

航空材料与运用

前言

本书是根据国家示范性建设高等职业院校——西安航空职业技术学院2007年教学计划和航空维修工程系航空机电设备维修专业教学改革方案，为“航空材料学”课程编写的教材。

在编写的过程中，编者认真学习国内外高等职业教育的理论、方法和经验，研究我国高等职业教育的发展历史和现状，充分认识到航空职业技术学院是重点培养高素质的航空装备维护和修理的技能型人才，这些人才毕业后主要在航空维修生产第一线从事实际工作。这就要求他们必须具备一定的理论基础、经验技术、智力技能和动作技能。本门课程主要讲授的飞机和发动机修理过程中的选材经验、金属热处理技术、复合材料构件的复合技术、防腐涂层的涂敷技术等是学习的重点。因此，本书在简要介绍金属学基本理论和材料学基础知识之后，重点讲解现代飞机和涡轮喷气式发动机常用的金属材料、有机高分子材料和复合材料的化学成分、相与组织结构、机械性能及其应用。内容简明扼要，由浅入深，努力追求航空材料学的主要理论密切联系飞机和发动机构造与修理工作的实际。甚至在一些重点章节中，以飞机、发动机的构造为主线，贯穿航空材料的应用；以主要结构材料为重点，讲清楚材料成分、结构对性能的影响；并着重讲解各种工艺对改善性能的作用，以加深学生对工艺技术和操作技能重要性的认识；并努力掌握好主要工艺的操作技能。

本书由西安航空职业技术学院白冰如、马康民、石鑫、杨帆组成了编写小组。马康民教授编写绪论以及第二、三、六、七章；白冰如高级工程师编写第一、四、五章；石鑫老师编写第八章；杨帆老师编写第九章。全书由白冰如、马康民审稿和校稿。

本书的编写得到了西安航空职业技术学院各级领导以及航空维修工程系和航空机电设备维修教研室领导和同志们的大力支持和积极协助，在此谨向他们深表感谢。由于编者水平有限，本书的不足之处在所难免，欢迎批评指正。

编 者

2012年4月29日

目 录

绪 论	/1
第一章 金属材料基础知识	/4
§ 1-1 金属材料生产过程简介	/4
§ 1-2 航空材料的技术标准	/6
§ 1-3 金属材料的机械性能	/8
习 题	/15
第二章 金属学基础知识	/16
§ 2-1 纯金属的晶体结构	/16
§ 2-2 纯金属的结晶	/20
§ 2-3 实际金属的晶体缺陷	/25
§ 2-4 合金的相结构	/31
§ 2-5 二元合金的匀晶相图	/35
§ 2-6 金属的塑性变形与再结晶	/41
习 题	/56
第三章 铁碳合金	/57
§ 3-1 Fe-Fe ₃ C 相图的碳钢部分	/57
§ 3-2 碳 钢	/65
§ 3-3 灰口铸铁	/70
习 题	/74
第四章 钢的热处理	/75
§ 4-1 钢在加热时的组织转变	/75
§ 4-2 钢在冷却时的组织转变	/81
§ 4-3 钢的退火和正火	/91
§ 4-4 淬 火	/97
§ 4-5 回 火	/104
§ 4-6 钢的化学热处理与表面淬火	/107

习 题	/115
第五章 合金钢	/116
§ 5-1 合金钢概述	/116
§ 5-2 合金结构钢	/122
§ 5-3 不锈钢	/133
习 题	/144
第六章 轻合金	/145
§ 6-1 铝合金	/145
§ 6-2 镁合金	/165
§ 6-3 钛合金	/169
习 题	/176
第七章 高温合金	/177
§ 7-1 高温合金的基础知识	/178
§ 7-2 航空发动机常用高温合金	/187
习 题	/195
第八章 高分子材料	/196
§ 8-1 橡胶材料	/196
§ 8-2 飞机座舱透明材料	/209
§ 8-3 航空涂料	/213
习 题	/219
第九章 飞机常用的复合材料	/220
§ 9-1 复合材料常用的原材料	/221
§ 9-2 复合材料的制造工艺	/225
§ 9-3 常用复合材料的性能与维护特点	/228
习 题	/228
附录 1 美国、英国、俄罗斯钢号表示法	/229
附录 2 中国铝合金制品的状态代号和美国 变形铝合金牌号及状态标记	/234

绪 论

众所周知,材料、能源、信息技术是现代文明的三大支柱。所谓材料,广而言之是指人类赖以生活和生产的物质,如水、空气、粮食、矿石、木材等。确切一点讲,通常人们将经过工业加工过的原料称为材料。

材料的种类很多,据统计已近 40 万种。常用的材料分类方法有:按用途分类法,按性能分类法,按化学成分分类法等。若按用途分类,材料常被分为建筑材料(水泥、玻璃、钢筋、沥青、石料等)、能源材料(煤、石油、天然气等)、生物材料(各种医药用品)、航空航天材料(钢铁、有色金属、橡胶、复合材料等)等。若按性能分类,常将以机械性能为使用性能的材料称为结构材料,如飞机蒙皮、起落架、航炮所用的金属材料都属于结构材料;而将以光、电、磁、热、声等性能为使用性能的材料称为功能材料,如半导体材料、磁铁、热电偶、光导纤维等。若按化学成分分类,又被分为金属材料(如钢铁、有色金属、贵金属等)、无机非金属材料(如陶瓷、耐火材料、水泥等)、有机高分子材料(如橡胶、塑料、涂料等)、复合材料(如玻璃钢、帘子布与橡胶复合材料的轮胎用材等)。

研究材料的成分、结构、性能及应用的学科,通常称为材料学,亦称材料科学。只需回顾一下史学家将人类社会分为石器时代、青铜时代、铁器时代等,就不难理解材料和材料学是人类社会发展的物资基础和巨大推动力。

航空材料是制造飞机(包括飞行器)、航空发动机及其附件、仪表及随机设备等所用材料的总称。通常它包括金属材料(结构钢、不锈钢、高温合金、有色金属及合金等)、有机高分子材料(橡胶、塑料、透明材料、涂料等)和复合材料。早期的飞机结构简单,所用的材料主要是木材、布和绳索等;20 世纪 30 年代,飞机逐渐发展成为全金属结构,动力装置则为活塞式发动机,所用的材料也只有钢铁、铝合金和镁合金等。

由于作战迫切需提高飞机的飞行速度,喷气式发动机应运而生。尽管喷气式发动机的原理早为人们所知,但这种发动机的制造成功,还是在耐热合金出现以后。

喷气式发动机完成了航空技术的一次飞跃——突破了“音障”。但随即又出现了“热障”问题。“热障”是当飞机超音速飞行时,飞机蒙皮表面附面层空气因摩擦而生成大量的热,使飞机蒙皮的温度急剧升高,当温度超过 250℃ 时,铝合金就不能用了。这样直到 20 世纪 40 年代末,出现钛合金以后,航空技术才又一次出现飞跃——突破了“热障”。

近几十年来,新型航空材料及先进工艺发展很快,如高强度铝合金、钛合金、高温合金、超高强度钢、复合材料、隐身材料及定向凝固叶片技术、定向共晶叶片技术、粉末高温合金涡轮盘制造技术等,为第三、第四代飞机的发展提供了物资基础。因此,航空发展

史证明,航空材料的每次重大突破,都会促进航空技术产生飞跃性的发展。

同材料学的其他分支一样,航空材料的发展也经历了由经验性认识发展到规律性认识,由宏观现象的测试发展到微观本质探讨的过程。它与许多专门学科互相渗透,形成了一门新的综合性学科——航空材料学。它包括金属物理、强度理论、高分子物理、高分子化学等基础知识;并研究材料的性能、结构及状态之间的关系;研究高性能的航空材料和先进工艺技术的综合应用;研究航空产品在使用中失效原因与材料本身的关系等。

《航空材料与应用》是根据西安航空职业技术学院 2007 年 10 月制定的中央财政支持项目建设方案中“航空材料学”课程教学大纲和航空维修工程系 2008 年教学改革方案的要求编写的。其目的主要是向学生传授航空材料学的基础知识、基本理论和主要研究方法,并紧密结合航空机电设备维修的专业实际,学习现代飞机和发动机的主要用材的成分、结构、组织、性能、工艺特点和应用。从而使使学生具有合理选材、正确使用航空材料的知识和能力,为学习后续课程及将来从事专业技术工作打好基础。为此,编写小组经过认真研究,并努力使这本教材具有以下特点:

其一,教材要做到紧密联系现代飞机和发动机用材的实际,突出应用特色。航空材料是制造飞机和发动机的物质基础,“航空材料学”是西安航空职业技术学院航空制造工程系和航空机电设备维修工程系学生的专业课。通过学习本门课程要使学生在今后学习和制造、维修航空机电装备时,能更好地理解装备的选材、正确地使用航空材料,合理地采用恰当的工艺,实施航空设备零部件的加工制造或修理。因此,只有使这本教材紧密联系我院专业教学改革的实际,找准本门课程在我院专业课程体系中的地位和作用,才能编写出结合装备实际,突出应用特色,具有较高水平的教材。编者正是在这一原则的指导下,认真学习我院有关在中央财政支持项目建设方案的总体要求下,落实搞好航空机电维修专业建设具体措施,编写出这本教材。并努力使教材做到紧密联系现代飞机和发动机用材的实际,突出应用特色。

其二,突出重点,将飞机和发动机有代表性的材料讲深讲透。飞机和发动机常用的合金钢、铝合金、钛合金、高温合金、有机高分子材料和复合材料是本门课程的主要内容,我们从这些材料中选择用量大的材料作为代表,紧密联系其在装备中的应用,从化学成分、组织结构、机械性能及工艺特点等方面讲深讲透;并通过这样的学习,使学生掌握学习和研究航空材料的一般方法;而对用量较少的材料,只作简单介绍,希望学员能用上述方法,触类旁通地自学并理解其他材料。对当前发展很快的高纯铝合金、先进钛合金和复合材料等方面的知识,与过去同类教材相比,无论从深度或广度方面都适当地增加了相应的内容,以满足学生今后继续发展的需要。

其三,适当地编写了自学内容,使教材知识面更宽,内容更新。由于本门课程学时较少,又要适应不同培养模式学生的要求,同时考虑到今后学生在机务工作中查找飞机和发动机零部件用材的需要,使教材具有一定的资料价值。因此,在这本教材中还编写了一部分自学内容。其中主要包括材料学的基本知识、现代飞机的主要用材、三代机采用的新材料、新工艺及航空材料发展前沿的一些内容。而将我国航空材料有关标准,美、俄的材料牌号、工艺代号等常用资料,作为附录列在书后,便于学生查找。

其四，与这本教材配套，我们还编写了实验指导书、习题集和教学课件。实验指导书规范了实验内容和实验方法；编写的习题集，便于学生复习；教学课件及相应的视听教材，有助于教学的进行。

由于航空材料学正在经历从经验型认识向规律性认识的发展过程，因此它是一门理论和实践并重的应用学科，所以内容很多，系统性比之其他学科而言，差别很大。加之学时有限，因此，在教学过程中老师和学生都要注意这一特点，注意用飞机和发动机构造这一主线贯穿航空材料的主要内容，使教与学都能更加生动，更加实用。这也是编者在本书中强调航空材料应用的初衷。由于水平有限，书中不足和欠妥之处在所难免，希望多提宝贵意见，以便再版时修订。

第一章

金属材料基础知识

金属材料,尤其是钢铁材料是现代工业的物质基础。钢铁材料、铝合金、钛合金又是航空材料的主要组成部分。本章主要学习金属材料生产的基础知识和金属材料的机械性能,为今后深入学习航空材料中的金属材料奠定基础。

§ 1-1 金属材料生产过程简介

本节简要介绍钢铁材料、铝合金和钛合金的生产过程;主要了解炼铁、炼钢、铸钢和轧钢等方面的基本知识,目的在于加深对金属材料品种、牌号和影响质量因素的认识。

一、炼铁简介

图 1-1-1 是炼铁高炉的示意图,从图中可见铁矿石、焦炭和熔剂从高炉顶部的料斗进入炉内,在高炉内部与由风嘴送入的空气发生燃烧反应,生成大量的 CO_2 , CO_2 又与焦炭反应生成 CO , CO 不断上升,在与矿石接触的过程中,夺取其中的氧,将铁还原出来。已经还原的铁在高炉中又会吸收部分的碳元素生成碳化铁 (Fe_3C),这样 Fe 和 Fe_3C 就形成合金,即生铁。通常将液态的生铁通过出铁口放入铸型中,就会得到铸铁锭,这种铸锭是炼钢的主要原料。

铁矿石是炼铁的主要原料,常见的铁矿石有磁铁矿、赤铁矿、褐铁矿和菱铁矿,它们的主要成分是 Fe_3O_4 、 Fe_2O_3 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 和 FeCO_3 。各种矿石的含铁量从 20% ~ 70% 不等,其中以菱铁矿含铁量最低,磁铁矿最高。

焦炭是炼铁的燃料,它是炼铁炉的热源,又是还原剂。

熔剂主要是石灰石,它能与铁矿石中的杂质在高温下生成液态炉渣;由于液态炉渣比铁水轻,所以漂浮在铁水之上;这样当打开炼铁炉的出渣口,就可以放出炉渣。

综上所述,炼铁炉中的主要化学反应过程是焦炭的燃烧、铁矿的还原、铁的增碳和造渣。需要指出的是,除了上述的主要反应外,还有耐火材料、铁矿石中的杂质元素也参与了化学反应,并最终影响到铸铁的质量。耐火材料用于制作炼铁炉的炉衬,常用的耐火材料是黏土砖 ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$),它呈中性,抗蚀性好,强度大,价格便宜。铁矿石中的杂质元素主要有硫、磷、硅、锰等,它们在炼铁过程中也会被还原出来,并进入生铁,从而影响生铁的质量。

二、炼钢简介

通常,人们讲到的钢就是指碳钢。它也是铁和碳的合金,只是其中碳和硫、磷、硅、

锰的含量要比生铁少得多；钢是用生铁冶炼成的。此处主要介绍底吹转炉炼钢法的基本知识。图 1-1-2 是炼钢转炉示意图。从图中可见，炼钢炉呈梨型，用钢板焊接而成，内部有耐火炉衬，装在可以旋转的支架上。

炼钢时，首先将炼钢炉侧倾一定角度，并从炉口注入液态生铁；然后将压缩空气从炉子底部的通气孔鼓入炉内，同时使炼钢炉转至垂直位置。由于空气穿过液态生铁时，其中的氧会与生铁中的杂质发生氧化反应生成炉渣，同时释放出大量的热量提高了炉温。因此，炼钢时不需要加入燃料。

炼钢常用底吹转炉外，还有侧吹转炉和顶吹转炉。侧吹转炉也是用空气中的氧作为氧化剂，它和底吹转炉一样都会给炉内带入大量的氮气。尽管氮不参与炼钢的化学反应，绝大部分都从炉口跑掉，但总会有极少量的氮留在钢中，结果导致钢的质量下降。因此，这两种方法炼的都是普通钢。

顶吹转炉是从炉顶吹入纯氧（98%~99%），因此炼出的钢质量好。

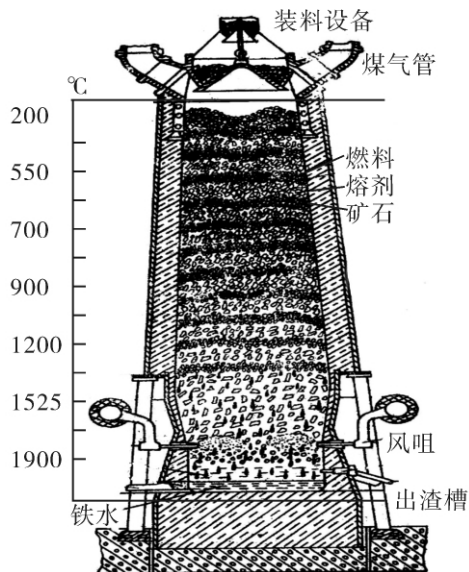


图 1-1-1 炼铁高炉的示意图

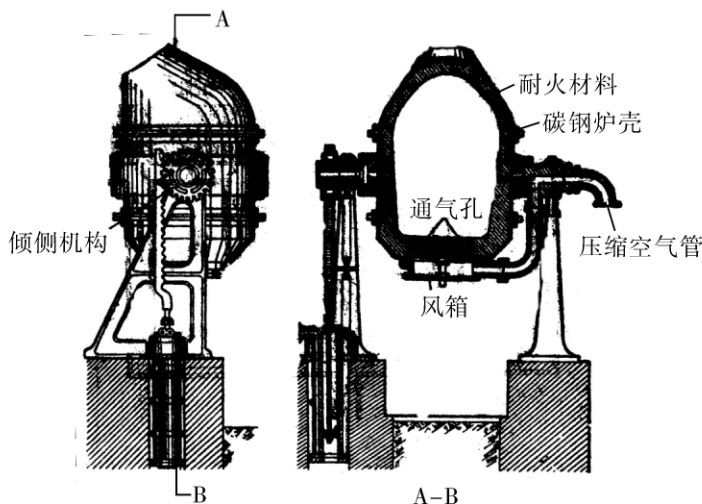


图 1-1-2 炼钢转炉示意图

转炉又根据采用的耐火材料性质不同，分为酸性转炉和碱性转炉。前者用的是酸性耐火材料硅砖（ SiO_2 ），并且在炼钢时无法除去其中的硫、磷，因此原料生铁中的硫、磷应该极少；后者用的是碱性耐火材料镁砖（ MgO ），且对原料生铁中的硫、磷含量没有严格要求。

炼钢的方法很多，除了转炉法以外，还有平炉法和电炉法。它们各有优缺点，此处从

略。

从炼钢炉放出的钢液除少量浇注成铸件外，大部分都浇注成铸锭。通常根据浇注时钢液脱氧程度的不同，又将钢分为沸腾钢、镇定钢和半镇定钢三种。

沸腾钢因钢液浇入锭模有沸腾现象而得名，它是脱氧不完全的钢。这种钢液中有一定量的氧化铁，当钢液进入锭模遇到碳时就会生成 CO，大量 CO 从钢液排出就会形成沸腾现象。在锭模内，由于钢液温度下降，粘度增大，部分 CO 不能排除，从而在铸锭内形成许多小气泡。导致钢的质量变差。这种钢只能用于轧制角钢、槽钢等一般型材。沸腾钢用的脱氧剂量少，价格又便宜，因此钢的冶炼成本低。

镇定钢脱氧完全，钢液浇注后很少排除气体，在铸模内钢液能安静凝固，铸锭质量好，因而优质碳素钢和合金钢都是镇定钢。由于这种钢采用大量高质量的脱氧剂，因此冶炼成本较高。

半镇定钢介于沸腾钢和镇定钢之间。

钢锭经过轧制就成为钢材。目前，钢材的种类已达数万种。常见的有板材、管材、型材和丝材四大类。板材又分为薄板和厚板，管材又分为无缝钢管和有缝钢管，型材品种很多，有圆钢、方钢、六角钢、工字钢、槽钢和角钢等。

三、铝合金与钛合金的冶炼简介

铝合金是重要的航空材料，它由铝和铜、镁、锰、锌等熔炼而成。此处主要介绍金属铝的生产知识。自然界含有铝的矿很多，而以铝土矿最有工业价值。因此目前工业上生产铝，首先是用铝土矿生产氧化铝，然后再把氧化铝置于电解槽中电解，液态的铝就会在阳极上析出，最后再将液态铝净化处理并铸成铝锭。

钛合金是一种新兴的航空金属材料，它由钛和铝、钒、钼、铌元素熔炼而成。钛主要以 TiO_2 的形式存在于地壳中，目前工业上用镁还原法制取海绵钛，然后用真空自耗电弧熔炼法生产钛锭。

§ 1 - 2 航空材料的技术标准

现代工业社会，产品都有一定的质量和规格。对产品的质量、品种、规格及其检验方法等作出的规定称之为技术标准。本节主要介绍航空材料技术标准的基本知识。

一、航空材料标准

航空材料有国家标准、部标准和企业标准三级。国家标准由国务院或主管国家标准的领导机关批准颁布，简称国标，用 GB 表示。如 GB—710—65 表示 1965 年国家颁发的序号为 710 的标准，它是优质碳素结构钢板的标准。

部标准由工业部颁发，如 YB 是冶金工业部的部标准代号。其编号和年份表示方法和国标相同。如 YB540—65 是冶金部 1965 年颁发的航空用合金结构钢板标准，序号 540。HB 是航空部的标准代号。

企业标准是在没有国标和部标的情况下，由企业根据使用要求制定的标准。通常用 Q 作字头。如 Q/BH 是本溪合金厂的企业标准，其中 Q 是企字汉语拼音第一个字母；BH 是本溪合金厂汉语拼音中的有关字母。

此处需要强调的是常用优质钢材的技术标准有一般工业技术标准和航空技术标准的区别。尽管在这两个标准中钢材的牌号相同，但质量标准不同。如 45 钢在一般工业标准中规定杂质硫、磷含量均不大于 0.04%，而在航空标准中规定硫、磷含量均不大于 0.035%，显然后者的质量好，价格高。所以，在采购、验收、保管及使用中要严格区别，不得将航空材料任意用作地面设备，更不能将供地面设备使用的材料用在飞机上。

航空材料标准在航空材料手册中可以查出；教材附录中列出俄罗斯、美国 and 英国金属材料的标准和牌号表示法供参考。

二、材料合格证

材料从工厂生产出来都带有质量证明书，这种证明书又称为合格证。合格证是材料重要的质量文件。表 1-1-1 是金属材料合格证的格式。从表可见它列出了材料的名称、牌号、规格、技术标准、交货状态、制造方法、电炉号、批号和机械性能、物理性能与化学成分等。下面主要介绍材料合格证的主要内容。

1. 技术条件

技术条件又称为技术标准，在合格证中技术条件栏内填写的是生产材料的技术标准代号。验收材料时应按技术标准核对合格证上的机械性能、化学成分等数据是否符合要求。

表 1-1-1 金属材料的合格证

领料 单位					制造 工厂						出厂日期				年	月	日
											填发日期				年	月	日
产品 名称	钢号、合金					规格尺寸 (mm)				批号	炉号	技术条件					
交货 状态	试片热处理 (℃)								制造方法			重量 (kg)					
	正火			淬火			回火										
机械 性能	抗拉强度 (MPa)			延伸率 (%)			抗剪强度 (MPa)		断面收缩率 (%)			冲击韧性 (MJm ⁻²)		硬度 (HB)			
化学 成分	碳 C	锰 Mn	硅 Si	硫 S	镍 Ni	铬 Cr	钨 W	钒 V	钼 Mo	铜 Cu	铁 Fe	铅 Pb	铝 Al	钛 Ti			
备考																	
库主任						填发人							校对入				

2. 交货状态和制造方法

材料在交货时,制造厂要根据其用途或使用单位的要求进行热处理。交货状态就是指材料在交货前经过何种热处理。

制造方法是指材料的制造工艺,如热轧、冷轧、冷拉或磨光、抛光等。例如通常供应的六角钢棒和钢丝是用冷拉或冷拔工艺生产的;厚钢板和圆钢棒是热轧的;薄钢板大多数是冷轧的。磨光是一种表面精度较高的加工方法,经过磨光的钢板表面非常光亮,通常称之为银亮钢。

由于交货状态和制造方法直接影响材料的机械性能,所以尽管材料的牌号和规格相同,只要交货状态和制造方法不同,材料的性能和用途就不一样。

3. 炉号和批号

金属材料冶炼时,每炼一炉,就编一个炉号。不同炉号的材料在化学成分、冶炼方法方面,允许在一定的范围内有差异。所以,飞机制造厂采购的材料尽管牌号、规格相同,但性能总会有一些不同。因此,对于金属材料每一炉(批)就有一个合格证。

4. 机械性能和化学成分

合格证中一般都写明材料的机械性能和化学成分。材料的机械性能是指强度极限、屈服极限、硬度、延伸率和断面收缩率等;化学成分是指材料的主要化学元素和杂质的含量。

材料的合格证是验收和发付材料的质量依据。因此在工厂,验收入库的材料必须有合格证;在发付材料时,必须同合格证一起发付。如果仓库零星发付材料,而材料的合格证只有一份,仓库就必须转抄一份,并随材料一起发付。合格证由仓库妥善保存,以备日后查考。

§ 1-3 金属材料的机械性能

金属材料的机械性能又称为力学性能,它是金属材料在外力作用下抵抗失效和损坏的能力。金属材料的机械性能指标是控制材料质量的重要指标,又是设计人员选择材料和设计零件的形状和尺寸的依据。本节主要介绍金属材料在常温下的机械性能和测试方法。

一、金属材料的强度和塑性

强度是金属材料抵抗变形和断裂的能力;塑性是其在外力作用下产生永久变形的能力。通常它们都是用拉伸试验测定的。

将金属材料按照标准要求做成试样,并用专门的试验机,在缓慢、均匀的单向静拉力作用下拉伸,使其从变形直到断裂,测定出材料的弹性、强度和塑性的方法,称为拉伸试验。

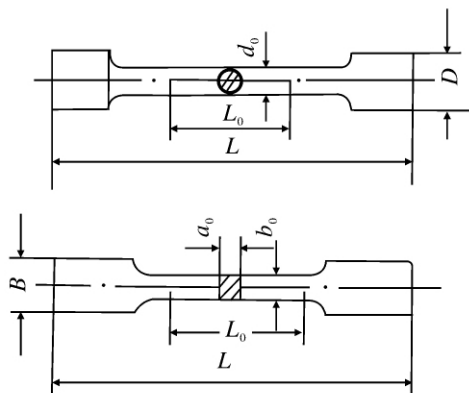


图 1-3-1 标准拉伸试样

图 1-3-1 是标准拉伸试样。从图中可见,常用的试样分为圆形截面和矩形截面两

种；前者用于棒材，后者用于板材。试样中间截面的均匀部分称为标距，用 L_0 表示； d_0 表示截面直径。国标 GB228—76 规定 $L_0/d_0 = 10$ 为长试样， $L_0/d_0 = 5$ 为短试样。

在拉伸试验中，将试样的载荷 P 和变形量 ΔL 之间的关系用曲线表示出来，通常称为拉伸曲线；图 1-3-2 是低碳钢拉伸曲线。

1. 强度指标

金属材料的强度指标常用的有弹性极限、屈服强度、抗拉强度和弹性模量。

(1) 弹性极限 在拉伸曲线上 Oe 段是直线，试样的变形量与外力成正比。当外力去除后，试样可以恢复到原来尺寸。所以这个阶段的变形称为弹性变形。

载荷 P_e 是弹性变形时的最大载荷，此时试样承受的应力 σ_e 即为材料的弹性极限。它的计算式如下：

$$\sigma_e = P_e / F_0 \quad (1-3-1)$$

式中 F_0 是试样的截面积。

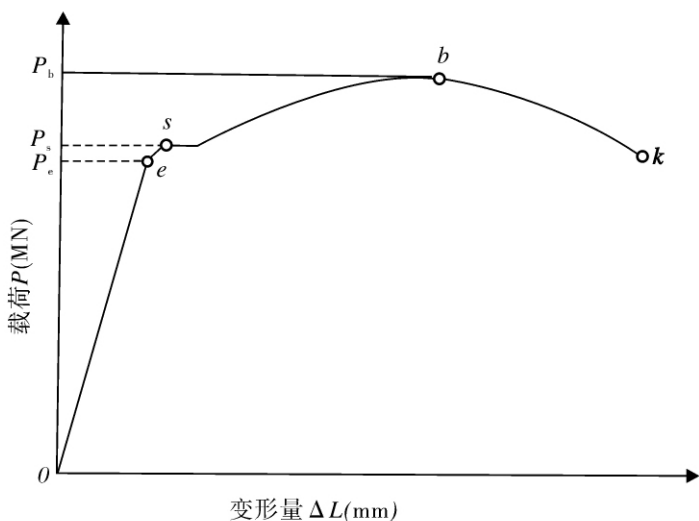


图 1-3-2 低碳钢的拉伸曲线

(2) 屈服极限 在拉伸试验中，当外加载荷增加到 P_s 时，拉伸曲线出现平台，此时尽管载荷不再增大，而试样却继续伸长，这种现象称为材料的屈服。材料屈服时试样承受的最小应力 σ_s 称为屈服极限，亦称为屈服强度。屈服极限用下式计算：

$$\sigma_s = P_s / F_0 \quad (1-3-2)$$

工程使用的大多数金属材料，如合金钢、铝合金在拉伸曲线上无明显的屈服平台，即材料无明显的屈服现象。因此，工程技术上将产生一定量塑性变形的应力，定为屈服极限。国标中规定，试样塑性变形量为标距长度的 0.2% 时，对应的应力称为“规定屈服极限”，并用 $\sigma_{0.2}$ 表示。

由于大多数零件工作时都处在弹性变形状态，不允许有明显的塑性变形，因此，屈服极限常常是设计零件和选择材料的依据。

(3) 强度极限 在拉伸试验中，当试样承受的应力超过屈服极限后，由于塑性变形引

起材料强化, 所以随着载荷的增大, 试样标距的长度均匀地增加; 当载荷达到 P_b 时, 试样开始出现“缩颈”, 此后试样的塑性变形集中在“缩颈”部位。随着试验继续进行, 最后从“缩颈”部位断裂。通常将拉伸试验中试样承受的最大拉应力 σ_b 称为材料的强度极限。并用下式计算:

$$\sigma_b = P_b / F_0 \quad (1-3-3)$$

材料的强度极限测定比较方便, 测得的数据也比较精确, 所以, 设计零件时也可以用 σ_b 为依据, 但必须采用较大的安全系数。

(4) 弹性模量 在拉伸试验中, 材料在弹性变形范围内的应力 (σ) 和应变 (ε) 的比称为弹性模量 (E)。材料的弹性模量愈大, 它就愈难产生弹性变形。

2. 塑性指标

金属材料的塑性指标是延伸率和断面收缩率, 它们也是用拉伸试验测得的。

(1) 延伸率 在拉伸试验中, 将拉断试样的标距与原标距的百分比称为材料的延伸率, 并用 δ 表示。

$$\delta = \Delta L / L_0 = (L_1 - L_0) / L_0 \quad (1-3-4)$$

式中 L_0 是试样原来标距的长度; L_1 是试样拉断后标距的长度。必须指出 δ_{10} 表示长试样测得的延伸率, δ_5 表示短试样测得的延伸率。用同一种材料制成长、短两种试样, 所测得的延伸率数值不同。

(2) 断面收缩率 在拉伸试验中, 将拉断试样的横截面积减小量与原横截面积的百分比称为材料的断面收缩率, 并用 ψ 表示。

$$\psi = (F_0 - F_1) / F_0 \quad (1-3-5)$$

式中 F_0 是试样原来的横截面积; F_1 是试样拉断后的横截面积。断面收缩率的数值不受试样长短的影响, 它能较好地反映材料塑性的大小。

金属材料的延伸率和断面收缩率数值愈大, 它的塑性就愈好。塑性好的材料适于锻造、冲压和轧制。如飞机的蒙皮、喷气发动机的火焰筒都是冷压成型的, 所用的材料都有良好的塑性。

二、金属材料的硬度

硬度是金属材料表层局部抵抗塑性变形的能力, 它的数值用硬度试验机测定。工厂常用的硬度试验机有布氏硬度计和洛氏硬度计, 它们都是用压入法测量材料硬度的。

压入法是将硬质材料制成压头, 并用一定载荷将压头压入材料表层, 得到一个压坑。再用压坑单位面积承受的应力或压坑的深度表示硬度数值。

1. 布氏硬度 (HB)

金属材料的布氏硬度值用布氏硬度计测量。其测量原理是布氏硬度计上的钢球在一定

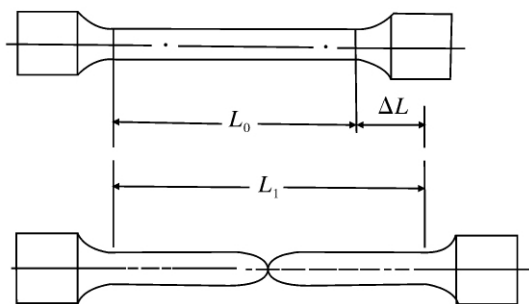


图 1-3-3 拉伸试样断裂前后的标距

载荷作用下，压入试样表面，形成压坑；用放大镜测量出压坑的直径，就可以用下式求得布氏硬度值，图 1-3-4 是测量布氏硬度的示意图。

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

(1-3-6)

$$HB = P/F = 0.102 \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

(1-3-7)

式中 P 是载荷值，单位 kgf (1-3-6)，或单位 N (1-3-7)； F 是压痕面积； D 是钢球的直径， d 是压痕的直径，单位是 mm。工厂在测量试件的布氏硬度时，已经不用公式计算了，因为钢球直径已知，施加的载荷已知，只要测得压坑的直径，对照专用表格，立刻可以查得布氏硬度值。

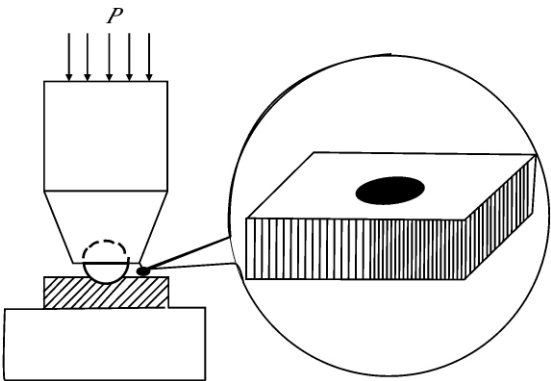


图 1-3-4 测量布氏硬度的示意图

由于金属材料的种类不同，工件的厚度各异，为了适应不同的需要，布氏硬度计的钢球直径 D mm 有 2.5、5、10 三种；载荷 P 有 15.6、62.5、187.5 等 7 种。GB 规定载荷 P 分别等于 $30D^2$ 、 $10D^2$ 和 $2.5D^2$ 。因此，在已知 P 、 D 和 d 的条件下，用压痕直径和布氏硬度对照表很容易查得试件的硬度值。如 120HBS10/1000/30 表示 $D = 10$ mm， $P = 1000$ kgf，保持 30 秒测得的布氏硬度为 120。其中 S 表示压球为淬火钢球。当压球为硬质合金球时，布氏硬度用 HBW 表示。

表 1-3-1 列出了布氏硬度试验规范（举例），表 1-3-2 是压痕直径和布氏硬度对照表（举例）。

表 1-3-1 布氏硬度试验规范（举例）

金属种类	布氏硬度范围 HBS	试件厚度 (mm)	载荷 P (kgf)	钢球直径 D (mm)	P 与 D 的关系	载荷保持时间 (s)
黑色金属	140~450	6~3	3000	10.0	$P = 30 D^2$	10
有色金属	36~130	9~3	1000	10.0	$P = 10 D^2$	30

表 1-3-2 压痕直径和布氏硬度对照表（举例）

压痕直径 d_{10} (mm)	载荷 P (kgf)			压痕直径 d_{10} (mm)	载荷 P (kgf)		
	$30 D^2$	$10 D^2$	$2.5 D^2$		$30 D^2$	$10 D^2$	$2.5 D^2$
3.00	415	138	34.6	4.00	229	76.3	19.1
3.26	350	117	29.2	4.26	200	66.8	16.7
3.50	302	101	25.2	4.50	179	59.5	14.9
3.76	260	86.6	21.5	4.76	158	52.8	13.2

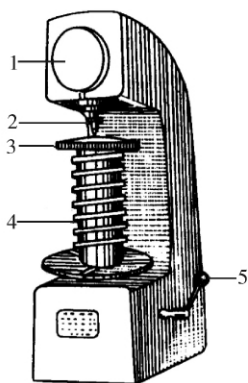
布氏硬度计多用于测量铸件、锻件等毛坯的硬度。由于压痕较大，不宜测量成品件的硬度。

2. 洛氏硬度

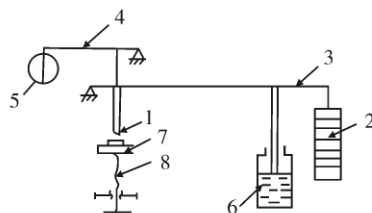
将金刚石圆锥或钢球，用一定的载荷压入试样表面，根据压痕深度确定材料的硬度称为洛氏硬度。表 1-3-3 是洛氏硬度的试验规范和应用范围。从表中可见，不同的材料由于硬度不同，选用的压头和载荷大小也不同。图 1-3-5 (a) 是洛氏硬度计示意图，从图中可见，将试样放在载物台上，用手顺时针转动手轮，使试样与压头慢慢接触，直到读数百分表的小针指到红点为止，见图 1-3-5 (c)。转动表盘，使表的长针对准表的 0 点；用手推手柄 5，加主载荷，并保留 10 秒钟。然后拉回手柄，卸除主载荷。表上长针指出了材料的硬度值。从表 1-3-2 可见，三种洛氏硬度用的压头和载荷各不相同，表盘中长针指出的数值也不相同；HRA 和 HRC 读表外圈的数值，HRB 读表内圈的数值。图 1-3-5 (b) 是洛氏硬度计加载原理图，请同学们自己分析加载过程。

表 1-3-3 洛氏硬度计常用试验规范

符号	压头	总载荷 (kg)	表盘刻线颜色	硬度范围	应用举例
HRA	金刚石圆锥	60	黑线	70 ~ 85	硬质合金、表面硬化工件。
HRB	钢球	100	红线	20 ~ 67	退火钢、铜合金等。
HRC	金刚石圆锥	150	黑线	40 ~ 77	淬火钢、调质钢等。



(a) 洛氏硬度计外形



(b) 洛氏硬度计机构图

1-读数百分表；2-压头；3-载物台；
4-升降丝杠；5-加载手柄。

1-压头；2-载荷砝码；3-主杠杆；4-测量杠杆；
5-表盘；6-缓冲装置；7-载物台；8-升降丝杠。



(c) 洛氏硬度计表盘

图 1-3-5 洛氏硬度计

三、金属的韧性

韧性是金属在外力作用下断裂时吸收能量大小的能力，它常用冲击韧性和断裂韧性表示。

1. 冲击韧性

冲击韧性是金属在冲击载荷作用下抵抗变形和断裂的能力，它用冲击试验测定。图 1-3-6 是冲击试验的示意图，从图中可见，一定高度 H 的摆锤，将试样冲断后升到 h 高度处，摆锤的势能差与试样断裂处的横截面积的比值，就是金属的冲击韧性，并用 a_k 表示。冲击韧性的数值用下式计算：

$$a_k = G(H - h) / F \quad (1-3-8)$$

式中 G 是摆锤的重量， H 和 h 分别是摆锤冲击试验前后的高度， F 是冲击试样缺口处的横截面积， a_k 是冲击韧性值。通常摆锤在冲断试样时消耗的能量可以从试验机的表盘上直接读出，单位 MJm^{-2} 。

飞机制造厂的经验表明， a_k 值对于材料的内部缺陷、显微组织的变化十分敏感，并且测量简单，因此工厂常用冲击试验检验材料的质量，如钢材的夹杂物、淬火过热和回火脆性对材料性能的影响等。

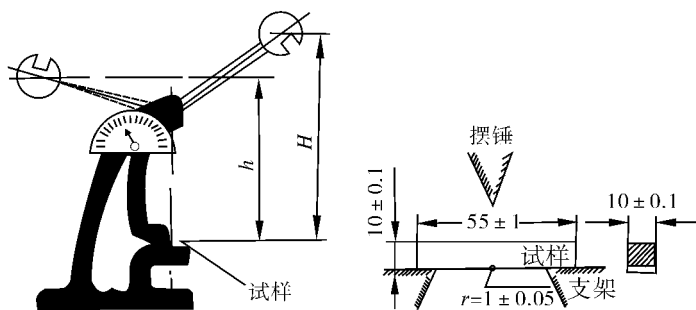


图 1-3-6 冲击试验与试样示意图

2. 断裂韧性

材料抵抗裂纹扩展的能力称为断裂韧性，它用 K_{IC} 表示。金属材料的断裂韧性数值用专用试样，在万能试验机上测得。下图是测定断裂韧性的三点弯曲试样的示意图。试样磨削后切除机械缺口，并在疲劳试验机上预制裂纹。然后在万能试验机上用三点弯曲法测得 K_{IC} 的数值。

断裂韧性 K_{IC} 值愈大，表明材料抵抗裂纹扩展的能力愈强，裂纹的扩展速度就愈小。因为大型工程构件的材料上不可避免存在着夹杂物、气孔等冶金缺陷；或在机械加工中、或在使用中不可避免会出现缺陷，这些缺陷破坏了材料的连续性，成为材料中的裂纹。当构件在使用过程中受到应力作用时，尽管应力很小，也会引起脆性断裂，工程上称之为低应力脆断。因此， K_{IC} 是预防低应力脆断的重要设计指标。