

工程应力-应变曲线绘制的探讨

北京航空材料研究所

郑炳杨

一、引言

金属材料在受到轴向外力的作用下将产生变形,不断地施加外力,材料将由弹性变形、弹塑性变形到塑性变形,直至断裂。如果用一定放大比的仪器在拉伸或压缩过程中将变形放大绘制于记录纸上,便可得出拉伸或压缩曲线图。此图反映了材料受力后力与变形的全过程,是工程设计和使用的至关重要的原始资料。由于生产上使用的零部件与试件的截面和形态不同,为便于设计计算,通常将拉伸曲线用计算方法重新绘制成工作应力-应变曲线编入材料手册提供使用。为此,如何精确和快速绘制应力-应变曲线就显得格外重要。

由于材质不同,材料有脆性与韧性之分,脆性材料的断裂往往发生在弹性范围内,即未及塑性变形试件就断裂,在其拉伸曲线图上所显示的屈服极限(现改称为规定非比例伸长为0.2%时相应的应力)与强度极限的性能很接近,无塑性变形段,而韧性材料(是指高塑性的金属及合金)的断裂,在断裂前则发生大量的塑性变形,其屈服极限约为强度极限的70%,在拉伸图上则有较大的塑性变形段。因此,具备绘制工程应力-应变曲线条件的是韧性材料。

二、试验方法

目前我所绘制应力-应变曲线的方法是根据航标HB5431-89采用参照美国军用标准MIL-HDBK-50的应变偏离法测定,其作法过程如表1所示^[1]。

表1 应变偏离法典型应力-应变曲线的例子

偏离 (D) (mm/mm)	应力 (MPa)					应变 (μ) (mm/mm)	
	实验 1	实验 2	实验 3	平均 ^a (σ_A)	制品平均 ^b (σ_T)	弹性 ^c (ϵ_E)	总的 ^d (ϵ_T)
0	438.1	427.5	412.0	425.9	426.3	4022	4022
20	497.7	488.1	451.4	479.1	479.5	4524	4544
40	514.4	509.8	478.2	500.7	501.2	4728	4768
100	543.1	539.6	512.4	531.7	532.2	5021	5121
500	601.6	603.7	571.0	592.1	592.7	5592	6092
1000	626.7	628.5	594.5	616.6	617.2	5823	6823
2000	649.5	650.6	618.0	639.4	640.0*	6038	8038
2200	652.6	653.8	621.2	642.5	643.1	6067	8267

a—试验1、2、3的平均值

b— $\sigma_T = (\text{制品平均屈服强度} / \text{试验平均屈服强度}) \times \sigma_A$

c— $\epsilon_E = \sigma_T / E$

d— $\epsilon_T = \epsilon_E + D$

一、制品平均屈服强度

1. 将每条原始曲线的直线部分延长(如图1所示),并标出塑性应变为0.2%的屈服载荷位置。

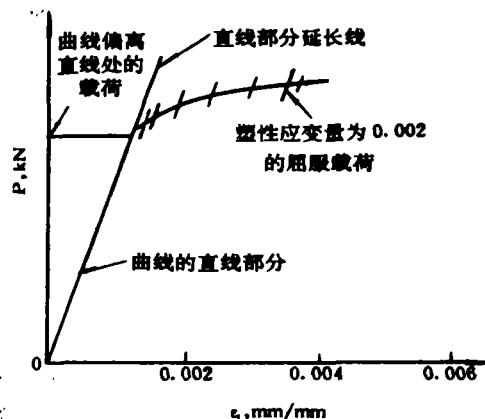


图1 应变偏离法应变与载荷的测量

2. 精确地确定出曲线开始偏离直线时的载荷,在此载荷点至略超过屈服载荷的曲线段上取若干个塑性应变值,并测出相对应的载荷,同时将载荷转换成应力,所取塑性应变值的个数以精确地描述一条应力-应变曲线为依据。

再将各原始曲线上相同塑性应变值下的应力取平均值,即 σ_A 。

3. 当有制品的平均屈服强度数据后,则将每个塑性应变值下的平均应力 σ_A 按下式转换成制品平均应力 σ_T :

$$\sigma_T = \sigma_A \left(\frac{\sigma_{0.2\text{制品}}}{\sigma_{0.2\text{试验}}} \right)$$

式中: $\sigma_{0.2\text{制品}}$ —制品的平均屈服强度

$\sigma_{0.2\text{试验}}$ —试验的平均屈服强度

4. 按 $\epsilon_E = \sigma_T / E$ 公式计算曲线上每一塑性应变处相应的弹性应变。

5. 将弹性应变 ϵ_E 和塑性应变 ϵ_P 相加,即可得到总应变 ϵ_T 。

6. 用 σ_T 和 ϵ_T 绘制典型的应力-应变曲线(见图2)。

曲线图的纵坐标表示应力,每20mm代表25、50、100或250MPa,横坐标表示总应变,每20mm代表0.002~0.004mm/mm。

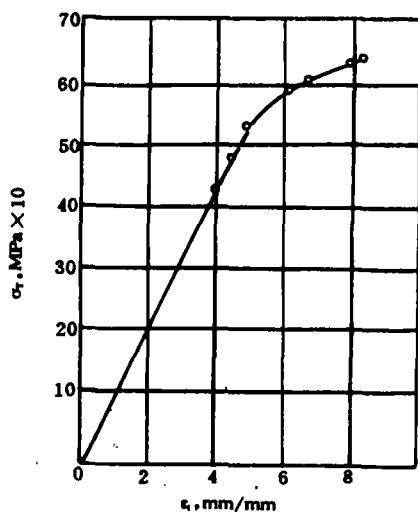


图2 由表1数据绘制的典型应力—应变曲线

三、试验结果及其讨论

按照上述所举例表、图作为试验结果的要求来分析,首先,拉伸图的原始曲线是载荷—伸长曲线,即 $P-\Delta L$ 曲线,在曲线上截取屈服载荷点时,是按其定义即标距的 0.2% 的公式计算的 ($\Delta L = L_0 \times 0.2\% \times n$)—— L 是标距, n 是放大倍数。将拉伸图变为拉力—应变图来截取载荷一是没有必要,二是甚为不便(见图1)。其次,要选取的 8~10 个偏移点,也要逐个的将应变值按公式 $\epsilon = \Delta L / L_0$ 换算成变形值 ΔL ,方能在曲线上截取,这将涉及

测试样品的计算长度和测试仪器的放大倍数^[2~4]。当使用随机附带测量变形仪器的标距(即计算长度)为 35(即尾数不是零)时,按应变偏离法的定点计算,其变形的结果不是一个整数。如以放大 1000 倍测试,取应变量为 20 为例,则变形量为 0.7mm,而应变量为 40 时,变形量为 1.4mm,这在记录纸上是不易取准的,又如以放大 500 倍测试,应变值不变,则变形量提高一倍。说明放大倍数的选取与计算长度的定值对用应变偏离法作图有影响。

由于材料变形程度的不同,其拉伸曲线的形态也各异(当然,这与放大倍数的选取亦有关),特别是起始直线部分较短而圆弧又很大的曲线,用美标规定的起始应变确定其变形量,结果是变形的间距小、取点密、与圆弧交接部分多,不易分清其真正的交点,造成很难准确与迅速判断其相应的载荷。

根据上述情况以及考虑到记录纸的空格情况,我们改用应变偏离法绘制应力—应变图,在规定范围内选点以固定变形量为基础来作图(即按该记录纸 1 格为 2mm,选点为 2、4、8、12、20、40、70、80、90、120,单位均以 mm 计),这就避免了由于不同标距和放大倍数造成的误差,除脆性材料外,其余金属与合金的曲线形态均能用此法作图并能得到比较满意的结果。具体作法与航标 HB5431-89 所述类似,不同的只是将应变截取载荷改为用变形取,所得载荷不立即换算成应力,而是将几条曲线的载荷与截面积取均值后再计算平均应力,将偏离的距离(即变形量)通过上述求应变公式 ($\epsilon = \Delta L / L_0$) 换算成应变值 ϵ_p (见表 2、图 3、图 4),我们运用此方法在近年来处理了一批某工程的近千个拉伸和压缩性能数据,并绘制了相应的应力—应变曲线。

表2 应变偏离法平均应力—应变曲线的例子

偏离 D		载荷 P (N)					平均值		应变 ϵ (mm/mm)	
距离 (mm)	应变值 ϵ_p (mm/mm $\times 10^{-3}$)	试 验 号					P (N)	σ (MPa)	弹性 ϵ_e $\times 10^{-3}$	总的 ϵ_t $\times 10^{-3}$
		1	2	3	4	5				
0	0	6200	6000	6000	6400	6800	6280	229.9	3.411	3.41
2	0.057	8080	7250	7600	8000	8400	7866	287.9	4.272	4.33
4	0.114	8900	8300	8500	8700	9200	8720	319.2	4.736	4.85
8	0.228	9820	9740	9701	9800	10000	9812	359.2	5.329	5.56
12	0.343	10480	10270	10320	10420	10500	10398	380.6	5.647	5.99
20	0.571	11200	11000	11150	11150	11250	11150	408.1	6.055	6.63
40	1.143	12000	11920	11970	11900	11970	11952	437.5	6.491	7.63
70	2.000	12350	12320	12350	12270	12300	12318	450.9	6.690	8.69
80	2.286	12400	12400	12400	12300	12330	12366	452.6	6.715	9.00
90	2.571	12450	12440	12480	12400	12400	12434	455.1	6.752	9.32
120	3.429	12560	—	12570	12450	12480	12515	458.1	6.797	10.23

(下转第 18 页)

质作用方式是不可忽略的因素。

4. 腐蚀疲劳裂纹萌生与腐蚀坑的关系

在含水介质中金属将由于表面存在电化学不均匀性而发生电化学腐蚀。使金属材料试件表面形成了大量腐蚀坑，从而大大缩短了疲劳裂纹萌生寿命，与空气环境相比，其疲劳寿命就大大降低了，如图1所示。金属材料在循环应力与环境介质交互作用下，由于驻留滑移带(PSB)中与可动位错相联系的金属原子比周围的原子更加活泼，造成PSB的优先溶解，导致表面应变的释放和表面形变显著增加，使金属表面产生腐蚀坑。其次机加工刀痕或表面夹杂区，构成阳极溶解，也形成腐蚀坑。蚀坑由于应力集中在坑底形成微小裂纹，垂直应力方向的裂纹在交变载荷和腐蚀介质的联合作用下，使疲劳裂纹加速扩展。腐蚀坑形成疲劳裂纹的机理见图5。在进行疲劳试件断口的SEM分析中，可见到盐水环境中疲劳断口的源区存在大量的腐蚀坑(图4c)。也观察到了以腐蚀坑底形成疲劳裂纹的情况(图4e)。证实了疲劳裂纹萌生与腐蚀坑密切相关。

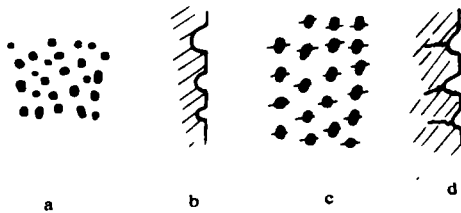


图5 腐蚀坑形成腐蚀疲劳裂纹机理示意图

- (a) 腐蚀坑(俯视图)
- (b) 蚀坑的横截面
- (c) 蚀坑引发裂纹(俯视图)
- (d) 蚀坑引发裂纹后的横截面

(上接第38页)

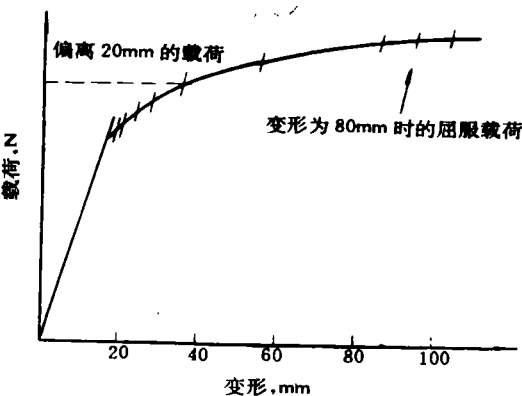


图3 变形偏离法载荷的测量

四、结 论

从原始曲线上选用变形偏离法绘制应力—应变曲线

四、结 论

- 1. 35NCD16 钢对 3.5% NaCl 溶液很敏感，疲劳损伤较大，在 1×10^6 疲劳寿命下，疲劳强度仅为空气中的 30%。
- 2. 在 3.5% NaCl 溶液中，加载频率对 35NCD16 钢的疲劳性能有影响，10Hz 与 30Hz 频率下的疲劳强度相比，以等同速率降低了 20%。
- 3. 不同介质作用方式对该钢有一定影响，在循环流动的盐水中的疲劳强度比静泡在盐水中试验的疲劳强度以等同速率降低 17%。
- 4. 宏观断口观察表明，盐水中试件断口的腐蚀产物最多，呈红棕色。而空气中的断口见不到此特征。
- 5. 扫描电镜 (SEM) 断口观察表明，盐水环境中疲劳源起始于腐蚀坑，在近源扩展区，呈现大面积沿晶和穿晶混合开裂特征。

参考文献

1. W. H. Hartr, The international corrosion forum, houston, 1986
2. 陈美英等, 航空材料及装备环境试验研究论文集, 1993, P85~87
3. D. J. Mcadam, Tran. Amer. Soc. Mech. Eng. 517 1928
4. D. J. Duquette, Fatigue and Microstructure, 335 1979
5. Y. Hirose et al, Engng Frac. Mech. 22, 859 1985
6. N. E. 弗罗斯德, 汪一麟、邵本述译, 金属疲劳, 1984, P123
7. Wei R. P. Shim G. ASTM STP801, 1983, P5~25
8. 航空航天工业部等, 飞机结构腐蚀疲劳, 航空工业出版社, 1992
9. 陈美英等, 航空材料, No. 4, 1987, P12~16

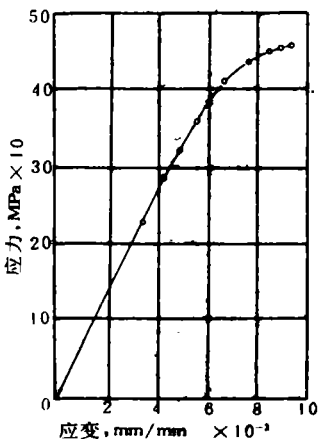


图1 由表2数据绘制的平均应力—应变曲线

较为恰当。

参考文献 (略)