

GB/T 228.1 — 2010

《金属材料 拉伸试验
第1部分：室温试验方法》
实施指南

高怡斐 梁新帮 邓星临 编著



 中国质检出版社
中国标准出版社

GB/T 228.1—2010

《金属材料 拉伸试验 第1部分：室温试验方法》

实 施 指 南

高 怡 斐 梁 新 帮 邓 星 临 编 著

中国质检出版社

中国标准出版社

北 京

图书在版编目(CIP)数据

GB/T 228.1—2010《金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法》实施指南/高怡斐,梁新帮,邓星临编著. —北京:中国标准出版社,2012
ISBN 978-7-5066-6727-2

I. ①G… II. ①高…②梁…③邓… III. ①金属材料-拉伸试验-国家标准-中国-指南 IV. ①TG115.5-65

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 082398 号

中国质检出版社
中国标准出版社 出版发行
北京市朝阳区和平里西街甲 2 号(100013)
北京市西城区三里河北街 16 号(100045)

网址: www.spc.net.cn

总编室:(010)64275323 发行中心:(010)51780235

读者服务部:(010)68523946

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷

各地新华书店经销

*

开本 787×1092 1/16 印张 8.5 字数 199 千字

2012 年 7 月第一版 2012 年 7 月第一次印刷

*

定价 38.00 元

如有印装差错 由本社发行中心调换

版权专有 侵权必究

举报电话:(010)68510107

前 言

金属力学性能试验方法是检测和评定冶金产品质量的重要手段之一,其中室温拉伸试验方法是应用最广泛的力学性能试验方法。拉伸性能指标是金属材料的研制、生产和验收最主要的测试项目之一,拉伸试验测定的各项强度性能和延性性能指标是反映金属材料力学性能的重要参数。影响拉伸试验结果测量不确定度的因素有很多,主要包括试样、试验设备和仪器、拉伸试验速率、拉伸性能测试技术和试验结果处理几大因素。为获得准确可靠的、实验室间可比较的试验数据和试验方法具有可行性,必须将这些因素加以限定,使其变化的影响减至最小,这就是试验方法标准化的基本目的和要求。

GB/T 228.1《金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法》由1963年版、1976年版、1987年版、2002年版发展至目前的2010年版本,已经经过了四次修订。随着我国科学技术的发展和测试技术水平的提高,新版标准中,从技术内容、结构上,从标准总体的科学性、先进性和实用性方面已步入国际水平。

GB/T 228.1—2010标准从开始立项准备、草案稿、征求意见稿、审定稿和终审稿,到最终发布出版前后历时4年多,是历时周期长、技术难度大的一次标准修订工作。为了广泛征求业界的意见、获得最佳的标准修订成果,该标准历经“二征三审”(征求意见稿两次,草案讨论会一次,标准审定会一次,终审会一次),终成正果,在终审会上技术水平被评为“国际先进”水平。在此过程中,TC183/SC4全国钢标准化技术委员会力学及工艺试验方法分技术委员会作了大量的组织协调工作,付出了辛勤的劳动,编者在此表示深深的敬意。同时对参与本标准起草的所有起草单位和起草人一并表示感谢!

在本次修订中,在技术内容上最重要的变化是引入了应变速率的实验方法。对于新方法,在标准的修订过程中、在今后的实际应用中,自然会有读者提出许多新问题。作为标准主要起草人之一,编者觉得有许多问题需要讲清楚、说明白,因此有必要编写GB/T 228.1—2010的实施指南,以辅助贯彻实施新版标准,以使试验人员能更好地理解 and 正确实施这个在金属材料领域应用最广泛的基础试验方法标准。

对于本书中不足之处,恳请读者予以指正。

编 者
2012年5月

目 录

第一章 概述	1
第一节 金属材料拉伸试验基础知识	1
第二节 GB/T 228《室温拉伸试验方法》的变迁	10
第二章 新旧版本标准对照	17
第一节 性能名称、符号的变动	17
第二节 主要技术要求对照	18
第三章 标准结构和定义	24
第一节 拉伸试验标准体系结构	24
第二节 标准的适用范围及规范性引用文件	24
第三节 性能术语定义、符号和计量单位	25
第四章 试样与试样尺寸测量	29
第一节 试样	29
第二节 试样原始横截面积的测定	46
第三节 有关测量的若干问题的处理	52
第五章 试验设备	60
第一节 拉伸试验机	60
第二节 引伸计	64
第三节 试样原始标距标记装置	66
第六章 拉伸试验速率	67
第一节 试验速率	67
第二节 应变速率控制的试验速率(方法 A)	72
第三节 应力速率控制的试验速率(方法 B)	83
第七章 拉伸性能测定	86
第一节 强度性能的测定	86

第二节	延性性能的测定	98
第三节	性能测定结果数值的修约	106
第四节	拉伸试验重试	108
第五节	试验报告	109
第六节	性能测定相关的补充	110
第八章	拉伸试验的测量不确定度	112
第一节	评定不确定度的基本知识	112
第二节	金属材料室温拉伸试验测量结果不确定度 评定	117
参考文献		128

第一章 概 述

第一节 金属材料拉伸试验基础知识

一、金属材料拉伸试验的目的和意义

金属材料受外力作用时会表现出各种不同的行为,呈现出弹性与非弹性反应相关或涉及应力-应变关系的力学特性。金属力学性能正是材料承受外载荷而不发生失效的能力。力学性能的判据是表征和判定金属力学性能所用的指标和依据,而其高低表征材料抵抗外力作用的能力水平,是评定金属材料质量的重要依据。

拉伸试验是金属力学试验中最基本的试验。通过拉伸试验获得的拉伸力学性能是工程材料的基本力学性能,拉伸试验的基本目的就在于此。通过拉伸试验可以评定金属材料的弹性性能、强度性能、塑性性能等方面多种性能参数。为金属材料质量检验、研制和开发新材料、改进材料质量、最大限度地发挥材料潜力、进行金属材料制件的失效分析、确定金属材料制件的合理设计、制造、安全和维护提供依据,也为选材和质量控制提供重要依据。

影响金属材料拉伸力学性能测定的因素很多,为了限制和减小因素的影响,以便测出可供分析对比和利用的各种性能,拉伸试验必须标准化、通用化并与国际接轨。更好地促进技术的发展和交流。

二、拉伸试验力学参量

1. 应力

一根原始横截面积为 S_0 、长度为 L 的直杆试样,若在其两端施加拉力 F ,在力的作用下发生变形,轴向延伸和横向缩短,如图 1-1 所示。因外力作用而发生变形的试样,同时亦导致其内部各质点间相互作用而产生抵抗这种变形的内力。在图 1-1 的情况下,作用力通过直杆试样的横截面中心,横截面上内力的合力与外作用力 F 大小相等,方向相反。内力在横截面上均匀分布。为了便于比较几何相似的试样的内力强度,需要引入一个力学参量,作为比较的基础。这个力学参量就是“应力”。应力定义为单位面积上的内力。一般用符号 σ 表示,单位用 MPa 表示。

按照上述定义,应力与作用力和受力的横截面积大小相关。图 1-1 中受外力作用的试样,作用力变化时,由于纵向延伸和横向缩短,实际上瞬时横截面积也随之变化。显然,在计算应力时,用试样实际瞬时横截面积或受力前的原始横截面积,其结果会不同。按照 GB/T 10623—2008《金属材料 力学性能试验术语》的定义,按照瞬时横截面积计算的轴向应力称为真应力,用公式(1-1)表示:

$$\sigma_T = \frac{F}{S_T} \quad (1-1)$$

式中： σ_T 为真应力； F 为横截面上承受的力； S_T 为实际的瞬时横截面积。

虽然用真应力表示内力强度是准确的方法，但在实际中，由于随着外力的变化试样横截面积也随之变化，因此，式(1-1)表示的真应力不便于工程实际的使用。实际应用中通常采用工程应力。按照 GB/T 10623—2008 的定义，按原始横截面积计算的轴向应力称为工程应力（而在施加力方向上的应力分量称为轴向应力），简称应力，用式(1-2)表示：

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad (1-2)$$

式中： σ 为工程应力； F 为横截面上承受的力； S_0 为原始横截面积。

与真应力相比较，用工程应力表示的内力强度不如真应力的准确。但在金属材料的弹性范围内，或总应变不大的情况下，工程应力的误差不大，对于大多数工程实际来说准确度是足够的。

在拉伸试验中试样处于均匀延伸状态下，真应力与工程应力有固定关系。通过假定试样变形时体积保持不变，可以写出如下关系：

$$V_0 = S_0 L_0 = S_1 L_1$$

$$\text{那么} \quad S_1 = \frac{S_0 L_0}{L_1} \quad (1-3)$$

式中： S_1 为瞬时横截面积； L_1 为瞬时长度。将式(1-3)中 S_1 代替式(1-1)中的 S_T ，得到：

$$\sigma_T = \left(\frac{L_1}{L_0}\right) \left(\frac{F}{S_0}\right) = \left(1 + \frac{\Delta L}{L_0}\right) \sigma = (1 + e) \sigma \quad (1-4)$$

式中： e 为工程应变；式(1-4)为真应力与工程应力的关系。在测定金属拉伸硬化指数 n 时，在计算中用到此关系式。

2. 应变

考虑图 1-1 的试样拉伸情况，外加的拉力不仅导致试样内部产生抵抗变形的内力，而且也导致试样内部质点间相对位移，其总效应表现为试样的延伸。

经验表明，试样的延伸不但与作用的外力大小有关，也与试样的长度有关。为了比较不同尺寸试样的变形程度，同样需要引入一个力学参量作为比较的基础。这个力学参量就是“应变”。按照 GB/T 10623—2008 的定义，由外力所引起的试样尺寸和形状的单位变化量称为应变（而在施加力方向上的线应变称为“轴向应变”）。工程应变用符号 e 表示。应变是无量纲的量，一般用百分数表示。

与上述的应力情况一样，应变也有真应变和工程应变之分。工程应变定义为瞬间长度与原始长度之差与原始长度之比。用式(1-5)表示：

$$e = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (1-5)$$

式中： L 为瞬时长度； L_0 为原始长度； ΔL 为总延伸。工程应

变简称应变，按照式(1-5)定义的工程应变便于计算。在金属弹性范围内或总应变量不大的情况下，按照式(1-5)计算工程应变具有足够准确度。但工程应变不是严格的力学参量，因

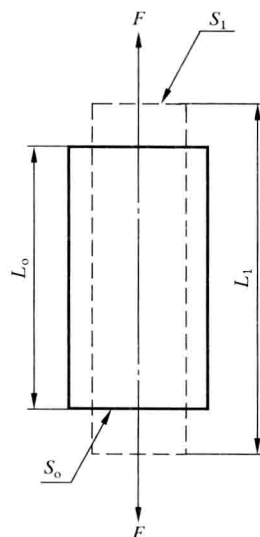


图 1-1 直杆试样的拉伸变形（纵向延伸和横向缩短）

为它不具有可叠加性。举例说明,图 1-1 的试样首先从原始长度 L_0 延伸到 L_1 ,计算的工程应变为 e_1 ,然后从 L_1 延伸到 L_2 ,计算的工程应变为 e_2 。两次应变之总和为:

$$e_1 + e_2 = \frac{L_1 - L_0}{L_0} + \frac{L_2 - L_1}{L_1}$$

现在改变方式,使试样从原始长度 L_0 一次延伸到 L_2 ,则此时的工程应变为:

$$e = \frac{L_2 - L_0}{L_0}$$

从上面两式可以看到, $e_1 + e_2 \neq e$ 。这说明工程应变并不具有可叠加性。其原因是,工程应变的定义没有考虑试样长度在延伸过程中对应变计算的影响。因此,用总延伸 ΔL 与原始长度之比表示的应变不是严格准确。

若考虑用试样延伸过程中瞬时的微小延伸 dL 与该时刻试样长度 L 之比,来表示此时此刻的微小真实相对延伸 $d\epsilon$:

$$d\epsilon = \frac{dL}{L} \quad (1-6)$$

总相对延伸即为各微量真实相对延伸之和。在极限情况下,求和运算变为积分运算,即对式(1-6)的积分:

$$\epsilon = \int_{L_0}^L d\epsilon = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right) \quad (1-7)$$

式(1-7)表示的真实相对延伸称为“真应变”。因此,真应变的定义(见 GB/T 10623—2008)是:在缩颈开始之前,瞬时长度与原始长度之比的自然对数。真应变也称“对数应变”。真应变具有可叠加性。前述例子中,两次延伸的试样,其各次真应变分别为:

$$\begin{aligned} \epsilon_1 &= \ln\left(\frac{L_1}{L_0}\right) \\ \epsilon_2 &= \ln\left(\frac{L_2}{L_1}\right) \end{aligned}$$

两次总真应变为:

$$\epsilon = \epsilon_1 + \epsilon_2 = \ln\left(\frac{L_1}{L_0}\right) + \ln\left(\frac{L_2}{L_1}\right) = \ln\left(\frac{L_2}{L_0}\right)$$

由此可见,真应变是具有可叠加性的力学参量。

在轴向拉伸试样均匀延伸的状态下,真应变与工程应变之间有固定关系。从式(1-7)可以导出这一关系:

$$\epsilon = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right) = \ln\left(\frac{L_0 + \Delta L}{L_0}\right) = \ln(1 + e) \quad (1-8)$$

在测定金属材料的拉伸应变硬化指数 n 时,要用到式(1-8)计算真应变。

在以后的各章节中,出现的应力和应变这两个力学参量,均为工程应力和工程应变。

三、金属拉伸时物理现象和力学判据

1. 拉伸图

拉伸试验时,以力为纵坐标,以延伸作为横坐标,记录拉伸过程曲线称为拉伸图,亦即力-延伸曲线($F-\Delta L$ 曲线)。

金属材料拉伸图的形状各种各样,图 1-2 是常见的低碳钢室温拉伸试验的拉伸图。以

此为典型例子说明拉伸过程中各变形阶段的特征。

第1阶段(*oa*):弹性变形

在此阶段试样处于弹性变形状态,变形完全可逆,而且力与延伸呈线性关系。正因为这样,将其称为线弹性变形。此阶段内的弹性变形的延伸可按式(1-9)计算:

$$\Delta L = \frac{FL_0}{ES_0} \quad (1-9)$$

式中: E 为弹性模量(或杨氏模量)。

但经精确的测量发现,在 *oa* 范围内,力与延伸的关系稍稍偏离线性,实际弹性延伸为:

$$\Delta L = \frac{FL_0}{ES_0} \left(1 + \frac{nF}{E_0 S_0} \right) \quad (1-10)$$

式中: E_0 为变形开始时的弹性模量; n 为系数,就钢铁而言,在 5~7 之间。从工程实际的观点看,式(1-10)的非线性部分的偏差并不大,完全可以忽略不计。因而可以把 *oa* 阶段看作线性变形处理。

第2阶段(*ab*):滞弹性变形

此阶段仍为弹性变形,变形仍然可逆。但 *ab* 阶段的弹性变形滞后发生,而且是非线性的,应力不与应变成线性比例关系。对于金属材料来说,此阶段相对地很短。

第3阶段(*bc*):屈服前微塑性变形

当超过 *b* 点进入 *bc* 阶段时,开始出现连续的均匀微小塑性变形,此阶段也相对地很短,而且不容易与滞弹性变形阶段准确区分开。

第4阶段(*cde*):屈服变形

在此阶段,塑性屈服变形不连续,在试样的表面可以观看到吕德斯带(滑移线)。*c* 点为不连续屈服的开始,从 *c* 到 *d* 为第一条吕德斯带产生。由于突然发生塑性延伸,其延伸速率超过试验机横梁移动速率,因而使力下降,使之从 *c* 点降到 *d* 点。*de* 为下屈服区,此区间内,吕德斯带从一个源或几个源扩展至整个长度(平行长度)范围。同时力也呈现小的波动。*e* 点为屈服阶段结束点,该点标志着光滑硬化阶段的开始。

第5阶段(*ef*):均匀塑性变形

进入此阶段,随着变形量的不断增加,金属呈现强化,称为“应变硬化”。表现为 *ef* 段曲线光滑而单调地上升,但在宏观上试样变形均匀。这是因为由于应变硬化而使微小缩颈扩散不能形成局部化缩颈所致。*f* 点为最大拉伸力点,通常成为拉伸图的最高点,这一点正是拉伸缩颈开始点,也称为拉伸失稳点。

第6阶段(*fg*):局部塑性变形

拉伸达到最高点时,试样最弱横截面中心处附近产生微小裂纹,并很快扩展,导致试样几何软化,使该处横截面的有效承载面积减小,应力亦因此进一步升高,使变形集中于缩颈处。而力很快下降,直至到达 *g* 点试样断裂。

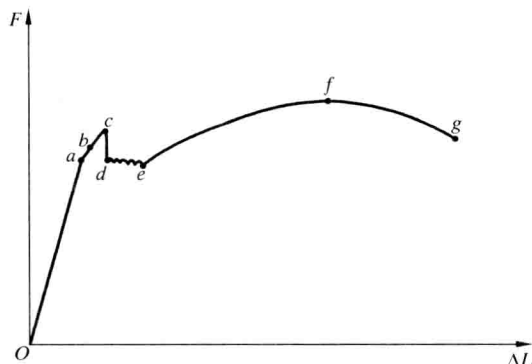


图 1-2 低碳钢试样的拉伸图

除图 1-2 所示的低碳钢拉伸图外,图 1-3 所示的四种拉伸图是较多见的典型拉伸图。

拉伸试验时通过试验机的自动记录系统能够得到力-延伸曲线。根据这样的曲线可以测定所要求的拉伸力学性能。所以准确记录力-延伸曲线是十分重要的。理解各阶段的变形特征,对正确测定拉伸力学性能有大的帮助。

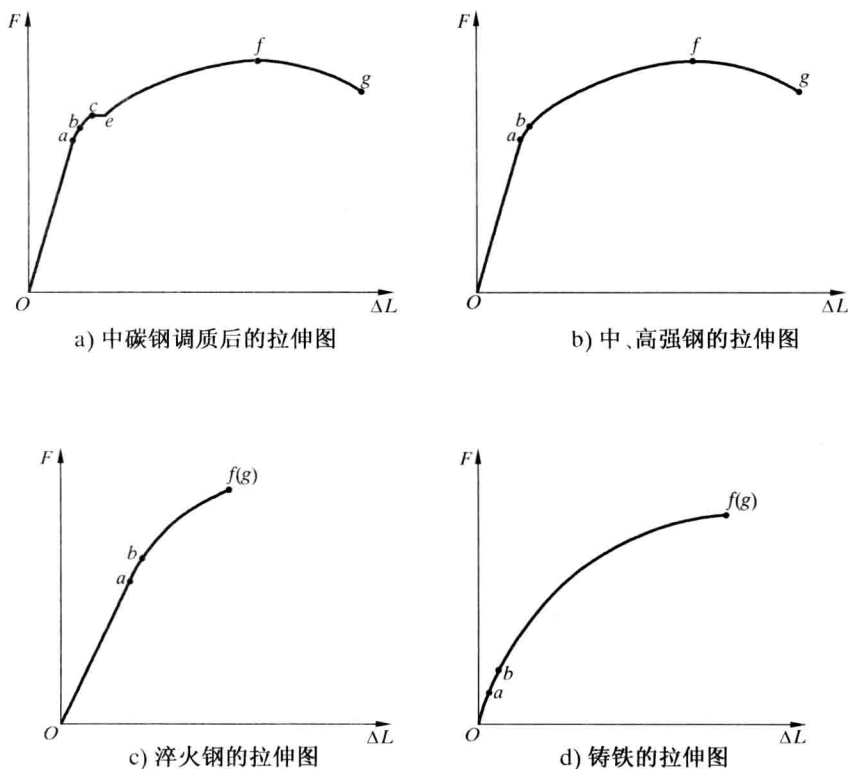


图 1-3 常见的典型拉伸图

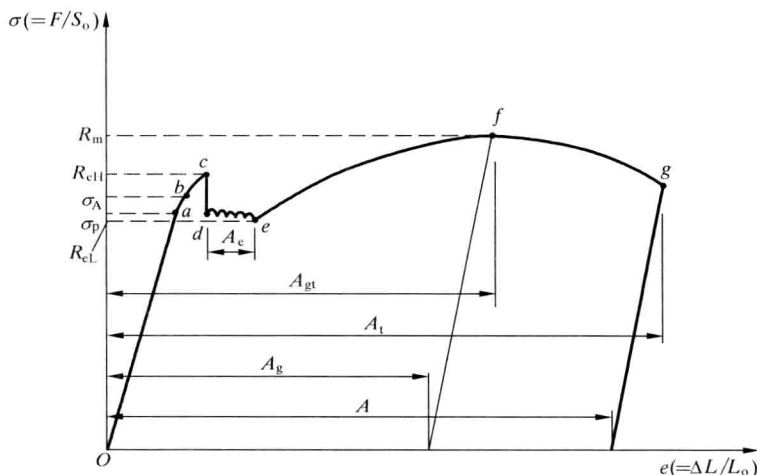
2. 拉伸应力-应变曲线

在前一节所述的拉伸图,仅代表具体试样的拉伸特性。因为图中的纵坐标和横坐标均与试样具体尺寸有关。若将拉伸图纵坐标的力 F 除以试样原始横截面积 S_0 变为应力 σ ,将横坐标的延伸 ΔL 除以试样原始长度 L_0 变为应变 e ,这样得到的曲线与试样的具体尺寸无关,可以代表该试样材料的拉伸特性。这样的曲线称为拉伸应力-应变曲线(σ - e 曲线),在拉伸试验的标准方法里称为应力-延伸率曲线(R - e 曲线)。因为 S_0 和 L_0 是已经确定的常数,拉伸图上纵坐标和横坐标各分别除以常数,经此变换得到的 σ - e 曲线其形状和原来的 F - ΔL 曲线类似,特征没有变化。下面仍以低碳钢为例,介绍 σ - e 曲线(见图 1-4)中的特征应力和特征应变,即拉伸性能判据。

曲线的 oa 段:线弹性应力-应变阶段

在这一阶段内的应力-应变关系呈线性关系,变形是可逆的,无论是加力或卸力期间,应力与应变之间保持单值线性关系。线弹性是这一阶段的宏观特征。

金属材料弹性变形是其晶格中原子自平衡位置产生可逆位移的反应。每一原子的位移量越大,则宏观弹性应变变量也越大。可以用双原子模型来解释金属材料弹性变形的过程,在

图 1-4 低碳钢试样的 σ - e 曲线

没有外力作用时,金属原子在其平衡位置附近产生震动,相邻两个原子之间的作用力由引力与斥力叠加而成。一般认为,引力是由金属正离子和自由电子间库仑力所产生,而斥力是由离子之间因电子壳层产生应变所致。引力和斥力都是原子间距的函数。

当原子因受外力作用而接近时,斥力开始缓慢增加;而后,当电子壳层重叠时,斥力迅速增加,引力则随原子间距增加而逐渐下降。合力曲线在原子平衡位置为零,当原子间相互平衡力因受外力而受到破坏时,为了达到新的平衡,原子的位置必须作相应的调整,即产生位移,以期外力、斥力和引力三者达到平衡。原子位移的总和在宏观上表现为变形。外力去除后,原子依靠彼此间的作用力又回到平衡位置上,位移消失,宏观上的变形也随之消失,从而表现出了弹性变形的可逆性。

原子间相互作用力 F 与原子间距 r 的关系可以表示为:

$$F = \frac{A}{r^2} - \frac{Ar_0^2}{r^4} \quad (1-11)$$

式中: A 和 r_0 为常数,与原子本性或晶体、晶格类型有关。

上式中第 1 项为引力,第 2 项为斥力。可见,原子间相互作用力与原子间距的关系并不是线性,而是抛物线关系。但若外力较小时,原子偏离平衡位置不远,合力曲线的起始阶段可视为直线,这样可以用胡克定律表示外力与位移线性关系。

曲线的 oa 段为宏观弹性直线范围,应力 σ 与应变 e 呈线性关系,应力与应变服从胡克定律:

$$\sigma = Ee \quad (1-12)$$

式中: E 为弹性模量。

从式(1-12)可知,当应变 e 达到 100% 时的应力即为弹性模量值。根据式(1-12),可以把弹性模量定义为弹性模量是产生 100% 应变时所需的应力。但这样的定义对于金属材料没有任何实际意义,因为金属材料所能产生的弹性应变很有限,还未有达到 100% 应变之前早就已经断裂了。

式(1-12)也可以将其表示成:

$$E = \frac{\sigma}{e} \quad (1-13)$$

根据式(1-13),弹性模量可以有另一种定义:弹性模量定义为弹性直线段(即 oa 段)的斜率。按此定义可以采用静力拉伸试验测定金属材料的弹性模量 E 。

弹性模量 E 是线弹性范围的一种有用的性能判据。它反应材料抗弹性变形的能力,是材料刚度的量度。很多工程结构和机械部件用的材料都需要知道它的弹性模量值,以便用于设计计算。

曲线的 a 点是应力与应变保持线性关系的最高点,该点处的应力 σ_p 称为理论比例极限。从理论上说,超过此点,应力与应变的关系开始偏离式(1-12)表示的胡克定律。所以应力 σ_p 也是一种重要性能判据。

比例极限 σ_p 在理论上很有意义,但实验上准确地确定或测定它却是很困难的。因为在测定 σ_p 的各种方法中, σ_p 的值(或在应力-应变曲线上的位置)与测定用的仪器的分辨力有关。仪器的分辨力越高,测出的 σ_p 越低。所以,在实际应用中并不测定开始偏离线性关系点来确定性能比例极限 σ_p ,而是测定工程比例极限,例如测定规定塑性延伸强度 $R_{p0.01}$ 、 $R_{p0.001}$ 等作为工程比例极限。

曲线的 ab 段:滞弹性应变阶段

曲线的 ab 阶段为滞弹性应变(非线性弹性应变)阶段, b 点的应力 σ_A 称为理论滞弹性弹性极限。超过它,微塑性应变发生,或者说微屈服应变发生。 σ_A 与 σ_p 的所在位置很接近,相距不远。弹性极限 σ_A (确切地说是滞弹性极限)也是性能判据。

在 ab 阶段内,虽然为弹性阶段,但应力与应变的关系并不表现为线性关系。当加力到该阶段范围时,外加应力卸除回到零点,应变也回到原点,但不是沿原曲线路径回到原点,而是沿它自己的卸力线返回,甚至滞后于应力回到原点,从而形成一个闭合环。这样的行为意味着加力与卸力的应力-应变关系不同。卸力后能回到原点,说明变形可逆,位错结构并没有改变,属于弹性行为。弹性应变滞后于应力,这表明是处于滞弹性特性状态,所以此阶段称为滞弹性阶段。

可以利用加力和卸力形成的闭合环的方法来测定滞弹性极限 σ_A 。在加力和卸力的循环中,首次观测到加力线与卸力线形成开环时的应力确定为 σ_A (如图 1-5 所示)。

与测定比例极限 σ_p 情况一样,弹性极限 σ_A 也是随所用测量仪器的分辨力或灵敏度的提高而偏低。因此,在实际中测定例如规定塑性延伸强度 $R_{0.05}$ 、 $R_{0.01}$ 等作为工程弹性极限。

曲线的 bc 段:微塑性应变阶段

此阶段为屈服前的微塑性应变阶段。这些微塑性应变是由于材料内部所受应力不是绝对均匀,而一些处于应力集中的晶粒其内部的位错发生运动,以及晶粒内存在小量的低能易动位错的运动所造成。在这一阶段内实质上已发生小量不可逆的塑性应变,其应变虽然相对较小,但可测量。

曲线的 cde 段:不连续屈服应变阶段

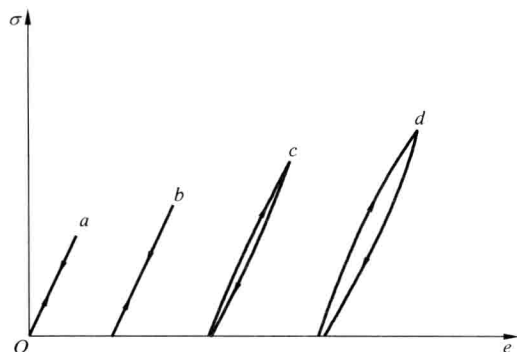


图 1-5 首次产生开环(d)时的应力为滞弹性极限 σ_A

这阶段的 c 点是屈服应变爆发性增加的点,屈服应变突然增加,致使应变速率高于试验机施加的位移速率,导致外加力下降,而应力减小的现象。在 de 范围(下屈服区)应力不增加,保持相对平稳状态,但塑性应变在增加,直至 e 点这种状态结束。 c 点的应力是重要性能判据,称为“上屈服强度 R_{eH} ”,在 de 范围内的最低应力也是性能判据,称为“下屈服强度 R_{eL} ”。

对于上屈服和下屈服现象有两种解释。一种基于位错钉锚理论,另一种基于小量位错首先在低应力和低速度下运动的位错动态增值理论。按照前一种理论,中低碳钢的碳原子通过晶格扩散到位错,围绕位错聚集成碳原子气团并把位错钉锚住。被钉锚的位错脱锚启动所需的应力比维持它无气团运动所需的应力高。脱锚启动所需应力对应于宏观的上屈服强度。维持位错继续运动所需的应力对应于宏观的下屈服强度。

按照第二种理论,在被试材料达到低于上屈服强度的应力下,应能观测到有塑性应变发生。对于锆、硅和氟化锂等材料,达到低于上屈服强度时会观测到大量的微屈服应变,这支持了第二种位错动态增值理论的观点。

当施加外力达到图 1-4 中的 c 点时,屈服应变突然增加,在试样的外表面可以观测到明显的滑移线,这些滑移线称为吕德斯带,它与拉伸试样轴成 45° 角,通常在试样最弱的横截面处,或在过渡弧与平行度连接的应力集中处局部发生,随后扩展至整个试验长度,在吕德斯带从局部扩展至整个试验长度期间,应力相对稳定,并无大的变化,此期间也不显示出应变硬化现象。因此可以说,下屈服强度是吕德斯带扩展转播的应力。

宏观上的一条吕德斯带实质包含了许多的滑移面。当作用在滑移面上的切应力在滑移方向达到临界值时,位错才沿滑移方向滑移。图 1-6 说明分解的切应力与滑移方向的关系。

如图 1-6 所示,滑移面的面积为:

$$S_B = \frac{S_0}{\cos\beta} \quad (1-14)$$

作用在滑移面的平均应力为:

$$\sigma_\beta = \frac{F}{S_B} = \frac{F}{S_0} \cos\beta = \sigma \cos\beta \quad (1-15)$$

此应力在滑移面上的滑移方向的分解切应力为:

$$\begin{aligned} \tau &= \sigma_\beta \cos\lambda = \sigma_\beta \cos(90^\circ - \beta) = \sigma_\beta \sin\beta \\ &= \sigma \sin\beta \cos\beta = \frac{1}{2} \sigma \sin 2\beta \end{aligned} \quad (1-16)$$

当切应力达到最大值时,可以有:

$$d\tau = \frac{1}{2} \cdot 2\sigma \cos 2\beta = 0$$

于是

$$\frac{1}{2} (2\sigma) \cos 2\beta = 0, \cos 2\beta = 0$$

得到:

$$\beta = \frac{1}{4} \pi = 45^\circ \quad (1-17)$$

$$\tau_{\max} = \frac{1}{2} \sigma \quad (1-18)$$

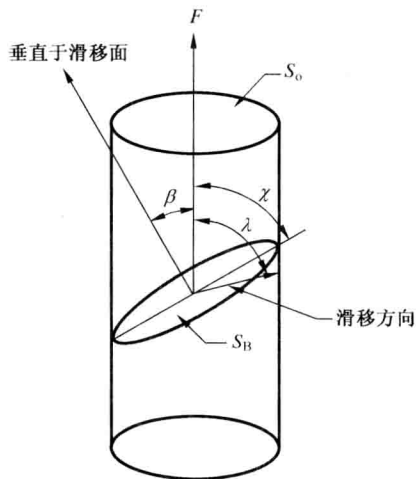


图 1-6 滑移方向与分解切应力

式(1-17)和式(1-18)表明,当滑移面和滑移方向与作用力方向成 45° 角时,分解切应力达到最大值。实验上观测表明,最大切应力方向与滑移方向基本一致,滑移方向与力作用方向的夹角略大些。

在图 1-4 中 ce 两点之间所对应的塑性应变,是屈服塑性的量度。所以, ce 之间的塑性应变也是性能判据,称为屈服点延伸率 A_e 。

曲线的 ef 段:塑性应变硬化阶段

曲线上的 ef 阶段是应变硬化(加工硬化)阶段。当达到 e 点,屈服阶段结束应变硬化开始,此后应力重新逐渐上升,直到 f 点。此阶段的应力与应变可以用 Hollomon 经验公式表示:

$$\sigma_T = H\epsilon^n \quad (1-19)$$

式中: σ_T 为真应力; ϵ 为真应变; H 为强度系数; n 为硬化指数。虽然公式并不严格正确,但实验表明,许多金属材料的应变化规律都符合或近似符合式(1-19)表示的 Hollomon 关系。

金属材料的应变硬化效应主要是由于位错密度所引起。当金属晶体是理想晶体,完全没有缺陷和位错,理想晶体具有很高的理论强度。但实际金属材料,不管是单晶或是多晶材料,实际强度远低于理论强度。这是因为晶体内部含有缺陷和位错,降低了强度,金属材料应变硬化是由塑性变形过程中位错大量增殖,发生不同滑移系的交叉滑移,晶体内部的位错密度迅速增高,反过来阻碍位错的滑移运动,使得变形困难,必须在更高的应力下才能使位错滑移运动。这表现为宏观上的塑性应变硬化效应。

式(1-19)中的硬化指数 n 是有用的性能判据。利用式(1-19)和塑性应变时体积不变的依据,可以求得硬化指数与其塑性应变的关系。

试验时参加塑性变形的体积可以表示为:

$$V = S_0 L_0 = SL \quad (1-20)$$

因为体积不变而有:

$$\begin{aligned} dV &= SdL + LdS = 0 \\ \frac{dL}{L} &= -\frac{dS}{S} \end{aligned} \quad (1-21)$$

因为拉伸试验时,当达到曲线最高的 f 点,力达到最大值 F_m ,因而有:

$$\begin{aligned} F_m &= \sigma_T S \\ dF_m &= \sigma_T dS + Sd\sigma_T = 0 \end{aligned} \quad (1-22)$$

$$-\frac{dS}{S} = \frac{d\sigma_T}{\sigma_T} \quad (1-23)$$

将式(1-23)代入式(1-21)后有:

$$\frac{dL}{L} = \frac{d\sigma_T}{\sigma_T}$$

即

$$\begin{aligned} d\epsilon &= \frac{d\sigma_T}{\sigma_T} \\ \frac{d\sigma_T}{d\epsilon} &= \sigma_T \end{aligned} \quad (1-24)$$

将式(1-19)(式中 H 看成为常数)代入式(1-24)得到:

$$nH\epsilon^{n-1} = H\epsilon^n$$

$$n = \epsilon \quad (1-25)$$

式(1-25)表明,硬化指数 n 等于试样拉伸试验达到最大力的 f 点时的真塑性应变 ϵ 。

曲线的 ef 阶段的 f 点,其所对应的总应变和塑性应变,都是拉伸均匀延伸的性能,是性能判据之一。分别称为“最大力总延伸率 A_{gt} 和塑性延伸率 A_g ”。

由式(1-25)和式(1-8),可以将硬化指数表示为:

$$n = \epsilon = \ln(1 + e) = \ln(1 + A_g) \quad (1-26)$$

从理论上说,可以首先测出 f 点相应的塑性均匀延伸率 A_g ,然后按照式(1-26)计算硬化指数 n 的值。但实践上并不采用这种思路的方法测定。主要原因有两点,其一是,有很多材料在 ef 阶段上局部地符合或近似符合式(1-19)所表示的关系。其次是,有些材料,对应于应力-应变曲线最高处并不呈现一点,而是一平台,这样的材料如何确定最大力对应点各有不同的观点。所以,必须按照专门测定硬化指数 n 值的标准方法进行测定,否则结果可能差异很大。

曲线上 f 点是应力-应变曲线的最高点,此点对应的应力为最高,称为抗拉强度 R_m ,是重要的性能判据。几乎所有工程结构金属材料都会测定抗拉强度这一性能。

曲线的 fg 段:局部缩颈变形阶段

图 1-4 中 fg 阶段为缩颈集中于局部的变形阶段。拉伸试验达到 f 点时,应变硬化的作用与几何软化作用(试样承载横截面积减小)两者达到平衡,力不再增加,同时伴随发生拉伸失稳,进入局部缩颈变形阶段。当力达到最高点(即 f 点)时,试样最弱横截面的中心附近开始形成微小空洞,它们彼此相连形成微小裂纹,一旦形成了微小裂纹,试样的受力状态不再是单向应力,而是变为三向应力的平面应变状态。反过来,又促使裂纹迅速扩展,快速形成该横截面中心处断裂(表现为拉伸失稳),与此同时发生缩颈变形。在缩颈阶段中力下降,工程应力(或称名义应力)下降。在此阶段,由于缩颈而横截面减小,实际上真应力高于用工程应力表示的抗拉强度。

当拉伸试验达到 g 点,试样发生完全断裂。在这 fg 阶段所形成缩颈的长短,与材料软硬和应变硬化能力大小有关。软材料、硬化指数低的材料趋向于产生短的缩颈。

g 点为试样断裂点,该点对应的应力称为断裂强度(σ_f),也可以作为性能判据(例如金属线材需要测定断裂强度)。

g 点(断后)对应的塑性应变是重要的性能判据,称为“断后伸长率 A ”。

g 点(断后)其横截面积的最大变化量与原始横截面积之比称为“断面收缩率 Z ”,是反映材料延性的重要性能判据。

第二节 GB/T 228《室温拉伸试验方法》的变迁

一、GB/T 228 的溯源

在 1949 年新中国成立以前,旧中国在整个标准化工作方面都极其落后,没有理化检验

方面的国家标准,直至新中国成立后才真正开始了标准化方面的工作。1950~1953年期间是我国经济恢复时期。1950年冬,华北公营企业部召开了“钢铁质量会议”,目的在于抓钢铁产品质量,与此举措相密切联系的“理化检验方法”的标准化问题在会上提出来。1951年我国重工业部成立,下设“钢铁工业管理局”,在其内部的生产技术处设立“标准化科”,负责抓理化检验方法标准化的工作。同年成立了“钢铁试验所”,以便开展相关的试验测试技术工作。由于当时不具备条件,加上钢铁工业得到了前苏联的帮助,解决当务之急的“理化检验方法标准”问题,唯一可行的捷径是直接采用前苏联ГОСТ相应的标准。为此,钢铁工业管理局标准化科和钢铁试验所组织力量翻译了一部分前苏联ГОСТ标准。1952年,重工业部成立“钢铁理化检验委员会”,为加快采用前苏联ГОСТ标准,分别在北京的“钢铁试验所”和上海的“材料所”举办“钢铁理化检验研讨班”(为期一年),目的是对14个前苏联ГОСТ标准(其中9项力学及工艺性能试验方法标准)进行学习和研讨。经过“理化检验研讨班”讨论过的这些标准,制定成重工业部试行标准“重试标”。这9项力学及工艺性能试验方法标准中包括有“金属拉力试验法”标准。所以,重试标“金属拉力试验法”实质是直接采用前苏联ГОСТ 1497—42《金属拉伸试验方法》,而从此成为当时的行业标准,一直使用至1963年正式制定为GB 228—63《金属拉力试验法》。

二、GB/T 228 的沿革

1. 首次制定

首次制定和颁布的金属拉伸试验方法的国家标准是GB 228—63《金属拉力试验法》。它是在原重工业部制定的“重试标”的基础上制定而成的。而重试标又是直接翻译采用前苏联标准ГОСТ 1497—42《金属拉伸试验方法》。1963年由冶金部制定了GB 228—63《金属拉力试验法》,制定时参照采用当时新修订的前苏联标准ГОСТ 1497—61《金属室温拉伸试验方法》。

国家标准GB 228—63《金属拉力试验法》主要规定了6种拉伸性能的测定方法及相关的技术要求。这6种性能包括:比例极限(σ_p)、屈服点(σ_s)、屈服强度($\sigma_{0.2}$)、抗拉强度(σ_b)、伸长率(δ)和断面收缩率(ψ)。GB 228—63《金属拉力试验法》所覆盖的技术内容相对简单,技术要求和试验方法相对粗糙,但基本上适用于当时的国情。其中,在标准中规定了“试验测定结果数值的修约要求”是较为合理的内容。但对板状试样机加工的形位公差“同轴度”允许达2mm是不适当的。

2. 第一次修订

GB 228—76《金属拉力试验法》是GB 228—63《金属拉力试验法》的修订版。修订版扩大了技术内容的覆盖面。主要修改和增补的方面如下:

- (1) 增加“规定残余伸长应力 $\sigma_{0.01}$ ”的定义和测定方法;
- (2) 增加圆管纵向弧形试样的使用和试样原始横截面积计算公式:

$$F_o = a_o b_o \left[1 + \frac{b_o^2}{6D_o(D_o - 2a_o)} \right]$$

- (3) 增加“称重法”测定等横截面试样原始横截面积的方法和计算公式:

$$F_o = \frac{w}{rL} \times 1000$$