

高等学校教材

高压技术基础（一）

高压装置材料与选择

李保成 赵纪兰 编著

兵器工业出版社

前 言

现代工程材料的飞速发展,为工程技术人员选择最佳材料提供了广阔的天地,同时也要求工程技术人员有更加全面和深入的关于材料制造、使用和加工的知识。

本书是《高压技术基础》丛书之一,其内容主要针对高压装置,同时也照顾到相近的机械制造行业。书中既注重材料科学的基础理论,又注意最新的科技成果;既强调理论的系统性,又回避了一些深奥难懂的概念。使学过《工程材料》(或《金属材料及热处理》)的工程技术人员就能够理解和应用,对于从事工程材料研究和加工的工程技术人员则有开拓视野的作用。

书中序论不仅叙述了高压装置用材料的特点,同时还介绍了国内外流行的几种选材方法。第一章以金属材料机械性能为主线,着重介绍各种性能指标,尤其是在高温、高压、高速、腐蚀和辐射条件下的指标的物理意义、工程价值,这是评价和选择材料最重要的依据。同时对金属的强度理论、断裂机理进行了论述,这是工程技术人员选用设计指标和失效分析判据的理论基础。第二章着重介绍高压装置制造的工艺性能,同样是选择材料的重要依据。第三章至第七章分别对钢铁材料、非铁金属材料、高分子材料、陶瓷材料和复合材料加以论述。非金属材料部分既注意它们各自的特征,同时也注重在使用、试验以及性能指标选用等方面与金属材料的对比。为适应改革开放的要求,搜集了许多国外资料,并尽可能地与国内资料加以对比。同时还对正在发展的与高技术相联系的工程材料和发展趋势作了介绍,为研究人员开发新产品提供参考。

由于编者学识浅薄,错误之处实在难免,希望有关专家、学者和广大读者批评指正。

编者 1989年

出 版 说 明

遵照国务院关于高等学校教材工作的分工，原兵器工业部教材编审室自成立之日起就担负起兵工类专业教材建设这项十分艰巨而光荣的任务。由于各兵工院校、特别是参与编审工作的广大教师积极支持和努力，及国防工业出版社、兵器工业出版社和北京理工大学出版社的紧密配合，自1985年到1988年共编审出版了89种教材。

为了使兵工类专业教材更好地适应社会主义现代化建设培养人才的需要，反映兵工科学技术的先进水平，达到打好基础、精选内容、逐步更新、利于提高教学质量的要求，在总结第一轮教材编审出版工作的基础上，制订了兵工教材编审工作的五个文件。指导思想是：以提高教材质量为主线，完善编审制度，建立质量标准，明确岗位责任，充分发挥各专业教学指导委员会的学术和咨询作用，加强从教材列选、编写到审查整个教材编审过程的科学管理。

1985年根据教学需要，我们组织制订了“七五”教材编写规划，共列入教材176种。这批教材主要是从经过两遍教学使用、反映较好的讲义中遴选出来的，较好地反映了当前兵工教材的科学性和适合我国情况的先进性，并不同程度的更新了教材内容，是一批较好的新型教材。

本教材由潘德恒主审，张守中复审，经机械电子工业部兵工教材编审室审定。

限于水平和经验，这批教材的编审出版难免有错误之处，希望广大读者批评指正。

机械电子工业部兵工教材编审室

1989年8月

目 录

绪论	(1)
一、高压装置对材料的要求	(1)
二、高压装置用材的特征	(1)
三、关于高压装置的选材程序	(1)
四、几种选择材料的方法	(2)
第一章 金属材料的机械性能	(4)
1.1 金属材料的弹性性能	(4)
一、弹性变形	(4)
二、影响弹性的因素	(8)
1.2 金属材料的屈服与塑性变形	(11)
一、屈服现象和屈服强度	(11)
二、金属材料的塑性指标	(13)
三、形变强化	(14)
四、高压下金属材料的性能	(16)
1.3 金属材料的断裂	(17)
一、断裂形式和断口形貌	(17)
二、脆性断裂和韧性断裂	(18)
三、断裂韧性	(21)
四、疲劳断裂	(24)
五、冲击断裂和冲击试验	(30)
1.4 环境对金属材料性能的影响	(35)
一、高温性能	(35)
二、低温性能	(38)
三、应力腐蚀	(45)
四、氢脆	(52)
五、辐射对金属材料性能的影响	(54)
参考文献	(59)
第二章 金属材料的工艺性能	(60)
2.1 金属材料的焊接性能	(60)
一、金属可焊性对焊接质量的影响	(60)
二、金属材料可焊性试验	(67)
2.2 金属的压力加工性能	(69)
一、金属的塑性变形能力	(69)

二、可旋压性	(73)
三、金属的超塑性	(75)
四、形变热处理	(79)
2.3 热处理工艺性能	(82)
一、钢的淬透性	(82)
二、贝因体钢	(85)
三、非调质钢	(87)
参考文献	(92)
第三章 钢铁材料	(93)
3.1 结构钢	(93)
一、结构钢概述	(93)
二、低合金高强度钢 (HSLA)	(107)
三、超高强度钢	(117)
3.2 不锈钢耐酸钢	(121)
一、常见的腐蚀破坏类型	(121)
二、不锈钢耐酸钢的分类	(123)
三、耐应力腐蚀不锈钢和合金	(133)
3.3 耐热钢	(140)
一、铁素体抗氧化钢	(140)
二、马氏体耐热钢	(140)
三、奥氏体耐热钢	(145)
四、气阀钢	(145)
五、低合金耐热钢	(146)
3.4 耐候钢和低温用钢	(150)
一、耐候钢	(150)
二、低温用钢	(151)
参考文献	(155)
第四章 其它金属材料	(156)
4.1 铝合金	(156)
一、概述	(156)
二、耐热铝合金	(166)
三、低温用铝合金	(168)
四、Al-Li 合金	(168)
4.2 钛合金	(171)
一、概述	(171)
二、钛合金的热处理	(176)
三、低温用钛合金	(178)
4.3 镍基高温合金	(179)
一、镍基合金概述	(179)

二、常见镍基合金	(179)
4.4、铜合金	(183)
一、概述	(183)
二、黄铜	(188)
三、青铜	(188)
四、白铜	(188)
参考文献	(189)
第五章 高分子材料	(190)
5.1 高分子材料的结构和基本特征	(190)
一、概述	(190)
二、高分子材料的基本结构和形态	(190)
5.2 高分子材料的强度与断裂	(200)
一、一般力学特性	(200)
二、高分子材料的断裂	(202)
三、关于高分子材料的力学试验	(207)
5.3 高分子材料的环境强度和老化问题	(208)
一、环境应力开裂	(208)
二、高分子材料的抗化学药品性能	(208)
三、高分子材料的老化问题	(209)
四、耐热塑料	(211)
参考文献	(213)
第六章 陶瓷材料	(214)
6.1 陶瓷材料的结构和性能	(214)
一、一般概念	(214)
二、陶瓷材料的结构和聚集态	(216)
6.2 结构陶瓷的韧性和韧化	(221)
一、 ZrO_2 的增韧	(222)
二、 SiC 、 Si_3N_4 的增韧	(223)
三、关于结构陶瓷材料设计的概念	(224)
6.3 金属间化合物	(226)
一、概述	(226)
二、金属间化合物开发研究的现状	(227)
参考文献	(228)
第七章 复合材料	(229)
7.1 复合材料基础	(229)
一、复合材料的一般特性	(229)
二、复合材料的力学特性	(231)
三、复合理论简介	(234)
7.2 增强材料	(235)

一、概述	(235)
二、有机增强纤维	(235)
三、碳纤维	(238)
四、硼纤维	(244)
五、玻璃纤维	(244)
7.3 工程复合材料	(246)
一、高分子工程复合材料	(246)
二、金属基复合材料	(249)
三、碳/碳复合材料	(252)
四、其它复合材料	(253)
参考文献	(255)

绪 论

随着科学技术的飞速发展,超高压技术也在不断发展,如今用静压方式可以获得 $10^{10}\sim 10^{12}$ Pa的压力。为了承受这么高的压力,对制造高压装置的材料必然要提出很高的要求。

一、高压装置对材料的要求

1. 强度韧性要求高 高压装置一旦遭到破坏,不仅仅只是停止工作,更主要的是会造成不可弥补的巨大损失,如爆炸、环境污染等,因而要求所用材料不仅强度高,还必须韧性好。

2. 环境适应性强 现代高压装置多工作在高温(1000°C 以上)、低温(-250°C 以下)状态,以及腐蚀性介质、辐射、热冲击等条件下。大多数材料的强韧性对环境都很敏感,因而研制适应各种环境的材料是现代高压装置的要求。

3. 化学稳定性好 相当多的高压装置是盛装化学物质或进行化学反应的装置,必须化学稳定性好,才能维持正常工作。

4. 需要一定的特殊功能 根据现代高压装置特殊工作条件的要求,材料相应需具有一定的功能。如航天航空所用材料,除要求比强度高外,还要求绝热、消振等功能;适当的线胀系数、抗静电能力和特殊的电磁性都是许多高压装置所要求的。

5. 先进的工艺性和经济性 为适应高压装置既有大量生产,又有单件生产特殊构件的特点,工艺性能不仅保证产品的性能,还要考虑经济性。

二、高压装置用材的特征

1. 高压装置用材与最新材料科学发展相联系 金属材料中的马氏体时效钢、新型钛合金、新型高温合金等以及和高技术紧密联系的无机非金属材料 and 复合材料,都已在高压装置中得到应用。

2. 高压装置用材与其它行业材料的发展相联系 如HY系列钢既是高性能船体材料,又是优良的压力容器材料;4340系列钢既是火炮用钢,又是高压气舱用钢等。

3. 高压装置用材与先进的制造工艺相联系 高压装置所用材料,尤其是钢铁材料的冶炼和制造都采用比较先进的工艺,大多数有其独特的控制标准和检测方法。

4. 高压装置用材品种繁多 高压装置所用材料除结构材料外,还有填充材料、密封材料、弹性材料、耐磨材料、功能材料等,材料品种繁多。

三、关于高压装置的选材程序

1. 依据产品技术条件,对材料要求进行分类 根据技术要求和设计理论选择适应某种性能要求的材料,并确定主次,是选材程序的第一步。比如,某项技术要求是以结构为主,还是以功能为主,在选材时一定要加以分析,并首先满足这些技术要求,而后再依据重要性的次序考虑其它要求。对于新出现的性能指标,一定要根据条件定出它的地位,以供选材时考虑。

2. 对可供选择的对象进行筛选和评价 对可供选择的材料进行筛选的原则是:来源、成本和可靠性。来源和成本相关,但不完全一致,且成本还应包括加工成本在内;一般来说非标准新材料可靠性比较低,因此按一定的方法评价出材料的可靠性是很必要的。

3. 选材资料 就我国来说,选择材料的资料主要来源是国家标准(GB),而且大多数设计手册中都有常用资料。但这些资料对于型号相同,厂家不同的某一材料,在性能上的差

别往往反映不出来。针对这些问题,国内陆续研制出一系列的材料数据软件,供设计人员选择,国外也有资料可供参考(参见表0-1)。当然参照同类产品进行选材,也是常见的选材方法。

4.选材组织 材料的选择和加工贯穿于产品设计、发展、制造和操作的全过程,涉及到包括产品设计、工艺、工装、供应和质量监督等方面。因此研究大型复杂产品,必须组织由上述部门组成的专门机构,负责和协调材料选择的有关问题。

5.代用材料 在选择代用材料前,首先要确定其相近指标,一经确定就不能任意改变,并且在设计过程中不能忽视化学、电气和生物等特殊功能。须知没有恰当的配合,就不能保证整个机构的安全。

四、几种选择材料的方法

在选材过程中,为了得到最好的材料,必须对多种性能的材料进行全面对比,采用系统的选择程序。这里介绍几种方法。

1.单位性质成本法 它是以单位性能指标成本为基本出发点进行选材的方法。以单位拉伸强度为例,同时采用密度和价格两个因子,购买1MPa强度的成本 C

$$C = \frac{M \times \rho}{\sigma_s}$$

式中 M 为单位质量的价格; ρ 为材料的密度; σ_s 为拉伸强度。同理,弹性模量、疲劳极限、蠕变强度、韧性指标等,都可以有相似的公式。

以下标 i 表示候选材料,下标 B 表示基准材料,则候选材料的相对成本

$$RC = \frac{M_i}{M_B} \cdot \frac{\rho_i}{\rho_B} \cdot \frac{\sigma_{B_s}}{\sigma_{i_s}}$$

当 $RC < 1$ 时,候选材料比基准材料便宜。这里 M 是否包括制造成本要根据二材料加工成本差别的大小来确定,差别大则应包括在内。

2.加权性质法 上述方法的缺点在于只注意了主要性质,却忽视了其它性质,因而出现了加权性质法。简单的方式是将使用的性质根据重要程度乘加权因子 α ,然后将其相加得到材料性能指数 N , N 最高则被认为是最好的材料。但 N 是一个把不同量纲的数组合起来的数,往往无理可讲。对于给定候选材料的某个性质,如果引入一个性质定标,各种性能无量纲因子 β 表示,有

$$\beta = \frac{\text{性能的数值} \times 100}{\text{一组材料中最高性能数值}}$$

$$N = \sum \alpha_i \beta_i$$

也有许多性质是无法用数值表示的,如耐磨性、可焊性等,必须用经验确定其定标值。

一种材料的优良指数 G_0 可定义为

$$G_0 = \frac{N}{M \times \rho}$$

式中 M 为零件总成本。同理也可以引入相对优良指数 RG_0 。

$$RG_0 = \frac{G_{0i}}{G_{0B}}$$

如果 $RG_0 > 1$ ，则比基准材料好； $RG_0 < 1$ ，则是应被淘汰的材料。

3. 性质极限法 被评价材料的性质可分成三个类型：下限性质、上限性质和预期目标值。例如，如果需要具有一定强度的轻质材料，那么强度应为下限性质，密度应为上限性质。设计过程中希望具有某种特殊性能的材料时，应把这种性能规定为预期目标值，比如在一定强度下的线胀系数就可定为预期目标值。材料的同一性能在某种场合为上限性质，而在另一种场合则有可能为下限性质。

对于每种材料的性质都可用数字逻辑法定出其加权因子 α 。设 $Y_{L1}, Y_{L2}, Y_{L3}, \dots$ 为下限性质， $Y_{u1}, Y_{u2}, Y_{u3}, \dots$ 为上限性质， $Y_{t1}, Y_{t2}, Y_{t3}, \dots$ 为预期目标值，候选材料则以 $X_{L1}, X_{L2}, X_{L3}, \dots$ ， $X_{u1}, X_{u2}, X_{u3}, \dots$ 和 $X_{t1}, X_{t2}, X_{t3}, \dots$ 并加以种类注脚表示。对于下限性质，若 $Y_L/X_L \leq 1$ ，则此材料可以接受；对于上限性质，若 $X_u/Y_u \leq 1$ ，则此材料也可以接受；对于预期目标值 $| (X_t/Y_t) - 1 |$ 必须在规定范围内才可接受。候选材料中如有一项不符合则要被淘汰。通过初步筛选的材料，再按优值参数 δ 进行分级。 δ 定义如下

$$\delta = \sum_{i=1}^{N_L} \alpha_{Li} \cdot \frac{Y_{Li}}{X_{Li}} + \sum_{i=1}^{N_u} \alpha_{ui} \cdot \frac{X_{ui}}{Y_{ui}} + \sum_{i=1}^{N_t} \alpha_{ti} \left| \frac{X_{ti}}{Y_{ti}} - 1 \right|$$

式中 N_L 、 N_u 、 N_t 分别代表下限性质、上限性质和预期目标值的数目。 δ 越低，材料越好。

诸如此类的方法还有一些，各有优缺点，设计者要根据条件确定使用方法或加以修正，这里不一一叙述，可参阅有关资料。

近20年来，材料科学的发展无疑会给设计思想、生产组织、使用维护带来极其深刻的影响，并改变以往形成的既定关系。例如传统上一直把结构设计和材料选择分属两个系统，而现在却需要互相结合起来；过去一直把宏观工程和微观结构分别予以考虑，但很多工程问题（如疲劳和断裂）和材料选择（各向异性材料）却有赖于宏观和微观的结合。本书将为这些结合提供一些知识和资料。

表0-1 国外常用选材资料

序号	资料名称	出版单位	说 明
1	Materials Selector	Issue of Materials Engineering USA	月刊，每年一辑，普通工程材料为主
2	Data Book	Issue of Metals Progress ASM	月刊，每年一辑，有加工工程和制造方法
3	The Metals Handbook Vol 1	ASM	金属材料及其选择
4	ASTM Information Retrieval Service	ASTM	免费刊物
5	ASTM Standards	ASTM	有关材料性质和试验方法的权威性刊物
6	ASTM Computerised Data Base	ASM	从1986年以来的金属资料
7	Alloy Index in Metals Abstracts	Metals Society UK	特殊合金

第一章 金属材料的机械性能

金属材料的机械性能指标是设计机械产品最重要的依据之一，同时，也是评价金属材料最重要的依据。随着科学技术的发展，金属材料机械性能指标的分类方式越来越多。如按加载方式分类有静载、疲劳、冲击、磨损等；按使用条件分类有高温、低温、氢脆、应力腐蚀等。为了适应高压装置设计和制造的要求，本书有针对性地选择一些内容，如用弹性力学原理设计时使用的强度指标，即“ σ ”系列和弹性；用于安全度评定的韧性指标，即冲击韧性、断裂韧性等；用于容限设计的指标，即 dI/dN ， dI/dt 等；同时也兼顾系统性和相关性。

金属材料机械性能指标仅是在一定条件下金属材料的力学行为，而实际使用过程是一个十分复杂的物理化学过程。因而只有对金属材料的力学行为有一个比较系统的认识，才能正确理解机械性能指标的意义和使用条件。

1.1 金属材料的弹性性能

金属材料的力学行为包括弹性变形、塑性变形和断裂。对于每一种正常使用的机械装置，希望只有一种行为——弹性变形。

一、弹性变形

金属的弹性变形是一种可逆变形，其变形量一般不超过0.5~1%。任何装置，尤其是高压装置在工作状态下总是处于弹性变形状态。

1. 弹性变形的规律 弹性变形的规律一般遵循虎克(R. Hooke)定律，即

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (1-1-1)$$

式中 ϵ ——应变；

σ ——应力，MPa；

E ——弹性模量，MPa。

在复杂的应力状态下，则遵循广义虎克定律

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{1}{E} [\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)] \\ \epsilon_y &= \frac{1}{E} [\sigma_y - \mu(\sigma_x + \sigma_z)] \\ \epsilon_z &= \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y)] \\ \gamma_{xy} &= \tau_{xy}/G \\ \gamma_{yz} &= \tau_{yz}/G \\ \gamma_{zx} &= \tau_{zx}/G \end{aligned} \right\} (1-1-2)$$

式中 $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ —— x, y, z 方向上的正应变;
 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ —— x, y, z 方向上的正应力;
 $\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$ —— x, y, z 方向和 zox, xoy, yoz 面内的剪应变;
 $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ —— x, y, z 方向和 xoz, xoy, yoz 面内的剪应力;
 G ——剪切弹性模量;
 μ ——泊松系数。

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} \quad (1-1-3)$$

上式中除了力学变量之外,反映材料性质的参量有 E (也称作正弹性模量)、 G 和 μ ,实际上三个中只有两个是独立的。常常使用的还有体积弹性模量 K ,它表示物体在三向压缩的条件下,压力 p 与体积变化率 $\Delta V/V$ 之间线性比例的关系。在压力 p 作用下,任一方向上的应变 $\varepsilon = p/E(2\mu-1)$,其体积的相对变化则为 3ε ,代入 $K = \frac{E}{3(1-2\mu)}$,即有

$$\Delta V/V = -Kp \quad (1-1-4)$$

显然,在弹性力学中使用的材料常数,真正能反映材料弹性性质的独立参数只有 E 和 G 。

2.弹性模量的技术意义 任何一种装置的零部件在工作过程中都处于弹性变形状态,而有时常要求某些零部件在一定载荷下只能产生一定量的弹性变形,如果发生了过量的弹性变形就不能使用(即失效)。比如镗床的镗杆、机床的主轴、刀架等弹性变形太大,加工出的机件精度就无从保证;高压容器弹性变形太大,会产生鼓凸现象而失去稳定性。这在工程上称为刚度问题。所谓刚度就是工件产生单位变形需要的载荷。在单向应力作用下

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{P/A}{\Delta l/l}$$

$$EA = \frac{P}{\Delta l/l} \quad (1-1-5)$$

式中 A ——工件的截面积;
 Δl ——工件绝对伸长量;
 l ——工件原始长度。

根据定义可知, EA 就是工件的刚度。显而易见,改变 E 和 A 即可改变工件的刚度。当工件的形状和尺寸确定之后,工件的刚度就决定于 E ,也就是决定于材料,所以称 E 为材料的刚度。在这种情况下,提高弹性构件的刚度就要选择弹性模量大的材料,如高弹性合金等。有时也使用“比弹性模量”的概念,常见材料的比弹性模量值见表1-1-1。

表1-1-1 常见材料的比弹性模量

材 料	Cu	Mo	Fe	Ti	Al	Be	Al ₂ O ₃	SiC
比弹性模量 ×10 ⁸ cm	1.3	2.7	2.6	2.7	2.7	10.5	10.5	17.5

弹性模量不仅是一个宏观变形的性能指标,同时也是断裂强度指标。由Griffith公式

$$\sigma_t = \sqrt{\frac{2E\gamma'}{\pi l}} \quad (1-1-6)$$

式中 σ_t ——断裂强度；
 γ' ——表面能；
 l ——裂纹长度。

不难看出， σ_t 随着 E 的增大而增大。但是大多数金属材料的断裂过程却与塑性变形有关，而 E 的作用极其次要。

3. 弹性变形的物理过程 金属由原子规则排列构成，相邻原子间存在一定的作用力。弹性变形就是克服原子间作用力，使原子间距发生变化，且除去外力后又可恢复到原来位置的过程。借用双原子模型可以说明弹性变形的特征。图1-1-1表明相邻两原子在一定范围内它们之间存在有相互作用力。一般认为引力是由金属正离子和自由电子间的库伦引力产生的，斥力是由正离子和正离子、电子和电子之间的斥力产生的。当无外力作用时，双原子各自处于自己的平衡位置，它们之间的距离为 r_0 ，合力为0， r_0 系正常的晶格常数，此时原子间势能最低，处于稳定状态。当外力作用使两原子靠近($r < r_0$)或分开($r > r_0$)时，必须克服相应的斥力和引力，才能使原子达到新的平衡位置，这个过程就是变形。当外力除去后因原子间力(合力3)的作用，原子又回到原来的平衡位置($r = r_0$)，则称为变形的复原。这就是弹性变形具有可逆特点的原因。

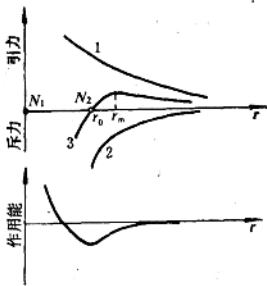


图1-1-1 双原子模型

1—引力曲线；2—斥力曲线；3—合力曲线。

分析表明，两原子之间的作用力 P 和间距 r 的关系为

$$P = \frac{A}{r^2} - \frac{Ar_0^3}{r^4} \quad (1-1-7)$$

式中 A 为和原子性质有关的常数。

由此关系式可知， $r_{max} = \sqrt{2} r_0$ ，即弹性变形最大值可达41%，对多原子模型 $r_{max} = 1.25r_0$ 。实际上，弹性变形量很小，这是由于金属内部存在缺陷的缘故。

从前面的讨论得知，金属晶体的弹性变形既不是线性的，更不是各向同性的，实验可证明这一结果(见表1-1-2)。那么在工程上假设金属材料的弹性变形为线性及各向同性是否实用呢？回答是肯定的。这里除实践可给以证明外，还可从图1-1-1中得出结论。当弹性变形量很小时曲线和直线之间的差别很小，工程上反映不出来，所以可近似为线性的，且实用的金属材料是多晶体，各晶体的取向随机分布，所以绝大多数工程用金属材料不表现出各向异性。

表1-1-2 若干纯金属的弹性模量

晶格型式	金属	E (MPa)			G (MPa)		
		单晶		多晶体	单晶		多晶体
		最大	最小		最大	最小	
面心立方 (fcc)	Al	76100	63700	70300	28400	24500	26100
	Cu	191100	66700	129800	75400	30600	48300
	Au	116700	42900	78000	42000	18800	27000
	Ag	115100	43000	82700	43700	19300	30300
体心立方 (bcc)	Fe	272700	125000	211400	115800	59900	81600
	W	384600	384600	411000	151400	151400	160600
密堆六方 (hcp)	Mg	50600	42900	44700	18200	16700	17300
	Zn	123500	34900	100700	48700	27300	39400
	Ti	—	—	115700	—	—	43800

4. 弹性极限和弹性比功 从图1-1-1还可以看出,金属的弹性变形超过某一定量时就不再是线性关系了,因而在工程上出现了两个与弹性变形有关的抗力指标,即比例极限 σ_p 和弹性极限 σ_e 。

比例极限状态应力-应变之间保持线性关系,超过此值虽然仍属弹性变形,但应力-应变之间不再为线性关系。工程上确定比例极限的办法是在拉伸曲线上找出一-点,使该点的斜率 $\text{tg}\theta'$ 比直线斜率 $\text{tg}\theta$ 增加(见图1-1-2)50%,该点对应的应力值就称为比例极限,也叫做规定比例极限。如果要求严格时,也可以把增加值规定为25%、10%等,分别记以 σ_{p25} 、 σ_{p10} 。同一材料中, $\sigma_p > \sigma_{p25} > \sigma_{p10}$ 。

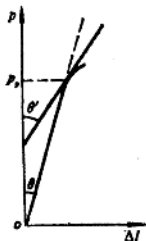


图1-1-2 比例极限 σ_p 的确定

弹性极限 σ_e 是金属弹性变形和弹塑性变形的分界线。当应力超过该值后即有塑性变形发生,因而弹性极限是表征金属弹性的一个抗力指标(工程上的确定方法将在屈服强度一节中介绍)。如果将金属制成弹性构件,其储存能量(或吸收能量)的多少等于弹性变形功(图1-1-3中的阴影部分),也常被称之为弹性比功

$$A_e = \frac{1}{2} \sigma_e \epsilon_e = \frac{\sigma_e^2}{2E} \quad (1-1-8)$$

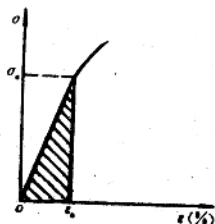


图1-1-3 弹性比功

由上式可知,弹性比功的大小决定于 σ_e 和 E 。为增大弹性比功一方面可以提高 σ_e ,另一方面可以降低 E 。由此可见,在工程上对弹性的理解可包括两个方面,一是刚度,为增加刚度从材料学角度应提高 E ;二是弹性比功,为增加能量储存值则应降低 E 。所以正确理解金属弹性的含义是选择材料及其指标的前提。

二、影响弹性的因素

在设计重要的高压装置时,几乎都选择比例极限 σ_p 为强度指标,目的在于保证装置在使用时不发生塑性变形,而不是出于弹性性能的利用。但现代高压装置中的恒压(稳压)元件和减震元件的元件却和金属的弹性性能密切相关。前者以刚度为主,后者以弹性比功为主。本节将着重讨论与刚度有密切关系的弹性模量、弹性滞后、包申格(Bauschinger)效应和循环韧性。

1. 影响弹性模量的因素 金属的弹性模量主要取决于金属原子本身的性质,同其他表征原子间结合能量的物理参数,如熔点、汽化热一样,在某种程度上表征着原子之间结合力大小的弹性模量也是原子序数的周期函数(见图1-1-4)。除过渡族金属有其特殊规律外,一般说来弹性模量 E 与原子半径 r 之间存在如下关系

$$E = \frac{K}{r^m} \quad (1-1-9)$$

式中 K 和 m (>1)均为与材料有关的常数。同一周期内 E 随原子序数的增加而增加,这与元素价电子增多,原子半径减小有关;同一族内 E 随原子序数的增加而减小,这与原子半径增大有关。同理可知在单晶体中,原子密度大的方向 E 大,反之即小。但过渡族元素的规律就

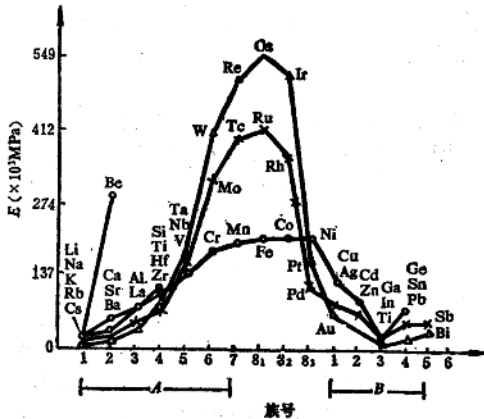


图1-1-4 金属元素弹性模量的周期变化

不尽相同,且它们的弹性模量也高,则可能是由于其d层电子未被填满而引起原子间结合力增大的缘故。所以这些金属可以得到广泛的应用,如Fe、Ni、Mo、W、Mn等。

由此可见,凡能改变原子间距(或晶格常数)的因素都能改变弹性模量。表1-1-3列出的是三种合金钢在不同热处理状态下的剪切弹性模量,与表1-1-2提供的数据相比较,合金化,热处理对弹性模量的影响很小,一般不超过5%。也就是说,弹性模量是一个对组织不敏感的参数,试图用工艺方法改变与 E 直接有关的性能是不可取的。对于精密的弹性零件则应考虑到这些影响。冷变形一般可使 E 降低4%~6%,但形变量大到出现织构时,要产生各向异性,此时研究提高或降低 E 的问题便毫无意义了。同理,温度对 E 也有影响,许多资料指出, E 将随温度的升高而下降。如铁每升高100°C, E 下降20%。在正常工作温度下(指-50~50°C范围内), E 的变化很小,在工程上可以忽略不计。

表1-1-3 几种弹簧钢的剪切弹性模量 (MPa)

50 Cr Mn		50 Cr V		60 Si ₂	
热 处 理	G	热 处 理	G	热 处 理	G
退 火	84340	退 火	83850		
840℃淬火	80800	淬 火	80610	淬 火	79240
淬火后300℃回火	81600	淬火后300℃回火	81890	淬火后300℃回火	80610
淬火后400℃回火	82280	淬火后400℃回火	82580	淬火后400℃回火	81790
淬火后600℃回火	84630	淬火后500℃回火	83650	淬火后500℃回火	83360
		淬火后600℃回火	84930		

反之, 对于飞行器所用高压装置中的稳压器, 其弹性元件的刚度误差则不得大于 3% (I 级弹簧), 否则即使弹性模量变化很小也会引起超差。以圆截面螺旋压缩弹簧为例

$$S = \frac{Gd^4}{8nD^3} \quad (1-1-10)$$

$$\Delta S = \frac{d^4}{8nD^3} \Delta G + \frac{Gd^3}{2nD^3} \Delta d - \frac{3Gd^4}{8nD^4} \Delta D \quad (1-1-11)$$

式中 S——弹簧刚度;
G——剪切弹性模量;
d——金属丝直径;
n——弹簧圈数;
D——螺旋中径。

假如制造精度足够高, 即 $\Delta d = 0$, $\Delta D = 0$, 则

$$\frac{\Delta S}{S} = \frac{\Delta G}{G} \quad (1-1-12)$$

由此可见, 如果弹性模量的改变量大于 5%, 那么制造出的就不是 I 级弹簧。

如果不考虑实际上等温模量与绝热模量间的微小差别, 那么变形速度对弹性模量并无影响。弹性变形在固体中的传播速度可用声速来表示, 对于纵向振动的杆件, 弹性波 (声波)

表1-1-4 声在一些材料中的传播速度

材 料	速 度 m/s	材 料	速 度 m/s
Pb	1320	橡 皮	43
Cu	3666	软 木	500
Mg	4600	胶 木	1570
Ni	4970	冰	3160
Fe	5000	花 岗 石	5100
Al	5104	玻 璃	5500

的传播速度 $v = \sqrt{E/\rho}$ (这里 ρ 为传播声波介质的密度)。表1-1-4为几种材料中的声速,也就是弹性变形的传播速度。从表1-1-4中看出,弹性变形的速度非常大,尤其是在金属材料中,通常远远超过加载速度。然而大多数情况下,弹性变形只在瞬间发生,变形速度并不影响金属的弹性模量。利用这一结果,可以用动荷方法测量微小变形下的弹性模量。

在现代科技中,加载速度大于 10^5 m/s 的机构及现象并不罕见。在如此高的应变速率下观察其弹性变形规律是很困难的,需要使用专门的装置。

2. 弹性不完整性和弹簧的非线性误差 完整的弹性变形应该是加载时立即变形,卸载后立即恢复原状,载荷-形变图上加载线与卸载线重合,即应力与应变同相,变形值大小与时间无关,当应力值小于 σ_p 时,应力应变是线性关系。实际上,弹性变形时加载线和卸载并不重合,常见的一种是应变落后于应力,称为弹性后效(或滞弹性),见图1-1-5。

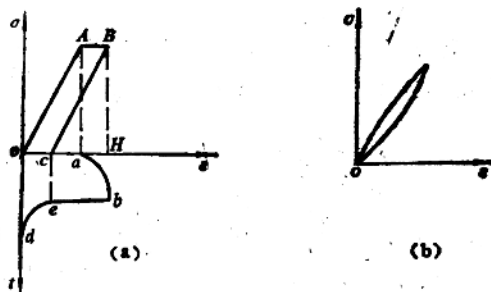


图1-1-5 弹性滞后示意图
(a) 弹性滞后; (b) 滞后环。

在生产实践中,弹簧在加载和卸载时会形成一个封闭环(见图1-1-6),这个环和弹性滞后环相似,所引起的刚度偏差称为弹簧非线性误差。对于高精度弹簧,其值要求小于3%。这种偏差引起的原因有两个方面,一是弹性滞后的反映,这是由于弹簧钢丝截面上应力不均匀致使弹性变形不同时发生而引起的;另一种与Bauschinger效应有关,所谓Bauschinger效

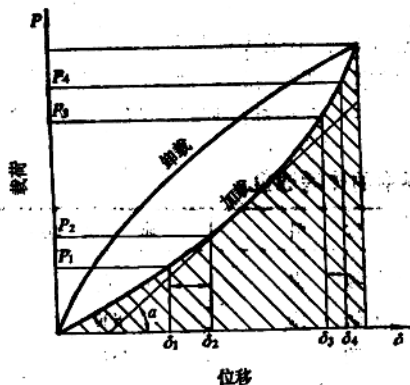


图1-1-6 螺旋压缩弹簧加载卸载环

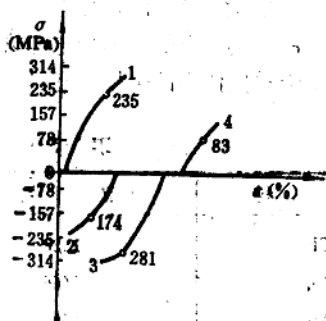


图1-1-7 铜的Bauschinger效应图

应是指金属材料加载至弹性极限附近卸载后,同向加载弹性极限上升,反向加载弹性极限下降的现象(见图1-1-7)。以上弹性不完整性的产生都和内应力以及在弹性变形中金属内