

耐热钢

持久性能的统计分析 及可靠性预测

赵 杰/著



科学出版社

耐热钢持久性能的统计分析 及可靠性预测

赵 杰 著

科 学 出 版 社

北 京

前 言

在核动力、发电设备、石油化工、航空航天等工业领域广泛应用的高温设备,由于长期在高温、高压等苛刻的环境下服役,在温度和应力作用下,材料的微观组织、力学性能、耐热性能、物理性能都将会缓慢地发生变化,同时伴随有蠕变、热疲劳、腐蚀等现象发生。材料在使用过程中出现的老化现象,实质上是蠕变损伤积累和材质劣化的结果,并最终在应力作用下导致开裂失效,材料的高温蠕变断裂是高温环境中工作的机械设备失效的主要形式之一。因此高温设备的设计需要依据材料的长期持久强度进行,而关键部件则要求以高置信度、高可靠性的持久强度作为设计依据,高温构件的持久寿命预测和可靠性分析是高温关键构件设计及延寿评估中的重要一环,既可以较准确地制定检修时间间隔,又能最大限度地提高资源利用率,达到经济合理地使用高温构件和安全生产的目的。

近半个世纪以来,持久寿命预测技术一直是学术界和工程界极为关注的热点课题。为了预测高温高压构件的持久寿命,人们已经建立了各种寿命预测模型,主要的方法是对材料的高温持久性能进行分析,再利用外推法确定实际温度、应力下的持久寿命。但对于实际的工程构件,由于受到众多随机不确定性因素的影响,如由于冶金等方面的原因,会引起材料不均匀性,从而导致力学性能较大的分散性;又如设备工况所造成的服役条件在一定范围内波动,亦具有随机不确定性质,这些都导致寿命预测结果的不确定性。由于这些不确定因素的存在,给寿命预测工作的准确进行增加了很大难度。

为了考虑许多不确定因素的影响,必须采用基于概率论和数理统计的可靠性理论和方法,对高温材料的持久寿命进行可靠性分析。目前,机械、动力设备围绕疲劳寿命的可靠性预测方法已经形成比较全面的体系,对工程设计、设备检修计划制定等发挥重要作用。对高温持久寿命预测而言,持久性能实验需要在一定的温度和应力条件下进行,在相同实验条件下的数据量比较少,统计分析结果的准确性受到局限。对于大多数材料而言,要得到相同实验条件下的断裂寿命数据分布,需要花费大量的时间和财力,实施难度较大。

尽管如此,由于蠕变持久性能在高温构件安全评估及寿命预测上的重要性,国际上一些主要的发达国家还是投入了巨大财力开展数种耐热钢系列的持久性能试验,如日本的原金属材料技术研究所(National Research Institute for Metals, NRIM;现合并为日本国立物质·材料研究机构, National Institute for Materials Science, NIMS)、欧洲的一些机构在数十年以前就开始进行系统的、有规模的持久

性能试验,经过几十年的时间,已获得一些持久时间长达二十余万小时,甚至三十余万小时(约 40 年)的数据,NIMS、BSCC(British Steelmakers Creep Committee,英国钢铁制造业蠕变委员会)、ECCC(European Creep Collaborative Committee,欧洲蠕变协作委员会)等机构相继整理并公布了相关的数据。如何利用这些宝贵的数据,分析总结材料蠕变持久性能的规律,结合可靠性的方法推进持久寿命预测技术的进步,无疑具有重要的工程背景及应用价值。

基于上述背景,本书系统地介绍了高温材料持久性能的统计分析 & 可靠性预测方法。全书由 6 章组成:第 1 章和第 2 章介绍金属的高温蠕变 & 持久断裂 & 可靠性分析的基本知识,包括金属蠕变持久试验方法、试验数据的整理方法、相关的统计分析、假设检验 & 参数估计方法,以及常用的时间-温度参数法等;第 3 章具体叙述耐热钢持久性能数据的可靠性分析方法,包括基于持久断裂时间和持久强度的概率统计分析、基于 Z 参数的概率统计分析、对统计分布 & 可靠性分析结果的影响因素等;第 4 章介绍目前在高温强度设计中常用的安全系数 & 许用应力方法,并基于可靠性分析结果提出了持久强度的概率设计方法,以及在综合考虑性能分散性和服役条件波动性情况下的干涉模型——SCRI 模型,比较了基于可靠性的设计方法与其他方法的差异;第 5 章和第 6 章介绍耐热钢高温持久寿命预测 & 损伤评估的基本方法,既介绍了常用的等温线预测法、TTP 参数法以及修正的 Monkman-Grant 方程,也介绍了 θ 投影法、断裂力学法以及结合可靠性分析的的概率预测法和结合组织劣化评定标准的 Z 参数方法,同时描述了高温蠕变损伤的物理过程以及有关损伤的可靠性评估应用,讨论了寿命预测结果准确性的关联因素。

本书在相关章节融入了作者多年来的研究成果,比较详细地介绍了基于 Z 参数的高温持久性能可靠性分析方法在高温强度设计、寿命预测 & 损伤中的应用,结合国际上颁布的耐热钢的持久性能数据,提供了结合可靠性分析技术得到的数十种耐热钢的“应力-TTP 参数-可靠度”曲线、“应力-断裂时间-可靠度”曲线和“许用应力-温度-可靠度”曲线,与目前的一些已有规范(如行业标准 SH/T 3037—2002)相比,本书提供的这些设计曲线与试验数据更为吻合,希望能对这一行业高温持久强度的可靠性设计提供帮助和参考。此外,基于 Z 参数的“服役条件-持久强度-可靠度”干涉模型实现了在波动服役温度、波动载荷条件下以及考虑持久性能数据分散性下的持久性能可靠度评估方法,可以获得更为准确的可靠性分析结果;有关 Manson-Haferd 参数法中两个常数项 T_0 和 $\lg t_0$ 的关联关系为持久数据的整理、获得精度较高的预测结果提供了更多的选择。相关内容为针对性地开展高温构件强度 & 寿命的可靠性设计提供了技术手段。

本书的成文是基于作者多年的研究经历,并受益于研究组前辈、同行 & 学生们的工作,还有国内高温材料及强度研究领域的诸位专家、同行的鼓励 & 帮助,借此表示深深的谢意。作者特别感谢科学技术部“863”计划(2006AA04Z421)以及中

央高校基本科研业务费专项资金(DUT10JS06)的支持,使本书涉及的内容得到深入细致的研究。涂善东教授和乔生儒教授对本书给予了热情鼓励和许多建议,作者受益匪浅。数学学院的宋立新教授审核了概率统计和可靠性分析的相关内容,使作者受益良多。张俊善教授审阅了全部书稿,并提出了许多宝贵意见,进一步提升了本书的质量。李东明、刘春慧、祝志超等帮助整理了书中的大部分图表。在此一并致谢。作者同时要感谢日本物质材料研究所木村博士、东京大学 Enoki 教授,由于有他们的支持和帮助,作者得以能够分析众多的耐热钢的持久性能数据,为获得准确的研究成果打下基础。国际上 NIMS、ECCC 等机构提供它们数十年积累的数据,体现了科技成果全球共享的趋势,也令作者受益并深深感动。

本书的出版得到了中国科学院科学出版基金的支持和资助,作者借此表示深深谢意。

由于高温蠕变及持久性能可靠性分析的复杂性,而作者水平有限,书中所涉及的内容只不守是沧海一粟,一些章节虽经多次修改整理,但仍显浅薄,难免有疏误,恳请读者批评指正。

作者

2011年5月

目 录

前言

第 1 章 金属的高温蠕变及持久断裂	1
1.1 高温蠕变的基本知识	1
1.1.1 高温蠕变概述	1
1.1.2 蠕变速率的经验关系	3
1.1.3 蠕变极限	4
1.1.4 持久强度	4
1.2 蠕变与持久强度试验	5
1.2.1 蠕变试验	5
1.2.2 持久强度试验	7
1.3 蠕变持久性能试验数据的基本要求	9
1.3.1 试验所依据的标准	10
1.3.2 试验材料的基本信息	10
1.3.3 蠕变持久数据	10
1.3.4 试验中的异常情况记录	11
1.4 蠕变持久试验数据的整理	11
1.4.1 等温线法	11
1.4.2 Monkman-Grant 关系	12
1.4.3 时间-温度参数法	13
1.5 常用的时间-温度参数	15
1.5.1 OSD 参数	15
1.5.2 MH 方法	16
1.5.3 其他 TTP 参数法	17
第 2 章 可靠性分析的基本知识	20
2.1 可靠性分析的基本概念	20
2.1.1 可靠性概念	20
2.1.2 可靠性特征量	20
2.1.3 失效类型的数学模型	25
2.2 可靠性数据的统计分析	26
2.2.1 可靠性试验分类	26

2.2.2	可靠性设计常用的概率分布	27
2.3	分布参数的估计	30
2.3.1	点估计	30
2.3.2	区间估计	31
2.4	分布类型的假设检验	33
2.4.1	χ^2 检验法	33
2.4.2	KS 检验法	35
2.4.3	Shapiro-Wilk 检验法	37
2.5	回归分析	39
2.5.1	回归方程	39
2.5.2	相关关系检验	40
2.6	可靠度、置信度和置信区间	42
第3章	耐热钢持久性能数据的可靠性分析	43
3.1	高温持久性能的分散性	43
3.2	持久断裂时间的概率统计分析	44
3.3	持久强度的概率统计分析	45
3.4	基于 Z 参数的概率统计分析	47
3.4.1	持久性能主曲线的描述	48
3.4.2	持久性能主曲线方程	52
3.4.3	基于 Z 参数的持久性能统计分析	54
3.5	成分及热处理条件对 Z 参数分布的影响	58
3.6	TTP 参数选择与可靠性分析	62
3.7	Z 参数分布与持久强度及持久断裂时间分布之间的关系	70
第4章	高温持久强度的可靠性设计	73
4.1	许用应力与安全系数	73
4.1.1	许用应力	73
4.1.2	安全系数	74
4.1.3	最小断裂强度	74
4.2	持久强度的概率设计方法	76
4.2.1	“应力 σ -TTP 参数-可靠度 R ”曲线	77
4.2.2	“应力 σ -断裂时间 t_r -可靠度 R ”曲线	78
4.2.3	“许用应力 $[\sigma]$ -温度 T -可靠度 R ”曲线	79
4.3	基于可靠性的设计方法与其他方法的比较	80
4.3.1	与安全系数法的比较	80
4.3.2	与最小断裂强度法的比较	83

4.3.3	TTP 参数选择与许用应力	86
4.4	高温持久性能设计的干涉模型——SCRI 模型	88
4.4.1	强度设计中的干涉模型	88
4.4.2	持久性能分散性和服役条件波动性的描述	90
4.4.3	“服役条件-持久性能”干涉模型	91
4.4.4	蒙特卡罗方法计算服役条件波动性	92
4.5	SCRI 模型在持久性能可靠性设计中的应用	94
4.5.1	不同服役条件下可靠度的计算	94
4.5.2	应用 SCRI 模型计算设定可靠度下的持久寿命	99
第 5 章	高温持久寿命的可靠性预测	103
5.1	高温持久寿命等温线预测法	103
5.2	Monkman-Grant 方程的修正	104
5.3	TTP 参数法	106
5.4	θ 投影法	107
5.5	Ω 法	110
5.6	断裂力学法	112
5.7	高温剩余持久寿命的概率预测法	115
5.8	结合组织劣化评定标准的 Z 参数方法	119
5.9	耐热钢高温持久寿命预测方法的讨论	125
第 6 章	高温蠕变过程的损伤及可靠性评估	128
6.1	损伤理论的一般描述	128
6.2	蠕变损伤理论	130
6.3	蠕变损伤的物理过程	132
6.3.1	应变因素损伤	133
6.3.2	温度因素损伤	134
6.3.3	环境因素损伤	135
6.4	高温损伤评估的方法	136
6.4.1	Robinson 法则	136
6.4.2	应变分数法则	137
6.4.3	蠕变损伤法	138
6.4.4	蠕变损伤的检测	140
6.5	基于 Z 参数方法对损伤过程的描述	142
6.5.1	基于 Z 参数的损伤演化模型	142
6.5.2	损伤演化的可靠性评估	144
	参考文献	147

附录 A 高温材料持久性能可靠性设计曲线	152
A. 1 0.2C(管)钢	152
A. 2 0.5Mo 钢	154
A. 3 1.3Mn-0.5Mo-0.5Ni 钢	156
A. 4 0.5Cr-0.5Mo 钢	158
A. 5 1Cr-0.5Mo 钢	160
A. 6 1Cr-1Mo-0.25V 钢	162
A. 7 1.25Cr-0.5Mo-Si(板)钢	164
A. 8 1.25Cr-0.5Mo-Si(管)钢	166
A. 9 2.25Cr-1Mo 钢	168
A. 10 5Cr-0.5Mo 钢	170
A. 11 9Cr-1Mo 钢	172
A. 12 9Cr-1Mo-V-Nb 钢	174
A. 13 12Cr 钢	176
A. 14 18Cr-8Ni 钢	178
A. 15 18Cr-12Ni-Mo(管)钢	180
A. 16 18Cr-12Ni-Mo(棒)钢	182
A. 17 18Cr-12Ni-Mo 中 N-低 C 钢	184
A. 18 18Cr-10Ni-Ti 钢	186
A. 19 Fe 基 21Cr-32Ni-Ti-Al(管)钢	188
A. 20 Fe 基 21Cr-32Ni-Ti-Al(板)钢	190
A. 21 25Cr-20Ni-0.4C 钢(HK40)	192
A. 22 25Cr-35Ni-0.4C 钢	194
A. 23 HR3C 钢	196
A. 24 Super304 钢	198
A. 25 T23 钢	200
附录 B 标准正态分布表	202
附录 C χ^2 分布表	206
附录 D KS 检验的临界值($D_{n,\alpha}$)表	208
附录 E W 检验中系数 $a_i(w)$ 数值表	210
附录 F W 检验统计量的 α 分位点 $W_{n,\alpha}$	213

第 1 章 金属的高温蠕变及持久断裂

对于工作在高温高压条件下的材料,抗蠕变性能是其最基本、也是最重要的性能,并且相关的理论是其他高温力学性能,如高温低周疲劳、蠕变裂纹扩展、应力松弛等的基础。高温蠕变与持久断裂之间有密切关系,对相关基础知识和基本规律的了解是开展寿命预测和可靠性分析的基础。

1.1 高温蠕变的基本知识

1.1.1 高温蠕变概述

金属的高温蠕变现象是指金属在高温和低于材料屈服强度的应力下发生的与时间相关的缓慢的塑性变形。材料在较低温度下虽然也可能有蠕变现象,但变形量较少,一般不会单独由低温蠕变导致构件的破坏。蠕变行为强烈地依赖诸如温度等环境因素,当温度升高到 $0.3T_m$,即绝对温度表示的金属熔点温度的约三分之一时,蠕变现象越来越明显。

蠕变试验是在蠕变试验机上进行,将试样加热到一定温度后施加恒定载荷,试样将随着试验时间的延长逐渐伸长,记录在该温度和载荷下的试样应变 ϵ 随时间 t 的变化关系,得到如图 1.1 所示的蠕变曲线。

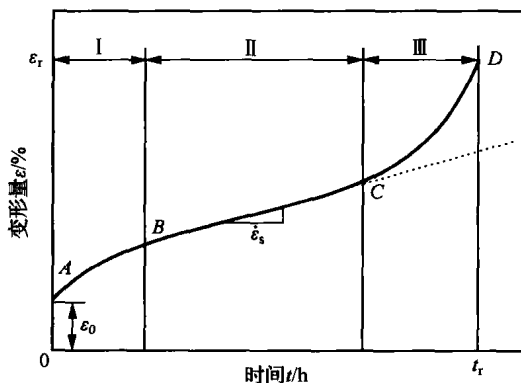


图 1.1 典型的蠕变曲线(载荷和温度为常数)

通常认为,蠕变可分为三个阶段:第 I 阶段称为初始蠕变阶段,蠕变速率 $\dot{\epsilon}(\dot{\epsilon} = d\epsilon/dt)$ 随时间不断降低;第 II 阶段为稳态蠕变阶段,蠕变速率保持不变,在

蠕变曲线上表现为直线,记作 $\dot{\epsilon}_s$,在图 1.2(a)中可以看到相当长的时间内蠕变速率基本维持在一个最低水平;第Ⅲ阶段为加速蠕变阶段,蠕变速率随时间增长开始加速,直至断裂。一般用稳态蠕变速率 $\dot{\epsilon}_s$ 来表征材料的蠕变性能,但对一些工程合金,稳态蠕变阶段很短,而最小蠕变速率 $\dot{\epsilon}_{\min}$ 则成为衡量蠕变抗力的参量,如图 1.2(b)所示。

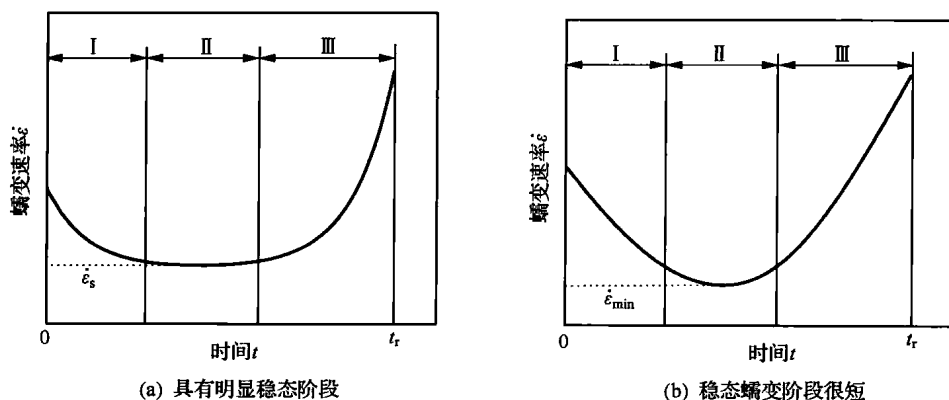


图 1.2 蠕变速率与时间关系

对于同一种金属或合金,蠕变曲线的形状随试验载荷和温度而发生变化。当温度较低且应力较小时,蠕变第Ⅱ阶段或稳态蠕变阶段较长,而当温度较高或应力较大时,第Ⅱ阶段或稳态蠕变阶段缩短,这一规律如图 1.3 所示。蠕变的三个阶段并不是在所有的试验条件下都存在,在高温或高应力下,蠕变第Ⅰ阶段可能不明显,只有第Ⅱ或第Ⅲ阶段,甚至在断裂前只有第Ⅲ阶段。而在一些情况下,材料只显示第Ⅰ和第Ⅱ阶段,随后发生断裂。

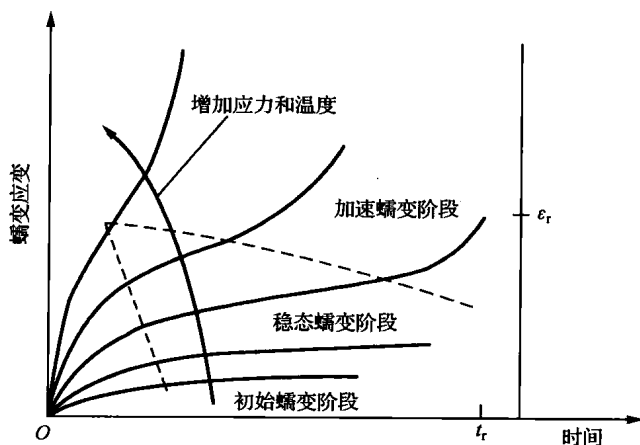


图 1.3 温度及应力对蠕变行为的影响

1.1.2 蠕变速率的经验关系

材料的蠕变性能一般用稳态蠕变速率表示,决定稳态蠕变速率大小的因素有两方面:一方面与材料本身的特性,如激活能、弹性模量等有关;另一方面还与温度和应力有关。在一定应力下,稳态蠕变速率与绝对温度的关系表示为

$$\dot{\epsilon}_s = A_1 \exp\left(-\frac{Q_c}{RT}\right) \quad (1.1)$$

式中, A_1 为与材料特性和应力相关的常数; Q_c 为蠕变表观激活能; T 为绝对温度; R 为气体常数。如果对式(1.1)两侧取对数, $\lg \dot{\epsilon}_s$ 与 $1/T$ 之间呈图 1.4 所示的线性关系^[1], 因此蠕变表观激活能 Q_c 可从直线的斜率计算得到。

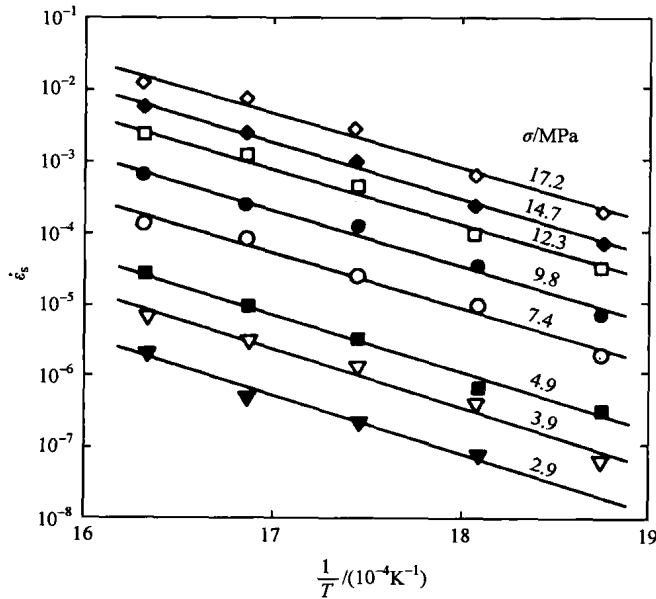


图 1.4 高纯铝的稳态蠕变速率与温度之间的关系^[1]

当试验温度一定时,许多金属在高温下的稳态蠕变速率与应力之间一般可以用幂律关系表示^[2]:

$$\dot{\epsilon}_s = A_2 \sigma^n \quad (1.2)$$

式中, A_2 为与材料特性和温度相关的常数; n 为稳态蠕变速率的应力指数。将式(1.1)和式(1.2)合并,得到稳态蠕变速率与温度、应力之间的蠕变方程为

$$\dot{\epsilon}_s = A_3 \sigma^n \exp\left(-\frac{Q_c}{RT}\right) \quad (1.3)$$

式中, A_3 为与材料特性相关的常数。

幂律蠕变通常适用于低应力侧,当应力较高时,会出现幂律失效,此时蠕变速率更适合用下列指数函数关系表示^[3]:

$$\dot{\epsilon}_s = A_4 \exp \left[-\frac{Q_c - V_1 \sigma}{RT} \right] \quad (1.4)$$

一般情况下,蠕变应变速率可以用适用型更广的双曲正弦函数形式表示:

$$\dot{\epsilon}_s = A_5 \exp \left(-\frac{Q_c}{RT} \right) \sinh(V_2 \sigma)^n \quad (1.5)$$

式(1.4)和(1.5)中, A_4 、 A_5 、 V_1 、 V_2 是包含材料特性的参数。式(1.5)在低应力侧简化为幂律关系,而在高应力侧则趋于指数关系,可以较好地描述蠕变关系。

1.1.3 蠕变极限

对于高温下服役的零部件,当要求在服役期内,不允许产生过量的蠕变变形时,定义蠕变极限来评价材料在高温下受到应力长时间作用时,对于蠕变变形的抗力。蠕变极限既用来表示材料对高温蠕变变形的抗力,又是高温服役条件下材料选用及零部件设计的主要依据之一。

蠕变极限表示在一定温度下,在规定时间内,材料发生一定量总变形的最大应力值,是高温长期载荷作用下材料对塑性变形抗力的指标。

蠕变极限有两种表示方法^[4]:

(1) 在规定温度 T 下,使试样在规定时间产生的蠕变伸长率(总伸长率或塑性伸长率)不超过规定值的最大应力。用 $\sigma_{\epsilon_T/t}^T$ 或 $\sigma_{\epsilon_p/t}^T$ 表示,其中 T 是温度($^{\circ}\text{C}$), ϵ_T/t 表示在规定时间 t 内产生的总应变为 $\epsilon_T\%$,而 ϵ_p/t 表示在规定时间 t 内产生的塑性应变为 $\epsilon_p\%$ 。例如, $\sigma_{1/10000}^{500} = 60\text{MPa}$,就表示材料在 500°C 温度下,10 000h 后变形量为 1% 的蠕变极限为 60MPa 。

(2) 在规定温度 T 下,使试样在规定时间产生的稳态蠕变速率不超过规定值的最大应力。用 $\sigma_{\dot{\epsilon}}^T$ 表示,其中 T 是温度($^{\circ}\text{C}$), $\dot{\epsilon}$ 表示第 II 阶段的稳态蠕变速率。例如, $\sigma_{10^{-5}}^{500} = 70\text{MPa}$,就表示材料在 500°C 温度下,稳态蠕变速率为 $1 \times 10^{-5} \%/h$ 的蠕变极限为 70MPa 。

以上两种蠕变极限都需要试验到稳态蠕变阶段若干时间后才能确定。两种蠕变极限在应变量之间有一定的关系。例如,以蠕变速率确定蠕变极限时,当恒定蠕变速率为 $1 \times 10^{-5} \%/h$,就相当于 100 000h 的应变量为 1% 。同样,蠕变速率为 $1 \times 10^{-4} \%/h$,应相当于 10 000h 的应变量为 1% 。

1.1.4 持久强度

蠕变极限表征了金属材料在高温长期载荷作用下对塑性变形的抗力,但不能反映断裂时的强度及塑性。与常温下的情况一样,材料在高温下的变形抗力与断

裂抗力是两种不同的性能指标。对于一些在高温下工作的零部件,如果蠕变变形量很小或是对变形量要求不严格,而要求其在高温长期载荷作用下抵抗断裂的能力,则用持久强度(也称持久强度极限)作为材料选用及零部件设计的主要依据。

持久强度是试样在规定温度下达到规定的试验时间而不发生断裂的最大应力,用 σ_t^T 表示,其中 T 是温度($^{\circ}\text{C}$), t 表示不发生断裂的规定时间^[4]。例如, $\sigma_{10^4}^{600} = 100\text{MPa}$,就表示材料在 600°C 温度下,承受 100MPa 应力作用在 $10\,000\text{h}$ 内不发生断裂,或者材料在 600°C 温度下工作 $10\,000\text{h}$ 的持久强度为 100MPa 。

蠕变极限和持久强度都是用来描述材料高温性能的,其区别在于前者用来描述材料抵抗蠕变变形的能力,而持久强度则用来描述材料抵抗高温断裂的能力。一般,根据零部件的服役要求来确定设计标准,但对于一些重要的零件,如发动机的涡轮盘、叶片,不仅要求材料具有一定的蠕变极限,也要求材料具有一定的持久强度,因此两者都是设计的重要依据。

金属材料的持久强度是通过做持久试验测定的。持久试验与蠕变试验相似,但较为简单,一般不需要在试验过程中测定试样的伸长量,只要测定试样在给定温度和一定应力作用下断裂时间。持久强度试验时间通常比蠕变试验要长得多,可达几万甚至数十万小时。

1.2 蠕变与持久强度试验

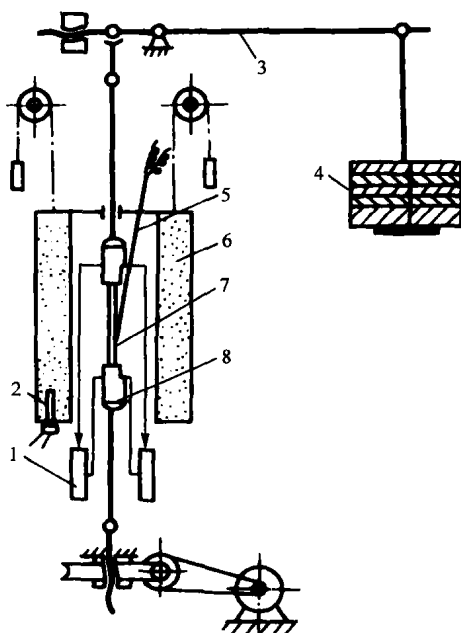
1.2.1 蠕变试验

蠕变试验是将试样加热到规定温度,沿试样轴线方向施加拉伸力并保持恒定,测定试样的伸长率与时间的关系。蠕变试验时间可能是几十小时,也可能延续几千甚至数万小时。试验不需要达到试样断裂。

蠕变试验的试样有圆形和板状试样两种,在特殊情况下,允许采用其他形状和尺寸的试样。试样制备时,注意不要使试样因受热或加工硬化而改变材料的性能。试样形状和尺寸的确定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。

测定金属材料蠕变极限所采用的试验装置示意图如图1.5所示,加热炉用于保证试样的均温带,蠕变变形通过差动电位仪进行。传统的蠕变试验机是杠杆式的,目前已逐渐使用电子拉伸式的,提高了试验的灵活性和精度。蠕变试验用试样的形状、尺寸及制备方法、试验程序 and 操作方法等,可参照有关国家标准的规定进行。

蠕变极限的测定需要在四个以上适当的应力水平进行等温蠕变试验,建议每个应力水平做出三个数据,在单对数或双对数坐标上用作图法或最小二乘法绘制

图 1.5 蠕变试验机装置示意图^[6]

1. 应变测试仪; 2. 铂电阻; 3. 杠杆; 4. 砝码; 5. 热电偶; 6. 加热炉; 7. 试样; 8. 夹头

出应力-蠕变伸长率或应力-稳态蠕变速率关系曲线,用内插法或外推法求出蠕变极限。

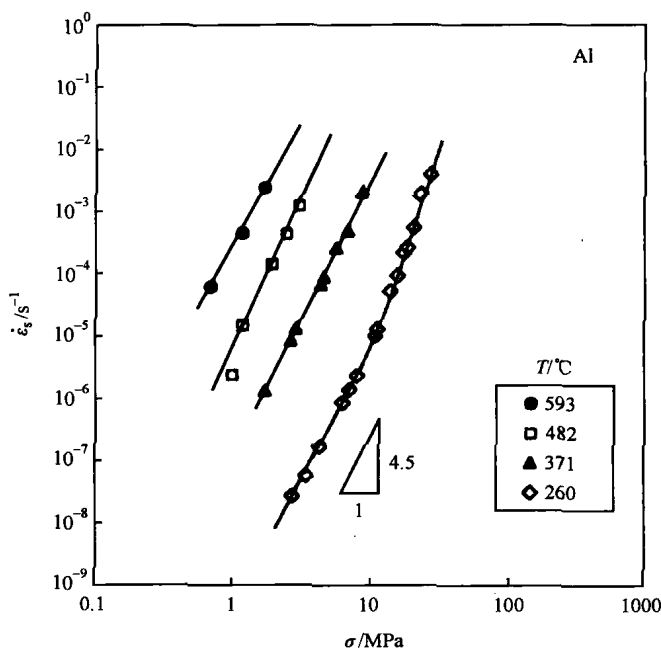
以稳态蠕变速率所定义蠕变极限为例,说明其测定的方法。

(1) 在一定温度和不同的应力条件下进行蠕变试验,每个试样的试验持续时间要足够长。根据所测定的应变量与时间的关系,作出一组蠕变曲线。每一条蠕变曲线上直线部分的斜率,就是稳态蠕变速率。

(2) 根据获得的不同应力条件下的稳态蠕变速率 $\dot{\epsilon}_s$, 在应力 σ 与稳态蠕变速率 $\dot{\epsilon}_s$ 的双对数坐标上作出关系曲线,如图 1.6 所示的高纯铝的试验结果^[6]。

(3) 实验表明,在同一温度下进行蠕变试验,其应力与稳态蠕变速率的对数值之间呈线性关系。因此,可采用较大的应力,以较短的试验时间作出几条蠕变曲线,根据所测定的稳态蠕变速率,用内插法或外推法求出规定蠕变速率的应力值,即得到蠕变极限。

通过蠕变试验可以获得下列数据:应力、伸长、时间 t 和温度 T 等,根据这些数据可以绘制以下曲线:蠕变伸长量-时间曲线、蠕变应变-时间曲线、蠕变速率-时间曲线、应力-蠕变速率曲线、蠕变极限-温度曲线等。

图 1.6 高纯度铝的稳态蠕变速率与应力关系图^[6]

1.2.2 持久强度试验

持久强度试验是工程上评价材料高温性能的最常用方法之一,也是开展持久寿命预测的重要基础。金属材料的持久强度是通过做持久试验测定的。持久试验与蠕变试验相似,但较为简单,一般不需要在试验过程中测定试样的伸长量,只要测定试样在给定温度和一定应力作用下的断裂时间就可以了。试样在规定温度和时间内破断时能承受的最大应力即持久强度。

试验可以在蠕变试验机上进行,也可以在专用的持久试验机上进行。首先将试样安装在试验机上,调整其偏心度在允许的范围内,然后缓慢加热至设定温度并保持一段时间,加热时间一般为 2~8h,温度保持时间为 1~24h。达到保温时间后,平稳均匀地将设定载荷施加到试样上,随即开始计算时间,直至试样破断。

一般情况下,持久强度的测定需要在 5 个以上适当的应力水平进行等温持久试验,建议至少在 3 个应力水平上每组做出 3 个数据,在单对数或双对数坐标上用作图法或最小二乘法绘制出应力-断裂时间关系曲线,用内插法或外推法求出持久强度极限。

通过持久强度试验,测量试样在断裂后的持久断后伸长率及断面收缩率,还能反映出材料在高温下的持久塑性。

持久断后伸长率 δ 是持久试样断裂后,在室温下计算长度部分的增量 $L-L_0$ 与原始长度 L_0 的百分比。

$$\delta = \frac{L-L_0}{L_0} \times 100\% \quad (1.6)$$

持久断面收缩率是持久试样断裂后,在室温下横截面积的最大缩减量 S_0-S 与原始截面积 S_0 的百分比。

$$\phi = \frac{S_0-S}{S_0} \times 100\% \quad (1.7)$$

持久塑性是衡量材料蠕变脆性的一项重要指标,过低的持久塑性会使材料在使用中产生脆性断裂。试验表明,材料的持久塑性并不总是随载荷持续时间的延长而降低的。因此,不能用外推法来确定持久塑性的数值。对于高温材料持久塑性的具体指标,还没有统一规定。例如,制造汽轮机、燃气轮机紧固件用的低合金 Cr-Mo-V 钢,一般希望持久塑性(伸长率)不小于 5%,以防止脆断。

图 1.7 比较了蠕变和持久试验的特点,它们通常都需要在恒温和恒载荷条件下进行。蠕变试验中因为需要获得蠕变速率,因此对试样的应变测试的精确度要求较高,相应的造价也高;持久性能试验因为主要关注持久断裂时间,因此只要得到机构的总变形量即可,造价更便宜。具体的蠕变及持久性能试验方法在国家标准 GB/T 2039—1997(金属拉伸蠕变及持久试验方法)、美国 ASTM 标准 ASTM E139—06 等中有更为具体的规定。

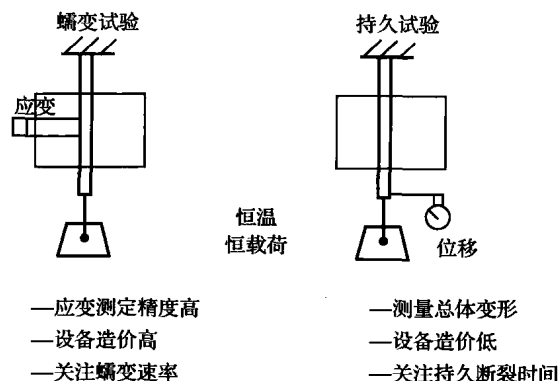


图 1.7 蠕变及持久试验比较图

由于金属材料蠕变持久性能在高温部件强度设计及安全运行中的重要性,世界上一些机构花费大量的时间、财力和精力开展试验工作,收集并整理相关的数据及资料。国际上的主要机构有日本的(日本国家金属材料研究所 NRIM, 2001 年与无机材料研究所合并为日本国立物质·材料研究机构,即 NIMS)、英国的英国钢铁制造业蠕变委员会(British Steelmakers Creep Committee, BSCC)、欧洲联盟