

中等专业学校教材

ZHONGDENG
ZHUANYE XUEXIAO
JIAOCAI



金属材料

(第二版)

太原铁路机械学校 孙士恒 编

中国铁道出版社

中等专业学校教材

金 属 材 料

(第二版)

太原铁路机械学校 孙士恒 编

中 国 铁 道 出 版 社

1987年·北京



B 427365



内 容 简 介

本书是根据铁路中等专业学校铁道物资管理专业(95学时)的《金属材料》教学大纲,结合近年来教学实践和金属材料的发展情况,重新编写而成的。全书分十章,重点阐述金属材料的性能和组织结构,钢的热处理,生铁及铁合金,碳素钢和合金钢,钢材和有色金属材料,以及金属材料的检验和防腐蚀等。

本书除作中等专业学校教材外,亦可供职工中专和现场物资管理工作人员学习参考。

中等专业学校教材

金 属 材 料

(第二版)

太原铁路机械学校 孙士恒 编

中国铁道出版社出版

责任编辑 梅根明 封面设计 霍 达

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本: 787×1092毫米 1/32 印张: 12.375 字数: 304 千

1981年1月 第1版

1987年6月 第2版 第4次印刷

印数: 42,591—52,500册 定价: 1.80 元

前 言

历史证明,人类的生产活动和社会的发展是同对金属的认识和利用紧密联系在一起的。只不过在几千年的漫长岁月里,人类对金属的认识,主要是依赖经验的积累。一直到二十世紀前后,特别是近三、四十年来,由于科学技术的发展和现代工业对金属材料的更苛刻的要求,才促使人们对金属材料的认识逐渐深入到它的本质。从而有力地推动了金属材料制造、使用和发展。

金属材料是由金属元素或由金属元素与非金属元素构成的,并且具有一般金属特性的物质。它包括纯金属和合金。又可分为黑色金属和有色金属两部分。黑色金属主要是钢铁,有色金属主要是铜、铝及其合金。在现代工业生产中,钢铁占有极重要的地位。在整个结构材料中,钢铁约占70%。可以说钢铁产量是衡量一个国家工业生产水平的主要标志之一。

钢铁具有良好的使用性能和工艺性能。资源丰富,价格低廉,应用十分广泛。目前,全世界年钢产量已达10亿吨,预计到本世纪末,世界钢产量可达17亿吨。到那时,工业材料仍以钢铁为主,但是有一部分会被高分子合成材料所代替。同时,钢材的性能也会有很大的提高,强度一般可望比现在提高一至二倍。钢材品种将会更规范化、系列化。各国通用的钢材牌号可能取得一致。钢材的利用率也将由现在的50%提高到80%左右。

物资管理工作是沟通生产和使用的桥梁。为了科学地管理、选用金属材料,加速祖国的现代化建设,培养具有中等专业水平的物资管理技术人材,普及、提高铁路的物资管理人员的基础科技知识,依据铁路中等专业学校“铁道物资管理专业”的《金属材料》教学大纲,1981年出版了《金属材料》试用教材。五年来,编者在教学实践中,又积累了新的资料,按照编委会1984年的计划,用一年多的时间,对本书进行了全面修改。

1986年4月在株洲铁路机械学校召开了审稿会议。编委委员黄钧福、傅武华、刘巨成、黄元孝、孙士恒等同志参加了审稿会议。傅武华同志担任主审。在本书的编写和修订过程中还曾得到黄惠芳、魏惟恒、陈培基、李家龙、安玉若、张春发等同志的支持和帮助,在此表示衷心的感谢。

编 者

1986年6月

目 录

第一章 金属材料的性能.....	1
第一节 金属材料的物理性能.....	1
第二节 金属材料的机械性能.....	4
第三节 金属材料的工艺性能.....	15
第二章 金属材料的组织结构.....	19
第一节 金属的晶体结构.....	19
第二节 金属的结晶.....	24
第三节 合金的相结构.....	28
第三章 铁碳合金状态图.....	32
第一节 二元合金状态图的概念.....	32
第二节 铁碳合金的基本组成物.....	37
第三节 铁碳合金状态图.....	39
第四章 钢的热处理.....	51
第一节 钢在加热时的转变.....	52
第二节 钢在冷却时的转变.....	54
第三节 钢的退火与正火.....	60
第四节 钢的淬火与回火.....	63
第五节 钢的表面热处理.....	67
第六节 钢的热处理常见缺陷.....	71
第五章 生铁和铁合金.....	75
第一节 生铁的冶炼和分类.....	75
第二节 灰口铸铁.....	77
第三节 可锻铸铁与球墨铸铁.....	79
第四节 铸铁管及管件.....	81
第五节 铁合金.....	83
第六章 碳素钢.....	86
第一节 钢的冶炼和分类.....	86
第二节 杂质对钢的性能的影响.....	92
第三节 碳钢的分类、牌号及用途.....	95
第七章 合金钢.....	103
第一节 合金元素在钢中的作用.....	103
第二节 合金钢的分类和牌号的表示方法.....	109
第三节 合金结构钢.....	111
第四节 合金工具钢.....	116

第五节	特殊性能钢	119
第八章	钢 材	122
第一节	钢的压力加工	122
第二节	型 钢	127
第三节	钢板和钢带	130
第四节	钢 管	132
第五节	钢 丝	135
第六节	钢 丝 绳	138
第七节	铁路常用钢材	141
第九章	有色金属材料	146
第一节	铜及铜合金	146
第二节	铝及铝合金	154
第三节	锡、锌、铅、铋及轴承合金	161
第四节	钨、钼、钛及硬质合金	168
第十章	金属材料的检验和防腐	172
第一节	金属材料的检验	172
第二节	钢铁的火花鉴别	176
第三节	金属的腐蚀与防护	181
附 录		187
附录一	硬度的换算和对照	187
附录二	钢铁产品涂色标记	189
附录三	有色金属及合金产品状态及符号	190

第一章 金属材料的性能

科学、合理地保管和使用金属材料，尽量减少金属材料在储运过程中的损耗，充分发挥金属材料的潜力，进一步提高金属材料的利用率，是任何一个用料单位都很重视的工作，无疑这对于保证铁路运输的安全正点、提高经济效益也具有十分重要的意义。为此，应该熟悉金属材料的性能及其主要指标，因为这是保管、供应和使用金属材料的基本知识之一。

金属材料的性能包括物理、化学、机械和工艺性能。物质参与化学变化时所表现出来的性能，叫做化学性能，如酸性、碱性、耐蚀性等。无需改变物质的化学性能，就可以测试的性能，称为物理性能，如聚集状态、比重、熔点、导电性等。机械性能是指材料在一定条件下抵抗不同性质的外力的作用时，所表现的能力，如强度、塑性、硬度等。工艺性能是指材料从冶炼到成品的生产过程中，能否适应各种加工工艺（如铸造、锻造、焊接、切削加工等）要求的能力。一般又将材料的物理、化学、机械性能统称为使用性能。它是材料在外界条件作用下所表现的行为，它可以告诉我们，材料是否符合使用的要求；而工艺性能则可决定材料能否用来生产所需的产品及其难易程度。总之本章的中心内容是讨论金属材料的性能及其指标。

第一节 金属材料的物理性能

一、比 重

各种金属材料都有固定的比重，其值大小不一，如铂的比重最大，为21.45，锂的比重最小只有0.534。对于飞机、汽车、客、货车等要求减轻自重的机械设备，采用性能好的比重小的金属材料具有十分重要的意义。比重、自重、单重是不同的概念，但它们之间又有密切的联系。几种常用金属材料的比重见表1—1。

常见金属材料的比重

表1—1

材 料 名 称	比 重	材 料 名 称	比 重
镁	1.7	金	19.3
铝	2.7	铂	21.45
锌	7.19	灰口铁	6.8 ~ 7.4
锡	7.3	白口铁	7.2 ~ 7.5
铁	7.85	碳钢	7.81 ~ 7.86
镍	8.9	铜	8.5 ~ 8.85
钴	8.89	青铜	7.5 ~ 8.9
银	10.5	合金	2.55 ~ 2.84
铅	11.3	合金	1.75 ~ 1.85

根据比重的大小，可将金属分为轻金属和重金属。比重在“5”以下的金属叫轻金属，而把比重超过“5”的金属叫做重金属。多数金属为重金属；少数是轻金属。金属材料的抗

拉强度与比重的比值,叫做“比强度”。这是一个综合指标。金属材料中比强度最高的是钛,约为6~7。而铁的比强度只有3左右。铝的强度不高,但比重也小,铝的比强度约与铜相近。所以,铝及其合金是飞机的主要结构材料。

二、熔 点

金属除了汞之外,在常温下均为固体状态,并且都是晶体。晶体物质溶解时的温度,称为熔点。它是该物质的固态和液态可以平衡共存的温度。在一定压强之下,任何晶体的凝固点和熔点相同。对于非晶体而言,无凝固点可言,亦无熔点可言。

各种金属都有自己固定的熔点。例如汞的熔点为 -39.3°C ,而钨的熔点则高达 3380°C ,为金属中熔点最高者。白炽灯灯泡中的灯丝,工作温度高达 3000°C ,只有钨才能胜任。合金的熔点随成份而变化。易熔合金可以用来制造焊料,保险丝,印刷铅字等;难熔合金可以用来制造耐高温的工具和零件,如电阻丝,内燃机排气阀,切削刀具等。所以熔点是选用金属材料的条件之一。几种常用金属材料的熔点见表1-2。

几 种 常 见 金 属 材 料 的 熔 点

表 1-2

材 料 名 称	熔 点 $^{\circ}\text{C}$	材 料 名 称	熔 点 $^{\circ}\text{C}$
钨	3380	金	1063
钼	2622	银	658
钛	1668	镁	627
铬	1765	锌	419
钨	1900	铝	327
铁	1535	锡	232
镍	1455	铸铁	1200~1350
锰	1230	碳钢	1450~1530
铜	1083	青铜	865~900

三、导 电 性

金属传导电流的能力,叫做导电性。衡量金属导电能力的最重要的指标是导电率 γ 或电阻率 ρ 。电阻率是导电率的倒数($\gamma = \frac{1}{\rho}$),电阻率的单位为 $\Omega \cdot \text{m}$ (欧姆米)或 $\Omega \cdot \text{cm}$ (欧姆厘米)。如铜在 20°C 时,电阻率约为 $1.7 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{cm}$ 。导体的电阻率 $\rho = 10^{-8} \sim 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$ 。

一般金属材料均有良好的导电性,其中以银的导电性最好,其次为铜、铝、铁等。铝的导电性为常用金属中最低者,其电阻率 ρ 比铜大12倍。

金属中的杂质越少,工作温度越低,电阻率越小,导电性能越好。合金的电阻率均比纯金属高。所以,尽可能采用纯金属作导体,而选用电阻率大的合金(如铜-镍-锰合金)作电阻元件。金属的电阻随温度的升高而增大的现象,证明金属具有正的电阻温度系数。这是金属与非金属的最本质的区别。

四、导 热 性

金属能够传导热能的能力,叫做导热性。热能是内能的一部分,物质热能的增加,导致其温度的升高。金属的导热性和导电性表现为一致性,这是因为导热和导电均与电子的运动

有密切关系。热量的传递是依靠正离子的振动和电子的运动而实现的，而电流就是自由电子的定向移动。所以自由电子的运动，不仅是导电的条件，也是导热的条件。多数金属都是热的良导体，其中银的导热性最好，铜、铝次之。若以银的导热能力为1，则铜的导热能力为0.9，铝为0.5，铁为0.15。

用来表征物质热传导性能的物理量是导热系数或热导率 λ 。它等于热流量除以长度 L 与温度差 ΔT 之乘积。其国际单位制(SI)单位为瓦特每米开尔文，符号为 $W/(m \cdot K)$ 。 $1W/(m \cdot K) = 1J/(s \cdot K \cdot m)$ 。非SI的单位有卡路里每厘米秒开尔文，符号为 $Cal/(cm \cdot s \cdot K)$ ；千卡每米小时开尔文，符号为 $kCal/(m \cdot h \cdot K)$ 。由于表示温度差和温度间隔时， $1^\circ C = 1K$ ，故上述公式中 K 均可用 $^\circ C$ 代替。金属的热导率 $\lambda = 25 \sim 350 kCal/(m \cdot h \cdot ^\circ C)$ ；热导率 $\lambda < 0.2 kCal/(m \cdot h \cdot ^\circ C)$ 的材料称为绝热材料，如空气、木、棉、毛等。

在金属的加热和选用中，均须考虑热导率的影响。凡 λ 较小的金属材料，加热速度宜慢；而制造散热器及活塞的金属材料， λ 应该大些。

五、热膨胀性

金属材料在温度升高时，产生体积膨胀的现象称为热膨胀。反之，当温度下降时，金属的体积发生收缩。这种现象称为热胀冷缩，这是绝大多数金属的规律。但是，也有反常的，如铋由液体状态转变为固体状态时，体积增大0.95%；锑增大12.0%；镓增大3.2%等。凡用铅的地方，几乎都加入一定量的铋，如铅字合金里加入铋，一是为了增加合金的硬度，延长使用寿命，二是为了使印刷的字迹清晰。

金属的热膨胀性用线胀系数 α_l 表示。 $\alpha_l = \frac{1}{l} \cdot \frac{\Delta l}{\Delta T}$ ，其单位为每开尔文(K^{-1})或 $^\circ C^{-1}$ 。

它表示金属材料在温度升高1K时，其单位长度所伸长的量。与金属材料长度无关。金属的体胀系数用 α_v 表示，若膨胀在各个方向上一样， α_v 近似等于 α_l 的三倍。

金属的热胀冷缩，在铸造工艺、钢桥的安装、钢轨的铺设及内燃机活塞等材料的选用上，均须慎重考虑和精确计算。几种常用金属材料的线胀系数见表1—3。

几种常见金属的线胀系数

表1—3

金属名称	线胀系数 (K^{-1})	金属名称	线胀系数 (K^{-1})
铋	39.5×10^{-6}	铜	17.0×10^{-6}
锑	37×10^{-6}	镍	13.1×10^{-6}
镓	24.3×10^{-6}	铁	11.76×10^{-6}
锡	23×10^{-6}	铝	6.2×10^{-6}
铅	23.5×10^{-6}	钛	8.2×10^{-6}

六、磁 性

具有磁性的物体称为磁体。天然的磁体通称为磁石。人造磁体常常是条形或马蹄形的。磁体的两端显示磁性最强，称为磁极。使原来不显磁性的物体在磁场中获得磁性的过程，谓之磁化。在外加磁场中因呈现磁化而能加强或削弱磁场的物质，称为磁性材料。所有的金属按磁性分为三类，即铁磁材料——在磁场中被强烈磁化，磁化方向与磁场方向相同。如铁、钴、镍等。顺磁材料——在磁场中，磁性十分微弱，磁化方向与磁场方向相同。如锰、铬、

铜、钨等。逆磁材料——在磁场中，磁性十分微弱，磁化方向与磁场方向相反。如铜、锡、铅等。

逆磁材料又叫抗磁材料，如手表壳就用它来制造。铁磁材料又分为硬磁材料和软磁材料。硬磁材料常用来制造电话机、扩音器、电钟及电表中的永久磁铁；如Al—Ni—Co合金；而软磁材料常用作电机的转子和变压器的铁芯，如硅钢片。

磁性材料在发电、探矿、指南和起重等方面均有重要用途。可以说，没有磁性材料，便没有当今如此强大的电源。电磁铁是利用电源的磁效应使铁芯磁化而产生吸力的装置。通常由软磁材料制成的铁芯和激磁线圈组成。线圈中通以电流时，铁芯被磁化，对铁磁体产生吸力，电流不通时，铁芯去磁，吸力消失。它在继电器中，用以驱动触头工作。在起重工作中，直接吸持铁磁工作物，如盘条、生铁块等。

铁磁材料加热到某一温度，就失去磁性，这个温度叫居里点，铁的居里点是 768°C ，镍的居里点是 358°C ，钴是 1131°C 。

第二节 金属材料的机械性能

所有的机械产品都是由零件组成的，而零件在使用过程中，都在不同程度上承受着力或能量的作用，并且常常伴有温度和特殊环境介质的作用。机械性能（又叫力学性能）就是材料在外力作用下所表现出来的特性。材料在外力作用下将产生形状和尺寸的改变，这种改变称为变形。由于材料的性质不同，外力的大小、方向及其他条件的不同，变形也很复杂。但是我们可以把复杂变形分解为简单变形，如拉伸、压缩、剪切、扭转等。上述变形又可分为弹性变形和塑性变形。若外力去除后，变形消失，材料能恢复原来的形状和尺寸，这种变形称为弹性变形。若外力去除后，变形不能消失，材料不能恢复原来的形状和尺寸，这种变形称为塑性变形或“永久变形”（残余变形）。

金属材料在外力作用下，一般会出现彼此关联的三个过程：弹性变形、塑性变形及断裂。由于外加载荷（外力）的性质不同，上述过程的发生和发展也不相同。力学性能试验就是对一定形状的试样施加一定类型的载荷，观察上述各过程的进展情况，并且测定表征这些情况的参数，即力学性能指标。主要的力学性能指标有：屈服点 σ_s （或条件屈服强度 $\sigma_{0.2}$ ）、抗拉强度（强度极限） σ_b 、伸长率 $\delta(\%)$ 、断面收缩率 $\psi(\%)$ 、冲击韧性值 a_k 等。

一、强度指标及其测定

为了使钢轨在满载列车的重压之下不致压溃，钢丝绳在吊起重载时不致拉断，车辆的弹簧在冲击震动中不致断裂，那么钢轨、钢丝绳和弹簧就应该具有足够的强度。材料在外力作用下对塑性变形和断裂的抵抗能力，称为强度。强度指标是通过拉力试验来测定的。拉力试验就是把制成规定形状和尺寸的试样（见图1—1）装在拉伸试验机上，施加一个缓慢增加的拉力 $P(MN)$ ，观察并测定由于拉力作用而引起的试样变形和断裂的过程。

拉伸试样的截面形状有圆形与矩形两种，其用来测量变形的长度 l_0 称为标距长度。对于圆形试样，标准规定 $l_0=10d_0$ 或 $5d_0$ ，前者称为10倍试样，后者称为5倍试样。对于矩形截面试样，则 $l_0=11.3\sqrt{F_0}$ 或 $5.65\sqrt{F_0}$ 。 d_0 为试样中段的直径， F_0 为试样中段的横截面积。圆形试样有较粗的头部，这是为了便于安装，并且防止拉伸时在头部断裂。在试验中，世界各国有关优先选用 $l_0=5d_0$ 试样的趋势，这是因为它比 $l_0=10d_0$ 节约材料，又能减少淬火变

形。试验前，在试样上用冲眼或划线标记 l_0 。标记不可过深，否则会造成应力集中而导致试样提前断裂。

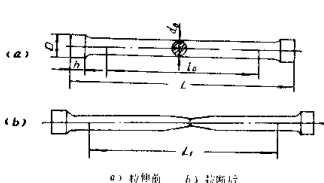


图 1-1 拉伸试样

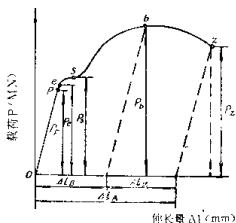


图 1-2 低碳钢的载荷—伸长曲线

在拉力试验过程中，若记录各时刻的拉力 P ，以及与各拉力 P 对应的试样标距 l_0 长度内的绝对变形 Δl ，便可以绘出载荷—伸长曲线（图 1-2），这种曲线叫做拉伸图。拉力 P 的数值可在试验机的测力计上读出。而一般试验机上都备有自动绘图装置，在试样的拉伸过程中自动地绘出拉伸图。

十分明显，拉伸图和试样尺寸有关。因为在同样大小的拉力作用下，试样愈长，截面积愈小，所得到的绝对伸长也就愈大。为了使拉伸图不受试样尺寸的影响，以反映材料本身的性能，将拉伸图的纵坐标 P 除以试样的横截面积 F_0 ，即 $\frac{P}{F_0}$ ；横坐标 Δl 除以试样的标距长度 l_0 ，即 $\frac{\Delta l}{l_0}$ 。由于 $\frac{P}{F_0} = \sigma$ （应力）， $\frac{\Delta l}{l_0} = \varepsilon$ （应变）。于是就把拉伸图变成了以 σ 为纵坐标，以 ε 为横坐标的应力—应变图。由于 F_0 和 l_0 都是常数，所以应力—应变图同拉伸图（载荷—伸长曲线）的形状完全相同，但意义不同，不能混为一谈。

载荷—伸长曲线，全面地体现了金属材料在轴向拉应力作用下，从开始变形直至断裂这一过程中的各种性质。尤其以低碳钢的拉伸图最全面、最典型。通过它可以求得金属材料的大力学性能指标（ σ_s 、 $\sigma_{0.2}$ 、 $\delta\%$ 、 $\psi\%$ ）。现对载荷—伸长曲线进行分析如下：

在拉伸试验的起初阶段，所加外力较小，试样的伸长与施加的外力成正比关系，试样发生均匀的变形。这时的变形属于弹性变形。当载荷超过 P_0 之后，拉伸曲线开始偏离直线。 P_0 （比例极限载荷）是保持直线关系的最大载荷。当载荷超过 P_0 （弹性极限载荷）之后，试样除了产生弹性变形之外，还产生塑性变形。当载荷增加到一定值时，拉伸曲线出现了平台或锯齿状，这说明载荷虽有波动，但几乎没有增加或略有下降，而试样继续发生了塑性变形。这种现象称为“屈服”。平台为屈服阶段，而屈服阶段的最低载荷，就是屈服载荷 P_s 。

在屈服阶段之后，试样随载荷的增加，发生明显的塑性变形。 sb 段为均匀塑性变形阶段（标距 l_0 各部分的伸长基本上是一样的），它是一条向上凸起的曲线。这说明，若要试样继续变形，必须增加载荷。材料在屈服后，重新产生了抵抗变形的能力，这种现象称为“形变强化”。 b 点是曲线的最高点， b 点所对应的载荷是试样断裂前能承受的最大载荷，称为抗拉强度极限载荷（ P_b ）。

b_2 段是试样局部变形阶段。当载荷增加到 P_b 后, 试样的变形不再是均匀的。而是集中在某一个局部区域, 这一区域越拉越细, 出现“颈缩”现象。由于颈缩处截面积的急剧缩小, 试样的总抵抗力相应地下降, 以致使试样变形所需的外力也逐渐变小(但应力仍在增大)。变形仍然继续进行, 直至Z点试样断裂。Z点所对应的载荷为断裂强度载荷(P_z)。

综上所述, 金属材料在拉伸过程中得到的载荷——伸长曲线, 包括四个阶段: 弹性变形, 屈服、均匀塑性变形及局部塑性变形阶段。根据载荷——伸长曲线上各特殊点的载荷与试样中段原截面的关系, 可以求出强度指标。

(一) 比例极限

材料承受外力与变形成正比时的最大应力, 称为比例极限。用符号 σ_p 表示。

$$\sigma_p = \frac{P_p}{F_0} \text{ (MPa)}$$

式中 σ_p ——比例极限 (MPa);

P_p ——P点所对应的外力 (MN);

F_0 ——试样原始截面积 (m^2)。

σ_p 是材料符合虎克定律的最大应力值。A3钢的比例极限 $\sigma_p = 200 \text{ MPa}$ (20 kgf/mm^2)

(二) 弹性极限

材料在外力作用下产生弹性变形时所能承受的最大应力, 称为弹性极限。用符号 σ_e 表示。

$$\sigma_e = \frac{P_e}{F_0} \text{ (MPa)}$$

式中 σ_e ——弹性极限 (MPa);

P_e ——e点所对应的外力 (MN);

F_0 ——试样原始截面积 (m^2)。

A3钢的 σ_e 也近似等于200MPa, 所以实际上P、e两点非常接近。在应用时, 对 σ_p 与 σ_e 通常不加严格区分。但是测定弹性极限是很困难的, 所以国标中规定以残余伸长为0.01%的应力作为“规定弹性极限”, 并以 $\sigma_{0.01}$ 表示。对精密弹簧而言, 若弹簧材料的 $\sigma_{0.01}$ 过低, 弹簧工作时就可能产生微量塑性变形。时间长了, 将导致弹簧失效。

(三) 屈服点

材料产生屈服时的最小应力, 称为屈服点。用符号 σ_s 表示。

$$\sigma_s = \frac{P_s}{F_0} \text{ (MPa)}$$

式中 σ_s ——屈服点 (MPa);

P_s ——材料产生屈服时的最小载荷 (MN);

F_0 ——试样原始截面积 (m^2)。

屈服点是具有屈服现象的材料(如低碳钢、铁素体钢等)特有的强度指标。屈服点 σ_s 的载荷可借助于试验机的测力计刻度盘的指针或拉伸曲线上的纵坐标来确定: 测力计刻度盘的指针停止转动或第一次往回转的最小载荷, 就是 P_s (图1-3(a)); 在拉伸图上找出屈服平台的恒定载荷或第一次下降的最小载荷就是 P_s (图1-3(b))。

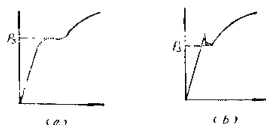


图 1-3 屈服点的确定

工业上使用的金属材料，多数没有屈服现象，如淬火后低、中温回火钢，退火铝合金，调质处理的合金钢及铸铁等均无屈服点，即无法确定材料产生塑性变形的最低应力值。在国标GB228-63中规定，对这样的材料，当试样在拉伸过程中标距部分的残余变形达到0.2%时的应力值（ $\sigma_{0.2}$ ）称为条件屈服点。

屈服点（条件屈服点）是表征金属材料发生微量塑性变形的抗力。例A3钢的屈服点 $\sigma_s=235\text{MPa}$ （ 24kgf/mm^2 ）。零件与结构大多在弹性变形范围内工作，一般不允许发生塑性变形。因为过量的塑性变形会导致机械零件失效。例如，齿轮的塑性变形会使啮合不良，甚至卡死、断齿。又如，为了保证气缸盖和气缸体的密封性，缸盖螺栓是不允许发生过量的塑性变形的。由于上述原因，材料的屈服点（条件屈服点）总是设计、选材和验收的主要依据。是最重要的强度指标之一。

（四）抗拉强度（强度极限）

材料在断裂前所能承受的最大应力，称为抗拉强度。用符号 σ_b 表示。

$$\sigma_b = \frac{P_b}{F_0} (\text{MPa})$$

式中 σ_b ——强度极限（MPa）；

P_b ——材料在断裂前所能承受的最大载荷（MN）；

F_0 ——试样原始截面积（ m^2 ）。

抗拉强度的测定比较容易，拉伸试验时，可以由测力计刻度盘的指针位置，直接读出最大载荷 P_b 。

对于脆性材料（如铸铁等）而言，没有屈服和颈缩现象，在产生极少的均匀伸长之后就发生断裂，b点与z点重合。所以它拉伸时只有一个强度指标，断裂时的最大应力值就是抗拉强度极限。

强度极限 σ_b 表征材料最大均匀变形的抗力是材料断裂前所能承受的最大应力值，是安全的保证。A3钢的强度极限 $\sigma_b=400\text{MPa}$ 左右，45钢的 $\sigma_b=530\sim 598\text{MPa}$ 。所以强度极限也是材料的最重要的强度指标之一。

工程上所用的金属材料，不仅希望具有高的屈服点（ σ_s 或 $\sigma_{0.2}$ ），而且还希望具有一定的屈强比（ σ_s/σ_b ）。这个比值愈小，材料的可靠性越高。因为材料在断裂前会出现大量的塑性变形。如果这个比值过小，则材料强度的有效利用率太低。因此，一般希望此值高些，以节约材料。

几种常用的金属材料的机械性能见表1—4所列。

几种常用金属材料的机械性能

表1—4

材料名称或牌号	屈服极限 σ_s (MPa)	抗拉强度极限 σ_b (MPa)	伸长率 δ (%)	断面收缩率 ψ (%)
A3钢	216~233	273~461	25~27	—
35钢	216~314	432~630	15~20	28~45
45钢	265~353	530~598	13~16	30~40
40Cr	343~785	568~981	8~9	30~45
QT60-2	412	588	2	—
HT15~33	—	98~275	—	—

二、塑性及其指标

凡是卸载后不可恢复的变形都是塑性变形。断裂前金属发生塑性变形的能力，叫做塑性。但断裂前难于判断塑性变形的程度，所以塑性以断裂后的塑性变形大小来表示。通过拉伸试验可以测定金属塑性的两项指标：伸长率和断面收缩率。

（一）伸长率

试样受力拉断后，标距部分所增加的长度与原标距长度的百分比，称为伸长率或延伸率。用符号 δ 表示。

$$\delta = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \times 100\%$$

式中 l_1 ——试样拉断后的标距长度 (mm)；

l_0 ——试样的原标距长度 (mm)。

由于标距部分所增加的长度是均匀变形的伸长与局部变形的伸长之和，所以伸长率也是上述两个变形所提供的伸长率之和，而均匀变形的伸长与试样的标距有关，局部变形的伸长与试样的断面积有关，所以试样的形状和尺寸必须标准化，试样之间所求得的伸长率才可以相互比较。同一材料，用短试样 ($l_0 = 5d_0$) 所测得的伸长率 (δ_5)，比长试样 ($l_0 = 10d_0$) 测得的伸长率 (δ_{10}) 大20%~50%左右。这是因为长试样和短试样拉断后都有一颈缩部分，把颈缩部分平均到短试样中，比在长试样中占有较大的比例。

鉴于上述原因，对于伸长率，必须注明是用短试样测定的 (用 δ_5 表示)，还是用长试样测定的 (用 δ_{10} 表示)，若不加注明，则认为是长试样的伸长率。当然，用非标准试样测得的伸长率，也不能同标准试样的 δ_5 或 δ_{10} 进行比较，否则将产生严重错误。

（二）断面收缩率

断裂后，试样截面的缩减量与原截面的百分比，称为断面收缩率。用符号 ψ 表示。

$$\psi = \frac{F_0 - F_1}{F_0} \times 100\%$$

式中 F_0 ——试样的原横截面积 (mm²)；

F_1 ——试样断口处横截面积 (mm²)。

断面收缩率的测定，对于圆试样比较简单，将拉断的试样对接起来，测出它的最小直径 d_1 (从相互垂直的方向测两次，再取平均值)后，代入上式，即可求出 ψ 值，显然 ψ 值受试样直径的影响，而与试样的标距长度无关。所以 ψ 值比 δ 值更能代表金属材料的塑性。

伸长率和断面收缩率都是材料的重要塑性指标。这两个指标愈大，说明金属材料断裂时产生的塑性变形愈大。如大多数碳素钢，其塑性较好，可以用较大的变形量进行加工；而有些合金钢塑性较差，进行压力加工时变形量不能太大，以免破裂。对于灰口铸铁来说，其塑性很低，伸长率小于1%不能进行压力加工，只能进行铸造。所以塑性的大小，可以决定金属材料能否产生塑性变形或者产生多大的塑性变形。通常将 $\delta > 5\%$ 的材料称为塑性材料，如铜、铝、钢材等； $\delta < 5\%$ 的材料称为脆性材料如铸铁等。

良好的塑性，还能增加材料在使用时的安全可靠性。这是因为，仁用中万一超载，也能由于塑性变形而使材料的强度提高，从而避免突然断裂。

三、硬 度

硬度是衡量金属材料表面软硬程度的一个综合指标，而不是一个单纯的物理量，它与材料的弹性、塑性、形变强化、强度等物理量均有关系。目前给硬度所下的定义，都不能确切地反映出硬度的实质。不过，一般可以定为硬度是指金属表面上不大体积内抵抗变形或抵抗破裂的能力。

硬度的测定方法曾有过近百种，但目前只剩下简单方便的几种。常用的硬度测定法都是用一定的载荷（压力）把一定的压头压在金属材料表面，然后测定压痕的面积或深度来确定硬度。当压头和压力一定时，压痕愈大或愈深硬度愈低；若压痕愈小或愈浅，硬度愈高。常用的硬度测定法是布氏硬度、洛氏硬度、维氏硬度三种。

硬度的测定设备简单，操作迅速方便，同时又能敏感地反映材料的化学成份及组织结构的差异，因而被广泛用来检查热处理后的产品质量。并且测试时，对试件的损伤很小，属于无损检验的范围，任何机械零件都可以测出相应的硬度而不影响使用。所以，硬度测定方法既适用于生产车间，也适用于科学研究部门。

金属的硬度与强度指标之间虽无严格的对应关系，但可以根据大量的试验数据，找出粗略换算的经验公式，从而可按硬度值估算强度数据。因此，硬度测定法是金属材料的力学性能试验中不可缺少的测试项目。

（一）布氏硬度

布氏硬度的测定原理是把规定直径的淬火钢球，用一定大小的载荷压入被测金属材料表面（图1—4），保持一定时间后，将载荷卸除，根据金属材料表面压痕的表面积 $F(\text{mm}^2)$ 除以载荷 (P) 所得的商值，作为硬度的计算指标。用符号HB表示，它是1900年瑞典工程师布里涅耳（T.A. Brinell）提出来的。

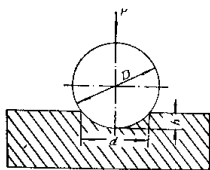


图1—4 布氏硬度试验原理示意图

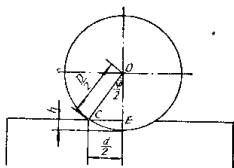


图1—5 h 和 d 的关系

$$\text{HB} = \frac{P}{F} = \frac{P}{\pi D h} \quad (\text{kg} \cdot \text{f} / \text{mm}^2)$$

布氏硬度值的大小就是压痕单位面积上所承受的平均压力，一般不标出单位。此值越高表示材料越硬。应当指出，所测压痕是经过恢复后的压痕，不包括弹性变形部分。

不过，在实际测量时，由于压痕深度难于测量精确，而压痕直径 d 的测量比较方便，因此上式的 h 可换算成 d 。图1—5中 OEC 为直角三角形，所以可求出：

$$h = \frac{1}{2}(D - \sqrt{D^2 - d^2})$$

因此

$$HB = \frac{2P}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

显然，试验时只要测量出压痕直径 d (mm) 便可通过计算求得 HB 值。为了简便起见，测定压痕直径之后，可按 d 值查表（见附录 1），求得相应的布氏硬度值。

从上式可知，布氏硬度是在载荷与钢球直径一定的条件下进行试验的。只有这样，对不同试件所得出的布氏硬度值才可能进行比较。但是，仅规定一种载荷及钢球直径显然是不够的，因为材料有软硬、大小及厚薄之别。例如标准载荷为 $3000\text{kg}\cdot\text{f}$ ，钢球直径为 10mm ，用它来测定铅、锡一类软金属时，就会出现压穿的现象，而测定厚度小于 2mm 的试件时，则产生压透的现象。所以，要采用不同的载荷及与之相适应的钢球直径。

由图 1-5 可知，压入角 φ 与钢球直径 D ，压痕直径 d 存在下面的关系：

$$\begin{aligned}\frac{d}{2} &= \frac{D}{2} \sin \frac{\varphi}{2} \\ d &= D \sin \frac{\varphi}{2}\end{aligned}$$

布氏硬度计算公式即可写成：

$$HB = \frac{P}{D^2} \cdot \frac{2}{\pi \left(1 - \cos \frac{\varphi}{2}\right)}$$

大家知道，无论钢球直径及与之对应的载荷怎样变动，同一材料的布氏硬度值应该相同，对不同材料的布氏硬度值应该可以进行比较。为此，当 $\frac{P}{D^2}$ 为常数时，对同一材料而言，其 HB 值必然相等。对不同材料，其 HB 值的大小随压入角 φ 的大小而变化，因此，就可以进行比较了。

布氏硬度广泛用于有色金属材料、铸铁及退火或正火状态下的钢材性能检验。布氏硬度压痕较大，代表着金属在较大体积内的平均性能，面不受个别组成相及微小不均匀度的影响，因此，特别适用于测定灰口铸铁、轴承合金等金属材料，是其他试验方法所不能代替的。也因为压痕较大，试验数据稳定，数据重复性强；而且布氏硬度值和抗拉强度之间存在一定的换算关系。

但是由于布氏硬度压痕较大，不适于检验成品。同时，钢球本身有变形问题，故在 HB450 以上时，就不宜再使用此法。此外，压痕直径一般要用放大镜进行测量，比其他方法来慢，所以，生产车间的产品检验也不采用。

布氏硬度的压头直径分别为 10 、 5 、 2.5mm 的淬火钢球。 P/D^2 的比值为 30 、 10 、 2.5 三种。试验时，根据金属材料种类、试样硬度范围和厚度的不同，按表 1-5 的规范选择钢球直径载荷及载荷保持时间。

试验后，压痕直径的大小应在 $0.25D < d < 0.6D$ 范围内（在此范围内压痕相似），否则试验结果无效，同时应考虑更换载荷重作试验。当选用的 P/D^2 比值不同时，布氏硬度值不能直接进行比较。

布氏硬度值的表示方法：若 $D=10\text{mm}$ ， $P=3000\text{N}$ ，载荷保持时间 10s ，所测得的硬度值为 250 ，则用 HB250 表示之。在其他试验条件下，符号 HB 应以相应的指数注明钢球直径、载荷大小及载荷保持时间。例如 HB5/250/30=100，表示用 $D=5\text{mm}$ ， $P=2500\text{N}$ ，载

荷保持时间为30s的条件下测得的布氏硬度值为100。

布氏硬度试验压头与载荷的关系

表 1-5

金属材料	布氏硬度值范围 HB	试样厚度 (mm)	载荷 P 与钢球直径 D 的关系	钢球直径 D (mm)	载荷 P (N)	载荷保持时间 (s)
黑色金属	140~450	6~3	$P = 30D^2$	10	30000	10
		4~2		5	7500	
		2		2.5	1875	
有色金属	<140	6~3	$P = 10D^2$	10	10000	10
		4~2		5	2500	
		3		2.5	625	
有色金属	>130	6~3	$P = 30D^2$	10	30000	30
		4~2		5	7500	
		<2		2.5	1875	
	36~130	9~3	$P = 10D^2$	10	10000	30
		6~3		5	2500	
		<3		2.5	625	
	8~35	>6	$P = 2.5D^2$	10	2500	60
		6~3		5	625	
		<3		2.5	156	

(二) 洛氏硬度

洛氏硬度用金刚石圆锥（锥角为 120° ）或钢球（直径为1.588毫米）做压头，根据试样的压痕深度来表示硬度数值的试验方法。由美国人洛克韦尔（Rockwell）在1919年提出。

洛氏硬度也是用压入硬度试验。其试验原理可用图1-6来说明。载荷先后两次施加，先加预载荷 P_0 ，然后加主载荷 P_1 ，其总载荷为 $P(P=P_0+P_1)$ 。

图1-6中0-0为未加载荷，压头未接触试样时的位置。

1-1是压头在预载荷 P_0 （100N）作用下，压入试样的深度为 h_0 时的位置。

2-2是加上主载荷 P_1 之后，压头在主载荷 P 的作用下压入试样的位置。

3-3是除去主载荷 P_1 之后，压头由于 P_1 所产生的弹性变形被消除而略提高后的位置。此时压头的实际深度是 $(h_1-h_2+h_0)$ 。

3-3和1-1位置的深度差 h 为 $(h_1-h_2+h_0)-h_0=(h_1-h_2)$ 。洛氏硬度值就是利用深度差 h 来确定的。压痕深度差 $h(h_1-h_2)$ 的数值越大，说明试样越软；其数值越小，说明试样越硬。为了照顾习惯上数值越大硬度越高的概念，采用一个常数 K 减去 (h_1-h_2) 所得的数值来表示硬度值的高低，并用每0.002mm为一个硬度单位，则得洛氏硬度值

$$[K - (h_1 - h_2)] / 0.002,$$

此值为一无名数，以HR表示。

$$HR = \frac{K - (h_1 - h_2)}{0.002}$$

用金刚石作压头时， $K=0.2\text{mm}$ ；用钢球作压头时， $K=0.26\text{mm}$ 。为了用同一试验机测定从极软到极硬材料的硬度，即为了扩大洛氏硬度的测量范围，采用不同的压头和载荷，组成了15种不同的洛氏硬度标尺。每种标尺用一个字母加在HR之后，如HRA、HRB、HRC等。其中最常用的是HRA、HRB、HRC三种，其计算公式只要将常数代入上式即得：

$$HRC = 100 - \frac{h_1 - h_2}{0.002} = 100 - \frac{h}{0.002}$$

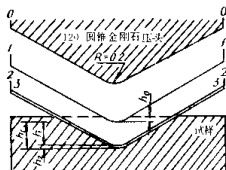


图 1-6 洛氏硬度测量原理示意图