

“十五”国家重点图书

材料科学与工程手册

▷ 上卷

◎ 主编 师昌绪 李恒德 周 廉



化学工业出版社

材料科学与工程出版中心

第 4 篇 性能与测试篇

编委会、撰稿人和审稿人名单

编委会主任 何冠虎 吴学仁

委 员 (按姓氏笔画排序)

于慧臣 尤清照 石作德 吴学仁 何冠虎 张行安 张志东
周荣灿 钱梦騄 黄新跃 梁 勇 管 地

撰 稿 人 (按姓氏笔画排序)

于慧臣 尤清照 石作德 吴学仁 何冠虎 张行安 张志东
周荣灿 钱梦騄 黄新跃 梁 勇 管 地

审 稿 人 (按姓氏笔画排序)

孙校开 吴学仁 何冠虎 张文美 郭敬东 黄成新 董瑞琪

目 录

4.1 导论	4-6	4.3.1.3 感生磁各向异性	4-19
4.1.1 材料性能的重要性	4-6	4.3.1.4 形状各向异性	4-19
4.1.2 材料性能变化的基本规律和测试技术	4-6	4.3.1.5 表面磁各向异性	4-20
参考文献	4-6	4.3.1.6 磁转矩法	4-20
4.2 基本力学性能及测试方法	4-7	4.3.1.7 磁化率法	4-20
4.2.1 常温单向拉伸性能及测试方法	4-7	4.3.1.8 磁化曲线法	4-20
4.2.1.1 拉伸应力-应变曲线	4-7	4.3.1.9 奇异点探测法	4-21
4.2.1.2 弹性变形	4-8	4.3.2 磁致伸缩	4-21
4.2.1.3 弹性模量	4-8	4.3.2.1 方向性磁致伸缩	4-21
4.2.1.4 屈服强度	4-8	4.3.2.2 体积磁致伸缩	4-21
4.2.1.5 抗拉强度	4-8	4.3.2.3 磁机械效应	4-21
4.2.1.6 真实断裂强度	4-8	4.3.2.4 光学杠杆法	4-21
4.2.1.7 静拉伸塑性参量	4-8	4.3.2.5 应变仪测定法	4-22
4.2.1.8 应变硬化	4-9	4.3.2.6 X射线衍射法	4-22
4.2.1.9 真实应力-应变曲线	4-9	4.3.3 磁畴	4-22
4.2.1.10 拉伸试验方法	4-9	4.3.3.1 磁畴结构	4-22
4.2.2 缺口拉伸性能及测试方法	4-10	4.3.3.2 粉纹法	4-23
4.2.2.1 弹性范围缺口对应力分布的影响	4-10	4.3.3.3 磁光法及其他方法	4-24
4.2.2.2 塑性范围缺口对应力分布的影响	4-10	4.3.4 静态磁化过程	4-24
4.2.2.3 缺口拉伸测定力学性能参量	4-10	4.3.4.1 磁场的产生和测量	4-24
4.2.2.4 缺口拉伸试验方法 (按 HB 5214—1996 标准)	4-11	4.3.4.2 磁矩	4-25
4.2.3 常温压缩性能及测试方法	4-11	4.3.4.3 磁化强度测量	4-25
4.2.3.1 单向压缩试验特点及应用	4-11	4.3.4.4 磁化曲线	4-25
4.2.3.2 压缩试验测定的力学性能参量	4-11	4.3.4.5 磁滞回线	4-26
4.2.3.3 压缩测试方法	4-11	4.3.4.6 冲击法	4-26
4.2.4 常温扭转性能及测试方法	4-11	4.3.4.7 振动样品磁强计	4-26
4.2.4.1 扭转试验的特点与应用	4-11	4.3.4.8 脉冲强场磁强计	4-26
4.2.4.2 扭转试验测定的力学性能参量	4-12	4.3.4.9 磁秤法	4-27
4.2.4.3 扭转试验方法概述	4-12	4.3.4.10 超导量子干涉器件磁强计	4-27
4.2.5 常温弯曲性能及测试方法	4-12	4.3.5 动态磁化过程	4-27
4.2.5.1 弯曲试验特点及应用	4-12	4.3.5.1 交流磁化率	4-27
4.2.5.2 弯曲试验测定的力学性能参量	4-13	4.3.5.2 磁滞效应	4-27
4.2.5.3 弯曲测试方法	4-13	4.3.5.3 涡流损耗	4-27
4.2.6 冲击性能及测试方法	4-13	4.3.5.4 磁后效	4-28
4.2.6.1 加载速度及变形速度	4-13	4.3.5.5 高频损耗	4-28
4.2.6.2 冲击载荷下金属的变形和断裂	4-14	4.3.5.6 动态磁性测量	4-28
4.2.6.3 冲击试验测定的力学性能参量	4-14	4.3.5.7 交流磁化损耗的测量	4-28
4.2.6.4 冲击吸收功 A_K 、冲击韧性 α_K 的适用性	4-14	4.3.5.8 交流电桥	4-29
4.2.6.5 弯曲冲击试验方法	4-14	4.3.6 自旋共振	4-29
4.2.6.6 冲击值与其他力学性能参量的关系	4-14	4.3.6.1 顺磁共振	4-29
4.2.6.7 冲击试验应用	4-15	4.3.6.2 铁磁共振	4-30
4.2.7 硬度性能及测试方法	4-15	4.3.6.3 亚铁磁共振	4-30
4.2.7.1 布氏硬度	4-15	4.3.6.4 反铁磁共振	4-30
4.2.7.2 洛氏硬度	4-16	4.3.6.5 核磁共振	4-30
4.2.7.3 维氏硬度	4-16	4.3.6.6 穆斯堡尔效应	4-31
4.2.7.4 努氏硬度	4-16	4.3.6.7 中子衍射	4-31
4.2.7.5 肖氏硬度	4-17	4.3.7 电磁特性	4-31
参考文献	4-17	4.3.7.1 磁阻效应	4-32
4.3 磁学性能及测试方法	4-18	4.3.7.2 霍尔效应	4-32
4.3.1 磁各向异性	4-18	4.3.7.3 磁电效应及压磁效应	4-32
4.3.1.1 磁晶各向异性	4-18	4.3.8 磁光效应	4-33
4.3.1.2 晶体场	4-19	4.3.9 磁致热效应	4-33
		参考文献	4-34
		4.4 热学性能及测试方法	4-35

4.4.1 热导率及测试方法	4-35	4.6.1.1 压电换能器	4-59
4.4.1.1 傅里叶定律及导热各向异性	4-35	4.6.1.2 磁致伸缩换能器	4-60
4.4.1.2 热传导方程	4-35	4.6.1.3 静电换能器	4-60
4.4.1.3 导热微观机制	4-35	4.6.1.4 电磁声换能器	4-60
4.4.1.4 热导率测量方法	4-37	4.6.1.5 激光超声	4-61
4.4.1.5 测量热导率的稳态法	4-37	4.6.2 材料的声速测量方法	4-62
4.4.1.6 测量热导率的通电法	4-38	4.6.2.1 行波法	4-62
4.4.1.7 测量热导率的非稳态法	4-39	4.6.2.2 谐振法	4-63
4.4.2 比热容及测试方法	4-39	4.6.2.3 脉冲回波法	4-63
4.4.2.1 基本概念	4-39	4.6.2.4 脉冲回鸣法	4-64
4.4.2.2 杜隆-珀替定律	4-40	4.6.2.5 脉冲重合法	4-64
4.4.2.3 爱因斯坦比热容理论	4-40	4.6.2.6 脉冲回波叠加法	4-65
4.4.2.4 德拜比热容理论	4-40	4.6.2.7 临界角法	4-66
4.4.2.5 温度对材料比热容的影响	4-40	4.6.3 材料的声衰减及测试方法	4-66
4.4.2.6 测量比热容的下落式量热计法	4-41	4.6.3.1 吸收衰减	4-67
4.4.2.7 测量比热容的绝热量热计法	4-41	4.6.3.2 散射衰减	4-67
4.4.2.8 测量比热容的电脉冲加热法	4-42	4.6.3.3 几何衰减	4-68
4.4.3 热辐射系数及测试方法	4-42	4.6.3.4 声脉冲管法测量声衰减	4-69
4.4.3.1 辐射传热概述	4-42	4.6.3.5 替代法测量声衰减	4-69
4.4.3.2 热辐射基本定律	4-43	4.6.3.6 谐振法测量声衰减	4-70
4.4.3.3 测量热辐射系数的量热计技术	4-44	附表 I 金属的声速	4-71
4.4.3.4 测量热辐射系数的辐射计技术	4-44	附表 II 几种金属的损耗因子	4-72
4.4.3.5 测量热辐射系数的反射计技术	4-45	附表 III 岩石的声速	4-72
4.4.4 热膨胀系数及测试方法	4-45	附表 IV 几种材料的声衰减	4-72
4.4.4.1 热膨胀基本概念	4-45	附表 V 塑料的声学性能	4-73
4.4.4.2 热膨胀基本理论	4-45	参考文献	4-75
4.4.4.3 热膨胀系数与其他性能的关系	4-46	4.7 电学性能及测试方法	4-76
4.4.4.4 测量热膨胀的顶杆法	4-46	4.7.1 电介质的电学性能及测试方法	4-76
4.4.4.5 测量热膨胀的干涉法	4-47	4.7.1.1 电介质的极化	4-76
4.4.4.6 测量热膨胀的 X 射线法	4-47	4.7.1.2 绝缘材料电阻测试方法	4-76
4.4.4.7 测量热膨胀的非接触法	4-48	4.7.1.3 复介电常数的测量	4-77
附录 部分元素的热物理性质	4-48	4.7.1.4 绝缘材料介电强度的测试方法	4-78
参考文献	4-49	4.7.2 半导体的电学性能及测试方法	4-79
4.5 光学性能及测试方法	4-50	4.7.2.1 导电型号的测量	4-79
4.5.1 辐射度测量	4-50	4.7.2.2 半导体特性	4-80
4.5.1.1 基本辐射度量与单位	4-50	4.7.2.3 本征半导体和掺杂半导体	4-80
4.5.1.2 辐射度测量方法和仪器	4-50	4.7.2.4 半导体的迁移率和电阻率	4-80
4.5.2 光度测量	4-51	4.7.2.5 半导体电阻率的测试方法	4-82
4.5.2.1 光度量术语与单位	4-51	4.7.2.6 非平衡少数载流子寿命的测量	4-84
4.5.2.2 光度测量方法	4-51	4.7.3 金属材料的电学性能及测试方法	4-85
4.5.3 光谱光度测量	4-52	4.7.3.1 金属导电物理本质	4-85
4.5.3.1 光谱透射测量	4-52	4.7.3.2 金属的电阻	4-86
4.5.3.2 光谱反射测量	4-53	4.7.3.3 电桥法测量金属导体电阻	4-87
4.5.4 色度测量	4-53	4.7.3.4 金属电阻直接读数测量法	4-87
4.5.4.1 标准色度学系统	4-53	4.7.3.5 瞬态测试技术(脉冲加热法)	4-87
4.5.4.2 常用的色度测量仪器	4-54	4.7.3.6 感应法	4-88
4.5.5 光学零件的测量	4-54	4.7.3.7 超导体的电阻	4-89
4.5.5.1 光学零件的表面面形偏差测量	4-54	参考文献	4-89
4.5.5.2 光学零件表面的球面曲率半径测量	4-55	4.8 低维材料的性能与测试技术	4-91
4.5.5.3 透镜中心厚度的测量	4-55	4.8.1 粉体材料的性能与测试技术	4-91
4.5.6 激光参数测量	4-56	4.8.1.1 颗粒形貌	4-91
4.5.6.1 激光参数的测量方法	4-56	4.8.1.2 比表面积	4-92
4.5.6.2 常用激光测量仪器	4-57	4.8.1.3 粒度及粒度分布	4-93
4.5.7 光纤和光通信参数测量	4-57	4.8.1.4 粒度测量方法	4-94
4.5.7.1 光纤和光通信参数的测量方法	4-57	4.8.1.5 粒子密度	4-96
4.5.7.2 常用纤维光学检测仪器	4-58	4.8.1.6 填充密度	4-97
参考文献	4-58	4.8.1.7 安息角	4-97
4.6 声学性能及测试方法	4-59	4.8.1.8 流动性	4-97
4.6.1 材料中声波的激发和接收	4-59	4.8.1.9 ζ 电位	4-97

4.8.2 一维材料的表征性能与测试技术	4-98	4.9.4.3 霉菌的作用机理	4-109
4.8.2.1 形貌与结构	4-98	4.9.4.4 长霉试验方法	4-109
4.8.2.2 力学性能	4-98	4.9.5 腐蚀试验	4-109
4.8.3 薄膜材料的表征性能与测试技术	4-98	4.9.5.1 盐雾试验	4-109
4.8.3.1 表面形态	4-98	4.9.5.2 接触点与连接件的二氧化硫试验	4-111
4.8.3.2 薄膜厚度	4-99	4.9.5.3 接触点与连接件的硫化氢试验	4-111
4.8.3.3 薄膜硬度	4-100	4.9.6 太阳辐射试验	4-112
4.8.3.4 断裂韧性	4-100	4.9.6.1 太阳辐射对材料的影响	4-112
4.8.3.5 杨氏模量	4-101	4.9.6.2 太阳辐射对材料的影响机理和 效应	4-112
4.8.3.6 残余应力	4-101	4.9.7 低气压试验	4-113
4.8.3.7 附着力	4-102	4.9.7.1 自然环境条件	4-113
参考文献	4-102	4.9.7.2 产品受低气压环境应力的影响及作用 机理	4-113
4.9 材料的环境适应性及试验方法	4-104	4.9.8 自然大气曝露试验	4-113
4.9.1 概论	4-104	4.9.8.1 国外的自然大气曝露试验	4-113
4.9.1.1 环境试验的目的及重要性	4-104	4.9.8.2 常用金属材料在国内湿热地区的自 然大气曝露试验	4-114
4.9.1.2 环境条件对材料的影响	4-104	4.9.9 高分子材料的气候环境适应性	4-116
4.9.2 温度试验	4-104	4.9.9.1 室内搁置环境试验对高分子材料的 影响	4-116
4.9.2.1 高温试验、低温试验及高低温试验 导则	4-104	4.9.9.2 湿热大气曝露试验对高分子材料的电 性能和力学性能的影响	4-116
4.9.2.2 温度变化试验及温度变化试验 导则	4-106	4.9.9.3 寒冷大气曝露试验对高分子材料及元 器件的影响	4-116
4.9.3 湿热试验	4-107	4.9.9.4 以聚过蜜亚胺基导电聚合物为例研讨 温度、湿度对其性能变化的影响	4-116
4.9.3.1 湿热试验应用	4-107	参考文献	4-118
4.9.3.2 湿热试验的加速作用方法	4-107		
4.9.3.3 湿热试验的作用机理	4-107		
4.9.4 长霉试验	4-108		
4.9.4.1 材料长霉的环境条件	4-108		
4.9.4.2 霉菌对材料的影响	4-109		

4.1 导 论

4.1.1 材料性能的重要性

人们把材料喻为现代文明的三大支柱之一,一种具有开拓意义的新材料的出现往往伴随着一个新的技术领域乃至新的时代的兴起。自20世纪中叶以前合成高分子材料获得成功以来,微电子(光电子)功能材料,高性能合金与陶瓷,各类复合材料及其新的制备技术的涌现改变了人类长期以来依赖以木材、皮革、金属、混凝土为代表的结构材料的状态,并为航天与航空工业,电子与信息产业,核材料与能源工业,建筑业,汽车工业以及人们的日常生活提供了丰富的物质材料的基础。21世纪的重要标志之一是先进材料和先进制造技术将成为迅速发展的领域,这将为发展高技术产业和现代文明提供物质基础。然而各种高性能结构材料与新型功能材料长期并存,发挥各自的优势,仍然是不可逆转的事实。

不言而喻,一切材料包括制成的零件,器件,部件均是以其合格的性能为基础的,可以举出大量的事例来说明原材料性能低劣带来的危害。桥梁断裂,缆车坠毁,高楼坍塌,飞机失事,核电泄漏等等重大事故时有发生,究其原因材料性能不合格是重要原因之一。在日常生活中,电线起火,显像管爆裂,汽车刹车失灵,家电高压伤人,眼镜不合格引起的伤害,啤酒瓶爆炸伤人等等事故屡见不鲜,这也无不与材料基本性能不合格有关。人们常说,眼睛是人类心灵的窗户,材料性能的重要性可以用眼睛对人的重要性来比喻。如果使用没有合格性能数据的材料,就等于失去了灵魂,用这种材料设计制成的零件、器件、部件乃至整机都隐藏着危机,结果将贻害无穷。因此研究材料性能的测试方法,提供可靠的性能数据显得十分重要。

4.1.2 材料性能变化的基本规律和测试技术

性能与组织结构是密切相关的,材料性能的改变无不与其组织结构的变化有关,材料性能的变化应该是有规律可循的。本篇涉及的材料既有传统的结构材料,如金属和合金,陶瓷及耐火材料,聚合物和工程塑料,合成橡胶,水泥制品等,又涉及半导体,磁性材料,光电子材料,激光物质,超

细粉体,薄膜材料等正在发展中的功能材料。本篇所涉及的性能包括力、磁、热、光、声、电等基本性能,也编入了低维材料性能和环境性能的测试技术和试验方法。本篇每章的编写体例虽不尽相同,但都首先侧重于介绍与材料性能有关的基本概念、基本定律以及性能变化的基本规律,随后介绍的测试方法也主要侧重于测试方法的基本原理和基础技术及测试装备的要点。测试方法和技术的细节可从每一章结尾列出的参考资料中获取。

随着科学技术的发展,性能测试的方法和技术也在不断进步。本篇各章均力图介绍一些近期发展起来的先进测试方法和技术,例如基本力学性能及测试方法中全面地阐述了常温拉伸、压缩、扭转、弯曲、冲击和硬度的基本概念和试验方法,还着重介绍了棒材,管材,丝材和箔材的试验方法;磁性性能及测试方法中观察磁畴的磁力显微镜和测量各向异性的奇异点探测法;热学性能及测试方法中的薄膜热膨胀测试的非接触电荷耦合器件法;光学性能及测试方法中的激光参数和光纤参数的测试方法和技术;声学性能及测试方法中的非接触式电磁声换能器和激光超声技术,它们不需要耦合剂,消除了耦合剂对材料的影响;电学性能及测试方法中的金属超高温电阻及其他物理性能的综合测试方法和技术;低维材料的性能及测试方法中介绍的大部分内容均为新近发展起来的测试方法和技术;材料的环境性能和试验方法中介绍了我国材料环境试验的一些最新结果。

材料性能的测试方法和技术内容十分丰富,所涉及的科学技术领域十分宽广。本篇的每一章几乎都可以单独编写成书。各章的编写者从侧重于本人从事的研究领域出发,竭力拓展编写的内容,由于基础和专业知识的某些局限和编写篇幅的限制,所写内容出现某些不足甚至错误在所难免,恳请广大读者不吝指正。

参考文献

中国科学院 2000 高技术发展报告. 北京: 科学出版社, 2000. 5, 11

撰稿人 何冠虎 吴学仁

4.2 基本力学性能及测试方法

基本力学性能是指材料在外加载荷作用下或载荷与环境温度的联合作用下所表现的行为。主要包括拉伸、压缩、弯曲、剪切、扭转和冲击性能等。试样所承受的载荷一般采用各种力学参量（如应力、应变、冲击吸收功等）表示，而表征材料力学行为的力学参量的临界值或规定值称为材料的力学性能指标（如强度指标、塑性指标、韧性指标等）。

4.2.1 常温单向拉伸性能及测试方法

拉伸是指材料沿轴向承受拉力的一种状态。常温单向拉伸试验是指测定材料在常温下，在轴向、静载下的强度和变形的一种试验。拉伸试验可以测定材料的弹性、塑性、强度、韧性和硬化指数等许多重要性能指标（其中弹性模量、屈服强度、抗拉强度、断后伸长率及断面收缩率称为金属材料的五大性能指标）。这些指标，在工程应用中不仅是结构静强度设计的主要依据，而且是评定和选用材料及确定加工工艺的重要参数。无论研究新材料，还是合理使用现有材料或者改进材料热处理工艺，通常都要以拉伸性能作评定。因此，单向拉伸试验已成为材质检验的重要手段之一。

4.2.1.1 拉伸应力-应变曲线

在拉伸试验过程中自动记录绘出力-伸长曲线，称为拉伸图或拉伸曲线图。图 4.2-1 (a) 为退火低碳钢的拉伸曲线，纵坐标表示载荷 F ，单位为 N；横坐标表示绝对伸长 ΔL ，单位为 mm。载荷 F 除以试样初始横截面积 S_0 ，得到工程应力 σ ($\sigma = F/S_0$ ，单位为 MPa)；绝对伸长 ΔL 除以初始标距长度 L_0 ，得到工程应变 ϵ ($\epsilon = \Delta L/L_0$ ，无量纲)。分别以 σ 和 ϵ 为纵、横坐标，便得图 4.2-1 (b) 所示的工程应

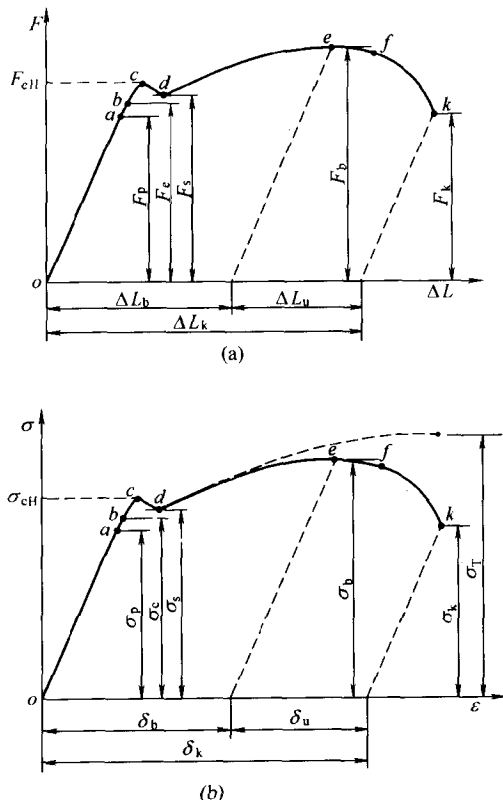


图 4.2-1 低碳钢的拉伸图和应力-应变曲线

力-应变曲线，简称拉伸应力-应变曲线 (tensile stress-strain curve)。由图 4.2-1 可见，材料在拉伸过程中可分为四个阶段。

(1) 弹性变形阶段 图中为 ob 段。其中 oa 符合虎克定律，即应力和应变成线性关系。保持直线关系的最大应力称为比例极限。 ab 段应力和应变不完全成正比，但变形仍是弹性的。超过 b 点后，出现微量的塑性变形。开始产生微量塑性变形的应力称为弹性极限。

(2) 屈服阶段 超过弹性极限，有的材料在塑性变形的初期产生明显的塑性流动，即力不增加、增加很小或略有下降的情况下变形大量产生，拉伸图上出现平台或锯齿形，试样表面出现滑移带，这种现象叫做屈服。屈服阶段的最小应力称为屈服应力 (cd 段)。

(3) 均匀变形阶段 屈服后继续变形，必须不断增加载荷。此阶段的塑性变形是均匀的，称为均匀变形阶段 (de 段)。这种随塑性变形增大，变形抗力不断增加的现象称为应变硬化，也叫做加工硬化。当载荷达到最高点 e 时，所对应的应力称为强度极限或抗拉强度。

(4) 局部变形阶段 当载荷达到最高点后，试样的一部分截面开始急剧缩小，出现了“缩颈”现象，载荷下降，变形增大直至断裂。变形主要集中在缩颈附近，称为局部变形阶段 (ef 段)。

综合金属、陶瓷及高聚物材料的拉伸应力-应变曲线，大致可分为七种类型，如图 4.2-2 所示。

曲线 (1) 为纯弹性应变，无塑性变形就断裂，如玻璃、陶瓷等。

曲线 (2) 为最典型的，存在明显屈服，有上、下屈服点 c 、 d ，有均匀塑性变形段 de ，有局部变形 ef ，如低碳钢。

曲线 (3) 无明显屈服和缩颈，如高强度、超高强度结构钢，高温合金等。

曲线 (4) 无明显屈服和均匀硬化阶段，如冷拉钢。

曲线 (5) 没有屈服，甚至弹性变形正比关系也不严格存在，如退火钢、结构钢等。

曲线 (6) 为锯齿形曲线。低温和高应变速率下，面心立方金属的塑性变形通过孪晶和滑移交替进行。当孪晶产生的应变速率超过试验机夹头移动速度时，负荷会突然松弛下降，反复进行呈现锯齿形应力-应变曲线，如 GH44 合金板材。

曲线 (7) 为弹性-局部塑性-均匀塑性型。主要是一些结晶态高聚物，在塑性变形开始时原有结晶结构破坏，发生缩颈，载荷下降。在变形最剧烈区域重新组合成新的、方向性好、强度高的结晶结构，使应力-应变曲线再次上升，直至断裂。

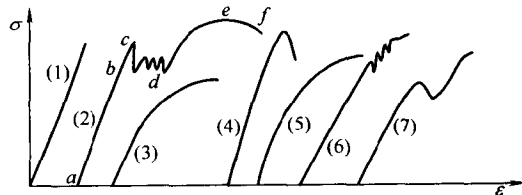


图 4.2-2 各种类型的拉伸应力-应变曲线

有些特征点如比例极限、弹性极限，虽然物理意义明确，但在技术上难以按定义测定。目前各国采用规定一定非

比例伸长率所对应的应力来表征,以 $\sigma_{p0.01}$ (下标为塑性变形的百分数,后同)作为规定比例极限; $\sigma_{p0.05}$ 作为规定弹性极限; $\sigma_{0.2}$ 作为规定屈服极限。

4.2.1.2 弹性变形

材料在外力作用下,形状尺寸发生变化称为变形。外力去除后变形完全恢复的称为弹性变形 (elastic deformation)。弹性变形来源于原子间的相互作用。弹性变形可分为线弹性、非线性弹性和滞弹性三种。线弹性变形是指应力、应变服从虎克定律并具瞬时性;非线性弹性变形不服从虎克定律,但仍具瞬时性;滞弹性变形也服从虎克定律,但要经过一段时间后才能达到虎克定律所对应的稳定值,这种弹性变形和时间相关,也称弹性后效。除外力能产生弹性变形外,晶体内部的畸变也能产生弹性变形。例如晶体各种缺陷(空位、位错、间隙原子、晶界)周围,杂质和第二相质点周围等均能因畸变产生弹性变形,这种局部、微观的弹性应变将产生微观的内应力。

4.2.1.3 弹性模量

弹性模量(E) (modulus of elasticity)是表征材料对弹性变形的抗力指标,其数值等于应力-应变曲线上直线段的斜率(单位为GPa)

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (4.2-1)$$

式中, σ 为正应力; ϵ 为正应变。

弹性模量越大,在相同应力下产生的弹性变形越小。弹性模量表征材料内部原子间结合力的大小,即键的强弱。在多晶体中,它取决于组成材料的原子结构,晶格类型和点阵常数。对于各向异性晶体,它是结晶方向的函数。少量合金化和热处理对弹性模量影响不大。固体中弹性变形速度相当于声速,远远超过加载速度,加载速度对弹性模量没有影响。当温度升高,由于晶体点阵常数增大,弹性模量将下降。

4.2.1.4 屈服强度

屈服是指材料宏观上产生塑性变形,即应力不增加或在某一应力水平附近波动,试样继续产生应变的现象,如图4.2-3所示。不计初始瞬时效应,应力下降的最低值称为下屈服强度(yield strength),用 σ_{sl} 表示,应力首次下降前的最大值称为上屈服强度,用 σ_{su} 表示。

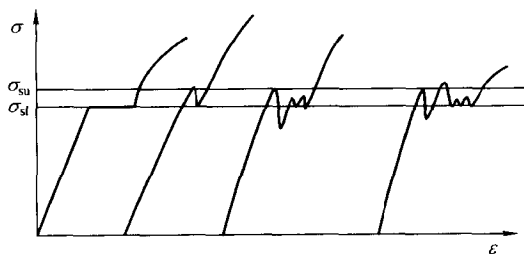


图 4.2-3 不同类型的屈服行为

许多高强度金属材料在拉伸时没有明显的屈服现象。对于这类材料,通常表示其屈服强度的应力可以采用规定非比例伸长应力,即产生0.2%非比例伸长率的应力表达,用 $\sigma_{0.2}$ 表示。

材料的屈服为内部位错克服“考屈尔气团”的运动,如在钢中,C、N等间隙原子,聚集到位错线附近的张应力处,形成溶质原子的“考屈尔气团”。位错运动要摆脱“气团”作用需要更大的应力,即为上屈服应力。位错一旦从溶质原子气团挣脱出来,就可在较低的应力下运动,即为下屈

服应力。由于位错这种运动为非连续的,且为叠加的,在应力-应变曲线上成为屈服平台或锯齿形。

屈服强度为抵抗塑性变形的最大应力。在微观上为抵抗位错运动的最大阻力。增加位错运动的所有阻力,如点阵阻力,位错间交互作用阻力,细晶强化的界面阻力,置换原子或间隙原子固溶强化阻力,第二相质点数量、尺寸、形状、弥散分布等阻力,均能提高屈服强度。屈服强度不仅是成分、组织敏感的力学性能参量,而且还受温度、应变速率影响。温度升高,屈服强度降低;应变速率增加,屈服强度增加。

4.2.1.5 抗拉强度

抗拉强度(σ_b) (tensile strength)是试样拉断前承受的最大标称拉伸应力,也称强度极限,由试样所承受的最大载荷 F_b 除以初始横截面积 S_0 求得

$$\sigma_b = \frac{F_b}{S_0} \quad (4.2-2)$$

4.2.1.6 真实断裂强度

将轴向拉伸载荷 F 除以试样瞬时真实横截面积 S 便得到真应力,用 σ_t 表示

$$\sigma_t = \frac{F}{S} \quad (4.2-3)$$

真实断裂强度 σ_T (true fracture strength)是试样拉伸时的真应力,它等于拉断时的载荷 F_k 除以缩颈处横截面积 S_k

$$\sigma_T = \frac{F_k}{S_k} \quad (4.2-4)$$

4.2.1.7 静拉伸塑性参量

断裂前材料发生不可逆变形的能力称为塑性。塑性指标为金属断裂时的最大相对塑性变形,通常用拉伸时的伸长率 δ 和断面收缩率 ϕ 表示。

(1) 伸长率 δ 伸长率 δ 是断裂后试样标距长度的相对伸长值。用百分数表示

$$\delta = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \times 100\% \quad (4.2-5)$$

式中, L_1 为断裂后标距长度; L_0 为初始标距长度。

断后总伸长由均匀伸长和局部伸长两部分组成,均匀伸长和 L_0 成正比,而局部伸长和横截面积平方根成正比,因此 δ 也可表示为

$$\delta = \frac{\Delta L}{L_0} = \alpha + \beta \frac{\sqrt{S_0}}{L_0} \quad (4.2-6)$$

式中, α 、 β 为材料常数。

可见 δ 除决定于 α 、 β 外,还受试样尺寸的影响,与试样初始横截面积 S_0 的平方根和 L_0 的比值有关。对同一状态同一种材料的不同尺寸试样,如期望其伸长率相等,需满足条件

$$\frac{\sqrt{S_1}}{L_1} = \frac{\sqrt{S_2}}{L_2} = \dots = \frac{\sqrt{S_0}}{L_0} \quad (4.2-7)$$

只有满足上式,同种材料的伸长率才能相等,不同材料的伸长率方可进行比较。GB/T 228—2002中规定 $L_0 = 11.3\sqrt{S_0}$ 或 $L_0 = 5.65\sqrt{S_0}$ (有时前者称为比例长试样,后者称为比例短试样且国际上普遍使用)。

(2) 断面收缩率 ϕ 断面收缩率是断裂后试样横截面积的相对缩减值,等于横截面的最大缩减量 $\Delta S = S_0 - S_1$ 除以试样的初始横截面积 S_0 ,用百分数表示

$$\phi = \frac{S_0 - S_1}{S_0} \times 100\% \quad (4.2-8)$$

式中, S_1 是拉断后颈缩处最小横截面积。

ϕ 越高, 材料塑性越好。在缩颈以前, 根据体积不变原则, 可得 ϕ 与 δ 的关系

$$\phi = \frac{\delta}{1+\delta} \quad (4.2-9)$$

一般认为 ϕ 比 δ 能更真实地反映材料的真实变形能力, 测定 ϕ 比测定 δ 更有意义。

4.2.1.8 应变硬化

材料的变形抗力随塑性变形量的增大而增加的现象称为应变硬化 (strain hardening), 也称加工硬化。用真实应力-应变表示硬化过程的曲线, 描述金属应变硬化最常用的表达式为

$$\sigma = K'\epsilon^n \quad (4.2-10)$$

式中, σ 、 ϵ 分别为真实应力和真实应变; K' 为应变硬化系数; n' 为应变硬化指数, 均为材料常数, 反映金属材料缩颈前抵抗继续塑性变形的能力。 n' 值越大则应变硬化强度也越大, 当 $n'=1$, 表示材料为完全弹性体; 当 $n'=0$ 、 $\sigma=K'=$ 常数, 表示材料没有应变硬化能力。大多数金属的 n' 值在 0.1~0.5 之间, 一般随材料强度增加, n' 数值减小。应变硬化即是位错在运动过程中由于遇到晶界、第二相质点以及位错间相互作用, 如位错交割、扭折、增殖等各种障碍, 使运动受阻, 需要不断增加外应力才能使位错继续运动。其表现为应力不断增加, 塑性变形才能继续进行。

工程中常用 Ramberg-Osgood 三参数方程中的曲率形态指数表征材料的应变硬化行为, 即

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + K\left(\frac{\sigma}{E}\right)^n \quad (4.2-11)$$

式中, ϵ 为总应变; E 为弹性模量; n 为 R-O 方程指数也称曲率形态指数; K 为 R-O 方程常数也称塑性减缩系数。Ramberg-Osgood 方程中塑性变形关系式为

$$\epsilon_p = K\left(\frac{\sigma}{E}\right)^n \quad (4.2-12)$$

理论上, R-O 曲率形态指数 n 约为应变硬化指数 n' 的倒数

$$n \approx \frac{1}{n'} \quad (4.2-13)$$

经过多种材料验证, 由于 R-O 参数方程 n 采用屈服前数据, 而应变硬化指数 n' 采用屈服后数据, 其结果稍有误差, n 微大于 $1/n'$ 值。R-O 方程常数 K 和应变硬化系数 K' 的关系为

$$K \approx \frac{1}{\left(\frac{K'}{E}\right)^n} \quad (4.2-14)$$

4.2.1.9 真实应力-应变曲线

真实应力 σ_1 (载荷除瞬时横截面积 F/S) 和条件工程应力 σ 的关系为

$$\sigma_1 = \frac{F}{S} = \frac{\sigma}{1-\phi} \quad (4.2-15)$$

伸长率实际上是断裂时的条件工程应变, 真实应变 ϵ_1 和条件工程应变的关系为

$$\epsilon_1 = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right) = \ln(1+\delta) \quad (4.2-16)$$

$$\phi_1 = \ln\left(\frac{S}{S_0}\right) = \ln(1-\phi) \quad (4.2-17)$$

在均匀变形阶段, 根据体积不变假设, 可求出真实应变 ϵ_1 和 ϕ_1 的关系如下

$$\epsilon_1 = \ln\left(\frac{1}{1-\phi}\right) = -\phi_1 \quad (4.2-18)$$

在拉伸试验中, 以真实应力为纵坐标, 真实应变为横坐标

标所得曲线为真实应力-应变曲线 (true stress-strain curve)。真实应力-应变曲线可由工程应力-应变曲线求得。弹性部分两曲线基本重合。在塑性变形过程中, 在 $F-L$ 曲线上可获得某一瞬时的 L 、 F 。按体积不变定理, 即 $L_0 S_0 = LS$, 可求得瞬时截面积 S , 从而可得真实应变 $\epsilon_1 = \ln(L/L_0)$ 以及真实应力 $\sigma_1 = F/S$, 即可获得真实应力-应变曲线。

4.2.1.10 拉伸试验方法

(1) 室温拉伸试验方法 (按 GB/T 228—2002 标准)

试样: 按材料使用要求, 有棒材、矩形板材、丝材、管材、箔材等多种形式。GB/T 228—2002 中规定有两种比例试样, 即比例长试样 $L_0 = 11.3 \sqrt{S_0}$ 和比例短试样 $L_0 = 5.65 \sqrt{S_0}$ 。对于板材试样, 当厚度大于或等于 12mm 时, 应加工成直径尽量大的圆截面标准试样进行试验。用冲点或细划线标出试样初始标距, 标距不应影响试样断裂, 可用双标距套用, 对脆性试样也可用带色涂料标出初始标距。

设备: 试验机由计量部门按 JJG139、JJG475 标准检定, 载荷示值误差为 $\pm 1\%$, 变动值为 1% , 进、回程差为 2% 。引伸计按 GB/T 12160—2002 进行标定, 试验时按照 GB/T 228—2002 要求选用 1 级或 2 级引伸计。

试验: 测量试样长度和宽度应使用不低于 0.02mm 的量具, 测量试样直径和厚度应使用不低于 0.01mm 的量具。屈服期间应变速率控制在 0.00025~0.0025/s 之间, 或屈服前加载速率控制在 1~10MPa/s 之间; 屈服后试验机两夹头分离速度应不大于 0.4 L_e mm/min, L_e 为引伸计标距长度。

确定规定非比例伸长应力的图解法 (见图 4.2-4): 在力-伸长曲线上, 作弹性直线段的延长线 OA, 取 $OC = L_e \epsilon_p n$ (ϵ_p 为规定非比例伸长应变, n 为放大倍数), 再由 C 点作 BC 平行于 OA, 交曲线于 D。D 点所对应的力 F_p 即为所测定规定非比例伸长力, 将 F_p 除以初始横截面积 S_0 便得到规定非比例伸长应力。

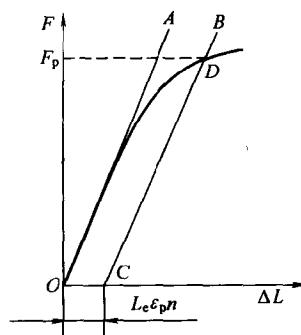


图 4.2-4 图解法确定规定非比例伸长力 F_p

(2) 管材室温拉伸试验方法 (按 HB 5145—1996 标准)

试样: 外径小于 30mm 的管材切取整管试样, 在整管试样两端塞入比管材硬度稍高的材料制成的塞子进行试验。外径大于 30mm 的管材可加工成条形或带头条形试样; 外径小于或等于 60mm 的金属管材, 长轴不大于 60mm 的各种水滴形或椭圆形管材, 在退火及正火状态下, 允许整管试验, 可将夹持部分压扁后进行试验; 当管壁厚度大于 8mm 时, 可加工成尽可能大的圆截面标准试样。

横截面积计算: 圆管试样按公式 $S_0 = \pi a_0 (D_0 - a_0)$ 计算横截面积。

条形和带头条形试样一般可以按下式计算原始横截面积

$$S_0 = a_0 b_0 \left[1 + \frac{b_0^2}{6D_0(D_0 - 2a_0)} \right] \quad (4.2-19)$$

式中, a_0 为试样厚度; b_0 为试样标距部分的宽度; D_0

为圆管外径。

异形管和毛细管试样用重量法测定平均原始横截面积

$$S_0 = \frac{m}{\rho L} \times 10^3 \quad (4.2-20)$$

式中, m 质量; ρ 密度; L 长度。整管、条形和带头条形试样, 一般不测断面收缩率。

(3) 丝材拉伸试验方法 (按 HB 5177—1996 标准)

丝材的打结拉力为带一个环状结的金属丝试样, 在拉断前承受的最大力。丝结形状见图 4.2-5。打结强度为试样的打结拉力除以原始横截面积所得应力。



图 4.2-5 丝材环状结示意图

试样: 对于直径或厚度小于 5mm 的丝材, 标距长度为 100mm; 直径或厚度大于 5mm 的丝材, 标距长度为 $11.3 \sqrt{S_0}$ 。

试验: 试样的横截面积应为丝材原始横截面, 异形丝材试样的横截面积用重量法测定。测定规定非比例伸长应力和屈服点时, 加载速率不大于 5MPa/s; 测定抗拉强度、打结强度、断面伸长率时, 加载速率不大于 10MPa/s; 丝材和夹具间可垫入砂纸、纸片或橡胶片; 测打结强度时, 若丝材未断于打结处则结果无效。

(4) 铝箔拉伸试验方法 (按 HB 5280—1996 标准)

试样: 带头部试样的尺寸为 15mm×60mm×220mm; 条形试样的尺寸为 15mm×200mm。试样可以成批用铣刀加工, 条形试样也可剪切加工。加工试样时, 试样之间需垫入硬铝、塑料等其他薄片。

试验: 厚度不大于 0.025mm 的箔材试样用称量法测定试样厚度 ($h_0 = m/\rho A$, m 为试样质量, h_0 为试样厚度, A 为试样面积)。对于较厚和延性较好的箔材试样, 可使用楔形夹具, 试样与夹具齿间可垫入砂纸。厚度小于 0.08mm 的箔材试样应使用光滑平面夹具。达到 $\sigma_{0.2}$ 前加载速率控制在 1.2~12MPa/s, 或应变速率控制在 0.002~0.010/min 范围内。

4.2.2 缺口拉伸性能及测试方法

工程结构零件常存在截面积突变、键槽、销孔、螺纹、尖角和刀痕等, 它们会引起不均匀的应力分布, 即应力集中。如果材料塑性较差, 通过塑性变形使应力重新分布的能力很小, 则在缺口处由于应力集中, 在平均应力尚低时, 即已达到抗拉强度, 引起材料断裂。另外, 在缺口处产生三向应力状态, 会阻碍材料塑性变形的发展, 致使金属在断裂前塑性变形能力受到约束, 使塑性材料产生脆性断裂。

4.2.2.1 弹性范围缺口对应力分布的影响

拉伸时试样要产生横向变形。缺口试样缺口周边的材料必然要阻止缺口根部的变形, 因此缺口根部附近为三向应力状态 (轴向应力 σ_L 、切向应力 σ_t 和径向应力 σ_r), 如图 4.2-6 所示。

σ_L 及 σ_t 在截面上分布不均匀, 最大应力在缺口根部的表面处, σ_r 在缺口根部为零, 最大值距根部一定距离。缺口截面上最大轴向应力 σ_{Lmax} 和缺口处最小原始横截面 (S_{0n}) 上名义应力 σ_m 之比称为应力集中系数 K_t 。

$$K_t = \frac{\sigma_{Lmax}}{\sigma_m} \quad (4.2-21)$$

式中, $\sigma_m = F/S_{0n}$; K_t 与缺口根部直径 d_0 、缺口深度 $(D_0 - d_0)/2$ 、缺口夹角 α 及缺口根部曲率半径 ρ 有关, 其中

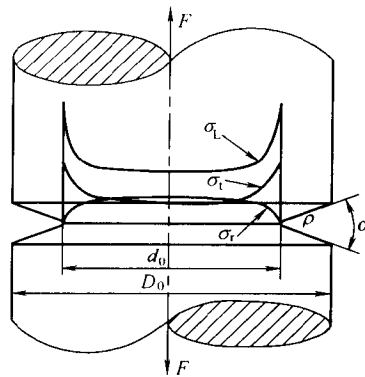


图 4.2-6 拉伸时深缺口圆截面试样缺口处的应力分布

与 ρ 的关系最大。缺口根部曲率半径 ρ 越小, σ_{Lmax} 越大, 应力集中越严重。可见, 脆性或低塑性材料, 缺口拉伸或缺口弯曲时, 同样材料同样截面无缺口的条件强度极限 σ_0 约为带缺口的条件强度极限 σ_{bn} 的 K_t 倍。

4.2.2.2 塑性范围缺口对应力分布的影响

在缺口处产生塑性变形, 必须满足 $\sigma_L - \sigma_r = 2\tau_{max} = \sigma_s$, σ_s 为产生塑性变形的正应力。缺口试样单向拉伸时, 缺口根部表面处 σ_L 最大, $\sigma_r = 0$ 。满足上述条件塑性变形开始产生, 之后随载荷增加塑性变形逐渐向试样中心扩展, 塑性变形使应力重新分布, 缺口处的应力集中将降低。

图 4.2-7 给出了随外加载荷 F 的增加, 缺口根部轴向应力的重新分布情况。曲线 1 为尚未塑性变形, 曲线 2~5 随 F 增加, 最大轴向应力 σ_{Lmax} 位置随弹塑性变形区域与弹性变形区域交界位置向内移动而移动, σ_{Lmax} 就位于两个区域的交界位置, 见图图中黑点处。随外力增加, 塑性变形逐渐发展, 平均真实应力 σ_m 和平均条件应力 σ_n 均逐渐增加。

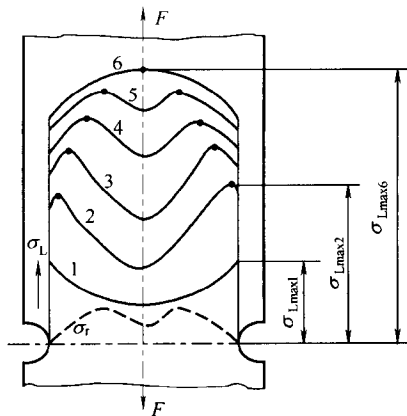


图 4.2-7 缺口试样在塑性变形时轴向应力的重新分布

4.2.2.3 缺口拉伸测定力学性能参量

表征材料因缺口而产生的强度或塑性急剧下降程度, 或材料发生脆性破坏趋势大小的参量, 称为缺口拉伸敏感系数 q_t 。同批材料在相同条件下, 用光滑试样的抗拉强度 σ_b 和缺口试样的抗拉强度 σ_{bn} 的比值来衡量 q_t 。

$$q_t = \frac{\sigma_b}{\sigma_{bn}} \quad (4.2-22)$$

式中, σ_{bn} 为缺口试样的抗拉强度。定义为缺口试样在

断裂前承受的最大拉力除以缺口处最小原始横截面积 S_{0n} ，用下式计算

$$\sigma_{bn} = \frac{F_{bn}}{S_{0n}} \quad (4.2-23)$$

q_t 值的大小表明材料对缺口敏感的趋势， q_t 值越大，材料对缺口越敏感。

4.2.2.4 缺口拉伸试验方法（按 HB 5214—1996 标准）

试样：由三种规格和 $K_t=3、4、5$ 三种应力集中系数来选取缺口试样具体尺寸。所取缺口试样必须和光滑拉伸试样尺寸相对应，以便比较。试样缺口必须在热处理后加工，缺口形状及根部尺寸应在不低于 50 倍投影仪下检查，并在试样合格证上注明试样缺口根部的最小直径。常用缺口试样缺口形状 $45^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$ ， $\rho \approx 0.1\text{mm}$ ， $5\text{mm} \leq d_0 \leq 10\text{mm}$ 。

试验：试验时应严防试样偏斜带来的附加影响。缺口抗拉强度与缺口形状、尺寸、试验条件有密切关系，只有在相同条件下试验结果才可比较，测定 σ_{bn} 时每组不少于 5 件试样，计算 q_t 和 $\sigma_{bn}/\sigma_{0.2}$ 时， σ_b 、 $\sigma_{0.2}$ 和 σ_{bn} 均采用各自的算术平均值。

4.2.3 常温压缩性能及测试方法

4.2.3.1 单向压缩试验特点及应用

压缩是指材料沿轴向承受压力的一种受力状态。单向压缩试验主要用于铸铁、铸铝等脆性及低延性材料。由于此类材料在静拉伸、扭转和弯曲试验时为脆断，所以这些试验不能反映材料在韧性状态下的力学行为。如灰铸铁拉伸时为脆断，而压缩时则会发生一定塑性变形，沿与轴向成 45° 方向切断。因此压缩试验对于合理使用脆性材料有重要意义。

4.2.3.2 压缩试验测定的力学性能参量

抗压强度是材料抵抗压缩载荷而不失效的最大应力

$$\sigma_{bc} = \frac{F_{bc}}{S_0} \quad (4.2-24)$$

压缩屈服强度

$$\sigma_{0.2c} = \frac{F_{0.2c}}{S_0} \quad (4.2-25)$$

相对压缩率

$$\epsilon_c = \frac{h_0 - h_1}{h_0} \times 100\% \quad (4.2-26)$$

相对断面扩展率

$$\phi_c = \frac{S_1 - S_0}{S_0} \times 100\% \quad (4.2-27)$$

通过压缩试验可获得材料的压缩应力-应变曲线。如图 4.2-8 给出了 2024-T4 铝合金棒材的拉伸、压缩应力-应变曲线。可见，该棒材的压缩应力-应变曲线高于拉伸应力-应变曲线。

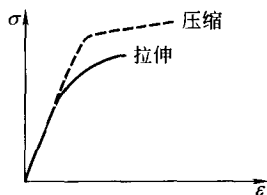


图 4.2-8 2024-T4 铝合金典型圆棒拉伸、压缩 σ - ϵ 曲线

压缩条件强度极限

$$\sigma_{bc} = \frac{F_{bc}}{S_0} \quad (4.2-28)$$

压缩真实强度极限

$$S_{bc} = \frac{F_{bc}}{S_k} \quad (4.2-29)$$

$\sigma_{bc} > S_{bc}$ ，两者关系为

$$\sigma_{bc} = (1 - \phi_c) S_{bc} \quad (4.2-30)$$

$$S_{bc} = (1 - \epsilon_c) \sigma_{bc} \quad (4.2-31)$$

4.2.3.3 压缩测试方法

试样：压缩试样可用圆柱形和矩形试样。圆柱形试样又有长短之分，用于破坏试验，如测试材料的抗压力强度试验等采用短圆柱试样，直径 d_0 为 $10 \sim 25\text{mm}$ ，试样高 h_0 一般取为 d_0 的 $1 \sim 3$ 倍，为防止压缩时试样失稳， h_0/d_0 在 $1.5 \sim 2$ 较好。为使载荷均匀，压缩试验要求试样二端面平行并和轴线垂直，端面研磨，粗糙度 R_a 为 $0.8 \sim 0.4\mu\text{m}$ 。

试验：为减少端面摩擦力，试验时端面涂二硫化钼等润滑剂或垫放聚四氟乙烯薄膜。对高分子等非金属材料，采用薄板试样试验时，需要设置侧向支撑夹具以防屈曲。压缩试验结果只有试样在相同的 h_0/d_0 比值下才可比较。

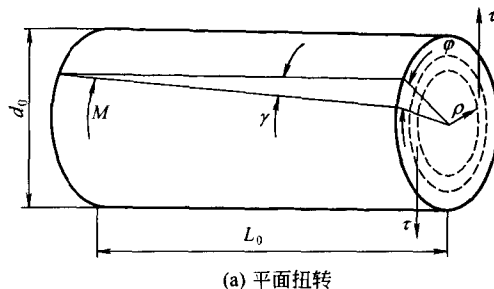
4.2.4 常温扭转性能及测试方法

4.2.4.1 扭转试验的特点与应用

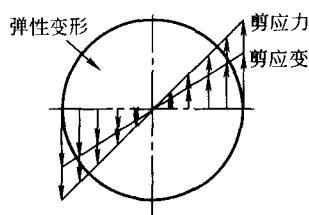
扭转试验的目的是得到材料在承受扭转载荷时的力学性能数据。在实际工程结构中，主要承受扭转载荷的构件大多数为轴类，如各类机械传动轴、转杆等，应用非常广泛。

进行扭转试验时，在直径为 d_0 的圆柱体试样两端施加两个在垂直于轴线平面内的大小相等、方向相反的力矩 M ，使得试样沿轴线各横截面发生相对于轴线的转动 [见图 4.2-9(a)]。

扭转试验的特点是，在试验过程中，试样沿长度方向的变形始终是均匀的，没有缩颈现象。因此对那些塑性较好的材料，此方法可以精确地测定其应力-应变关系。



(a) 平面扭转



(b) 横截面上的剪应力和剪应变

图 4.2-9 圆截面棒的扭转

圆轴扭转时，横截面上不存在正应力 σ ，仅有垂直于半径方向上的剪应力 τ ，剪应力的大小与扭转力臂长度 ρ 成正比，见图 4.2-9 (b)。横截面上任一点的剪应力为

$$\tau = \frac{M}{I_p} \rho \quad (4.2-32)$$

式中， M 为横截面上的扭矩； ρ 为扭转力臂，是 τ 所在

位置（横截面上任一点）到圆心的距离； I_p 为横截面对形心的极惯性矩，对圆棒试样为

$$I_p = \frac{\pi d_0^4}{32} \quad (4.2-33)$$

对外径为 d_0 ，内径为 d_1 的管状试样， I_p 为

$$I_p = \frac{\pi(d_0^4 - d_1^4)}{32} \quad (4.2-34)$$

在材料的扭转试验中，随着扭矩 M 的增加，扭转角 φ 也随着增加，把 M 与 φ 的变化关系绘制成曲线，即 $M-\varphi$ 曲线，得到如图 4.2-10 所示扭转图。需要的扭转性能参数可以从图中求出。材料在承受扭转载荷时，表面的应力最大，因此扭转试验可以较好地反映材料的表面质量。

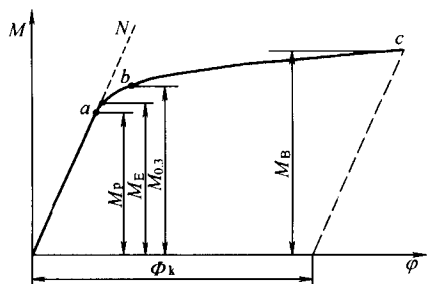


图 4.2-10 扭转曲线

4.2.4.2 扭转试验测定的力学性能参量

(1) 切变模量 在切应力与切应变呈线性关系的范围内，切应力与切应变之比称作切变模量 G 。在 $M-\varphi$ 图的线弹性段范围内测量扭矩增量 ΔM 和扭转角增量 $\Delta\varphi$ ，计算切变模量

$$G = \frac{\Delta M L_c}{\Delta\varphi I_p} \quad (4.2-35)$$

式中， L_c 为扭转计标距； I_p 为极惯性矩。

(2) 规定非比例扭转应力 扭转试验中，在试样标距部分内截面周边上的非比例切应变达到规定数值时，按弹性扭转公式计算得到的切应力。表示此应力的符号，应附以角注说明，如 $\tau_{p0.015}$ ， $\tau_{p0.3}$ 等分别表示规定的非比例切应变达到 0.015% 和 0.3% 时的切应力。

$$\tau_p = \frac{M_p}{I_p} \frac{d_0}{2} \quad (4.2-36)$$

令截面系数为

$$W = \frac{I_p}{\frac{d_0}{2}} \quad (4.2-37)$$

则有

$$\tau_p = \frac{M_p}{W} \quad (4.2-38)$$

(3) 屈服点（扭转） 扭转试验中，扭角增加而扭矩不再增加（保持恒定）时，按弹性扭转公式计算得到的切应力。

(4) 抗扭强度 根据试样在扭断前承受的最大扭矩，按弹性扭转公式计算得到的试样表面最大切应力，即

$$\tau_b = \frac{M_b}{W} \quad (4.2-39)$$

4.2.4.3 扭转试验方法概述

常用的扭转试验方法主要有金属室温扭转试验方法和金属丝材扭转试验方法。后者是材料工艺性能的试验方法，测试金属丝材料承受多圈扭转的能力。金属室温扭转试验通常采用圆柱形和圆管形试样，在扭转试验机上进行，试验机在试验时不能使试样产生轴向附加力，使用扭转计测量试样扭转角。在试验进行当中，以扭转角为横坐标，扭矩为纵坐标记录 $M-\varphi$ 曲线。根据从 $M-\varphi$ 曲线上测量的数据计算扭转力学性能参量，详见标准试验方法 GB/T 10128—1988 金属室温扭转试验方法。

在整个加载过程中，扭转试件的直径和标距几乎不改变，不会发生类似于拉伸试验时的颈缩失稳现象。试件各部位都会产生很大的塑性形变，有些低碳钢试样表面的伸长线应变可以达到拉伸试样非颈缩区最大伸长线应变的几十倍。因此，扭转试验便于描述和研究材料受力变形的全过程。

4.2.5 常温弯曲性能及测试方法

4.2.5.1 弯曲试验特点及应用

弯曲试验是通过试样施加静弯矩或弯曲力，测量相应的挠度，进而测定其力学性能的试验。试验时试样为简支梁平面弯曲受力状态，试样常采取矩形截面或者圆形截面梁，有集中力加载（三点弯曲）和等弯矩加载（四点弯曲）两种加载方式，一般弯曲至断裂。所施加的载荷垂直于梁的轴线，并作用在横截面全宽度上。在载荷作用下，梁的轴线在纵向对称面内弯曲成为一条平面曲线。沿试样长度方向弯矩的分布如图 4.2-11 所示。

在加载过程中，弯曲挠度 f 与载荷 F 之间的变化曲线称为试样的弯曲曲线。图 4.2-12 给出了典型韧性材料的弯曲曲线。从图中可以看出，当负荷施加到 p 点时，挠度 f 与载荷 F 保持正比关系；到 e 点时，挠度 f 仍为弹性变形；

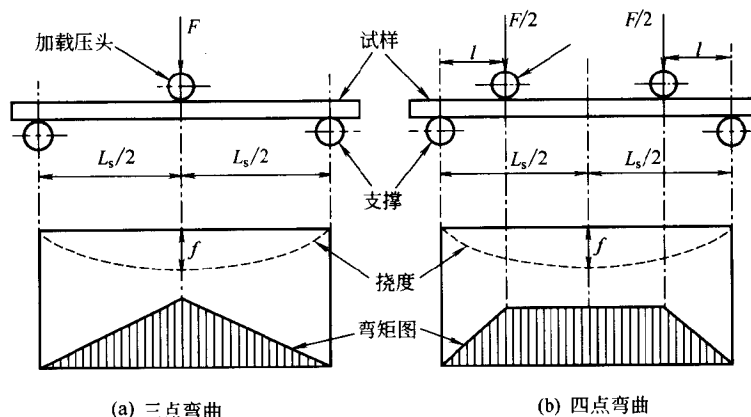


图 4.2-11 弯曲试验的加载方式和弯矩图

超过 e 点, 则除弹性变形外同时将产生一定的塑性变形; 到达 b 点时, 弯曲力达到最大值 F_{bb} ; 超过此点, 材料的抗弯能力将逐渐下降, 直至试样断裂。这种行为与拉伸时的力-伸长曲线颇为相似。对脆性材料, 几乎没有出现塑性变形, 试样即断裂。

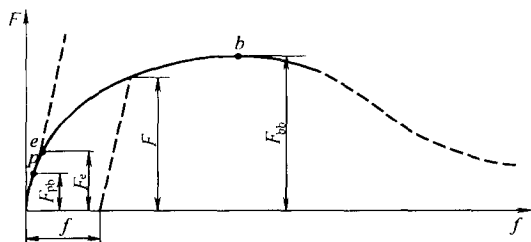


图 4.2-12 材料弯曲试验时得到的弯曲曲线

弯曲试验主要用来获得材料在弯曲载荷作用下的性能数据。韧性好的材料能承受很大的弯曲塑性变形, 在不能测定其弯曲断裂强度时, 可以对材料在弯曲情况下的塑性能进行比较, 这对材料的加工和应用仍然有重要意义。弯曲试验时, 试样横截面上受力不均匀, 表面应力最大, 因而对表面缺陷更敏感。所以弯曲试验常用来比较和判定结构件经表面强化处理后, 表面渗碳层和淬火层的质量。

淬硬工具钢、硬质合金、铸铁等进行力学性能试验时, 由于试样太硬, 难于加工成拉伸试样; 或者由于过脆, 拉伸试验时试样中心轴线略有偏差就会严重影响试验结果的准确性。弯曲试验则不受试样的偏斜影响, 可以稳定地测定脆性材料和低韧性材料的抗弯强度; 同时, 用挠度表示塑性, 能明显地显示脆性材料和低韧性材料的塑性。所以弯曲试验方法也是评定工具钢、硬质合金、铸铁以及其他铸造合金、陶瓷及其复合材料等材料的脆性趋势的理想试验方法。

4.2.5.2 弯曲试验测定的力学性能参量

弯曲力学性能参量的计算采用材料力学简支梁平面弯曲状态下推导的公式。平面弯曲时, 试样横截面上沿高度方向的应力分布是不均匀的, 一侧受拉应力, 另一侧受压应力, 中性面上应力为零, 上、下表面的应力最大。在计算力学参量时, 只计算最大应力的情况。在本节中, 试样跨距为 L_s , 四点弯曲的力臂为 l , 见图 4.2-11 (b)。试样尺寸, 圆截面直径为 d ; 矩形截面的高为 h , 宽度为 b 。载荷 F_{pb} 为非比例弯曲力, F_{bb} 为曲线上最大弯曲力, 如图 4.2-12 所示。

(1) 规定非比例弯曲应力 弯曲试验中, 试样弯曲外表面上的非比例弯曲达到规定值时, 按弹性弯曲应力公式计算的最大弯曲应力。在试验曲线上按规定的方法取规定非比例弯曲力 F_{pb} , 对三点弯曲试验

$$\sigma_{pb} = \frac{F_{pb} L_s}{4W} \quad (4.2-40)$$

对四点弯曲试验

$$\sigma_{pb} = \frac{F_{pb} l}{2W} \quad (4.2-41)$$

式中, σ_{pb} 为规定非比例弯曲应力; W 为试样的抗弯截面系数。对圆截面试样

$$W = \frac{\pi d^3}{32} \quad (4.2-42)$$

对于宽为 b , 高为 h 的矩形截面试样

$$W = \frac{bh^2}{6} \quad (4.2-43)$$

(2) 弯曲弹性模量 E_b 是表征材料对弯曲弹性变形的抗力指标, 其数值等于弯曲应力-弯曲应变曲线上直线段的斜率 (单位为 GPa)。弯曲弹性模量的测试方法是对试样施加相当于非比例弯曲应力 $\sigma_{pb0.01}$ 的 10% 以下的载荷和 50% 的

载荷, 两载荷之差为 ΔF , 测定试样承受上述载荷时对应的挠度, 两挠度之差为 Δf 。则三点弯曲试样的弯曲弹性模量为

$$E_b = \frac{L_s^3}{48I} \left(\frac{\Delta F}{\Delta f} \right) \quad (4.2-44)$$

四点弯曲试样的弯曲弹性模量为

$$E_b = \frac{l(3L_s^2 - 4l^2)}{48I} \left(\frac{\Delta F}{\Delta f} \right) \quad (4.2-45)$$

式中, I 为截面对中性轴的惯矩。对圆截面试样 $I = \pi d^4/64$; 对宽为 b 高为 h 的矩形截面试样 $I = bh^3/12$ 。

(3) 抗弯强度 试样在弯曲断裂前所承受的最大正应力。对三点弯曲试样为

$$\sigma_{bb} = \frac{F_{bb} L_s}{4W} \quad (4.2-46)$$

对四点弯曲试样为

$$\sigma_{bb} = \frac{F_{bb} l}{2W} \quad (4.2-47)$$

式中, σ_{bb} 为抗弯强度; F_{bb} 为试样上承受的最大弯曲力。

4.2.5.3 弯曲测试方法

(1) 金属的弯曲力学性能测试 试样规定为圆形截面和等边或不等边的矩形截面, 试样长度大于横截面高度方向尺寸的 16 倍。通常在万能材料试验机上装配专用三点弯曲或四点弯曲夹具进行加载, 试样挠度通过挠度计测量。试验中, 记录载荷-挠度曲线, 计算力学性能参量。具体方法请参照标准试验方法: GB/T 14452—1993 金属弯曲力学性能试验方法。

(2) 复合材料的弯曲试验 对各向异性的复合材料梁, 在计算复合材料弯曲强度时, 首先应该区分试样的破坏形式, 若是层间剪切破坏引起, 就不能计算弯曲强度。只在试样下表面或上表面拉坏时计算的弯曲强度才是合理的。复合材料的层间剪切强度比拉伸强度低得多, 为了克服三点弯曲时剪切应力的影响, 其跨厚比要比金属材料大。用三点弯曲法测得的弯曲弹性模量, 比用四点弯曲法测得的值低。复合材料在弯曲时, 应力状态比较复杂, 对内部结构和外界因素的敏感性很强。因此, 复合材料的弯曲试验数据一般只作为质量控制和材料鉴定指标, 也常用来评定材料的耐候性、吸水性和化学稳定性等, 而不作为材料性能设计的依据。详见有关的标准试验方法。

4.2.6 冲击性能及测试方法

冲击性能 (impact property) 是材料的重要力学性能之一。冲击试验 (impact test) 是利用能量守恒原理, 将一定形状和尺寸的带有 V 形或 U 形缺口的试样, 在高速冲击载荷作用下冲断, 以测定其冲击吸收功 A_K (absorbed energy) 的一种动力学试验方法。最常用的冲击试验方法为采用三点弯曲试样 (试样中部带有 V 形或 U 形缺口) 的弯曲冲击试验 (Charpy impact test) 方法。 A_K 值可用来评价材料在冲击载荷下的断裂抗力和韧性。冲击试验被广泛应用于评定材料的缺口敏感性和冷脆性倾向; 也常作为检验材料冶金质量和热加工后产品质量的一种重要手段。

4.2.6.1 加载速度及变形速度

冲击载荷与静载荷的主要差异, 在于加载速度显著不同。加载速度 (loading rate) 是指载荷施加于试样的速度, 用单位时间应力增加值表示, 单位为 MPa/s。变形速度为材料受到载荷作用后变形的速度。加载速度大则材料产生变形的速度也大, 一般用变形速度 (deformation rate) 间接地反映加载速度的变化。变形速度系单位时间的变形量, 有两

种表示方法,一种是绝对变形速度,即单位时间内试样的绝对变形量,以 v 表示

$$v = \frac{dl}{dt} \quad (\text{m/s}) \quad (4.2-48)$$

式中, l 为试样长度; t 为时间。另一种是相对变形速度,即为单位时间内试样的真实相对变形量,用 $\dot{\epsilon}$ 表示

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} \quad (\text{s}^{-1}) \quad (4.2-49)$$

式中, $d\epsilon = \frac{dl}{l}$ 。由上述两式可求得两种变形速度之间

关系为 $\dot{\epsilon} = \frac{v}{l}$ 。通常相对变形速度应用普遍,也称为应变速率。表 4.2-1 列出了不同的应变速率对应的试验类型及其特性。

表 4.2-1 不同的应变速率对应的试验类型及其特性

应变速率 $\dot{\epsilon}$ / s^{-1}	10^{-8}	10^{-6}	10^{-4}	10^{-2}	10^0	10^2	10^4	10^6
变形类型	蠕变	准静态	中等 $\dot{\epsilon}$	冲击	高速冲击			
加载方法	恒载或恒应力	液压或机械传动	气压或机械传动	机械或爆破冲击	爆破冲击			
试验动态特性	$\epsilon-t$ 曲线	恒 ϵ 试验	试样与试验机共振	弹塑性波传播	激波传播			
力特性	忽略惯性力			考虑惯性力				
温度特性	恒温			绝热				
应力状态	平面应力						平面应变	

经验表明,应变速率 $\dot{\epsilon}$ 在 $10^{-4} \sim 10^{-1} \text{s}^{-1}$ 的范围内,惯性力可忽略,按静态处理;当应变速率 $\dot{\epsilon}$ 更高时,惯性力不能忽略,必须考虑变形速率增大对材料力学性能的影响。

4.2.6.2 冲击载荷下金属的变形和断裂

由于材料的弹性变形以声速传播(如在钢中为 4982m/s),摆锤冲击试验变形速度在 10^3m/s 以下,弹性变形总能跟上外加载荷的变化,因而变形速度对金属材料的弹性模量 E 、泊松比 μ 等没有影响。而材料的塑性变形速度较慢,在高速冲击加载下,塑性变形来不及进行,塑性变形抗力随应变速率的增加而增加,特别是屈服强度有显著的升高。

金属在冲击载荷下的失效类型和在静载荷下的一样,也分为弹性变形、塑性变形和断裂三个阶段。如同拉伸试样一样,冲击试样的断口也有三种区域,即纤维区、放射区和剪切唇区,如图 4.2-13 所示。通常裂纹源位于缺口根部中段稍离表面处。对塑性较好的材料,裂纹沿两侧和深度方向稳定扩展,中央部分较深,构成中部突进式纤维状区域,然后失稳扩展而呈放射区。由于试样无缺口一侧受压缩应力,应力状态变软,可在此侧再次出现二次纤维区。如果材料塑性很好,则放射区可完全消失,整个断面上只存在纤维区和两

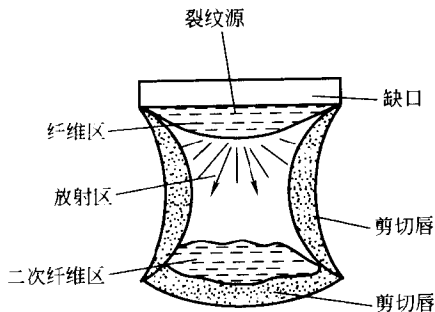


图 4.2-13 冲击试样断口

侧及底部最后形成的剪切唇。反之如果材料塑性很差,则受压侧塑性变形很小,二次纤维区消失,甚至无剪切唇,全部断口呈放射区。

4.2.6.3 冲击试验测定的力学性能参量

(1) 冲击吸收功 具有一定形状和尺寸的试样在规定类型试验机上,在一次冲击载荷下折断时所吸收的功。用 A_K 表示,单位为 $\text{J} (\text{N} \cdot \text{m})$ 。

(2) 冲击韧性 冲击吸收功 A_K 除以试样缺口处净截面积 S_N ,即得到冲击韧性值。用 a_K 表示,单位为 J/cm^2

$$a_K = \frac{A_K}{S_N} \quad (4.2-50)$$

4.2.6.4 冲击吸收功 A_K 、冲击韧性 a_K 的适用性

长期以来,习惯把冲击韧性 a_K 值作为评定材料韧脆程度及材料承受冲击载荷的抗力指标,这是不适宜的。由于其物理意义不明确,多数国家已不采用。 a_K 值是单位面积的冲击吸收功,与试样形状、截面尺寸和缺口的形状及尺寸无关。试样截面尺寸和缺口的形状及尺寸的改变而引起的 A_K 的变化与缺口处净截面积不成线性关系。所以截面尺寸不同, a_K 值也不同。试样在冲击载荷作用下产生弯曲变形,缺口处截面上的应力分布是不均匀的。试样被冲击断裂时, A_K 主要消耗于产生两个新的自由表面和一部分体积的塑性变形。目前,国际上通用的是把冲击吸收功 A_K 作为材料承受冲击载荷的抗力指标。

A_K 为冲断试样消耗的总功,但不能代表试样断裂前所吸收的总功。冲断试样消耗的总功可分为两部分,其一消耗于试样的变形和断裂;其二消耗于试样抛出及机座本身振动。对金属材料后一项值很小,一般略去;对陶瓷等脆性材料第一项值很小,就应使用小能量摆锤去试验,避免后一项所占比例过大带来大的误差;另外,有些高分子有机材料(如聚甲基丙烯酸甲酯类塑料),试样抛出功有时可达总能量的 50%,除采用小能量的摆锤外,对试验结果还要进行修正。

4.2.6.5 弯曲冲击试验方法

(1) 弯曲冲击试验方法 试验时将试样放在试验机支座上,将具有一定质量 G 的摆锤举至一定高度 H_1 ,使其获得一定位能 GH_1 ,然后将其释放,摆锤下落至最低位置时冲断试样。之后摆锤扬起至高度 H_2 ,剩余位能为 GH_2 。如果忽略空气阻力等各种能量损失,则冲断试样所消耗的能量(即试样的冲击吸收功 A_K)为

$$A_K = GH_1 - GH_2 = G(H_1 - H_2) \quad (4.2-51)$$

A_K 除以试样缺口处的净截面积 S_N 便得到材料的冲击韧性值 a_K 。

(2) 试样 采用 GB/T 229—1994 或 HB 5144—1996 规定的标准三点弯曲试样,其尺寸为 $10\text{mm} \times 10\text{mm} \times 55\text{mm}$ 。试样中部带有 2 mm 深的 U 形或 V 形缺口。具体试样尺寸及试样制备方法参见上述标准。

(3) 试验机 摆锤刀刃角度 30° ,刀刃为 $R2 \sim 2.5\text{mm}$ 圆弧,试验机支座距离为 40mm,试样缺口应处于试验机打击中心,其偏差不应大于 0.2mm。

4.2.6.6 冲击值与其他力学性能参量的关系

(1) 冲击吸收功 A_K 与断裂韧性 K_{IC} 许多学者试图建立 A_K 和 K_{IC} 的关系,但大量的试验结果表明,两者之间无必然联系。典型的例子是高强度钢经过高温淬火后, A_K 值升高 K_{IC} 却降低了。对金属材料,可认为冲击吸收功 A_K 主要消耗于试样的变形和断裂,而只有使裂纹扩展的 A_K 部分

和材料的 K_{IC} 有关。超高强度钢的 A_K 值中贡献于裂纹扩展的部分少, 而中、低强度钢 A_K 值中贡献于裂纹扩展的部分多。

(2) 冲击吸收功 A_K 与疲劳裂纹形成寿命的关系 对高强度和超高强度钢, A_K 值的主要部分消耗于裂纹形成, A_K 值在一定程度上反映了疲劳裂纹形成的难易。在等应力条件下 A_K 值较高的贝氏体组织的疲劳寿命比 A_K 值低的马氏体组织的长, 并且随着应力水平的降低和疲劳寿命的延长, 疲劳裂纹形成寿命占总寿命的比值进一步提高。

(3) 冲击吸收功 A_K 与应力强化系数 Q 的关系 缺口的存在导致在缺口处产生三向应力状态和应力应变集中, 使材料的塑性变形受到约束从而提高了屈服强度, 这种屈服强度的提高可用应力强化系数 Q 来表征。当 Q 足够大时, 材料在断裂前没有塑性变形就脆性断裂。材料脆性断裂的判据为

$$Q\sigma_s \geq \sigma_t \quad (4.2-52)$$

Q 和 A_K 值的大小均能反映材料缺口敏感性的高低。

4.2.6.7 冲击试验应用

(1) 评价材料的冶金质量和热加工后的产品质量 通过测定冲击吸收功 A_K 及观察冲击试样断口形貌, 可间接评价材料的冶金缺陷 (如夹渣、气泡、严重分层、偏析以及夹杂物超标等) 存在的严重程度; 也可用来间接评价锻造和热处理所造成的缺陷 (如过热、过烧、白点、回火脆性、淬火及锻造裂纹、纤维组织各向异性等) 情况, 有助于热加工工艺的改进。

(2) 评定材料在不同温度下的韧脆转化趋势 在一系列温度下进行冲击试验, 可得冲击吸收功 A_K 对温度的关系曲线, 据此可以评定材料的冷脆性倾向, 并得到材料的韧脆转变温度 (ductile-brittle transition temperature)。部件的服役温度应高于其韧脆转变温度。

(3) 确定应变时效敏感性 钢铁材料, 尤其是低碳钢板经过冷加工变形后长期处于较高温度下工作时, 其塑性和韧性会下降, 称为应变时效。应变时效敏感性用时效前、后的冲击吸收功之差与时效前的冲击吸收功之比的百分数表示。

(4) 评价材料的缺口敏感性 金属材料因存在缺口导致在缺口处产生三向应力状态和应力应变集中, 从而使金属材料塑性降低、脆性增大, 这种现象称为缺口敏感性。对具有不同缺口形状的试样, 通过测定其 A_K 值, 来评价材料的缺口敏感性。

4.2.7 硬度性能及测试方法

硬度是衡量材料软硬程度的一种性能指标, 是指材料在局部抵抗变形和破裂的能力。硬度试验方法有十几种, 基本可归类为压入法、刻划法和回跳法三大类。压入法硬度表征材料抵抗局部变形的能力。刻划法硬度表征材料抵抗局部破裂的能力。回跳法硬度则表征材料弹性变形功的大小。这些试验方法不仅在原理上有区别, 即使是同一种方法也存在着试验力、压头和标尺的不同。因此, 进行硬度试验首先要考虑的问题就是要根据材料的特性选择一种合适的试验方法和试验条件。

硬度的测试方法中, 最为常用的是压入法, 包括布氏硬度、洛氏硬度、维氏硬度等。压入法硬度综合反映了压痕附近局部体积内材料的弹性、微量塑变抗力、应变硬化能力以及大量塑变抗力等物理量的大小。压入法硬度试验的应力状态最“软”, 即最大切应力远大于最大正应力。在这样的应力状态下几乎所有的金属材料都会产生塑性变形。压入法除能测定金属材料的硬度外, 也可用来测定玻璃等脆性材料的硬度。

4.2.7.1 布氏硬度

(1) 布氏硬度 (Brinell hardness) 试验方法 布氏硬度试验是目前最常用的硬度试验方法之一, 适用于测定布氏硬度值在 650 以下的材料硬度。其原理如图 4.2-14 所示, 在直径为 D 的钢球或硬质合金球上, 施加一定的载荷 P , 压入试样表面, 经规定保持时间后卸载。根据试样表面的球形压痕表面积 S , 求出单位压痕面积承受的平均压力值, 定义为材料的布氏硬度, 记作 HB。

$$HB = \frac{P}{S} = \frac{P}{\pi D h} \quad (4.2-53)$$

式中, h 为压痕深度。在实际测试中, 实测压痕直径 d 要比实测 h 方便, 将 $h = \frac{D}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{D^2 - d^2}$ 代入上式可得

$$HB = \frac{2P}{\pi D [D - (D^2 - d^2)^{1/2}]} \quad (4.2-54)$$

当力的单位为 kgf 时, 用上式直接求出 HB; 当力的单位为 N 时, 上式再乘以系数 0.102。通常 HB 值是不标出单位的。

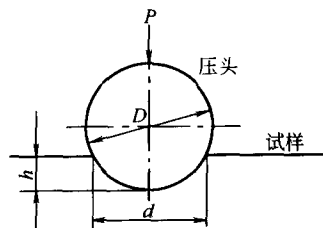


图 4.2-14 压痕深度和压痕直径关系

具体试验方法参照标准 GB 231—1984 和 HB 5168—1996 的规定。布氏硬度试验对试样的要求是上下表面平行, 试验面为光滑平面, 不应有氧化物和外界污物, 表面粗糙度 $Ra \leq 0.8 \mu m$ 以及试样厚度至少为压痕深度的 10 倍。两相邻压痕中心的距离不应小于压痕平均直径的 4 倍, 任一压痕中心至试样边缘的距离不应小于压痕平均直径的 2.5 倍。载荷的保持时间, 对黑色金属为 10~15s, 对有色金属为 30s, 对 $HB < 30$ 的材料为 60s。

钢球压头只适用于 $HB < 350$ 的材料; 硬质合金球压头适用于 $350 < HB < 650$ 的材料。HB 值表示方法规定为: 压头为钢球时用符号 HBS, 为硬质合金时用 HBW 表示, 符号前为硬度值, 符号后按球体直径、载荷和保持时间顺序用数值表示试验条件, 如果保持时间在 10~15s 内则不需标明。例如: 150HBS 10/1000/30 表示试样用 10mm 钢球压头, 在 9.807kN (1000kgf) 作用下, 保持 30s, 测得布氏硬度值为 150。

(2) 压痕相似原理 对于材料相同而厚薄不同的工件, 为了测得相同的布氏硬度值, 在选配压头直径和压下载荷时, 应保证测试时得到几何相似的压痕 (即压痕的压入角 ϕ 保持不变), 如图 4.2-15 所示。为此应使

$$\frac{P_1}{D_1^2} = \frac{P_2}{D_2^2} = \dots = \frac{P}{D^2} \quad (4.2-55)$$

为常数, 这样才能保证对同一材料得到相同的 HB 值。压头直径 D 规定有 10mm、5mm、2.5mm、2mm 和 1mm 5 种, 而常用的 P/D^2 值规定有 30、15、10、5、2.5、1.25 和 1 七种。对于软硬不同的材料, 为测得统一的可资比较的硬度值, 应选用不同的 P/D^2 值, 使压入角 ϕ 在 $28^\circ \sim 74^\circ$ 的范围内, 与此对应的 d 在 $(0.24 \sim 0.6) D$ 之间。

(3) 布氏硬度优缺点 优点是压痕面积大, 能反映材料表面较大体积范围内各组成相的综合平均性能, 适宜于测定具有粗大晶粒或粗大组成相的材料; 试验数据稳定, 可重复

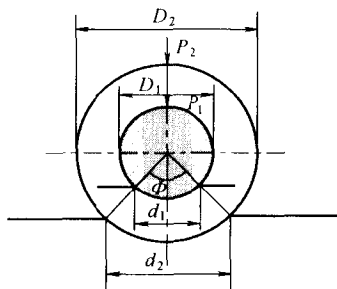


图 4.2-15 压痕相似原理

性强。缺点是对不同材料要更换压头和改变载荷，压痕直径的测量也较麻烦；由于压痕大，不宜在成品及厚度薄的零部件上进行直接测试。

4.2.7.2 洛氏硬度

(1) 洛氏硬度 (Rockwell hardness) 试验方法 洛氏硬度试验用检测压痕深度来表示材料硬度 (记作 HR)，避免了布氏硬度试验的缺点，即压痕直径的测量。洛氏硬度试验所用压头为圆锥角 $\alpha=120^\circ$ 的金刚石圆锥体 (适合于测定淬火钢等硬度较高的材料) 或为直径 $D=1.588\text{mm}$ ($1/16'$) 和 $D=3.175\text{mm}$ ($1/8'$) 的淬火钢球 (适合于测定有色金属等硬度较低材料)。根据标准 GB/T 230—1991 和 HB 5172—1996，洛氏硬度有 A、B、C、D、E、F、G、H、K、L、M、P、R、S 和 V 共 15 种不同标尺供测试不同硬度选用。对不同硬度的材料，可选配不同的压头和载荷，组成不同的标尺。最常用的标尺有 A、B 和 C 三种，其硬度值分别用 HRA、HRB 和 HRC 表示。洛氏硬度试验对试样的要求是表面无油脂、氧化物及表面粗糙度 $R_a \leq 0.8\mu\text{m}$ 。

图 4.2-16 为用圆锥体压头测定洛氏硬度的原理图。测试时，首先对压头施加初始载荷 P_0 ，使其压入试样一定深度 h_0 ，作为测量压痕深度的基线。随后再施加主载荷 P_1 ，压痕深度的增量为 h_1 ， h_1 中包括弹性变形和塑性变形。经规定保持时间后卸除 P_1 ，则 h_1 中的弹性变形恢复，在试样上得到由于主载荷 P_1 所产生的压痕深度的残余增量 e 。因 e 值越大硬度越低，故用一个常数 k 减去 e 表示硬度值，并规定每 0.002mm 为一个硬度单位。则洛氏硬度值可用下式计算

$$\text{HR} = \frac{k-e}{0.002} \quad (4.2-56)$$

可见洛氏硬度值是一个无量纲的量。当用金刚石圆锥体压头时， k 取为 0.2mm ；当用淬火钢球压头时，多用于测定较软材料的硬度，压入深度较深， k 取为 0.26mm 。

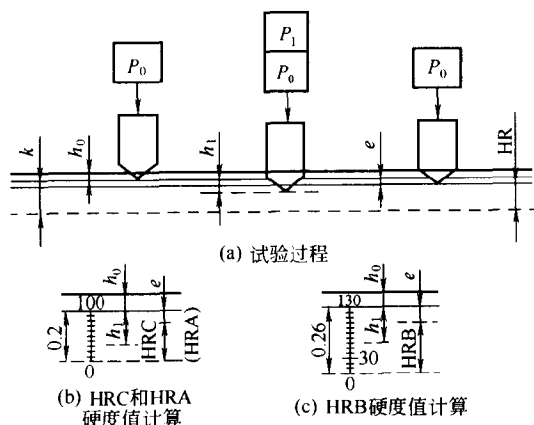


图 4.2-16 洛氏硬度试验原理

(2) 洛氏硬度优缺点 优点是操作简便迅速，试验效率高；不存在压头变形，压痕较小，可在一些成品表面直接进行检测；采用不同标尺可测定各种软硬不同和厚薄不一的试样硬度。缺点是压痕较小，代表性差；对于有偏析和组织不均匀等缺陷的材料，重复性差；用不同硬度标尺测得的硬度值无法统一，不能直接进行比较。

4.2.7.3 维氏硬度

(1) 维氏硬度 (Vickers hardness) 试验方法 维氏硬度的试验原理和布氏硬度的相同，也是根据压痕单位面积所承受的载荷作为硬度值，记作 HV。维氏硬度试验是在一个相对面夹角为 136° 的正四棱锥体金刚石压头上，施加规定的载荷，压入试样表面，经规定保持时间后卸载，测定压痕的两对角线长度，取其平均值 d (mm)。则 HV 可通过下式计算

$$\text{HV} = \frac{P}{S} = \frac{P}{\frac{d^2}{2\sin 68^\circ}} = 1.8544 \frac{P}{d^2} \quad (4.2-57)$$

式中， S 为压痕表面积。

当力的单位为 kgf 时，用上式直接求出 HV；当力的单位为 N 时，上式再乘以系数 0.102。和 HB 值一样，通常 HV 值也是不标出单位的。选用四方锥体压头类似布氏硬度测试中 P/D^2 为定值的条件，即压头在不同载荷作用下压入角 ϕ 不变。当硬度值在 450HB 以下时 HV 与 HB 基本相等。

根据标准 GB/T 4340—1999 和 HB 5173—1996，维氏硬度适用于硬度在 5~1000HV 的材料。施加的压下载荷在 5~100kgf (即 49.03~980.7N) 之间。试样表面为光滑平面，不应有氧化物等污物，表面粗糙度 $R_a \leq 0.16\mu\text{m}$ 。载荷作用方向应与试验面垂直。试样厚度至少应为对角线平均长度的 1.5 倍。对黑色金属，两相邻压痕中心内或距试样边缘不小于压痕对角线平均值的 2.5 倍。对有色金属，上述距离应不小于压痕对角线平均值的 5 倍。载荷的保持时间，对黑色金属为 10~15s，对有色金属为 30s。

维氏硬度表示方法规定为：HV 前为硬度值，HV 后按载荷和保持时间顺序用数值表示试验条件，如果保持时间在 10~15s 内则不需标明。例如 650HV 30/20 表示用 294.2N (30kgf)，载荷保持 20s，测得 HV 值为 650。

(2) 维氏硬度优缺点和适用范围 与布氏和洛氏硬度相比，维氏硬度试验具有很多优点。由于采用正四棱锥体金刚石压头，当载荷改变时，压入角恒定不变，不存在布氏硬度载荷 P 和压头直径 D 之间关系的约束；角锥压痕清晰，可精确计量对角线长度；不存在洛氏硬度不同标尺的值不能统一的问题；比洛氏硬度能更好地测定薄件的硬度。缺点是试验效率不如测洛氏硬度高，不宜用于成批生产的常规检验。

4.2.7.4 努氏硬度

努氏硬度 (Knoop hardness) 试验是维氏硬度试验的发展，属于低载荷压入的显微硬度试验。试验原理和维氏显微硬度相同，不同的是四棱锥体金刚石压头的两个相对面的夹角不等，分别为 172.5° 及 130° ，在试样上得到长、短对角线之比为 7.11 的菱形压痕。测量压痕的长对角线长度 d (mm)，用下式计算努氏硬度值，并记作 HK

$$\text{HK} = 14.229 \frac{P}{d^2} \quad (4.2-58)$$

当力的单位为 kgf 时，用上式直接求出 HK；当力的单位为 N 时，上式再乘以系数 0.102。努氏硬度试验载荷可在 0.05~2kgf (即 0.49~19.61N) 范围内选取。

努氏硬度试验由于压痕细长，只测量长对角线的长度，精确度较高。对于薄层区域的硬度检查以及测定硬度分布极