, 使钢坯、锭等产生塑性变形。



图 1-5 冲压成型的车门



图 1-6 冲压焊接成型的车身

1.1.3 硬度

硬度是表征材料表面局部体积内在其他物体压入时抵抗变形的能力。金属材料主要用压入法进行硬度试验, 而其中应用最为广泛的是布氏硬度试验法和洛氏硬度试验法。

1. 布氏硬度试验法

1) 试验原理

图 1-7 所示为布氏硬度试验原理图。它是用一定直径的淬火钢球或硬质合金钢球做压头, 以相应试验力压入被测材料表面, 经《金属材料 布氏硬度试验 第 2 部分: 硬度计的检验与校准》(GB/T 231.2—2022) 所规定的保持时间后卸载。以压痕单位面积上所受试验力的大小来确定被测材料的硬度值, 用符号 HB 表示。

$$\text{HB} = \frac{F}{S_{\text{压}}} = \frac{0.102 \times 2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (1-5)$$

式中, F 为试验力(N); $S_{\text{压}}$ 为压痕表面积(mm^2); D 为球体直径(mm); d 为压痕平均直径(mm)。

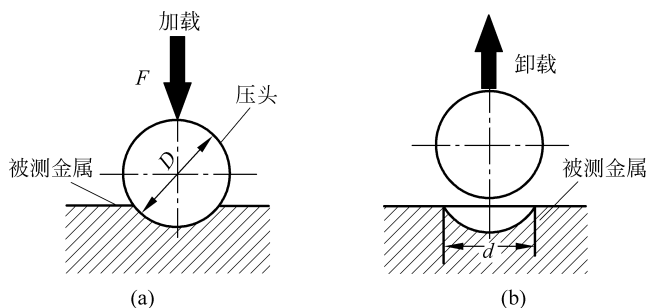


图 1-7 布氏硬度试验原理图

2) 表示方法

当表示布氏硬度值时,应同时标出压头类型。当试验压头为淬火钢球时,硬度符号为 HBS;当试验压头为硬质合金钢球时,硬度符号为 HBW。HBS 或 HBW 之前数字为硬度值,例如 120HBS、450HBW。

3) 应用范围

HBS 适用于测量布氏硬度值小于 450 的材料,HBW 适用于测量硬度值小于 650 的材料。因试样压痕大,不适宜检验薄件或成品。

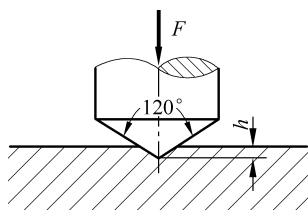


图 1-8 洛氏硬度试验原理图

2. 洛氏硬度试验法

1) 试验原理

图 1-8 所示为洛氏硬度试验原理图。洛氏硬度是用顶角为 120° 的金刚石圆锥体或直径为 1.588mm 的淬火钢球作为压头,试验时先施加初始载荷,目的是使压头与试样表面接触良好,保证测量结果准确。然后施加载荷,保持《金属材料 洛氏硬度试验 第 1 部分:试验方法》(GB/T 230.1—2018)所规定的时间后卸除主载荷,依据压痕深度确定硬度值。

金属越硬,压痕深度越小。为适应人们习惯上数值越大硬度越高的观念,故人为规定一常数 K 减去压痕深度 h 的值作为洛氏硬度指标,并规定每 0.002mm 为一个洛氏硬度单位,用 HR 表示,测洛氏硬度值为

$$HB = \frac{K - h}{0.002} \quad (1-6)$$

由此可见,洛氏硬度值是一个无量纲的材料性能指标。当使用金刚石压头时,常数 K 为 0.2,使用钢球压头时,常数 K 为 0.26。实际测量时,可直接从洛氏硬度计表盘上读出硬度值。

2) 表示方法

洛氏硬度计采用 A、B、C 三种标尺对不同硬度材料进行试验,硬度分别用 HRA、HRB、HRC 表示,硬度值标在符号前,如 45HRC。

3) 特点

洛氏硬度计操作简单(直接读出硬度值);测量范围大(软硬均可);压痕小,可直接测量薄件或成品。但由于压痕小,硬度波动大,因此,为提高精度,通常测定三个不同点取平均值。

1.1.4 冲击韧度

许多机械零件是在冲击载荷下工作的。冲击载荷比静载荷的破坏能力大,承受冲击

载荷的材料必须具备足够的冲击韧度。所谓冲击韧度,是指材料在冲击载荷作用下抵抗破坏的能力,通常用一次摆锤冲击试验来测定。

冲击试验原理如图 1-9 所示。将标准试样安放在摆锤试验机的支座上,试样缺口背向摆锤(见图 1-9(a))。将具有一定重力的摆锤举至一定高度 H ,使其获得一定势能 GH ,然后由此高度落下将试样冲断,试样断裂后摆锤上摆到 h 高度(见图 1-9(b)),在忽略摩擦和阻尼等条件下,摆锤冲断试样所做的功,称为冲击吸收功,以 A_k 表示,则有

$$A_k = G(H - h) \quad (1-7)$$

用试样的断口处截面积 S_0 除冲击吸收功即得到冲击韧度,即

$$\alpha_k = \frac{A_k}{S_0} \quad (1-8)$$

需要说明一点,使用不同类型的标准试样(U 型或 V 型缺口)进行试验时,冲击韧度分别以 α_{ku} 或 α_{kv} 表示。

α_k 值越大,材料的韧性越好,受到冲击时越不易断裂。

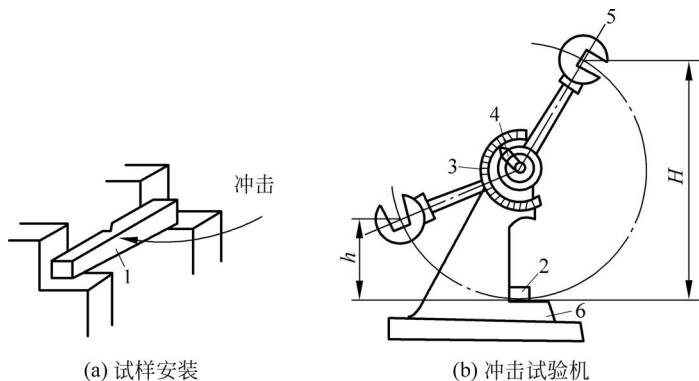


图 1-9 冲击试验原理图

1—试样; 2—打击中心; 3—转刻盘; 4—指针; 5—摆锤; 6—工作台



阅读材料

2003 年 2 月 1 日,“哥伦比亚”号航天飞机在完成 16 天的太空研究任务后,在返回大气层时突然发生解体,机上 7 名宇航员全部遇难。调查组对飞机残骸进行了原位重组、冶金分析以及模拟试验。分析结果表明:左机翼隔热瓦上的裂缝是“哥伦比亚”号航天飞机解体的主要原因。在其返回大气层过程中,高温热离子流使机翼铝合金、铁基合金、镍基合金结构熔化,导致航天飞机失控、机翼破坏和机体解体。图 1-10 所示为航天飞机发生解体后残骸的散落位置。

在发射“哥伦比亚”号时,已发现一块泡沫从外燃料箱上脱落,撞上了航天飞机。美国国家航空航天局的工程师们很担心泡沫撞击会造成影响,曾请求主管领导为在轨道上运行的航天飞机拍摄卫星照片,以查看机翼受损情况,但却遭到主管领导的拒绝。若延误航天飞机飞往国际空间站执行任务的时间,按照美国国会颁布的法令,就会削减预算,终止这项计划,在进度和经费的压力下,主管领导做出了错误的决定。而正是

从外燃料箱左侧双脚架掉下的这一块冷冻的隔热泡沫砸到左翼复合材料面板下半部附近,造成了裂缝。主管领导的错误决策造成了本可避免的悲剧。



图 1-10 “哥伦比亚”号航天飞机发生解体后残骸的散落位置

1.1.5 疲劳强度

1. 疲劳概念

许多机械零件(例如轴、齿轮、轴承等)在工作时承受的是交变载荷。在这种载荷作用下,虽然零件所受应力远低于材料的屈服点,但在长期使用中往往会突然发生断裂,这种破坏过程称为疲劳断裂。

2. 疲劳强度

工程上规定,材料经无数次重复交变载荷作用而不发生断裂的最大应力称为疲劳强度。图 1-11 所示是通过试验测定的材料交变应力 σ 和断裂前应力循环次数 N 之间的关系曲线。曲线表明材料所受交变应力越大,则断裂时应力循环次数 N 越少;反之,则 N 越大。当应力低于一定值时,试样经无限次循环也不破坏,此应力值称为材料的疲劳强度,用 σ_r 表示;对称循环 $r=-1$,疲劳极限用 σ_{-1} 表示。

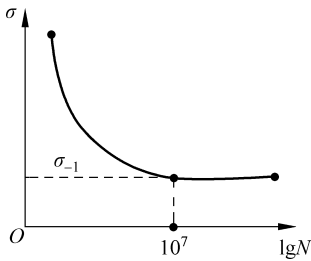


图 1-11 疲劳曲线