

第 20 篇 蠕 变 设 计

主 编 黄雨华
编写人 黄雨华

第 1 章 概 述

1 蠕变现象

在动力、化工、冶金、航空和航天等工程或工业部门中,有许多机械设备(如汽轮机、燃气轮机、冶金机械和压力容器等)是长期处在高温条件下工作,要求这些机械的零部件应具有足够的强度、刚度和寿命。对于有些机械随着高温技术的迅速发展,为了尽量提高设计参数,获得更高的热效率,要求能够适应更高的工作温度。因此,对于高温下工作的机械零部件,在设计方法、材料选择或失效分析方面都与常温情况有很大的不同,需考虑温度这个主要影响因素。

蠕变是指金属材料在恒定温度和恒定应力的长期作用下,随着时间的延长,材料会慢慢地发生塑性变形的现象。

蠕变可以在小于材料的屈服点的应力下发生。为与通常的塑性变形相区别,把蠕变引起的塑性变形称为蠕变变形。

蠕变在低温下也会发生,但只有达到一定的温度才能变得显著,称该温度为蠕变温度。对于各种金属材料的蠕变温度约为 $0.3T_m$, T_m 为熔化温度,以热力学温度表示。通常碳素钢超过 $300\sim 350\text{ }^{\circ}\text{C}$,合金钢在 $400\sim 450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上时才有蠕变行为,对于一些低熔点金属如铅、锡等,在室温下就会产生蠕变。

在蠕变温度以上工作的机械零部件,有两种失效形式。

1)蠕变变形超过允许的极限值,致使机械设备不能正常工作或损坏。例如,汽轮机叶片的工作时间,一般需在 10^5 h 以上,倘若在工作期内,叶片的蠕变变形超过汽缸和叶片之间的径向间隙,就会发生叶片和汽缸相碰撞,导致叶片换坏。

2)工作应力超过材料的抗持久断裂能力,使零部件发生蠕变断裂(或称持久断裂)。例如,锅炉的过热器在高温和应力的长时间作用下,由于蠕变一方面可使材质性能恶化;另一方面使直径不断增大和管壁变薄,最终会引起过热器破裂。

蠕变断裂又可分为蠕变塑性断裂和蠕变脆性断裂两种不同形式,前者断裂时有明显的持久塑性变形,后者则没有。

材料在高温下的力学性能是机械设计的重要指标,它可分为

1)短时力学性能,其包括工作温度下的抗拉强度、

屈服点、断面收缩率和伸长率等。当温度升高到一定值时,材料的屈服点就会消失,这时常用试件出现 0.2% 的残余变形时的应力作为条件屈服强度。

2)长时力学性能,其包括蠕变极限和持久强度等。

对于工作温度低于蠕变温度或高于蠕变温度但工作期限很短的情况,机械设计可以短时力学性能为依据;对于超过蠕变温度而工作期限又较长的情况,应采取长时力学性能为设计依据。

2 蠕变曲线

2.1 蠕变曲线的一般特征

金属材料的蠕变过程常用变形与时间之间的关系曲线来描述,在工程上称为蠕变曲线,它是由蠕变试验得到,把试验测量的结果标在时间 t -应变 ϵ 坐标中绘制而成。在恒定温度和恒定拉伸应力作用下,典型的蠕变曲线见图 20.1-1。图中, oa 为初始加载后引起的瞬时变形,它不属于蠕变变形。如果应力超过金属在该温度下的弹性极限,则 oa 由弹性应变 oa' 和塑性应变 $a'a$ 两部分组成。曲线 $abcd$ 为蠕变曲线,其斜率 $\tan\alpha = d\epsilon/dt$ 为应变随时间变化率,称为蠕变速度,用 v (或 $\dot{\epsilon}_c$) 表示,即

$$v(\text{或 } \dot{\epsilon}_c) = \frac{d\epsilon}{dt} \quad (20.1-1)$$

根据蠕变速度的变化情况,整个蠕变过程可以分为三个阶段(见图 20.1-1)。

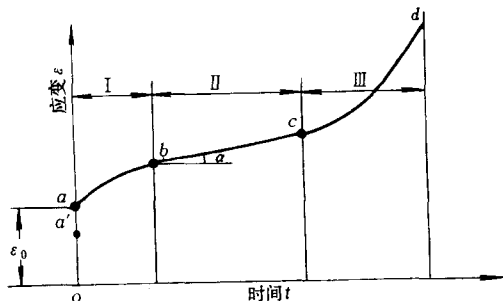


图 20.1-1 典型的蠕变曲线

1)第 I 阶段——曲线的 ab 段 这一阶段的蠕变速度 v 随着时间的延长而逐渐减小,也称为减速蠕变阶段或起始蠕变阶段。

2)第 II 阶段——曲线的 bc 段 这一阶段的蠕变曲线接近于一条直线,蠕变速度 v 达最小值并基本保

持不变,称为等速蠕变阶段或稳定蠕变阶段。

3)第Ⅲ阶段——曲线的 cd 段 这一阶段的蠕变速度 v 随时间的延长不断增加,达 d 点时产生蠕变断裂,称为加速蠕变阶段。

蠕变曲线的形状随材料和试验条件不同而变化,对于同一种材料的蠕变曲线,也随应力和温度的不同而不同,主要表现在蠕变各阶段所持续的时间要相应发生改变,在恒定温度下,改变应力或在恒定应力下改变温度的蠕变曲线如图20.1-2和图20.1-3所示。由图看出,当应力较小或温度较低时,蠕变第Ⅰ阶段持续的时间较长,甚至可使第Ⅲ阶段不发生;当应力较大或温度较高时,蠕变第Ⅰ阶段持续时间变短,甚至完全消失,材料将在很短的时间内发生断裂。

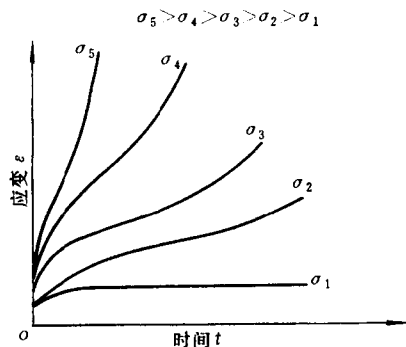


图 20.1-2 温度相同应力不同时的蠕变曲线

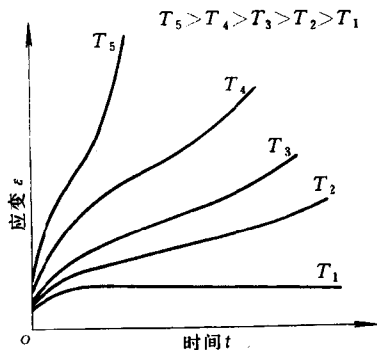


图 20.1-3 应力相同温度不同时的蠕变曲线

在机械工程中常要求金属材料的蠕变曲线具有很短的蠕变第Ⅰ阶段,较长的第Ⅱ阶段和明显的第Ⅲ阶段,这样可使金属材料在很短的时间内达到最小的蠕变速度,然后在很长的时间内具有较小的蠕变变形,并能清晰地预示蠕变断裂。

2.2 蠕变曲线的数学表示形式

2.2.1 蠕变曲线的一般函数表示

为了准确地描述蠕变规律,便于在工程计算中应

用,许多研究者都设法使用数学公式来描述蠕变曲线,目前已有许多蠕变方程,但由于蠕变变形的物理过程十分复杂,至今仍没有一个统一的公式。

对于图20.1-1中的蠕变曲线在任一时刻的总应变为

$$\epsilon = \epsilon_0 + \epsilon_c = \epsilon_e + \epsilon_p + \epsilon_c \quad (20.1-2)$$

式中 ϵ_0 ——初始应变, $\epsilon_0 = \epsilon_e + \epsilon_p$;

ϵ_e ——弹性应变;

ϵ_p ——塑性应变;

ϵ_c ——蠕变应变。

由于 ϵ_0 是一个常量,式(20.1-1)表示的蠕变速度可写成

$$\dot{\epsilon}_c = \frac{d\epsilon_c}{dt} \quad (20.1-3)$$

由试验得到金属材料的蠕变应变是应力 σ 、时间 t 和温度 T 的函数,蠕变方程的一般形式为

$$\epsilon_c = f(\sigma, t, T) \quad (20.1-4)$$

工程上常把式(20.1-4)近似简化为各变量的单独函数的乘积,即

$$\epsilon_c = f_1(\sigma)f_2(t)f_3(T) \quad (20.1-5)$$

式中, $f_1(\sigma)$ 、 $f_2(t)$ 和 $f_3(T)$ 分别为应力、时间和温度作为变量的函数。

2.2.2 各种蠕变方程

目前已有的蠕变应变或蠕变速度与应力、时间和温度之间的一些关系式,列举如下。

1) 蠕变与应力的关系

$$\epsilon_c = af(t)\sigma^b$$

$$\epsilon_c = af(t)\exp(b\sigma)$$

$$\epsilon_c = a\sinh((b\sigma))$$

$$\dot{\epsilon}_c = a\exp(b + c\sigma)$$

$$\dot{\epsilon}_c = a[\exp(b\sigma) - 1]$$

$$\dot{\epsilon}_c = a\sinh(b\sigma/RT)$$

2) 蠕变与时间的关系

$$\epsilon_c = at/(1+bt)$$

$$\epsilon_c = a + blgt$$

$$\epsilon_c = alg t + bt + c$$

$$\epsilon_c = a + bt - c\exp(-dt)$$

$$\epsilon_c = at + b[1 - \exp(-ct)]$$

$$\epsilon_c = a[1 - \exp(-bt)] + c[1 - \exp(-dt)]$$

$$\epsilon_c = a + bt^n$$

$$\epsilon_c = a(1 + bt^{1/3})\exp kt$$

$$\epsilon_c = at^m + bt^n + ct^p + \dots$$

$$\epsilon_c = alg t + bt^n + ct$$

3) 蠕变与温度的关系

$$\epsilon_c = a[\exp(-Q/RT)]^n$$

$$\epsilon_c = aT^{2.3}f(t)$$

$$\epsilon_c = aTf(t)$$

$$\epsilon_c = f[T(a+\lg t)]$$

$$\epsilon_c = f[(T-a)/(\lg t-6)]$$

$$\epsilon_c = ct[(T-T')^{-B}]$$

$$\dot{\epsilon}_c = a\exp(-Q/kT)$$

$$\dot{\epsilon}_c = aT\exp(-Q/RT)$$

$$\dot{\epsilon}_c = a\exp(-Q/RT)\sinh(b/RT)$$

在上述各式中, σ 为应力、 t 为时间、 $f(t)$ 为时间函数、 T 为温度、 ϵ_c 为蠕变应变、 $\dot{\epsilon}_c$ 为蠕变速度, 其他各系数和指数均为材料常数。

2.2.3 设计常用的蠕变方程

对于大多数碳素钢和合金钢的蠕变曲线, 常采用以下的计算公式, 即

1) 蠕变第 I 阶段

$$\epsilon_c = a\sigma^b t^n \quad (20.1-6)$$

$$\dot{\epsilon}_c = an\sigma^b t^{n-1}$$

2) 蠕变第 II 阶段

$$\epsilon_c = a\sigma^b t \quad (20.1-7)$$

$$\dot{\epsilon}_c = a\sigma^b$$

3) 蠕变断裂时间

$$t_r = A\sigma^{-B} \quad (20.1-8)$$

$$t_r = c\exp(-D\sigma) \quad (20.1-9)$$

以上各式中, ϵ_c 为蠕变应变、 $\dot{\epsilon}_c$ 为蠕变速度 (1/h)、 σ 为应力 (MPa)、 t 为时间 (h)、 t_r 为持久寿命 (h)、其他各系数和指数均为材料常数。

3 蠕变极限和持久强度

3.1 蠕变极限

蠕变极限表示材料抵抗蠕变变形的能力, 它是材料的一个重要的蠕变性能指标。蠕变极限有两种表示方法, 即

1) 在给定温度下和规定时间内, 使试样产生规定总应变 ϵ 或蠕变应变 ϵ_c 的极限应力, 用符号 σ_{ϵ}^T 表示。例如, $\sigma_{1/10000}^{500} = 100\text{MPa}$ 表示材料在 500℃ 下经 10000h 后, 产生 1% 应变量的极限应力为 100MPa。

2) 在给定温度下和规定时间内, 使试样产生规定蠕变速度 v 时的极限应力, 用符号 σ_v^T 表示。例如, $\sigma_{1 \times 10^{-5}}^{600} = 60\text{MPa}$ 表示材料在 600℃ 下蠕变速度为 $1 \times 10^{-5}\%$ /h 的极限应力为 60MPa。

上述两种方法使用的符号中, σ 表示极限应力, 单

位为 MPa; T 表示工作温度, 单位为 ℃; t 表示时间, 单位为 h; ϵ 表示应变变量, 以 % 值表示; v 表示蠕变速度, 单位为 %/h。

3.2 持久强度

持久强度表示材料长时间在载荷作用下抵抗蠕变断裂的能力, 也是一个重要的蠕变性能指标。持久强度是在给定温度下和规定时间内, 试样发生断裂的应力值, 用符号 σ_r^T 表示。其中 σ 表示应力, 单位为 MPa; T 表示温度, 单位为 ℃; t 表示时间, 单位为 h。例如 $\sigma_{1000}^{700} = 200\text{MPa}$ 表示材料在 700℃ 时, 持续时间为 1000h 的持久强度为 200MPa。

4 影响蠕变极限和持久强度的主要因素

材料的蠕变极限和持久强度受许多因素的影响, 其程度远大于对其他力学性能的影响。这些因素的影响常常还互相关联, 致使力学性能相近的材料, 在蠕变性能上可能有很大差别。因此, 了解这些因素影响对设计选材十分重要。

4.1 化学成分的影响

1) 碳含量的影响 在温度不太高的情况下, 钢中含碳量增加, 可使蠕变极限稍有提高, 但在较高的温度下, 提高含碳量并不一定能改善材料的抗蠕变能力, 甚至还会起相反的作用。如图 20.1-4 所示, 在温度为 450℃ 时, 起始增加含碳量可提高蠕变极限, 但当碳的质量分数超过 0.35% 时, 提高含碳量将会使蠕变极限下降。

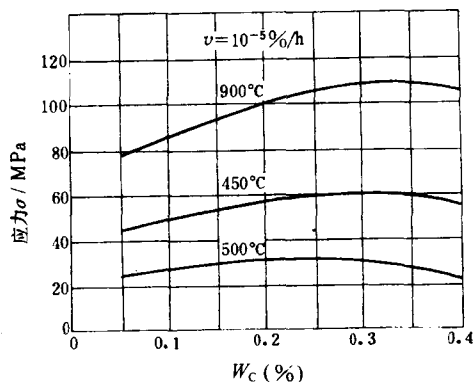


图 20.1-4 含碳量对碳素钢蠕变极限的影响

在碳钢和低合金钢中, 碳对抗蠕变能力的影响, 很大程度上取决于碳化物的形状及稳定性, 片状或针状的碳化物可提高蠕变性能, 球状碳化物则有相反效果。

2)合金元素的影响 钼、铬、钨和钒等元素皆能提高抗蠕变能力,它们和碳有很强的给合能力,但其影响并不和含量多少成正比,都存在一个最好的含量区间,含量过高效果不再显著,甚至会起负作用。

上述元素中钼是提高蠕变性能的重要元素,几乎在所有的低合金耐热钢中都含有一定数量的钼。由于钼的价格较高,当钼的质量分数超过1.5%时需考虑其经济性。铬的质量分数仅在小于1.5%时能少许提高抗蠕变能力,但在钼钢中加入铬元素后,可使蠕变性能有明显的提高。例如Cr-Mo-V钢在540~570℃范围内,铬的质量分数为1.5%~2.25%时有较高的蠕变极限和持久强度。钨很少用于珠光体钢,仅在奥氏钢中加入少许,以便使蠕变性能进一步提高,钨和钼复合加入,效果会更明显。钒、钛和锰等元素都能和碳强烈结合形成碳化物,起到强化作用。在奥氏体钢中加入少量的铌和钛,还可以防止晶间腐蚀。当钢中复合加入钒和铌、钛和钒、锰和铬、镍和铬元素时,蠕变性能会有较大提高。

加入微量的硼,能产生晶界的强化作用,一般与铌、钛、锆等元素作微量复合加入,效果显著。

镍、硅和铝,一般不形成碳化物,只能对铁素体起强化作用,可以提高晶粒的强度。因此,只有低于等强温度时这些元素才起作用。

3)其他元素的影响 铅、锡、锑、磷、硫和铋等元素都属于有害的杂质元素,可使晶粒的强度减弱。若在钢中加入少量的碱土或稀土元素,如钙、钡、镁和锶等元素,可以消除上述杂质的影响。

4.2 工艺因素的影响

1)冶炼工艺的影响 各种耐热钢及其合金,对冶炼工艺要求很高,需要使用不同的冶炼方法,一般低合金耐热钢,采用电弧炉或感应炉冶炼;高耐热合金钢和镍基合金,采用感应炉或真空电弧炉(真空自耗电极重熔)冶炼。钢和合金的冶金质量,对蠕变性质有很大的影响,这是因钢中的非金属夹杂和某些冶金缺陷,会使材料的持久强度有很大降低。高温合金对杂质元素和气体含量要求更加严格,即使杂质含量只有十万分之几,也会导致晶界严重弱化,而使高温强度降低,加工性能变坏。反之,若杂质元素含量降低,将会显著改善蠕变性能。例如,由某些镍基合金的实验得到,经过真空冶炼后,因铅的质量分数由5%降低到2%以下,材料的持久断裂时间可增加一倍。

由于高温合金在使用中,常在垂直于应力方向的横向晶界上产生裂纹,采用定向凝固工艺,可使柱状结晶沿受力方向产生,从而减少横向晶界,大幅度地提高持久寿命。表20.1-1给出了两种镍基合金采用普通铸

造(非定向凝固)和定向凝固工艺后,在760℃和660MPa应力作用下的性能对比。

表 20.1-1 镍基高温合金定向和非定向凝固的性能比较

材料	生产工艺	状态	760℃, 660MPa		
			断裂寿命/h	伸长率(%)	断面收缩率(%)
镍基合金 (一)	普铸	铸态及热处理	~90	~5	—
			132.50	14.8	15.8
	定向	铸态	197.75	16.7	18.7
			478.16	19.2	22.6
镍基合金 (二)	普铸	热处理	124.50	—	—
			646.70	11.2	23.3
	定向	热处理	443.70	14.8	20.9

2)热处理工艺的影响 在材料成份一定的情况下,可通过热处理获得所要求的组织状态,提高材料的抗蠕变性能。对于珠光体耐热钢一般采用正火和回火工艺来提高蠕变抗力,正火温度应较高,以促使碳化物充分而均匀地熔于奥氏体组织中,回火温度应高于使用温度100~150℃以上,这是为了提高组织的稳定性。对于奥氏体耐热钢或合金,一般进行固溶处理和时效,使之得到适当的晶粒度,改善强化相的分布状态。有的合金在固溶处理后,还需再一次进行中间处理(二次固溶处理或中间时效),使碳化物沿晶界呈断续链状析出,持久强度可进一步提高。

采用形变热处理可使晶界呈锯齿状,并在晶内造成多边化的亚晶,使合金进一步强化。如GH38、GH78型铁基合金采用高温形变热处理后,在550℃和630℃的100h持久强度分别提高25%和20%左右,而且还可以保持有较高的持久塑性。

3)晶粒度的影响 金属组织的晶粒大小,对材料的蠕变性能影响很大,它与材料的等强温度有关,当工作温度低于等强温度时,细晶粒具有较高的强度。一般金属材料的工作温度都在等强温度以上,所以晶粒应稍大一些,但需注意到晶粒度太大,会使持久塑性和冲击韧度降低。因此,在热处理时应考虑适当的加热温度,以满足晶粒度的要求。对于耐热钢和高温合金,通常随合金成分和工作条件的不同,都存在一个最佳的晶粒度范围。例如,GH36型合金在工作温度为650℃时,平均晶粒尺寸为0.15mm,合金具有最好的持久性能。

晶粒度大小的不均匀性,也能显著地降低材料的高温性能,因在大小晶粒交界处会出现应力集中,容易在这些地方引起裂纹,因而要求晶粒大小最好相差不大于1~2级,形状尽量要求等轴。为了消除晶粒的不均匀性,对于叶片类零件,采用高速锻造工艺,并结合

高温形变热处理,可使持久强度有很大提高。

4) 预变形的影响 经冷弯和冷拉等方法冷成形的零件,常能使蠕变性能下降。图 20.1-5 表示冷压变形程度对 1Cr18Ni9Ti 钢蠕变极限的影响。在温度不高的情况下,蠕变极限随变形程度的增加而增加,在某一冷变形程度下,可达最大值。若超过该最佳变形程度,蠕变极限将急剧下降,并且最佳变形程度是随试验温度的增高而减小。因此,在高温下如图中 700℃ 时,就不存在变形程度的最佳值。由试验可知,冷加工成形的零件若经合理的热处理,可使抗蠕变能力得到恢复。

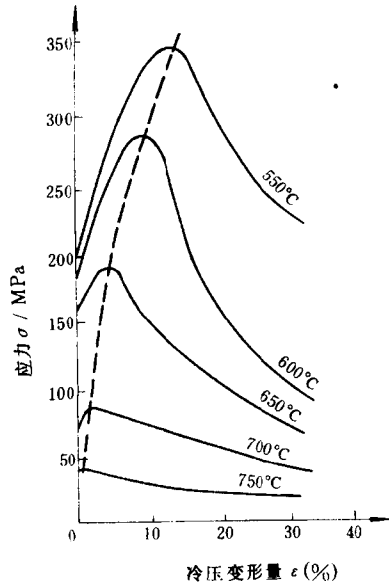


图 20.1-5 预变形程度对 1Cr18Ni9Ti 钢蠕变极限的影响

4.3 工作条件的影响

1) 温度变化的影响 蠕变极限和持久强度对温度变化十分敏感,温度升高 5~6℃,蠕变速度约增加一倍,持久寿命比原值减少 1/3 左右。温度升高 50℃ 左右时,若应力维持不变,持久寿命约为原值的 1/10 左右,所以在进行蠕变试验时应严格控制温度。

一些零件经常是在温度波动的情况下工作,例如锅炉的管道,由于启动、停炉或过负荷操作等,都能导致温度的波动,动力设备的温度偏差一般在 25~50℃ 左右。温度波动的周期对不同的零件也很不一致,对于蒸汽过热器的蛇形管,常是 1~2h 变化一次。表 20.1-2 列出了 12MX 和 91257 钢在恒定温度和温度波动下的蠕变极限,对于 12MX 钢,波动温度使蠕变极限比恒温度情况下降 15%~25%,对于 91257 钢下降了约 15%。因此,在设计时必须考虑温度波动的影响,一般推荐以波动温度上限的蠕变极限或持久强度数据作为设计计算的依据,这样比较安全。

表 20.1-2 恒定温度和波动温度下的蠕变极限 (MPa)

试验温度/℃	12MX	91257
480	160	---
480±25	120	---
510	120	---
510±25	100	---
540	82	---
540±25	70	---
575	---	80
575±25	---	75
600	---	65
600±25	---	55

注:1. 试验的蠕变速度为 $v = 1 \times 10^{-5} \%$ /h。

2. 波动温度周期为 1h。

3. 12MX 的化学成分(质量分数)为 C 0.09%~0.06%, Mn 0.4%~0.7%, Si 0.15%~0.3%, Cr 0.4%~0.6%, Mo 0.4%~0.6%, Ni ≤0.3%。

4. 91257 的化学成分(质量分数)为 C ≤0.15%, Mn ≤0.7%, Si 0.3%~0.8%, Mo 0.4%~0.6%, Cr 13.0%~15.0%, Ni 13.0%~15.0%, W 2.0%~2.75%。

2) 载荷变化的影响 在静载荷上叠加一个变动载荷,将使持久强度显著下降,这类问题涉及蠕变和疲劳的交互作用,对断口进行观察常具有疲劳断裂的特征。表 20.1-3 给出了 GH33 和 GH135 合金在 650℃ 下,并在平均应力为 570MPa 上叠加不同交变应力,频率为 10Hz 时的持久断裂时间。

表 20.1-3 GH33、GH135 在变动载荷下的持久断裂时间 (h)

材料	试验条件	叠加交变载荷/MPa			
		0	±12.5	±17.5	±22.5
GH125	650℃	3700	2570	950	650
	570MPa	3800	2740	>1160	1500
GH33	650℃	1080	520	440	195
	570MPa	1340	590	650	225

3) 环境气氛的影响 蠕变试验通常在空气中进行,但有些机械零部件是在不同的环境气氛中工作。例如,锅炉和燃气轮机是处于燃烧气体中;一些高压的化工容器是处于氢气的气氛中;核反应堆的一些管件处于含氮的气氛中等。这些气氛与材料之间往往能产生化学反应,特别是腐蚀和氧化作用,除了可使零件的断面变小外,也可使表面变得粗糙而造成应力集中,致使蠕变速度明显增加。因此,设计所用地蠕变数据应尽可能由与工作气氛一致的材料蠕变试验得到,图 20.1-6 给出了各种气体中 304 不锈钢的蠕变曲线。304 不锈钢的化学成分(质量分数)为 C ≤0.15%, Si ≤1.0%, Mn ≤2.0%, P ≤0.045%, S ≤0.30%, Cr 18.0%~20.0%, Ni 8.0%~10.5%。

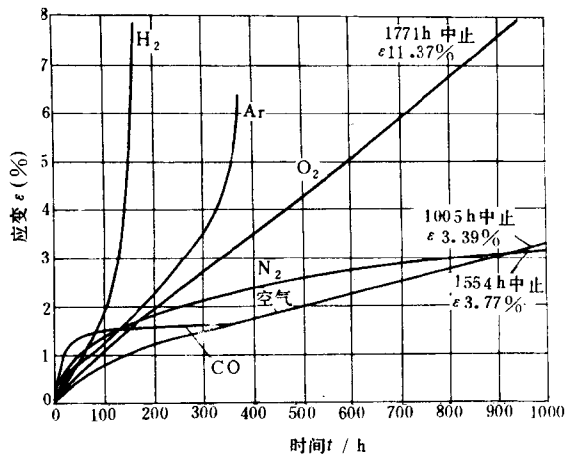


图 20.1-6 环境气氛对 304 不锈钢蠕变性能的影响(试验条件 815℃, 24MPa)

4.4 零件尺寸与形状的影响

(1)尺寸的影响

不同尺寸试样的蠕变和持久断裂试验表明,蠕变性能数据同样也存在尺寸效应,它还与材料的性质有关,有的材料尺寸效应显著,有的材料尺寸影响就很少。因此,蠕变设计时,一般应采用标准试样的试验数据,对于特殊情况,应进行相应尺寸的蠕变试验,或按尺寸效应给予修正。

(2)缺口的影响

实际零部件常有键槽、销孔或截面形状突变等各种缺口形式,在这些地方形成应力集中,使蠕变承载能力下降。为了评定缺口的影响,需通过缺口试样和光滑试样的持久性能试验,获得缺口敏感系数 K 来修正。 K 有两种表示方法,即

1)在相同应力作用下,缺口试样与光滑试样断裂时间之比,又称缺口断裂时间比,即

$$K_{\sigma} = \frac{t'_{rs}}{t_{rs}} \tag{20.1-10}$$

式中 K_{σ} ——相同应力作用下的高温缺口敏感系数;

t'_{rs} ——缺口试样在应力 σ 作用下至断裂的时间(h);

t_{rs} ——光滑试样在应力 σ 作用下至断裂的时间(h)。

2)在断裂时间相同的情况下,缺口试样与光滑试样应力之比,又称缺口强度比,即

$$K_{\sigma} = \frac{\sigma'_{tr}}{\sigma_{tr}} \tag{20.1-11}$$

式中 K_{σ} ——相同持久时间 t_r 下的高温缺口敏感系数;

σ'_{tr} ——缺口试样在持久时间 t_r 时的应力(MPa);

σ_{tr} ——光滑试样在持久时间 t_r 时的应力(MPa)。

当 $K \geq 1$ 时,表示材料对缺口不敏感;当 $K < 1$ 时,则材料对缺口敏感。这里的 K 是指 K_{σ} 或 K_{σ} 。

缺口敏感系数的大小常受材料、温度、缺口形状及尺寸和热处理工艺等因素影响。例如, Cr-Mo-V 钢在低于 482℃ 时, K 值大于 1, 材料呈缺口强化; 高于 482℃ 时, 长时区 K 值小于 1, 材料呈缺口弱化; 当温度超过 649℃ 时, 长时区转变为无缺口敏感性, 则 K 值趋近于 1。图 20.1-7 表示不同缺口半径对 K_{σ} 的影响。表 20.1-4 列出了图 20.1-7 中 4 组试验材料的化学成分和热处理情况。

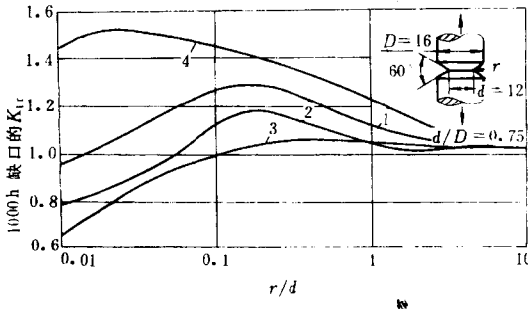


图 20.1-7 缺口半径对 K_{σ} 的影响

表 20.1-4 试验材料的化学成分和热处理

曲线号	合 金	化 学 成 分(质量分数)(%)									固溶处理	时效处理
		C	Ni	Cr	Mo	Co	W	Ti	Fe	Al		
1	Ni-Cr-Co-Fe 耐热合金	0.03	39.0	18.5	3.01	19.8	—	2.50	15.5	0.20	980℃ 20min 油冷	815℃, 20h, 空冷 650℃, 20h, 空冷 815℃, 20h, 空冷 650℃, 20h, 空冷
2	Ni-Cr-Co-Fe 耐热合金	0.03	39.0	18.5	3.01	19.8	—	2.50	15.5	0.20	980℃ 20min 油冷	730℃, 44h, 空冷 650℃, 20h, 空冷
3	Ni-Cr-Co-Fe 耐热合金	0.03	39.0	18.5	3.01	19.8	—	2.50	15.5	0.20	1150℃ 1h 油冷	815℃, 20h, 空冷 730℃, 20h, 空冷 650℃, 20h, 空冷
4	12Cr-3W			12			3		余量		900℃ 3h 空冷	640℃, 12h, 炉冷

第2章 蠕变试验

通过标准试样的蠕变和持久强度试验,可获得材料的蠕变性能数据,设计者可以此评价机械零部件的抗蠕变能力或进行有关的蠕变设计计算。

1 蠕变和持久强度试验

1.1 蠕变试验

蠕变试验通常是在恒定温度和拉力下进行,需在规定的时间内测定试样的伸长率与时间的关系,确定材料的蠕变极限。蠕变试验是一种长时间的试验,所需的时间常是几千小时,乃至几万小时,所测定的总应变(不包括开始的弹性应变)为千分之几至百分之几,最

小的应变速度为 $(10^{-5} \sim 10^{-1})\%/h$ 数量级,试验不需要进行到试样破断。蠕变试验方法可按照 GB/T2039—1980 进行。

1.1.1 试样

试样分为圆形试样和板状试样两种。

1)圆形试样 试样的直径 d_0 为 $\phi 5 \sim 10\text{mm}$,原始计算长度为 $5d_0$ 、 $10d_0$ (或用 $12.5d_0$),推荐试样如图 20.2-1a 所示。

2)板状试样 一般推如图 20.2-1b 所示的试样尺寸,其宽度为 15mm ,计算长度为 100mm ,厚度可取板材的厚度。

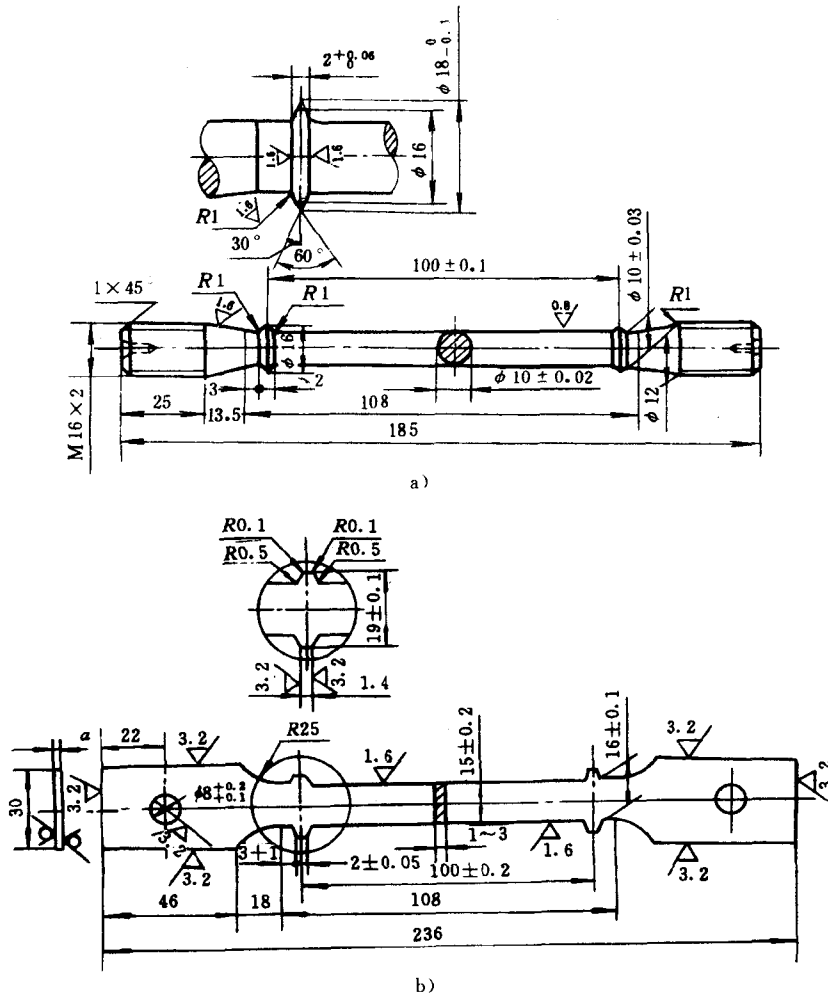


图 20.2-1 蠕变试验试样

在特殊情况下,允许采用其他形状和尺寸的试样。如圆形试样可采用直径 d_0 不小于 5mm, 计算长度 L_0 为 $5d_0$ 或 $10d_0$ 的试样; 板状试样可采用计算长度为 $5.65 \sqrt{A_0}$ 的试样, A_0 为试样的截面积。在确定试样的形状和尺寸时,应有利于精确地测定试样的伸长和载荷,并能适合于所用伸长仪的类型。

试样制备时,不应使试样因受热或加工硬化而改变金属的性能。圆形试样从头部至工作部分的过渡处应光滑、缓和; 螺纹部分与工作部分的同轴度为 $\phi 0.03\text{mm}$; 试样工作部分最小和最大的直径差不大于 0.02mm, 端部螺纹加工应符合 3 级精度要求。

板状试样可采用保持原表面或磨光表面两种类型,磨光表面的粗糙度应与侧面一致; 板状试样两端部的销孔中心线应与试样轴线重合,位置度不大于 0.1mm。

圆形试样直径和板状试样厚度及宽度的测量,应在计算长度中部及两端各测一处(不少于 3 处),圆形试样直径应在每处于两互相垂直方各各测一处,并取算术平均值。试样的横截面积应以所测得 3 处的最小值计算。

1.1.2 试验设备

蠕变试验机种类很多,通常均有加载机构、加热装置(包括控温和测温系统)和变形测量机构三大部分组成,如图 20.2-2 所示。

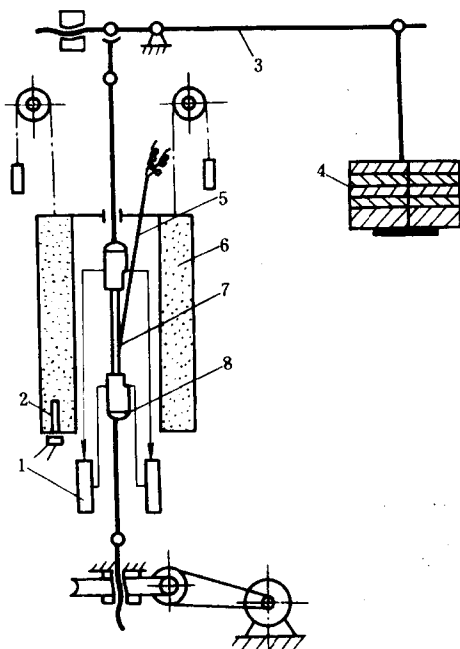


图 20.2-2 蠕变试验机装置简图

1—测长仪 2—铂电阻 3—杠杆 4—砝码
5—热电偶 6—电炉 7—试样 8—夹头

对试验机的主要规定是:

1) 试验机载荷的精确度在最大载荷的 5% 以上时,其偏差不得大于 $\pm 1\%$, 并能在试验过程中保持恒定,在施加或卸除载荷时应均匀平稳无振动。

2) 加载系统应具有准确的拉力中心,加于试样上载荷的偏心率(偏斜率)应不大于 15%。载荷偏心率是指在常温下测量标准试样任意两相对方向弹性伸长量的最大值与平均值之差,除以平均值的百分比。

3) 试样加热炉应保证试样标距部分受热均匀,加热炉均热区不得小于试样计算长度的 1.5 倍,加热装置应具有自动控温设备。均热区的温度波动和温度梯度应符合表 20.2-1 的规定。温度波动是指试样实测温度和试验设定温度的偏差,温度梯度是指任一瞬间试样所有被测定点的实测温度的最高值和最低值之差,测温用的热电偶应保持长期使用的稳定性,并要作定期的检查。在试验过程中,试验室的温度应保持恒定,一般规定 $20 \pm 5^\circ\text{C}$ 。

表 20.2-1 蠕变试验允许的温度波动和温度梯度

试验温度/ $^\circ\text{C}$	温度波动/ $^\circ\text{C}$	温度梯度/ $^\circ\text{C}$
≤ 600	± 3	3
$> 600 \sim 900$	± 4	4
$> 900 \sim 1200$	± 5	5

4) 变形测量仪器(即伸长计)要求的精度为最小分度值不低于 0.002mm,精度不低于 0.2%。目前常用的伸长计有:千分表型伸长计,马腾镜式伸长计和显微镜式伸长计。

1.1.3 试验方法

为了节省时间,可应用若干台蠕变试验机,分别同时进行同一批试样,在给定温度不同应力或给定应力不同温度下的试验,对每一试样的试验可按如下要求进行。

1) 将试样装在试验机上,并装上伸长计,施加约为总载荷 10% 的初始载荷,用来测量试样的偏心率是否在允许范围之内,如超出允许值应进行调整直至达到要求。

2) 当试样安装合乎要求后,除去初始载荷,开始对试样进行均匀缓慢地加热,达到给定温度后保持一定时间(一般不小于 1h)。待试样温度内外均匀并稳定后,再加约为总载荷 10% 的初载荷,然后调整伸长计到一适宜点,作为伸长计的示值零点,保持 5~10min,若试样温度及伸长计示值不变时,则均匀平稳地加载到给定的总载荷值,同时记录试样的弹性变形值。

3) 每隔一定时间,测定并纪录试样的伸长一次,开始时时间间隔要短些,可为 15~30min,然后可为 2h。当试验进行到蠕变第 I 阶段末期或第 II 阶段初期时,

可变为24h测定伸长一次。当伸长速度显著增大,进入蠕变第Ⅲ阶段时,试验就可终止。

对于蠕变极限的测定,要求在一定温度、不同应力条件下进行,每组试验的试样不少于3根,最后两组(即超过规定值与不超过规定值)应力差不应大于5MPa。

每一种材料的试验持续时间和允许伸长率,可按其用途而定。如果技术条件未作规定,可从持续时间为100h、300h、500h、1000h、或3000h;伸长率为0.1%、0.2%、0.5%、1%、3%、5%中选取。

4) 试验终了时,应先将试样上的载荷减至初始载荷,并测量其残余伸长量(即塑性变形)的绝对值。

5) 在试验过程中,如因意外原因不得不暂停试验时,应保持试样在总载荷不变的情况下,冷至室温。当

恢复并继续进行试验时,也应在总载荷不变的情况下,加热试件至试验温度,不然将导致错误的结果。在试验过程中,应注意勿使试样过热(超过给定的试验温度);万一发生过热,则应换用新试样重新做起。

1.1.4 试验结果整理

在蠕变试验中可获得下列数据,即应力 σ 、伸长 l 、时间 t 和温度 T 等,根据这些数据可绘制以下曲线。

1) 伸长—时间曲线 如图20.2-3a所示,由图可得到蠕变应变 ϵ_c 和蠕变速度 v ,即

$$\epsilon_c = \frac{l - l_0}{l_0} \times 100\% \quad (20.2-1)$$

$$v = \frac{\tan \alpha}{l_0} = \frac{\Delta l}{\Delta t l_0} \quad (20.2-2)$$

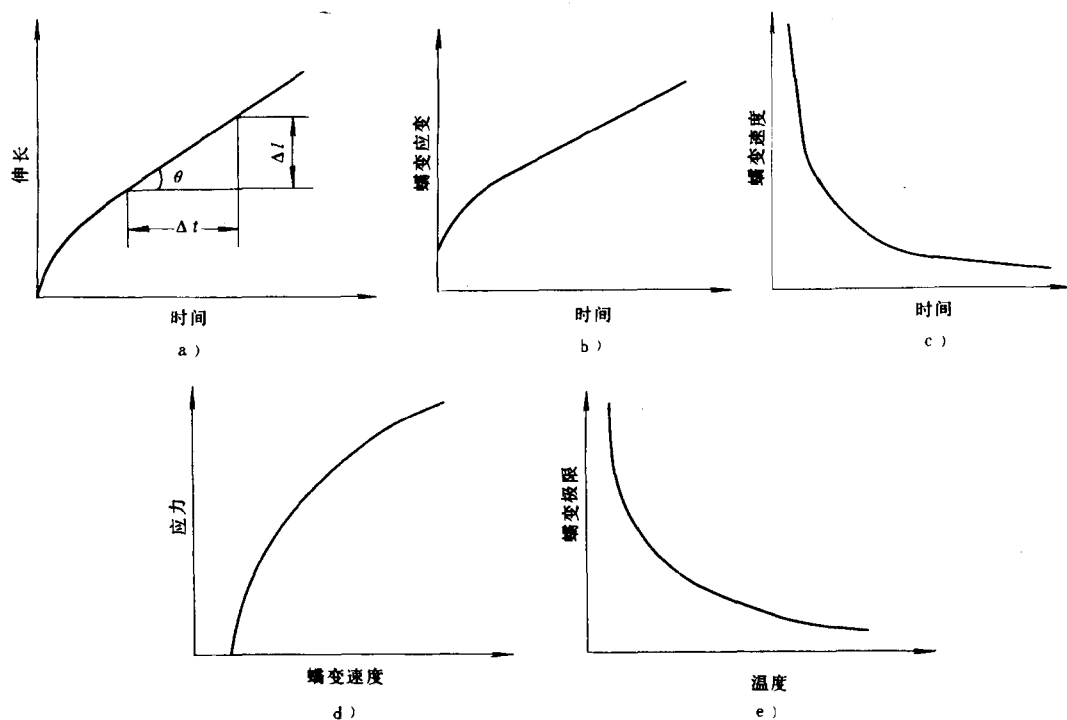


图 20.2-3 蠕变试验结果曲线

式中 l_0 ——初始试样长度(mm);

l —— t 时刻的试样长度(mm);

Δl ——在 Δt 时间间隔内试样的绝对伸长量(mm);

Δt ——时间间隔(h)。

2) 蠕变应变—时间曲线 如图20.2-3b所示。

3) 蠕变速度—时间曲线 如图20.2-3c所示。

4) 应力—蠕变曲线 如图20.2-3d所示。

5) 蠕变极限—温度曲线 如图20.2-3e所示。

为了便于将由短时间内所得到的试验数据推算到比较长的时间间隔去,可采用对数坐标系统。以图解法表示蠕变试验结果时,经常会出现数据点分散的现象,在这种情况下,可采用“最小二乘法”求得最佳的直线方程。设计者可以根据上述这些曲线外推或内插,获得设计上所需的蠕变数据。

1.2 持久强度试验

持久强度试验只要求在给定温度和时间内测定材料破断时,能承受的最大应力,不需要测量蠕变变形。

1.2.1 拉伸持久试验

适用于圆形和板状试样,可按照标准 GB/T 6395—1986 进行。

(1) 试样

1) 圆形试样。直径为 10mm, 计算长度为 50mm 的圆形试样, 见图 20.2-4a。

直径为 5mm, 计算长度为 25mm 的圆形试样, 见图 20.2-4b。

2) 板状试样。板状试样形状如图 20.2-4c 所示, 其尺寸见表 20.2-2。

3) 缺口试样 为了评定缺口对持久强度的影响, 常使用缺口试样。图 20.2-5a 为常用的缺口试样形状和尺寸, 其理论应力集中系数 $K_t=3.85$ 。材料持久强

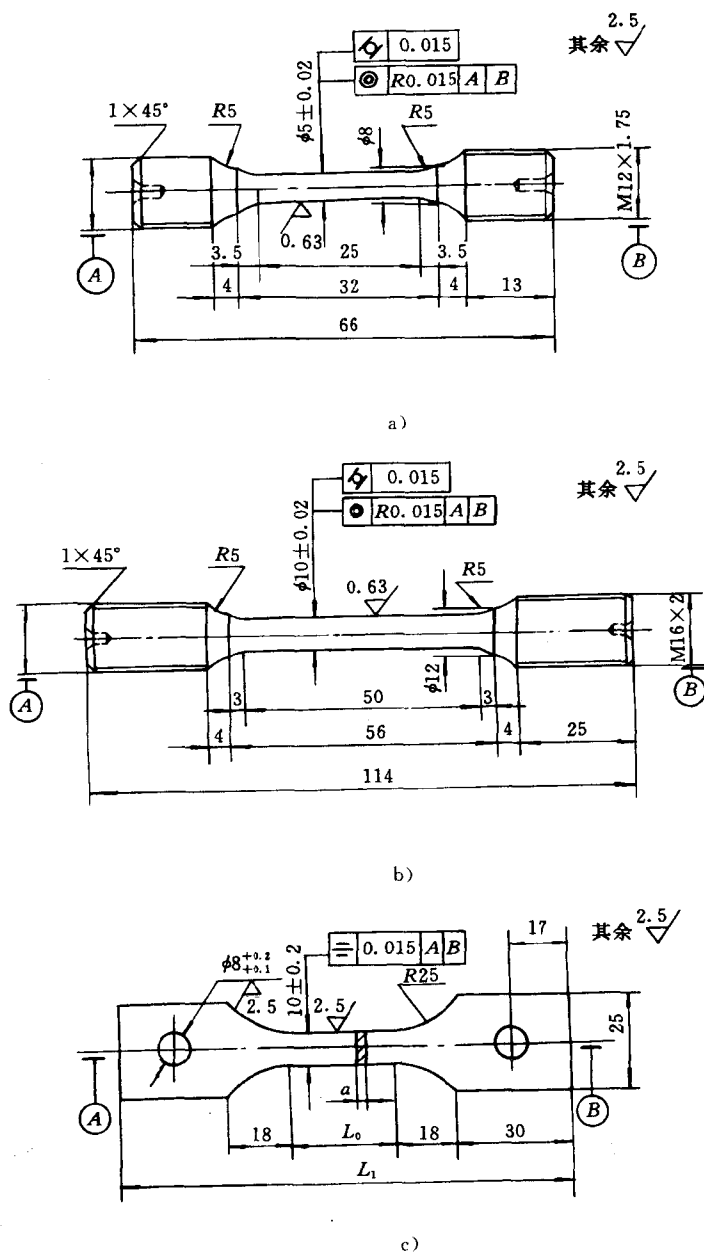


图 20.2-4 持久强度试验的圆形和板状试样

表 20.2-2 矩形横截面试样 L_0 与 a 的关系

(mm)

试样厚度 a	$\geq 0.8 \sim 1$	$> 1 \sim 1.5$	$> 1.5 \sim 2.4$	$> 2.4 \sim 3$	注
计算长度 L_0	15	20	25	30	在此以外厚
试样总长度 L_1	111	116	121	126	度 L_0 可另订

度对缺口的敏感性与缺口底部半径 r 、缺口深度 $h =$ 据需要选取,其形状见图 20.2-5b。

$\frac{1}{2}(D-d)$ 和缺口的角度 θ 有关。试样缺口的尺寸可根

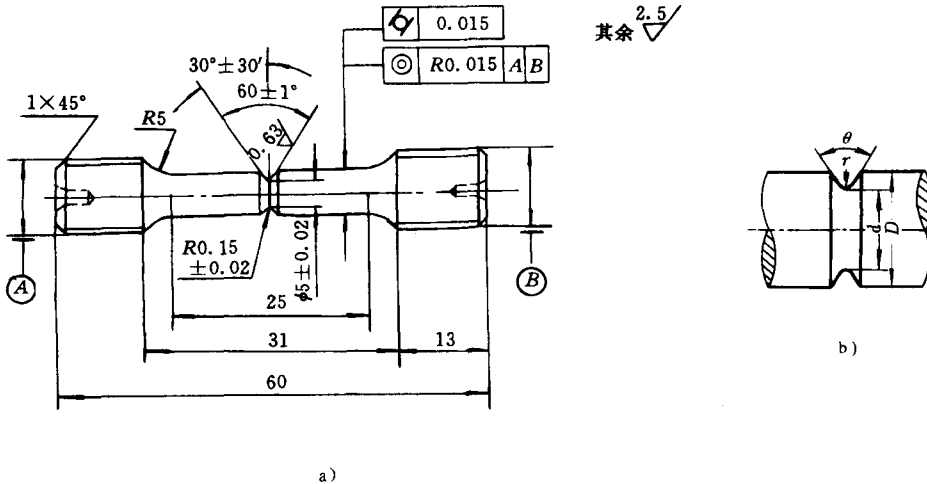


图 20.2-5 持久强度试验的缺口试样

(2) 试验设备

可以在蠕变试验机上进行,但为适应持久强度试验的特点,最好在专用的试验机上进行,它们能提供较高的试验温度和较大的载荷,并能防止试样破断时发生大的振动。

(3) 试验方法

持久强度试验过程也和蠕变试验相仿,但比较简单。首先将试样安装在试验机上,调整其偏心率在允许的范围,然后缓慢加热至给定温度,保持约 1h,再平稳均匀地将给定载荷加于试样上,随即开始计算时间,直至试样破断为止。

如果需要测定持久强度与时间关系曲线,至少应在五个应力水平下测出持续时间,每个应力水平的有

效试样不少于 3 个。

(4) 试验结果整理

根据试验结果持久强度可用下式计算

$$\sigma_t^T = \frac{F}{A_0} \quad (20.2-3)$$

式中 σ_t^T ——持久强度(MPa);

F ——试样断时所承受的拉伸载荷(N);

A_0 ——光滑试样或缺口试样在缺口处的原始横截面积(mm²)。

根据试验结果可绘制以下曲线:

1) 给定温度下应力-断裂时间曲线,见图 20.2-6a。

2) 持久强度-温度曲线,见图 20.2-6b。

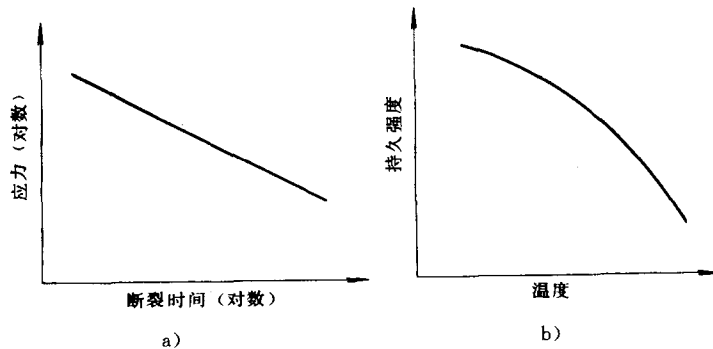


图 20.2-6 持久强度试验结果曲线

根据需要,也可以把不同温度下的应力与破断时间关系曲线画在同一张图样上以便比较,见图 20.2-7。

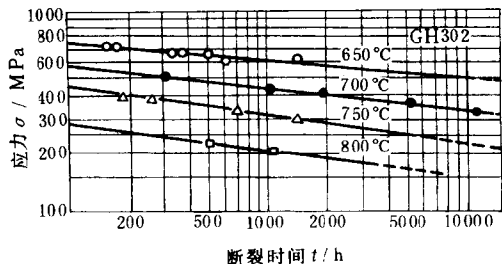


图 20.2-7 在双对数坐标中不同温度下应力-断裂时间曲线

1.2.2 管子爆破试验

管子爆破试验是适用于测定管材的持久强度。它是管状试样置于高温和内压下,测得温度、试验压力和爆破时间数据,管状试样受的是复杂应力状态作用,测得的数据更符合管子的实际情况。

1) 试样 将爆破试验的管子截成每段长 240mm,选取与管子相同的材料制成封头,一端的封头上开有焊接小管用的孔(图 20.2-8a),另一端为无孔封头(图 20.2-8b)。两个封头分别焊在试样的两端,焊后的试样全长约为 280mm,为减少试样中的空气,在焊封头时应放些金属细棒,将管子尽量填满,这样在管子爆

破时可使破坏力小些。

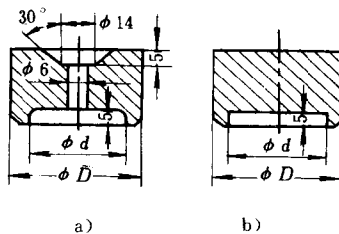


图 20.2-8 管子爆破试样封头

2) 试验设备 主要包括加热试样的电炉、加温和控温系统以及加压系统,如图 20.2-9 所示。加压系统包括:水泵(最高压力可达 100MPa)、增压容器、压力表、阀门和管道等。

3) 试验方法 试样安装后升温至规定温度,待控温情况稳定后即可加压。试验时需将内压力换算成管壁的正应力,不同的正应力将对应不同的爆破时间,此时的正应力就是管子的持久强度。正应力和内压力之间可按下式进行换算,即

$$\sigma = \frac{1}{2} \left(\frac{\beta + 1}{\beta - 1} \right) p \quad (20.2-4)$$

式中 σ ——管壁的正应力(MPa);

β ——管子外径与内径之比, $\beta = \frac{D}{d}$;

p ——管子的内压力(MPa)。

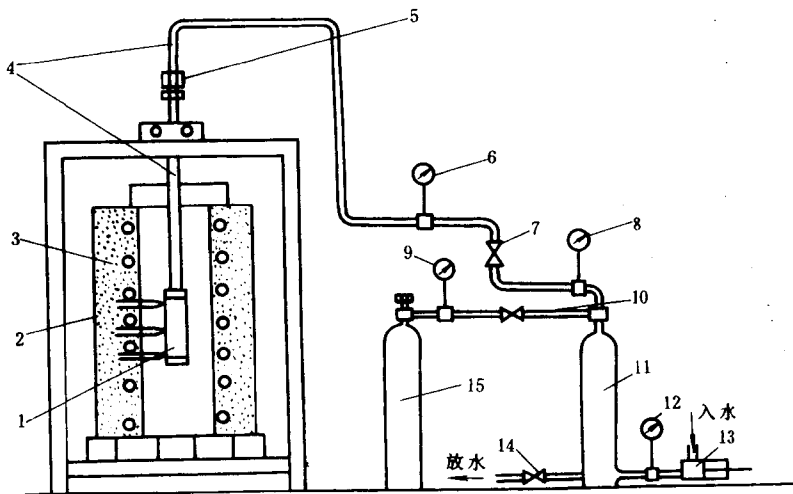


图 20.2-9 管子爆破试验装置简图

1—试样 2—热电偶 3—炉子 4—引气管 5—连接螺母 6—试样压力表 7—试样充压阀 8—总压力表
9—氮气压力表 10—充氮阀 11—增压缸 12—水压表 13—水泵 14—氮气瓶 15—放水阀

2 加速蠕变试验

蠕变试验本应在与机器零部件的实际工作状况相

一致的条件下进行,这样得到的蠕变性能数据才是最可靠的,但由于许多零部件具有相当长的工作寿命,如航空发动机的寿命已有几百小时提高到几千小时,锅

炉和汽轮机的设计寿命已达数十万小时,进行这样长时间的蠕变试验通常是不可能的,必须采用加速蠕变试验方法,并对短时的蠕变试验数据进行外推,才能获得设计所需的蠕变性能,但是任何的加速试验方法都不可能很精确,应正确地予以选择。

2.1 直接试验法

该法认为取得材料的蠕变数据,只需 30~100h 的试验时间,它常用于测定蠕变第 I 阶段的蠕变极限或蠕变速度。其主要有:

1) KWI 法 以试验开始 5~10h 内蠕变速度为 0.003%/h 的应力,作为实用蠕变极限。

2) VDM 法 将试验时间增加到 35h,测定 25~35h 之间平均蠕变速度为 $1 \times 10^{-3}\%$ /h,并在 48h 内总应变不超过 0.2% 的应力,作为实用蠕变极限。延长测试时间是为了提高数据的精度。用这种方法测得的蠕变极限 σ_{VDM} 与 10000h 内蠕变应变为 1% 的蠕变极限 $\sigma_{1/10000}^T$ 相比,有如下的近似关系,即

$$\sigma_{1/10000}^T \approx (0.5 \sim 0.8) \sigma_{VDM} \quad (20.2-5)$$

3) 其他方法 试验时间为 72h,测定 24~72h 内平均蠕变速度约为 $1 \times 10^{-3}\%$ /h 的应力,作为实用蠕变极限。该法在较低温度时,小于 10000h 或 100000h 内应变为 1% 的蠕变极限值,而在较高温度时,其结果偏高,在 450℃ 时两者大致相等。

2.2 间接试验法

这类方法主要是以间接的方法使试验时间缩短,进行材料的抗蠕变性能对比。目前常用的有:

1) 离心蠕变试验法 将同一批料制成相同的试件,一般为 16~24 根,以垂直方向固紧在圆形的转盘上,然后放入加热炉内,保持恒定的温度并旋转转盘。由于离心力的作用,试件将承受弯矩,经一定时间后,停止试验机的运行,测定每个试件的弯曲度,绘制出弯曲度-时间曲线,如图 20.2-10 所示。这样可达到一定弯曲度所需的时间或一定时间内试件弯曲度的大小,以此来评定材料的抗蠕变性能。

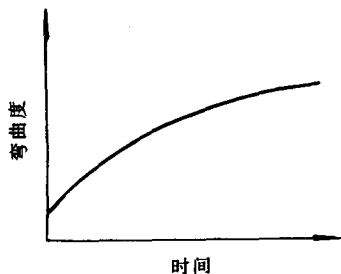


图 20.2-10 弯曲度-时间曲线

2) 高温长时硬度法 一般在 0.5~10h 不同时间内,在高温下做一系列的硬度试验,绘制出硬度-时间曲线,如图 20.2-11 所示,这样可比较不同材料在高温下的抗塑性变形或抗蠕变能力。

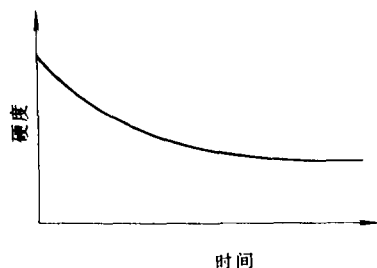


图 20.2-11 硬度-时间曲线

2.3 应力加速法

蠕变试验是在高于设计要求的应力下进行。在恒定的温度下,用不同的较短时间测定达到某一给定蠕变应变时的时间,根据试验得到的数据,在应力-时间坐标系中画出一簇以应变为常数的曲线(图 20.2-12)。然后按照设计要求的应变值,外延相应的曲线(图中的虚线),可获得设计应力下的寿命,或根据设计规定的寿命,求得相应的蠕变极限。

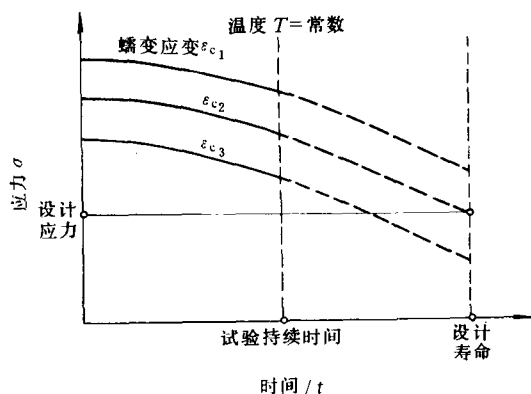


图 20.2-12 应力加速法的应力-时间曲线

2.4 温度加速法

蠕变试验是在高于设计要求的温度下进行。在不同的恒定应力作用下,测定达到给定蠕变应变值时的短时时间。根据试验得到的数据,在应力-时间的坐标系中画出一簇以温度为常数的曲线,如图 20.2-13 所示。然后按照设计要求的温度,外延相应的曲线(图中

的虚线),可获得设计应力下的寿命或设计寿命下的蠕变极限。

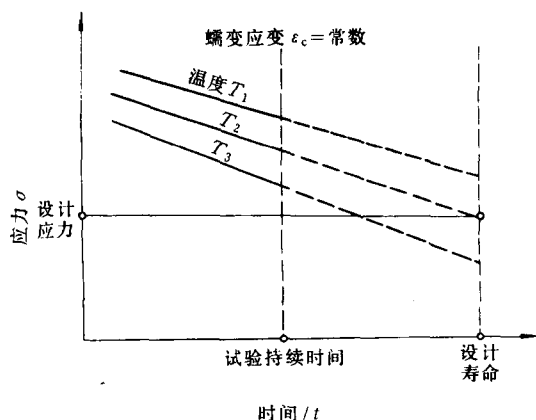


图 20.2-13 温度加速法的应力-时间曲线

3 蠕变和持久强度试验数据的外推法

目前有许多假设和理论,用于外推材料短时的蠕变和持久强度试验数据,获得设计人员所需的长时的蠕变性能。因此,所有这些外推方法都涉及到外推结果的准确性和精度,有些外推公式仅能适用于某些材料和某种特定条件。蠕变和持久强度的外推数据,主要从两个方面得到,一是从总结已有材料的试验数据出发,寻找经验公式,然后通过作图或数学计算进行外推;另一是从研究蠕变和蠕变断裂的微观过程出发,建立应力、温度和时间之间的关系式,以指导外推。以下是几种工程常用的外推方法。

3.1 等温线法

在温度一定的条件下,由较大应力的短时数据外推到应力较小的长时数据。使用该法时,对于蠕变和持久强度常用式(20.1-7)和式(20.1-8)表示,即

$$\dot{\epsilon}_c = a\sigma^b$$

$$t_r = A\sigma^{-\beta}$$

对上两式两边取对数,则有

$$\lg \dot{\epsilon}_c = \lg a + b \lg \sigma \quad (20.2-6)$$

$$\lg t_r = \lg A + \beta \lg \sigma \quad (20.2-7)$$

由式(20.2-6、7)得到,稳定阶段的蠕变速度 $\dot{\epsilon}_c$ 或持久断裂时间 t_r 的对数值和应力的对数值之间呈直线关系,外推数据用作图法直接在双对数坐标纸上读出,或用最小二乘法计算得到,如图 20.2-14 所示,图中实线为 12Cr2MoVSIB 钢在 620℃ 下由试验获得的持久强度曲线,虚线表示外推结果。

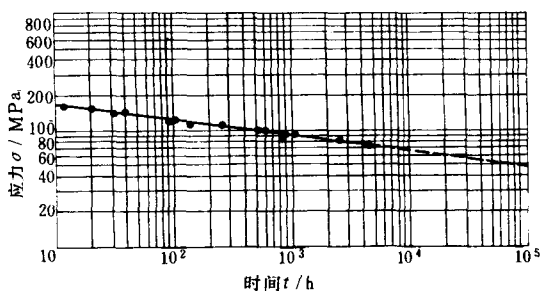


图 20.2-14 12Cr2MoVSIB 钢 620℃ 下的持久强度的等温线外推法

3.2 时间-温度参数法

在应力一定的条件下,由较高温度的短时试验数据来外推较低温度下的长时数据。该法把断裂时间 t_r 和试验温度 T 表示成一个互补参数 $f(t_r, T)$, 并把它表示成应力的函数,即

$$f(t_r, T) = P(\sigma) \quad (20.2-8)$$

根据这个基本原理,得到常用的葛庭燧-顿恩法(简称 KD 法)、拉森-米勒法(简称 LM 法)和曼森-哈佛法(简称 MH 法)等。

3.2.1 KD 法

假定蠕变速度 $\dot{\epsilon}_c$ 遵守一般用来描述速率的方程,即

$$\dot{\epsilon}_c = A \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (20.2-9)$$

式中 A ——常数;

R ——气体常数;

T ——用热力学温度表示的蠕变温度;

Q ——蠕变激活能。

又假定蠕断裂时间 t_r 反比于稳定蠕变速度 $\dot{\epsilon}_c$, 则式(20.2-9)可改写为

$$t_r = A \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \quad (20.2-10)$$

两边取对数后得到

$$\lg t_r = \lg A + \frac{Q}{2.3RT} \quad (20.2-11)$$

如果 A 、 Q 均与温度无关, 则 $\lg t_r$ 与 $1/T$ 之间是呈线性关系。

假定式(20.2-10)中的 Q 是材料的常数, 而 A 是应力的函数, 则式(20.2-10)可改写为

$$t_r \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) = P'(\sigma) \quad (20.2-12)$$

两边取对数

$$\lg t_r - \frac{Q}{2.3RT} = P(\sigma) \quad (20.2-13)$$

这就是KD法的参数式。式中 $P(\sigma)$ 称为热强参数。

由式(20.2-13)可见,断裂应力 σ 与参数式 $\lg t_r - \frac{Q}{2.3RT}$ 之间具有确定的函数关系,在 $\lg \sigma$ 与热强参数 P 的图中,如图 20.2-15 所示,不管试验在什么温度下进行,所有的点都将落在单一的曲线上,这条曲线称为综合参数曲线。常数 Q 可以用作图法,也可用计算求得。

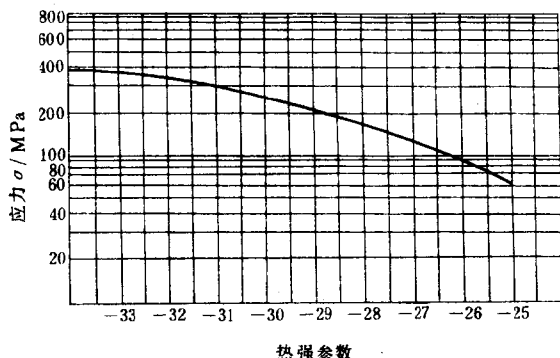


图 20.2-15 15MnPNbRE 钢 KD 法综合参数曲线

根据预测点的应力,由综合曲线查出相应的热强参数值,再由预测点的温度计算出断裂时间,或在给定预测点的温度和断裂时间的情况下,可由综合曲线推知其应力。

KD 法也可应用微机进行数据处理和外推,以提高准确度。此时的参数方程式 $P(\sigma)$ 可以表示成一个多项式,常用的是取三次多项式,即

$$\lg t_r - \frac{Q}{2.3RT} = C_0 + C_1 \lg \sigma + C_2 \lg^2 \sigma + \dots + C_n \lg^n \sigma \quad (20.2-14)$$

用式(20.2-14)进行变量代换,将试验数据代入后,就可以求出待定系数 $Q, C_0, C_1, \dots, C_n$ 的值,然后可按方程计算在给定温度和给定应力下的断裂时间,或在给定温度和给定断裂时间下的应力,在这种算法中因待定系数较多,最好用最小二乘法来拟合实验曲线,综合考虑了所有的试验结果,这样得到的外推值更可靠。

3.2.2 LM 法

LM 法是把式(20.2-10)中的 A 假定为材料常数,而 Q 是应力函数,则有

$$T(C + \lg t_r) = P(\sigma) \quad (20.2-15)$$

式中 $C = -\lg A$; $P(\sigma)$ 也称为热强参数,但与 KD 法中的热强参数具有不同的值。当缺少试验数据时,可取 $C = 20$ 。

同样 LM 法也可在 $\lg \sigma$ 与热强参数 P 的图中绘制综合曲线,如图 20.2-16 所示。根据综合曲线,可由预测点的应力和温度推算出断裂时间,或由预测点的温度和断裂时间推断出应力值。

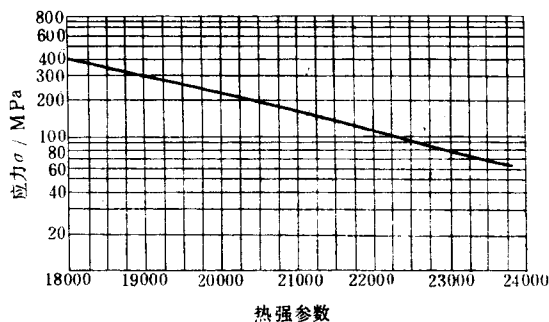


图 20.2-16 15MnPNbRE 钢 LM 法综合参数曲线

该法也可在微机上对试验数据进行处理和外推,以提高精确度,此时参数方程 $P(\sigma)$ 可表示成一个多项式,即

$$T(C - \lg t_r) = C_0' + C_1' \lg \sigma + C_2' \lg^2 \sigma + \dots + C_n' \lg^n \sigma \quad (20.2-16)$$

式中的待定系数 $C, C_0', C_1', \dots, C_n'$ 可根据试验数据确定,然后按式(20.2-16)进行外推。工程应用中常取方程的前三项。

3.2.3 MH 法

为了提高 LM 法外推值的可靠性, MH 法给出了比较保守的外推公式

$$\frac{T - T_a}{\lg t_r - t_a} = P(\sigma) \quad (20.2-17)$$

式中 $P(\sigma)$ ——与应力有关的参数;

T_a, t_a ——与材料有关的常数;

T ——预测点的热力学温度(K);

t_r ——蠕变断裂时间(h)。

式(20.2-17)中常数的确定方法和用该式进行外推的方法,完全类同于 KD 法和 ML 法。

3.3 最少约束法

这是具有较大概括性和普遍性的外推方法,它把蠕变过程作为时间、温度和应力的函数,然后根据实际的试验数据,建立如下的外推公式,即

$$\lg t + AP(T) \lg t + P(T) = G(\sigma) \lg \sigma \quad (20.2-18)$$