

高等学校试用教材

金属材料及热处理

陆大练 许晋堃 合编

人民铁道出版社

高等学校试用教材

金属材料及热处理

陆大紘 许晋堃 合编

人民铁道出版社

1979年·北京

内 容 提 要

书中较详细地叙述了金属材料的性能与分类；纯铁组织和性能，铁与碳的相互关系；冶金质量对钢性能的影响；钢的热处理及热处理技术的新发展；各种合金钢、铸铁、有色金属性能等。另外还对实际工作中如何选用金属材料 and 热处理工艺、机车车辆典型材料及热处理等进行比较完整的阐述。书后还附有热处理加热炉、国外钢号编号方法和国内外钢号对照表。

可供大专院校机车车辆专业教学用，亦可供有关厂段工程技术人员学习参考。

高等学校试用教材 金属材料及热处理

陆大紘 许晋堃 合编

人民铁道出版社出版

责任编辑 杨宾华

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

人民铁道出版社印刷厂印

开本：787×1092 $\frac{1}{16}$ 印张：13.375 字数：320 千

1979年2月第1版 1979年2月第1次印刷

印数：0001—78,000册

统一书号：15043·5115 定价：1.30元

前 言

本书从机车车辆专业的实际需要出发,比较系统地分类介绍常用的金属材料的成分、组织与性能特点以及有关的热处理工艺。为使读者能够从理论上掌握金属材料的组织与性能的内在联系,本书对一些基本的理论概念,如铁碳合金状态图、钢的等温转变曲线、钢的合金化原理、铸铁石墨化原理等作了简要的阐述。同时尽量结合内燃机车、电力机车与车辆零部件,介绍有关金属材料与热处理的实际资料。本书还介绍了选用金属材料与热处理工艺的一般原则和零件失效的原因分析,使读者能应用所学知识掌握分析和解决实际生产问题的基本方法。为了赶超世界先进水平,本书对新材料、新工艺也作了某些介绍。

本书是由西南交通大学机械系金属工学教研组许晋堃及陆大紘两同志共同执笔。在编写过程中,编写提纲曾由组内有关教师一起讨论。有关生产实际资料曾得到资阳内燃机车厂、成都机车厂、田心机车厂、大连机车车辆厂、戚墅堰机车车辆厂、沈阳机车车辆厂、浦镇车辆厂、武昌车辆厂、长春客车厂、长春机车厂、哈尔滨车辆厂、唐山机车车辆厂、二七机车车辆厂、天津机车车辆机械工厂、南口机车车辆机械工厂以及戚墅堰工艺研究所的大力支持与热情帮助,特此致谢。

由于我们水平有限,经验不多,书中一定会有不少缺点与错误,热忱希望读者提出宝贵意见,以便改进。

编者

1978年1月

目 录

绪 论

第一章 金属材料的性能与分类牌号	3
第一节 金属材料在机车车辆上的应用	3
第二节 金属材料的机械性能	5
第三节 金属材料的物理、化学性能与其他使用性能	11
第四节 金属材料的工艺性能	13
第五节 金属材料的分类及牌号	14
第二章 碳钢	19
第一节 纯铁的组织 and 性能	19
第二节 铁与碳的相互关系和碳钢的基本组织	21
第三节 铁—渗碳体系合金状态图	24
第四节 碳钢的组织对性能的影响	30
第五节 冶金质量对钢性能的影响	31
第六节 铸 钢	35
第七节 加工变形对钢性能的影响	36
第八节 各种碳钢的特点与应用	40
第三章 钢的热处理	46
第一节 概 述	46
第二节 钢在加热时的组织变化	46
第三节 钢在冷却时的组织变化	50
第四节 钢的退火与正火	57
第五节 钢的淬火	60
第六节 钢的回火	70
第七节 钢的表面热处理	73
第八节 钢的化学热处理	76
第九节 热处理技术的新发展	81
第十节 热处理工艺分析	84
第四章 合金钢	87
第一节 概 述	87
第二节 合金元素在钢中的作用	88
第三节 普通低合金钢	93
第四节 合金渗碳钢	94
第五节 合金调质钢	97
第六节 合金弹簧钢	101

第七节 滚珠轴承钢	102
第八节 合金工具钢	104
第九节 不锈钢	110
第十节 耐热钢及耐热合金	113
第十一节 其他特殊性能钢	117
第五章 铸 铁	120
第一节 白口铸铁的组织 and 性能	120
第二节 铸铁的石墨化	122
第三节 灰口铸铁	124
第四节 孕育铸铁	127
第五节 可锻铸铁	128
第六节 球墨铸铁	130
第七节 合金铸铁	132
第八节 铸铁热处理	135
第六章 有色金属	138
第一节 铝及其合金	138
第二节 铜及其合金	145
第三节 轴承合金	148
第四节 粉末冶金	152
第七章 机械零件的金属材料及热处理工艺的选用	154
第一节 零件的失效分析	154
第二节 选择金属材料及热处理工艺的依据	156
第三节 机械零件选择金属材料与热处理工艺的原则与方法	158
第四节 热处理技术条件的标注	161
第五节 零件设计、工艺过程安排与热处理质量间的关系	163
第八章 机车车辆典型零件材料及热处理	167
第一节 铁路用金属材料概述	167
第二节 机车车辆专业用钢	168
第三节 内燃机车典型零件的材料与热处理	171
附录1. 热处理用加热炉	184
附录2. 硬度的换算与对照	188
附录3. 结构钢按坯料截面与屈服极限选用钢种参考表	192
附录4. 国外钢号编号方法简介	193
附录5. 国内外钢号对照表	194
附录6. 几种国产内燃机车柴油机主要零部件材料对比表	198

绪 论

毛主席说：“一个粮食，一个钢铁。有了这两个东西就什么都好办了。”这深刻地说明了金属材料对社会主义建设的重要性。现代工业、农业、交通运输、国防与科学技术都需要使用大批金属材料。铁道运输业使用的金属材料在整个国民经济中占有相当大的比重。每修一公里铁路，仅钢轨就要一百多吨。无论那一类型机车，绝大部分零部件都是金属的。一台国产东风型内燃机车重126吨，其中钢占95.5%，铸铁占2%，有色金属占2.5%；一台国产韶山型电力机车要消耗金属材料132吨，其中钢占90%，铸铁占7.7%，有色金属占2.3%。即使是客车或货车也要消耗大量金属材料。一辆设计重量为50吨的客车，消耗的金属材料就达47吨多，其中钢占96.5%。为了多快好省地把我国建设成为一个伟大的社会主义的现代化强国，不仅要生产更多更好的钢铁和有色金属，而且要求每一个社会主义建设者更有效地使用金属材料，充分发挥每一寸钢材、每一个零件的潜力。对于机车、车辆工人与技术人员，学习与理解金属材料的知识就是为了更好地、更有效地使用金属材料，为铁路运输事业服务。

我国劳动人民是世界上最早掌握青铜与钢铁的冶炼与加工技术，最早利用热处理改善钢的性能的民族之一。早在三千年前的商代已能炼铜，铸造出重875公斤饰纹优美的大鼎。到二千多年前的周、秦，不但能冶铁、铸剑，而且开始使用淬火热处理来提高刀剑性能。明朝宋应星所著《天工开物》一书就记载了古代的渗碳热处理等工艺。这说明，早在欧洲工业革命之前，我国在金属材料与热处理方面已有了较高的技术成就。只是由于封建社会制度的压迫以及帝国主义的侵略，近一百多年来我国的生产技术才长期停滞下来。解放以后，在毛主席与党中央的领导下，我国工业与科学技术得到了迅速发展，用二十八年的时间走过了许多资本主义国家用半个多世纪走过的道路。金属材料的生产与热处理工艺也有了巨大的进展，改变了原有的落后面貌。我国已经制定了各种材料的国家标准，建立了符合我国资源条件的比较完整的合金钢系统。我国工人阶级发扬“独立自主，自力更生”精神，已经改变了过去合金钢中照抄外国的、镍铬钢占68.2%、自给率很低的落后状态，文化大革命以来到1969年试制了150多种新钢种，普通低合金钢产量猛增22倍，其中许多新产品的性能达到和超过世界先进水平。我国试制的70种无镍铬新钢种，其性能已达到或超过原来的镍铬钢。我国的热处理行业随着现代机械制造业的建设与发展已经相应配套，有了比较完整与先进的热处理设备，有不少地区与工厂采用了可控气氛热处理、真空热处理、辉光离子氮化等新工艺。在我国走自己工业发展的道路上，我们已经初步具备在二十世纪末实现四个现代化的一定的物质基础。

我国的铁道运输业为了适应四个现代化的要求正在向牵引动力内燃化和电气化的方向发展。随着内燃机车和电力机车的增多以及运行速度的提高，机车、车辆工业采用的金属材料不仅比过去品种与数量增加，而且对材料的性能质量也大大提高。铁路应用优质钢、合金钢日益增多，热处理工艺的应用也日益广泛。新型内燃机车和电力机车不少零部件采用了比较先进的热处理新工艺，这就要求机车、车辆工人和技术人员对金属材料的性能特点以及各种热处理工艺具有比较系统的知识，以适应形势发展的要求。

在机车、车辆的设计和制造中，如何合理地选用金属材料，使之既满足各种性能的要求，又能使生产过程经济合理，本来是一个复杂的任务。它需要对零、部件的受力情况、工作条件、结构形状以及制造过程中的冷、热加工工艺和生产成本作全面的辩证的分析。所以，除了要求各专业工艺人员共同协作外，机车、车辆专业的工人和技术人员应当在掌握材料性能和工艺的基本理论知识的基础上，善于总结实践经验，逐步掌握和提高选用材料的能力。在选材中必须批判那种不结合我国资源情况，盲目搬用外国资料，不分析、不总结的教条主义的态度，也要防止安于现状、无所作为、不求前进的保守思想。

在机车车辆的检修运用过程中，为了正确维护机械设备，延长使用寿命，也应了解零、部件所用材料的性能特点。当机械发生故障时，还应根据零、部件失效或破坏情况，分析原因，判断其是属于选材不当、材质不良、加工或热处理不当，还是设计结构方面或组装和操作运用方面的问题。据此，机车、车辆专业人员也可以提出改进意见。至于零、部件的修复或新制更涉及选用材料或代用材料以及加工、热处理等问题。总之，无论机车、车辆的设计制造，还是检修运用都涉及金属材料及热处理，故要求我们对金属材料及热处理有比较全面和系统的知识。

金属材料品种繁多，性能各异，而且通过加工，特别是热处理以后，性能变化很大，要掌握各种材料的性能特点，一定要了解金属材料内部矛盾运动的规律性。而金属材料及热处理这个学科就是研究金属材料的成分，内部组织与性能之间的关系以及运用热处理来改变组织，从而改善性能的规律性知识的。本书根据金属材料的类别、按照金属内部的规律性、结合机车、车辆零、部件分别介绍各类材料的成分、内部组织与性能特点，同时把一些基本理论结合进行阐述。对于机车、车辆上使用较多的材料还有专门章节加以介绍。

为了能够运用对于客观规律性的认识，去能动地改造世界，本书的目的不仅要介绍机车、车辆上使用的各种金属材料的性能特点与应用范围以及热处理工艺，而且要帮助读者根据零部件的工作条件与受力情况，初步懂得选用金属材料 and 考虑热处理方式的基本方法。

第一章 金属材料的性能与分类牌号

各种机械大部分是由各种金属材料制成的，其中主要是各种钢铁材料。金属材料为什么要有数以千计的繁多品种？它们具备哪些性能才能满足各种机械零件的使用要求？为了解决这些问题，掌握金属材料的规律性的知识，我们首先应从内燃机车和其他机车车辆零部件使用材料情况着手进行分析，然后进一步了解对于金属材料的性能要求。

第一节 金属材料在机车车辆上的应用

铁路使用着大量金属材料，如钢轨、钢桥等，而机车、车辆则满载着客、货，日夜奔驰，使用的金属材料数量既多，要求也高。例如，内燃机车是一种大型的、综合性的运输动力机械，它的发动机（柴油机）、传动装置（液力传动箱或牵引电机、电器）、车体、车架、转向架与各种辅助装置，包含着二万多个零、部件，采用着一百几十种牌号的不同尺寸型号的钢铁与有色金属材料。不同零、部件的工作条件与受力情况不同，其所用材料也不同。现以国产内燃机车为例，说明其材料使用简况。

柴油机是内燃机车的动力来源，柴油机气缸经受高温、高压燃气的作用以及燃烧产物的化学腐蚀作用，并在润滑条件较差的情况下与活塞环相摩擦，因此要求缸套材料能承受气体的高压力，并有一定的耐热性、耐磨性与抗腐性，有较小的摩擦系数以减少功率消耗。针对这种要求，缸套采用了含有铬、钼、铜或含有钒、钛的合金铸铁。而在气缸内受燃气推动作往复运动的活塞，中速的（如东风型内燃机车）现用合金铸铁，高速的（如东方红型、东风4型内燃机车）则采用铝合金。

与活塞相连的连杆在工作时受到气缸中气体压力的周期性冲击，受力很大，因此要求连杆在受力很大并不断遭冲击的条件下不致破坏或变形，即应有较高的强度、刚度与韧性，所以连杆采用中碳合金结构钢，如中碳铬钒钢或中碳铬钼钢等。

柴油机曲轴承受着各个气缸发出的交变冲击载荷，所以要求有高的强度与韧性，轴颈耐磨性好。东风型内燃机车柴油机曲轴是用合金球墨铸铁制造的，东方红型内燃机车曲轴则用中碳合金结构钢制造。

柴油机上有些零、部件的工作条件比较特殊，因此对性能有特殊要求，如联轴器钢片要求有高的抗腐性与机械性能，所以采用镀铬不锈钢；东风型内燃机车水泵轴也要有高的抗腐性与机械性能，所以采用铬不锈钢；精密偶件针阀套与针阀要有极高的硬度与耐磨性，尺寸要稳定，因此分别采用滚珠轴承钢与高速工具钢；12V180型柴油机的气缸头预燃室喷嘴及进、排气阀要在高温下工作，要求有较高的高温强度、耐热性和抗腐性，因此用耐热钢来制造；柴油机上很多轴承要承受一定的压力，还要有较高的耐磨性与减磨性，因此采用青铜或高锡铝合金来制造。

内燃机车与电力机车的传动装置中很多传递动力，改变速度的齿轮要用各种强度高、韧性好并且耐磨的合金钢来制造，而牵引电机与电器设备则用某些具有特殊性能的钢材（如磁

钢)和铜、铝、钢和铸铁等来制造。

机车、车辆的车体、车架和转向架上承受较重载荷,经受冲击与振动的零件主要是用具有一定强度与较好塑性、韧性的钢材(如普通碳素结构钢或低合金钢)作为结构材料制成的。一台内燃机车消耗的普通碳素钢约35吨左右;一台客车要消耗普通碳素钢26吨以上;而车轴、车轮则要用优质碳素结构钢来制造;不少部件上的弹簧要用合金弹簧钢来制造。

综上所述,机车、车辆的零、部件由于其工作条件与受力情况或所起作用的不同,采用着不同的材料。不仅如此,不同车型的同一种零件,虽则工作条件大体相似,但由于功率、转速或具体受力情况不同,也要采用不同材料。例如齿轮,其所用材料有铸铁、普通碳钢、优质碳钢、甚至用合金钢。以内燃机车上较重要的齿轮来说,东风型内燃机车就用了三种优质碳钢与六种合金钢来制造;东方红型内燃机车对齿轮材料作了简统化,用了一种优质碳钢和三种合金钢。由此可见,一种零件的选用材料可以有多种方案,而为了生产上的方便,又可以适当简统化。这里,应当指出,生产实践中因素复杂,不像经过简化的数学问题,一个式子只能得出一个答案,而往往存在多种方案,各有利弊。因此常要求我们分析矛盾,权衡主次,从实际出发,根据具体条件选用某一方案。

目前,在内燃机车与其他机车车辆上选用金属材料方面还存在不少问题,这些问题是我国铁路牵引动力革命中产生的新问题,也是推动铁路生产技术不断前进的有力因素。这些问题大体包括:

1. 某些零、部件使用寿命较短,如活塞环、缸套等,其原因既有材料成分与金相组织方面的,也有加工工艺与结构设计方面的;又如原用巴氏合金轴瓦性能不理想,寿命短,经改用高锡铝合金作轴瓦后,寿命大大延长,运用情况较好,这说明主要问题在选材。

2. 某些零、部件性能不良,有时甚至造成事故,如东风型内燃机车10L207柴油机铸铁活塞运用一段时间后往往出现裂纹;东方红型内燃机车12V180柴油机预燃室喷嘴耐热性不良,容易损坏等。这些问题中,选材不够理想占的比重较大,设计或工艺不够完善也有一定关系。

3. 由于我国内燃机车的设计制造,开始是从国外引进了一些机型,不少材料沿用了国外的标准,有些材料是我国资源比较短缺的,有些材料选用不尽合理,例如,东风型内燃机车早期每台耗用合金钢26种6413公斤,其中铬钢与镍铬钢共5191公斤,占80%以上,而我国镍铬均比较短缺。根据自力更生的精神,经过十多年的努力,目前内燃机车上镍铬钢与铬钢的比重已大大减少,但这方面的工作还落后于国内的先进行业,如何更多地利用我国资源丰富的元素所配制的合金钢或合金铸铁还有待继续努力。

4. 我国各机车工厂根据“自力更生”“奋发图强”的精神,为生产不同型号的内燃机车作出了各自的贡献,但不少零、部件使用的材料各不相同,增加了配件生产与检修工作的麻烦。零、部件使用材料的简统化还有待解决。

5. 在机车车体、转向架与车辆使用金属材料方面,我国已有了比较成熟的经验,选材与加工工艺均基本定型。但随着运行速度的提高以及减轻自重的要求,今后在采用新材料上仍有不少工作要做。除了在思想上要敢于革新、勇攀高峰,努力向科学技术现代化进军外,在工作上还要进一步摸清新材料的性能特点,并努力促使新材料生产的品种与规格能与铁路的需要紧密对接口。

应当说明,电力机车与车辆在采用金属材料的品种上比内燃机车为少,但电力机车具有功率更大,速度更高的特点,车辆则类型繁多,生产批量较大,因此对金属材料的选用与加

工处理各有其特殊性。

为了使材料选用更加合理与先进，所以要提倡为革命钻研技术，向先进单位学习，努力赶超世界先进水平。对于国外科学技术的先进成就，我们也要虚心学习，做到洋为中用。我们一定要根据我国的资源条件，充分利用与发挥我国的材料潜力，努力创造与使用适合我国特点的新材料、新工艺。

第二节 金属材料的机械性能

为了更好地使用金属，我们首先要弄清金属有哪些性质，怎样来表明这些性质，这些性质受那些因素的影响，它们对生产又有什么关系。

金属材料的性能可以大致分为两类：一类叫使用性能，反映金属材料在使用过程中表现出来的特点；另一类叫工艺性能（如铸造性能、切削性能），反映金属材料在制造加工过程中的各种特性。使用性能又可分为机械性能（或称力学性能），物理性能，化学性能等，使用性能决定了材料的应用范围，安全可靠性与使用寿命。

由于金属零件在使用时绝大部分是承受力的，因此金属材料在受力时的性质，即机械性能，要着重介绍，而它们对物理或化学现象的反应，叫做物理或化学性能，将在下一节简要介绍。

零件在使用过程中受力（载荷）超过某一限度时就会发生变形，甚至断裂失效。金属抵抗外力作用的性能就是机械性能。生产实践中，机械性能常作为选用材料的主要依据。常用的机械性能有强度、塑性、硬度、冲击韧性、疲劳强度等。

一、强度和塑性

金属的强度由于承受的载荷不同而分为拉伸、压缩、扭转、弯曲、剪切等几种。各种强度间是有一定联系的。我们常以拉伸强度作为最基本的强度值。手册与规范上所标出的材料强度一般都是指拉伸强度。

拉伸强度由拉伸试验测出。在拉伸试验中，试样两端加一缓慢增加的拉伸载荷，观察加载中产生的弹性和塑性变形，直至试样拉断为止。用低碳钢作拉伸试验测出的拉力——伸长曲线或应力——应变曲线（简称拉伸图）以及所用标准试样形状如图 1—1 及图 1—2 所示

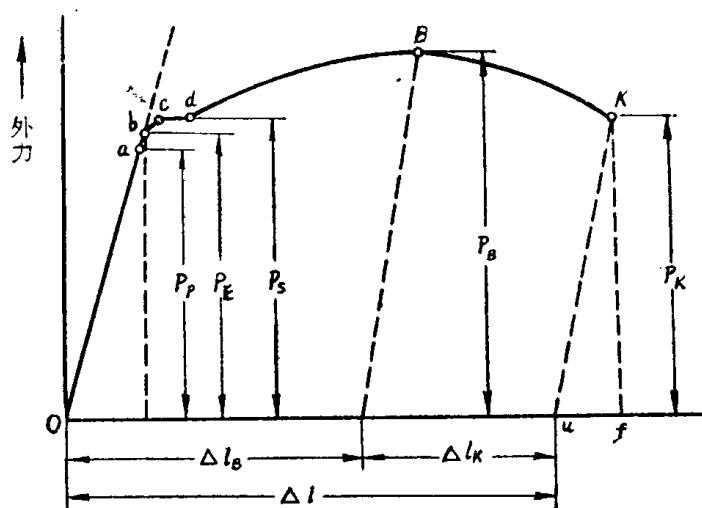


图 1—1 低碳钢拉伸图

$$\left(\text{应力} = \frac{\text{拉力 } P}{\text{原始截面积 } F_0}, \text{应变} = \frac{\text{伸长量 } \Delta l}{\text{原始长度 } l_0} \right)。$$

由图 1—1 中可见，试样受拉后，在 b 点以下，其变形量（伸长）和拉力成正比，而当拉力除去时，试样恢复原状，这种变形叫弹性变形。ab 段变形量与外力间的关系稍偏离直线关系，但仍属弹性变形。当外力大于 b 点时，如继续加大拉力至 c 点，材料就开始大量塑

性变形，这个现象叫做屈服现象。塑性变形当外力除去后，不能恢复原状，故又叫永久变形。由 d 点继续加大外力，试样明显地不断伸长，当拉力达到 B 点，试样开始局部变细，出现“缩颈”现象，不久以后，试样在“缩颈”处断裂。

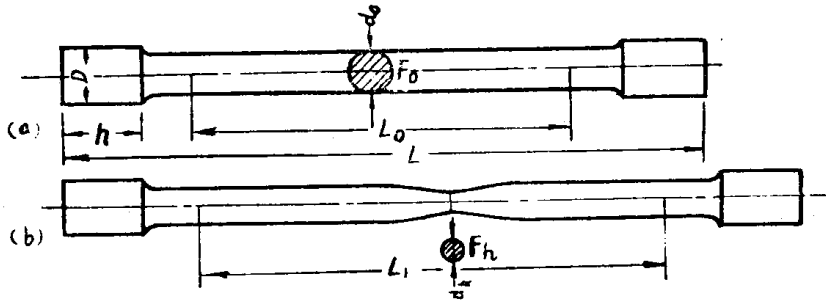


图 1-2 钢的标准拉伸试样示意图
(a) ——拉伸前；(b) ——拉断后。

根据拉力——伸长曲线，可求出材料的强度与塑性指标。

强度指标最主要的有两个：一个是强度极限（又叫抗拉强度或拉伸强度）以 σ_b 表示， σ_b 表示材料抵抗外加拉力不致断裂的最大应力， $\sigma_b = \frac{P_B}{F_0}$ 公斤/毫米²；另一个是屈服极限（又叫屈服强度）以 σ_s 表示， σ_s 表示材料抵抗开始产生大量塑性变形的应力， $\sigma_s = \frac{P_s}{F_0}$ 公斤/毫米²。

塑性指标有两个，它们都表示材料产生塑性变形的能力，一个是延伸率以 δ 表示， $\delta = \frac{l_1 - l_0}{l_0}$ （以%表示）；另一个是断面收缩率以 ψ 表示， $\psi = \frac{F_0 - F_K}{F_0}$ （以%表示）。

- 式中 P_B ——拉断前的最大拉力；
 P_s ——开始产生大量塑性变形时的拉力；
 F_0 ——试样原始截面积；
 F_K ——试样拉断时断口的截面积；
 l_0 ——试样标距原始长度；
 l_1 ——试样拉断后的标距长度。

中碳钢与高碳钢的拉伸曲线形状与低碳钢不同，它们的屈服现象不明显，因此这类材料的屈服极限常以产生一定的微量塑性变形（如变形量为 0.2%）的抗力来代表，其符号为 $\sigma_{0.2}$ ，以代替 σ_s 。 $\sigma_{0.2}$ 叫做条件的屈服极限。

灰口铸铁是一种脆性材料，拉伸时几乎不发生塑性变形，其屈服极限差不多等于强度极限，断口也没有缩颈现象。

σ_b 、 σ_s 和 δ 、 ψ 是最主要的机械性能指标。大多数机械零件设计时都以不发生塑性变形为原则，因此 σ_s 更显得重要， σ_b 的大小则是机件运转过程中安全的保证。 σ_s/σ_b 的比值叫屈强比。屈强比愈小，可靠性愈高，但材料强度的有效利用率太低，因此，一般希望屈强比稍高一些。

塑性指标中，延伸率 δ 的大小与试样尺寸有关，因为伸长量 $l_1 - l_0$ 包括了试样均匀伸长和局部缩颈后的伸长两个部分。为了便于比较，对试样尺寸必须标准化。常用的试样计算长度规定为其直径的 5 倍或 10 倍，其延伸率分别用 δ_5 或 δ_{10} 来表示。断面收缩率 ψ 与试样尺寸

无关，它能更可靠、更灵敏地反映材料塑性的变化。

不同特性的材料在静载下的断裂有两种形式即：韧断与脆断。韧断时，断口处有塑性变形，如低碳钢拉伸断口呈杯锥形，缩颈明显，心部有显微空隙，断口为纤维状（照片见图7—5），灰色无光泽。韧性断口中以杯锥形的塑性最好，半杯锥形次之，而星芒状断口则有良好的强度与塑性的配合，但其塑性不如前两种。斜角状断口表示塑性较差，而不规则的断口，则表示试样本身具有严重缺陷。脆断断口处没有塑性变形，断口平齐，有金属光泽，呈晶状或瓷状（照片见图7—1，图7—2）。

不论哪种断裂都是由裂纹的发生与发展两个阶段构成的。韧断的特点是裂纹发生后，其发展速度缓慢。当塑性变形停止时，裂纹也停止发展。只有再增大外力，才继续发展。这种过程一直延续到断裂。而脆断则不同，裂纹一达到临界尺寸后，就势不可挡以极快的速度发展，迅速断裂。

由于脆断前毫无征兆，并且断裂又是爆发性的不可抑止，所以后果很严重，我们应努力避免脆断。从这一点出发，在选用材料时不能单纯考虑强度指标，而且还要综合地考虑塑性等指标。

二、刚度和弹性

材料在受力时抵抗弹性变形的能力叫刚度。刚度的大小由弹性变形范围内应力与应变的比值——弹性模数 E 来代表。弹性模数 E 在拉伸图上表现为弹性变形的直线段的斜率。 E 愈大，即在一定的应力下发生的弹性变形愈小，刚度就愈大。

弹性模数主要决定于各金属的本性，其他因素（如加入合金元素，热处理，加工变形等）影响很小。因此弹性模数是金属材料最稳定的性质之一。室温下，钢的弹性模数 E 在 19000~22000 公斤/毫米² 之间，并随温度的升高而降低。铸铁的弹性模数 E 为 6000~17000 公斤/毫米²。

一般零件在使用过程中均处于弹性状态。对于要求弹性变形较小的零件应选用刚度较大的材料，如柴油机曲轴，精密机床主轴等。

材料的弹性是指材料不产生塑性变形时所能承受的最大应力，一般用比例极限 σ_p 来表示，其单位为公斤/毫米²，而比例极限 $\sigma_p = \frac{P_E}{F_0}$ 。

式中 P_E ——应力与应变成正比关系的最大拉力。

F_0 ——试样原始截面积。

三、冲击韧性

不少零件在使用中常受到冲击载荷。金属抵抗冲击载荷而不破坏的能力称为冲击韧性，以 a_k 表示。而 $a_k = \frac{\text{冲击破坏所消耗的功 } A_k}{\text{试样断口截面积 } F}$ 公斤·米/厘米²

a_k 愈大，即在冲击试验机上打坏试样所消耗的冲击功（以 A_k 表示）愈大，韧性就愈好。目前最常用的测定韧性的方法是横梁式弯曲冲击试验，试样通常是带缺口的（图1—3）。

a_k 值低的材料叫做脆性材料，脆性材料破坏时无明显变形，断口较平齐，有金属光泽，呈晶状或瓷状。而 a_k 值高的韧性材料破坏前有明显变形，断口呈灰色纤维状，无光泽。

很多零件如齿轮、连杆等工作时受很大的冲击载荷，因此要用 a_k 值较高的材料来制

造。铸铁的 α_K 值很低，灰口铸铁 α_K 近于零，不能用以制造受冲击载荷的零件。

一般说来，强度、塑性两者均好的材料， α_K 值也高。材料的冲击韧性除取决于材料的显微组织和化学成分外，还与加载速度、温度与材料的表面质量（如缺口，光洁度等）、材料的冶金质量等有关。加载愈快，温度愈低，表面质量愈差，冲击韧性就愈低。

金属在低于某一温度时会突然从韧性状态（ α_K 值较高）转变成脆性状态（ α_K 值低），这个温度叫做脆性转变温度（图1-4）。因此有的钢材在南方工作正常，而到北方寒冷地区可能脆断，这就是某些车辆在东北北部地区发现横梁开裂的原因之一。为此，有的钢材（如在寒冷地区的桥梁，车辆焊接用钢材）要作低温（一般为 -40°C ）冲击试验。一般说来，脆性转变温度愈低（钢中含镍能显著地降低其脆性转变温度），材料的低温冲击韧性愈好。

零件的表面缺陷往往是脆断裂纹的发源地，从而使冲击韧性降低。有缺口的试样或零件，容易产生应力集中，脆性增加， α_K 值降低。因此在设计中必须妥善安排形状，合理确定光洁度，在制造、检修时要防止产生加工缺陷与检查微裂纹，注意表面质量。避免表面缺陷是防止脆断的有效措施。

必须指出，零件实际所受的冲击载荷往往不是大能量的一次冲击，而是小能量的多次重复冲击，这显然与 α_K 值的试验条件不同，因此 α_K 值不能完全代表实际机件的韧性。我国已对小能量多次冲击开展了系统研究，发现材料承受多次重复冲击的能力主要决定于强度，因此对材料的 α_K 值的要求要作具体分析。

为了防止脆断，选用材料时，除保证强度足够外，还应要求有一定的韧性。高强度材料的韧性往往偏低，脆断倾向大，必须注意。我们既要防止对 α_K 值要求过高，不敢采用高强

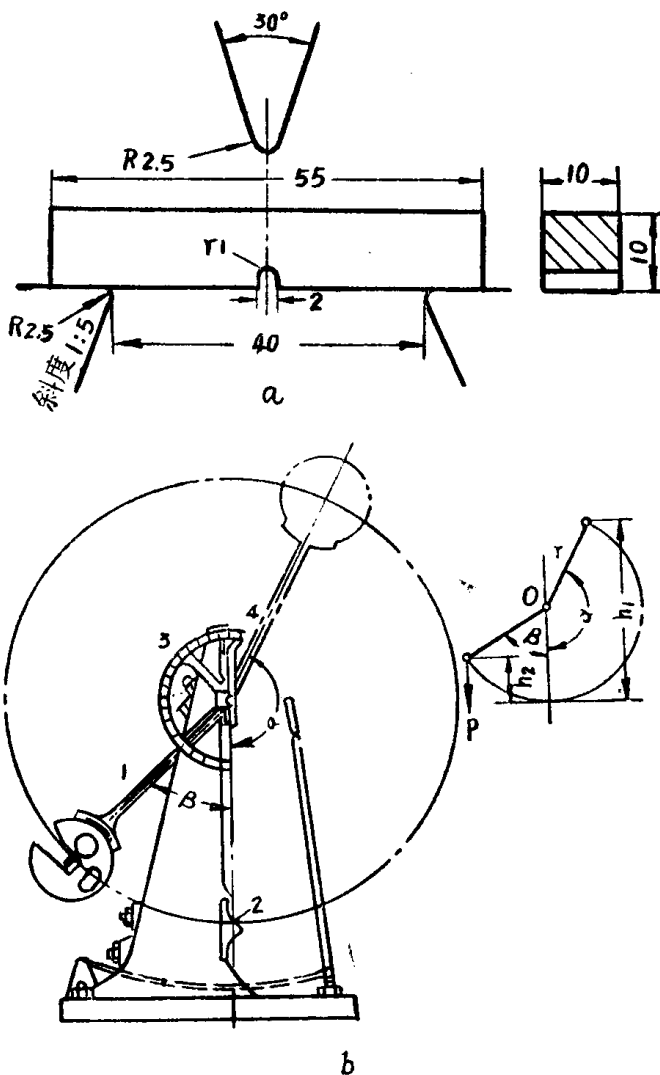


图1-3 横梁式冲击试验示意图

(a) —— 试样； (b) —— 试验机。
1 —— 摆锤； 2 —— 试样； 3 —— 刻度盘； 4 —— 指针。

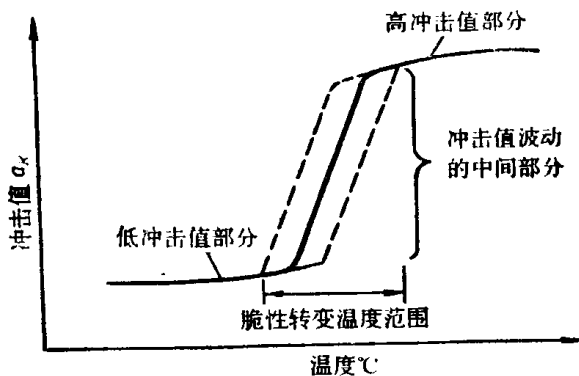


图1-4 温度对冲击值的影响

度材料的倾向，也要防止忽视韧性对防止脆断作用的倾向。对 α_K 值究竟多大合适，目前尚无确切的科学根据。根据船舶脆断事故经验而确定的 α_K 安全值，认为室温下一般材料应不低于 2 公斤·米/厘米²。低温工作零件还应有低温韧性的要求。

四、硬 度

硬度是指金属表面抵抗外物压入的能力。硬度不是一个单纯的物理量，而是反映弹性、强度与塑性等的综合性能指标。由于测定硬度的试验设备较简单，操作方便、迅速，又是无损检验，因此它是热处理工作质量检查的主要指标之一，也是对工件性能要求的最通用的指标。无论在生产或科研上，硬度试验应用都很广泛。

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。根据压头和压力的不同，常用的硬度试验方法有布氏硬度、洛氏硬度和维氏硬度三种。

（一）布氏硬度试验 布氏硬度试验是以直径为 D （10、5或2.5毫米）的钢球在压力 P 公斤下压入金属表面（图 1—5） P 与 D 成一定比例，对钢铁而言：

$$P = 30D^2$$

对应于 D 为 10、5或2.5毫米， P 分别为 3000、750或187.5公斤。

对有色金属，则采用 $P = 10D^2$ （铜合金），或 $P = 2.5D^2$ （铝或轴承合金）。

根据一定压力下，压出的压痕面积大小或直径大小，就可求出布氏硬度值 HB。

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

式中 P = 压力；

D = 钢球直径；

d = 压痕直径。

d 值可从试样量得。除用上式计算外，一般可按 d 值查表确定相应的 HB 值。

布氏硬度的特点是比较准确，因此用途很广，但也存在不能测高硬度金属（HB 450 以上），不能测太薄试样以及压痕较大，易损坏表面等缺点。

（二）洛氏硬度试验 洛氏硬度试验在生产上应用也很多。常用的洛氏硬度又分洛氏 B 与洛氏 C 两种。它们所用的压头与压力不同，但都是按压痕陷下的深度来测定硬度。表 1—1 列出了洛氏 B（HRB）与洛氏 C（HRC）硬度试验的压头、压力与硬度计算公式，图 1—6 则为洛氏 C 硬度测定方法的示意图。

洛氏硬度的测量方法简单、迅速，可由千分表上直接读出硬度值，不必计算或查表，其压痕较小，故可测小件、薄件，但洛氏硬度的精确性不如布氏硬度。洛氏 C 硬度一般用来测硬金属。当洛氏 C 硬度 HRC 为 20 以下时所测得的结果不太准确，应改用洛氏 B（HRB）或布氏硬度 HB。

（三）维氏硬度试验 在科学实验中，维氏硬度 HV 应用较多。维氏硬度的压头是顶角

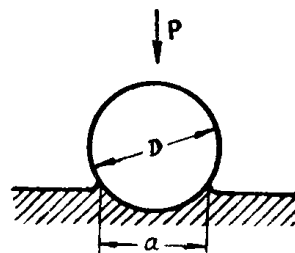


图 1—5 布氏硬度试验示意图

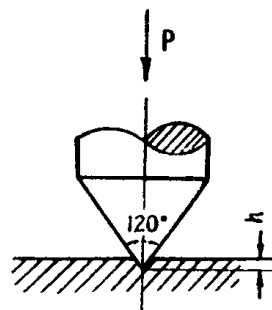


图 1—6 洛氏 C 硬度试验示意图

为136°的金钢石方锥，其压力一般可选用5、10、20、30、50、100、120公斤等；也可选用1公斤以下的压力作为测定某一显微组织的硬度的压力。维氏硬度试验的压头与压痕示意图如图1—7所示。维氏硬度也由压痕单位面积上的压力算出，即：

洛氏硬度试验

表1—1

硬度类别	压头	压力 初载荷+主载荷	硬度计算公式
HRB	直径为1.588毫米的钢球	10公斤+90公斤	$HRB = 130 - \frac{h}{0.002}$
HRC	顶角为120°的金钢石圆锥	10公斤+140公斤	$HRC = 100 - \frac{h}{0.002}$

表中 h 为压痕深度，压痕深度每0.002毫米相当洛氏硬度1度。

$$HV = 1.8544 \frac{P}{d^2}$$

式中 P ——选用的压力；

d ——压痕对角线长度。

HV也可根据 d 值查表求出。

维氏硬度比较准确，且载荷小时可测薄工件与渗碳层、氮化层等表面硬化层的表面硬度。

过去工厂中还采用过一种肖氏硬度 (HS)，它是用一个金钢石圆头重锤从一定高度自由下落到试样表面，根据它从表面回跳的高度来确定硬度。回跳愈高，硬度愈大，最高为HS100，现在肖氏硬度应用很少。

上述布氏、洛氏与维氏三种硬度之间没有直接的换算公式，如要换算，需查表。不过在HRC25左右与HB有近似的比例关系

即 $HRC \approx \frac{1}{10} HB$ ，而在HB 200~350间HB与HV非常接近。

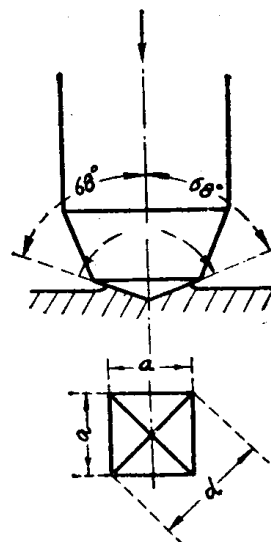


图1—7 维氏硬度试验的压头与压痕示意图

五、疲劳强度

有的零件在运行中受到方向、大小反复变化的交变应力，如机车车轴、柴油机曲轴等。以车轴而论，它在旋转过程中由于承受载荷，其表面反复受拉和受压，在这样的交变应力下，零件会在远小于其强度极限，甚至小于屈服极限的应力的长期作用下断裂，其断口一般是由光滑的边缘，叫疲劳扩展区和粗糙的心部（或一侧），叫瞬时破坏区所组成，特征明显，叫做疲劳断口（照片见图7—8），这种破坏叫做疲劳断裂。疲劳断口的疲劳扩展区光亮、细致，有疲劳扩展前沿，呈贝壳状、海滩状或涟纹状条纹，这是裂纹扩展磨光的结果。瞬时破坏区断口粗糙，一般呈粗晶状。

疲劳断裂的原因是材料内部应力分布不均匀，在零件截面有尖锐缺口或有缺陷疵病的地方应力特别高。当该处应力超过强度极限时，就形成微裂纹。这种裂纹在一拉一压的交变应力下逐渐扩大，它的两个表面在一张一合的过程中互相摩擦，渐渐磨光。而当裂纹发展到相当深度，其心部（或一侧）连接部分的截面缩小到受不住外加载荷时便突然折断，因此心部

(或一侧) 形成粗糙的断口。

在交变应力下引起疲劳断裂的交变周期数取决于交变应力的大小。图 1—8 为材料的疲劳曲线示意图, 由图中可以看到, 应力小时, 零件疲劳断裂前的交变周期长; 当应力大时, 零件疲劳断裂前的交变周期显著缩短。当应力小于一定水平时, 曲线趋于水平, 这说明在某一较小的交变应力下, 零件可经无限次交变周期 (或叫循环) 而不致断裂, 相当于这个水平线的应力叫做疲劳极限。对于钢铁, 生产上常把能经受 10^7 次应力交变周期而不断裂的最大应力值作为其疲劳极限。对称循环的弯曲疲劳极限以 σ_{-1} 表示。

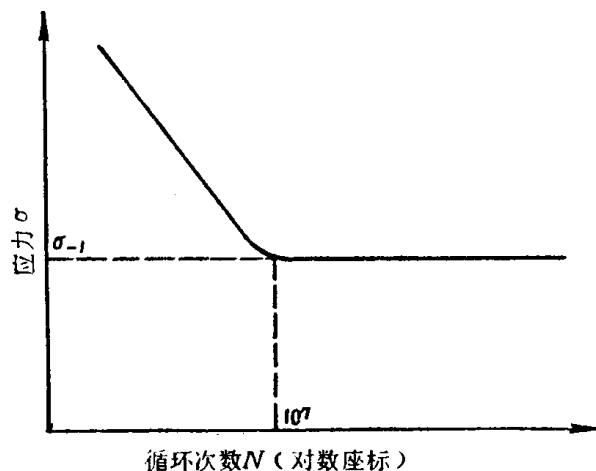


图 1—8 疲劳曲线示意图

据统计, 机件断裂事故中 80% 以上是由疲劳造成的。铁路系统中车辆的车轴和弹簧的疲劳折损较多, 内燃机车曲轴也有。1958 年全路更换弹簧 90 万卷, 消耗钢材 4500 吨, 其中大多数是由于疲劳断裂, 因此提高疲劳寿命有很大实际意义。

金属的疲劳极限与强度极限有近似比例关系, 钢的疲劳极限 σ_{-1} 大约为强度极限 σ_b 的一半。金属的疲劳极限除与金属的本性有关外, 还与载荷性质, 零件形状, 表面质量等许多因素有关。零件受扭转载荷时, 其疲劳极限就比拉压或弯曲载荷时为低。零件表面有缺口或截面有急剧变化, 零件表面有缺陷或表面光洁度低, 质量粗糙都使疲劳强度降低; 零件在腐蚀性介质中, 疲劳强度也降低。因此, 提高零件表面光洁度和表面喷丸、滚压、表面淬火、表面化学热处理等使表面产生残留压应力的表面强化方法都是提高疲劳强度的有效措施。

第三节 金属材料的物理、化学性能与其他使用性能

金属的物理性能有比重、熔点、热膨胀性、导电性、导热性、磁性等, 而化学性能主要是耐腐蚀性。耐磨性是一种综合性的使用性能, 它对很多承受摩擦的零件的使用寿命有决定性的影响。

一、比 重

对于飞机、汽车、车辆等要求减轻自重的机械, 采用比重小的金属材料很必要。尽管铝合金强度小于钢, 但它的比重却小得多, 用铝合金代替钢制造同一零件, 其重量可减少很多。高速柴油机的活塞为了减少由于惯性而消耗的功率, 故用铝合金制造。同理, 强度高、比重小的钛合金在航空与导弹工业上也得到广泛应用。常用金属材料的比重如下: 铜合金约为 8.8, 锡基轴承合金为 7.4, 钢为 7.8, 灰铸铁为 7.15, 钛合金约为 4.5, 铝合金约为 2.7, 镁合金约为 1.8。

二、熔 点

金属和合金的铸造与焊接要利用这个性能。熔点低的合金可用来制造焊锡、保险丝 (铅、锡、铋、镉的合金), 铅字 (铅与铋的合金) 等; 熔点较高的合金用来制造机械零件、结构件;