

低温工程材料

陈国邦 编著



浙江大学出版社

低温工程材料

陈国邦 编著



浙江大学出版社

内 容 提 要

本书以理论与工程应用相结合的方法,介绍了低温下材料的热物理性质、力学性能与常温下的显著区别,指出从事制冷与低温工程工作的技术人员掌握有关低温材料基本特性的知识和低温材料性能数据的重要性。本书着重介绍了材料低温脆性断裂的基本概念,金属和非金属材料的塑性和韧性随温度降低的变化规律以及它们的热电性质的变化特点。全书给出大量的数据图表,可供参考。最后还讲述低温系统的安全问题及选材原则。

本书内容丰富,适合作为高等院校制冷与低温工程专业的大学生或研究生的选修课教材,也可供从事制冷与低温技术研究和设计的科研工作者、工程技术人员阅读参考。

低温工程材料

陈国邦 编著

责任编辑 杜希武

* * *

浙江大学出版社出版

(杭州玉古路 20 号 邮政编码 310027)

浙江大学出版社电脑排版中心排版

杭州金融管理干部学院印刷厂印刷

浙江省新华书店经销

* * *

850×1168 32 开 10.25 印张 4 插页 257 千字

1998 年 2 月第 1 版 1998 年 2 月第 1 次印刷

印数 0001—1000

ISBN 7-308-01980-2/TB·001 定价:15.00 元

序 言

低温装备、低温工程机械在航空、航天、超导技术以及民用工业中得到日益广泛的应用。低温工程材料的物理、力学性能与常温状态下相比有较大的差别。低温下材料的脆性断裂会造成灾难性重大事故,这是因为多数金属材料在低温下会发生韧—脆转变,有的还会产生相变。倘若缺乏专门的低温工程材料知识和低温下的性能数据,将会造成选材和设计不当,在低温装备运行中将可能引发失效事故。然而,目前有关的专著不多,有关低温工程材料的性能数据缺乏,且分散在各种文献资料中。

浙江大学陈国邦教授多年从事低温工程的研究,并讲授“低温工程材料”课,在教学和科研中积累了丰富的经验和资料。80年代编写了“低温工程材料”讲义,近年来又充实了国内外学者的最新研究成果,修改后由浙江大学出版社正式出版。

该书重视系统性和反映国内外最新研究成就。全书贯穿理论与工程应用相结合的原则,在第一章中着重介绍了材料低温脆性断裂的基本概念及断裂力学基础及其应用;第二、第三章介绍金属、非金属材料的塑性、韧性随温度下降的变化规律以及它们的热、电性质的变化特点,给出大量

的实验研究数据图表,供读者参考。在第四章中讲述低温系统的安全问题及其工程材料的选择原则,因此本书是一本佳著,很适合用作大学本科学生的选修课教材,又是从事低温工程工作技术人员的很有价值的参考书。

希望本书的问世会引起广大读者的兴趣和广泛的参考,为低温技术的发展发挥应有的作用。

四川联合大学教授
中国工程院院士

涂铭旌

1997年8月于成都

目 录

第一章 低温工程材料的力学基础.....	1
第一节 材料机械性能的基本知识.....	1
一、材料的应力—应变图	1
二、材料的强度指标	3
三、材料的塑性指标	8
四、材料的冲击韧性	9
第二节 断裂力学及其在低温构件中的应用	15
一、断裂力学的基本概念.....	15
二、线弹性断裂力学概要.....	18
三、弹塑性状态的断裂韧性.....	36
四、断裂韧性试验.....	44
第三节 低温脆性断裂规律及评定指标	54
一、低温脆断特征及其影响因素.....	55
二、低温断裂的评定指标.....	64
第四节 温度对工程材料机械性能的影响	73
一、温度对材料机械强度的影响.....	73
二、温度对材料的塑性和韧性的影响.....	85
第二章 低温下工程材料的机械性质	92
第一节 工程金属与合金的机械性质	93
一、铁素体钢.....	93
二、低合金钢.....	94
三、奥氏体不锈钢.....	96
四、镍合金钢	122
五、铝合金钢	133

六、其它金属和合金	138
第二节 非金属材料的机械性质	147
一、塑料	147
二、复合材料	154
三、玻璃	162
四、其它非金属材料	163
第三节 制冷与低温技术用其它材料	164
一、焊料	165
二、粘接材料	170
三、蓄冷材料	172
四、吸附材料	174
五、过滤材料和渗透材料	178
第三章 低温下材料的热物理性质	181
第一节 低温比热容	181
一、比热容的定义及关系式	181
二、晶格比热容	183
三、电子比热容 C_L	191
四、磁性物质的比热容 C_L	192
第二节 低温下材料的热导率	195
第三节 低温下固体的热膨胀系数	202
一、固体的线性热膨胀系数	203
二、物质的体积热膨胀系数	211
第四节 材料的电学性质	211
一、绝缘体	212
二、金属导体	216
三、超导体	219
第五节 低温绝热材料的热物理性质	221
一、普通绝热材料的分类和一般特性	221
二、粉末状绝热材料	226

三、泡沫状绝热材料	231
四、纤维状绝热材料	236
五、多层绝热材料	239
第四章 低温系统的安全问题	244
第一节 低温流体的危害性	244
一、生理危害	244
二、物理性质的危害	248
第二节 低温流体的化学危害性	258
一、着火	260
二、突燃	263
三、爆炸	273
四、燃烧	280
第三节 工程材料与低温流体的相容性	284
一、概述	284
二、材料与液氧的相容性	285
三、材料与氟的相容性	294
四、结构材料的氢脆	299
参考文献	303
阅读文献	304
附录	310

第一章 低温工程材料的力学基础

本章首先复习一下连续介质材料力学的基本知识,然后介绍断裂力学概要及其在低温构件中的应用,最后讨论低温脆性断裂规律及其评定指标。由此可以了解和评价低温条件对工程材料的影响。

第一节 材料机械性能的基本知识

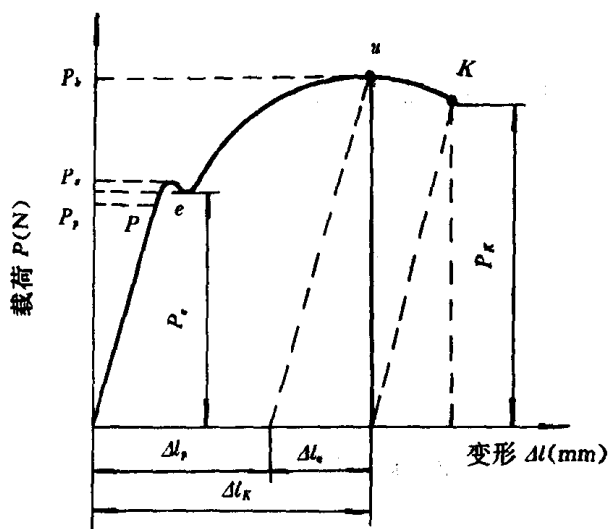
一、材料的应力—应变图

材料的机械性能指标是设计计算、材料选择、工艺评定以及材料检验的主要依据。材料的机械性能可通过实际测量而获得。一般材料试验机都带有自动纪录装置,可把作用在试样(圆柱状或板状的)上的力和变形纪录下来,绘成载荷—变形曲线,这种曲线叫做拉伸(压缩)图或拉伸(压缩)曲线(图 1-1)

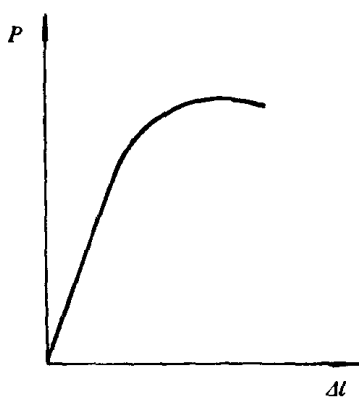
图 1-1(a)是退火低碳钢的拉伸图,纵坐标表示载荷 P ,单位为 N 或 kgf,横坐标表示绝对伸长量 l ,单位为 mm。

载荷比较小时,试样伸长随载荷成正比地增加,保持着直线关系。载荷超过 P_p 后,拉伸曲线开始偏离直线。保持直线关系的最大载荷,是比例极限的载荷 P_p 。

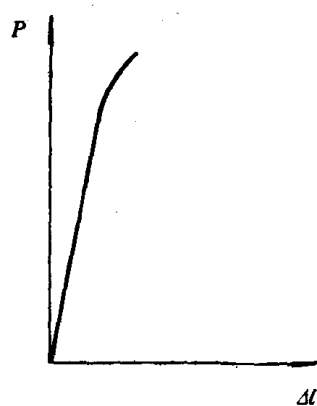
变形开始阶段,卸荷后试样立即恢复原状,这种变形是弹性变形。当载荷大于 P_e 再卸荷时,试样的伸长只能部分地恢复,而保留一部分残余变形。卸荷后的残余变形叫做塑性变形。开始产生微量塑性变形的载荷是弹性极限的载荷 P_e 。一般说来,比例极限 P_p 与弹性



a) 低碳钢



b) 塑性材料



c) 低塑性材料

图 1-1 金属材料的拉伸图

极限 P_s 是很接近的, 有时认为两点重合。

载荷增加至一定值时, 拉伸图上出现了平台或锯齿, 即在载荷不增加或减小的情况下, 试样继续伸长, 这种情况叫做屈服。屈服阶段的最小载荷是屈服点的载荷 P_s 。屈服后, 金属开始明显的塑性变形,

试样表面出现滑移带(由于材料内部晶格间的滑动而产生的与轴线约成 45° 的斜线)。

屈服现象发生以后,欲继续变形,必须不断增加载荷。随着塑性变形增大,变形阻力不断增加,这叫做形变强化或加工硬化。当载荷达到最大值 P_b 后,试样的某一部位截面急剧缩小,出现了“缩颈”,以后的变形主要集中在缩颈附近。

由于缩颈处试样截面急剧减小,继续变形不需要更大的载荷,致使载荷下降。拉伸图上的最大载荷,是强度极限的载荷 P_b 。

载荷达 P_k 时,试样断裂,这个载荷称为断裂载荷。

工业上使用的金属材料,多数是没有屈服现象的,其拉伸图如图 1-1(b)和(c)所示。其中图 1-1(b)是塑性材料的拉伸图,如退火的铝合金。图 1-1(c)是低塑性材料的拉伸图,它不仅没有屈服现象,而且也不产生缩颈,最大载荷就是断裂载荷。

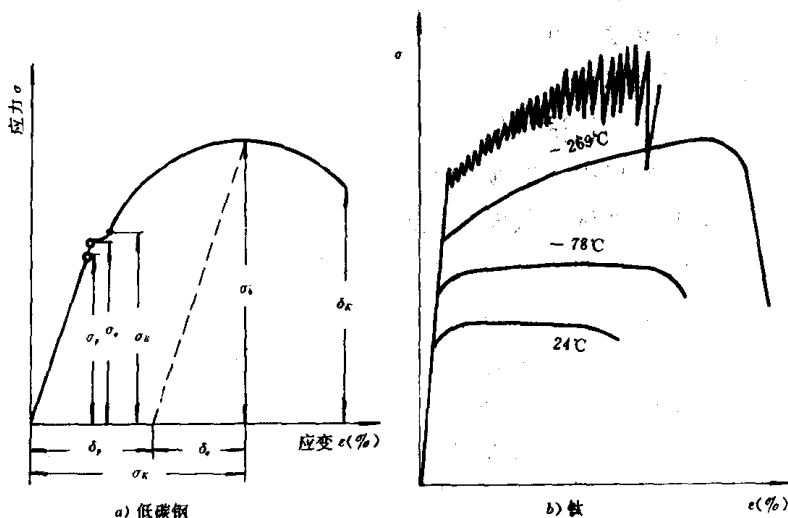
综上所述,金属在外力作用下,变形过程一般可分为三个阶段,即弹性变形、弹塑性变形和断裂。

用试样原始面积去除施加的载荷得到应力 σ ,即 $\sigma = \frac{P}{F_0}$ 。以试样的计算长度 l_0 去除绝对伸长 Δl ,得到相对伸长(应变) ϵ , $\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$ 。应力与应变的关系曲线叫做应力—应变曲线。应力—应变曲线的形状与拉伸图相似,只是坐标不同(如图 1-2(a)所示)。应力应变曲线的纵坐标表示应力,单位为 kgf/cm^2 或 MPa ,横坐标表示相对伸长,单位是百分数(%)。在应力—应变曲线上,可以直接读出材料的机械性能指标,如屈服点 σ_s ,强度极限(抗拉强度) σ_b ,伸长率(延伸率) δ_k 等。图 1-2(b)表示金属钛在不同的低温下的应力—应变曲线。

二、材料的强度指标

1. 比例极限 σ_p

比例极限 σ_p 是应力与应变成正比关系的最大应力,即在应力—应变曲线上开始偏离直线时的应力



(a) 低碳钢

(b) 钛

图 1-2 典型的金属应力—应变曲线

$$\sigma_p = \frac{P_p}{F_0} \quad (1-1)$$

式中: P_p —比例极限的载荷, N; F_0 —试样的原截面积, mm^2 。

2. 弹性极限 σ_e

弹性极限 σ_e 是材料由弹性变形过渡到弹—塑性变形的应力。应力超过弹性极限之后, 便开始发生塑性变形。弹性极限可表示为:

$$\sigma_e = \frac{P_e}{F_0} \quad (1-2)$$

式中: F_e —弹性极限的载荷。

由于弹性极限难以精确测量, 可以将产生一定残余变形的应力, 作为“规定弹性极限”。例如, 规定的残余变形伸长为 0.01% 的应力作为规定残余伸长应力, 并以 $\sigma_{0.01}$ 表示。可见, 弹性极限并不是金属对最大弹性变形的抗力, 因为应力超过弹性极限之后, 材料在发生塑性变形的同时还要继续产生弹性变形。所以弹性极限是表征开始塑

· 性变形的抗力。

理论上,材料的弹性极限 σ_e 较比例极限 σ_p 稍大一点,但实际上往往以规定残余变形来代替比例极限,因为在最大许用应力条件下是否会产生或产生多少残余变形是有实际意义的。

3. 屈服极限

在拉伸过程中,载荷不增加或开始下降,试样仍继续伸长时的恒定载荷所对应的应力叫材料的屈服应力。

$$\sigma_s = \frac{P_s}{F_0} \quad (1-3)$$

式中 P_s 是载荷不增加或开始下降,试样还继续伸长的恒定载荷或首次下降的最小载荷。

除退火或热轧的低碳钢和中碳钢等少数合金有屈服现象外,大多数金属合金都没有屈服点。因此,规定产生 0.2% 残余伸长的应力,作为屈服强度,以 $\sigma_{0.2}$ 表示

$$\sigma_{0.2} = \frac{P_{0.2}}{F_0} \quad (1-4)$$

式中 $P_{0.2}$ 为产生 0.2% 残余变形的载荷。

屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 与屈服点一样,表征金属发生明显塑性变形的抗力。由于弹性极限与屈服强度都是金属的微量塑性变形抗力指标,因此,目前有用规定的残余伸长应力把比例极限、弹性极限及屈服强度的定义统一起来的趋势。

4. 强度极限(抗拉强度)

强度极限(抗拉强度) σ_b 是由试样拉断前最大载荷所决定的条件临界应力,即试样所能承受的最大载荷除以原始截面积,以 σ_b 表示

$$\sigma_b = \frac{P_b}{F_0} \quad (1-5)$$

式中 P_b 为拉断前试样所能承受的最大载荷。

对塑性材料来说,在 P_b 以前试样为均匀变形,试样各部分的伸长基本上是一样的;在 P_b 以后,变形将集中于试样的某一部分,发生集中变形,试样上出现缩颈,由于缩颈处截面积急剧减小,试样能担

负的载荷减小,所以按试样原始截面积 F_0 计算出来的条件应力也随之减少。

强度极限的物理意义是表征材料对最大均匀变形的抗力,即材料在拉伸条件下所能承受的最大载荷的应力值,工程上通常称为抗拉强度,它是设计和选材的主要依据之一,也是材料的重要机械性能指标。

5. 断裂强度 σ_K

断裂强度是拉断试样时的真实应力,它等于拉断时的载荷 P_K 除以断裂后缩颈处横截面积 F_K

$$\sigma_K = \frac{P_K}{F_K} \quad (1-6)$$

断裂强度表征材料对断裂的抗力。但是对塑性材料来说,它在工程上意义不大,因为产生缩颈后,试样所负担的外力不但不增加,反而减少。

塑性差的材料(脆性材料)一般不产生缩颈,拉断前的最大载荷 P_b 就是断裂时的载荷 P_K ,并且由于塑性变形小,试样截面积变化不大, $F_K \approx F_0$,因此抗拉强度 σ_b 就是断裂强度 σ_K 。在这种情况下,抗拉强度 σ_b 表征材料的断裂抗力。

6. 材料的弹性指标

金属的弹性是金属弹性变形的能力。虎克定律相当准确地反映了应力与应变之间的关系。在拉伸(压缩)过程中,当 P 未达到比例极限之前,试件的伸长 Δl 与力 P 的大小和杆件长度 l 成正比,而与横截面积 F 成反比,即

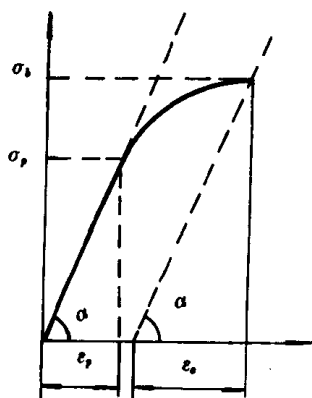
$$\Delta l = \frac{Pl}{EF} = \frac{l}{E} \sigma \quad (1-7)$$

式中 E 称为弹性模量(或杨氏模量),它表示材料的弹性性质,其值由实验测定。 EF 称为试件的抗拉(抗压)刚度,表征材料对弹性变形的抗力。刚度越大,则试件的变形越小。

虎克定律也可表示成另一种形式,由式(1-7)

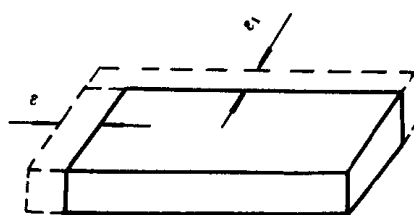
$$\sigma = E\varepsilon \quad \text{或} \quad E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (1-8)$$

由此可见,材料的杨氏模量等于拉伸图上的应力及对应的应变的正切,见图 1-3。



$$E = \tan \alpha = \frac{\sigma_p}{\varepsilon_p} = \frac{\sigma_s}{\varepsilon_s}$$

图 1-3 拉伸图上的杨氏模量



ε_1 —横向应变变量

ε —纵向应变变量

图 1-4 波松比

表示材料弹性性质的另一个指标是波松比 μ 。实验证明,在弹性变形范围内,横向应变 ε_1 与纵向应变 ε 间具有简单的正比关系,即

$$\varepsilon_1 = \mu \varepsilon \quad \text{或} \quad \mu = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon} \quad (1-9)$$

μ 值由实验测定,一般钢材的 μ 值在 0.25~0.33 之间,图 1-4 给出了波松比的示意图。

7. 金属的疲劳强度

机件在低于材料的屈服强度的交变载荷下,经过长时工作而发生断裂的现象叫做金属的疲劳,疲劳断裂与静载荷下的断裂不同。在静载荷下显示脆性或韧性的材料,在疲劳断裂时都不产生明显的塑性变形,断裂是突然发生的,因此具有很大危险性,常常造成严重的事故。

在交变载荷下,金属承受的交变应力和断裂循环周次之间的关

系,通常用疲劳曲线来描述。金属承受的最大交变应力 $\sigma_{\max}$ 愈大,则断裂时应力交变的次数 N 愈少;反之, $\sigma_{\max}$ 愈小,则 N 愈大。如果将所加的应力 $\sigma_{\max}$ 和对应的断裂周次 N 绘成图,便得到图 1-5 所示的曲线,此曲线叫做疲劳曲线。从图可见,当应力低于某值时,应力交到无数次也不会发生疲劳断裂,此应力称为材料的疲劳极限,即曲线水平部分对应的应力。由于疲劳断裂的周次很多,故疲劳曲线的横坐标通常取对数坐标。疲劳极限通常用 σ_r 表示,注脚 r 表示应力循环对称系数。对于对称应力循环, $r=-1$,故用 σ_{-1} 表示。

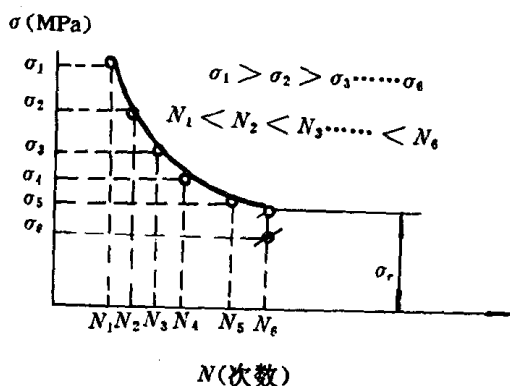


图 1-5 疲劳曲线示意图

试验指出,材料的疲劳强度总是随着温度的降低而增加。当温度降低时,铝合金的疲劳强度和强度极限之比值不变,即疲劳强度与强度极限以同样的方式随温度而变化。这个事实可用来估计低温下铝合金的疲劳强度。

三、材料的塑性指标

断裂前金属发生塑性变形的能力叫做塑性。塑性指标常用金属断裂时的最大相对塑性变形来表示,如拉伸时的伸长率 δ 和断面收缩率 ψ 。

1. 伸长率 δ_K (或 δ)

伸长率 δ_K 是断裂后试样标距长度的相对伸长值,它等于标距的绝对伸长 $\Delta l_K = l_K - l_0$ 除以试样原标距长度 l_0 ,用百分数(%)表示。

$$\delta_K = \frac{l_K - l_0}{l_0} \times 100\% \quad (1-10)$$

式中 l_K —试样断裂后的标距长度; Δl_K —断裂后试样的绝对伸长。

在材料的机械性能手册中,经常出现的延伸率为 δ_5 或 δ_{10} ,这表示试样标距等于 5 倍或 10 倍直径时测得的伸长率。

塑性材料与脆性材料的分界线为 5% 的延伸率,即断裂前延伸率大于 5% 的材料称为塑性材料,小于 5% 的材料叫脆性材料。碳钢的塑性随着温度的下降,其延伸率从 25%~30% 跌到 2%~3%。显然,这些材料不能用于低温。

2. 断面收缩率 ψ

断面收缩率 ψ 是断裂后试样截面的相对收缩率,它等于截面的绝对收缩 $\Delta F_K = F_0 - F_K$ 除以试样的原始截面积 F_0 ,也是用百分数表示的

$$\psi = \frac{F_0 - F_K}{F_0} \times 100\% \quad (1-11)$$

四、材料的冲击韧性

冲击载荷与静载荷的主要差异,在于加载速度不同。加载速度可用单位时间内应力增加的数值表示,单位为 Pa/s。机件在冲击载荷下的失效类型与静载荷一样,仍然表现为过量弹性变形、过量塑性变形和断裂。由于冲击过程持续时间很短而测不准确,很难按惯性力来计算机件内的应力。因而,冲击载荷下的应力通常按能量守恒法计算,并假设冲击能全部转换成机件内的弹性能,以计算应力和应变。

众所周知,弹性变形是以声速在介质中传播的,在金属介质中声速是相当大的,如在钢中为 4982 m/s。普通摆锤冲击试验时绝对变形速度在 1000 m/s 以下。这样,弹性变形总是能紧跟上外加载荷的变化,因而变形速度对金属材料的弹性行为及相应的机械性能(如 E 值)没有影响。