

燃气涡轮发动机材料和零件 的 结 构 强 度

〔苏〕 伊·阿·毕尔盖尔 等著

陈石卿 焦明山 译

航空工业出版社

1 9 9 0

内 容 简 介

本书讨论了燃气涡轮发动机材料和零件的结构强度,其中包括持久、蠕变、高循环疲劳和低循环疲劳强度。还讨论了断裂的模型以及燃气涡轮发动机强度储备的确定。

本书的读者对象主要是从事航空、舰船及地面燃气涡轮发动机强度研究、结构设计和调试的科技人员,也可作为从事结构材料、力学冶金和性能测试方面的科技人员的参考书。对于高等院校有关专业的师生,本书也是一本有价值的参考书。

燃气涡轮发动机材料和零件的结构强度

(苏) 伊·阿·毕尔盖尔 等著

陈 石 卿 焦 明 山 译

航空工业出版社出版发行

(北京市和平里小关东里14号)

——邮政编码: 100029——

全国各地新华书店经售

北京市通县向阳印刷厂印刷

1990年8月第1版 1990年8月第1次印刷

787×1092毫米1/32 印张: 9.125

印数: 1—1000 字数: 212千字

ISBN 7-80046-264-1/V·053

定价: 6.50元

译 者 的 话

燃气涡轮发动机是喷气飞机、现代舰船等运输工具的心脏，它是决定产品性能、安全和寿命的关键部分。而发动机能否起到这样的关键作用在很大程度上又决定于其结构强度的好坏。

拿航空来说，近几年来发生的事故及其严重性在不断增加，而且这些事故很大一部分都牵涉到发动机零部件的结构强度问题。因此，材料和零件的结构强度在现代航空燃气涡轮发动机的研制上是至关重要的。

材料和部件的结构强度主要是指在实际工作条件下的各种强度，往往是指材料及零件在难以模拟的发动机的复杂工作条件下进行试验所得到的性能。在这方面，除了要研究单纯的蠕变及持久性能外，还需要研究材料及部件在复杂受力状态下的行为：例如在温度、振动及载荷条件下的行为。因此，本书以相当大的篇幅搜集了有关低循环疲劳、微动磨蚀疲劳、疲劳与蠕变交互作用、疲劳与振动复合应力下的行为方面的资料。这些资料对现代燃气涡轮发动机的设计、制造与使用是必要的。这些新领域的研究工作，我们有些单位正在或准备着手进行。因此本书的出版对从事这方面工作的同志将不无裨益。

另外，现代燃气涡轮发动机大量应用高温铸造合金以及钛合金。本书讨论的重点也是围绕这样的一些新材料。其中不少合金牌号与我国的基本相同，因此书中提到的一些资料有一定参考价值。

本书力求从理论与实际的结合上来讨论各种结构强度问题，在引用大量实验数据的基础上找出规律性的东西，同时用数学模型来讨论。

译文由曾凡昌同志作最后技术审校。

译 者

1989年9月

原 序

材料和零件在工作条件下的强度叫做结构强度。本书总结了在高强度不锈钢、钛合金和热强合金结构强度研究方面的经验，书中对于在温度达 1100°C 条件下工作的热强铸造合金的讨论给予了很大的注意，因为这种合金在燃气涡轮中得到了广泛的应用。

根据燃气涡轮主要零件的工作条件，讨论了静强度和持久静强度、疲劳以及非稳定热载下的强度问题。

本书对应力集中、各种加载状态下的运转、工艺因素的影响、涂层的使用性能的讨论十分重视。

本书的特点是用总结性的数学模型来全面描述试验研究的结果，这些模型可以近似地评定材料和零件的结构强度。

第一章由 Р. Н. Сизова 撰写，第二、三、四章分别由 Т. П. Захарова 和 Л. А. Козлов、Б. Ф. Балашов 和 Л. А. Козлов、Б. Ф. Балашов 和 А. Н. Петухов 编写，第五章由 Р. А. Дульнев 编写，第六章和第七章由 И. А. Биргер 完成。

目 录

原序

译者的话

第一章 持久强度及蠕变.....(1)

第一节 持久强度.....(1)

第二节 蠕变.....(29)

第二章 疲劳.....(39)

第一节 疲劳的统计性质.....(39)

第二节 试样形状、应力集中、尺寸因素以及加载 频率的影响.....(47)

第三节 非对称循环下的疲劳.....(75)

第四节 复合加载下的强度.....(95)

第五节 复杂受力状态下的疲劳.....(107)

第六节 非稳定加载疲劳.....(121)

第三章 疲劳试验方法及试验结果的处理.....(130)

第一节 疲劳试验方法的分析.....(130)

第二节 疲劳极限及寿命的统计分布.....(140)

第三节 全尺寸零件的试验.....(155)

第四章 材料和零件的疲劳强度与工艺和使用因素的关系	(162)
第一节 切削加工和表面层状态对疲劳的影响.....	(162)
第二节 零件表面处理对疲劳的影响.....	(174)
第三节 微动磨蚀疲劳.....	(183)
第五章 等温及非等温加载下的低循环疲劳	(197)
第一节 低循环加载下周期弹塑性变形的 主要规律以及强度判据.....	(197)
第二节 热强材料中与加载及加热条件有关的热疲 劳抗力.....	(208)
第三节 工艺因素对热疲劳抗力的影响.....	(219)
第四节 热疲劳断裂的判据.....	(226)
第六章 断裂的确定模型和统计模型	(235)
第一节 稳定加载下断裂的确定模型.....	(235)
第二节 强度参数的统计分布.....	(244)
第三节 稳定加载断裂的统计模型.....	(251)
第四节 非稳定及非单一加载下的确定模型及统计 模型.....	(258)
第七章 燃气涡轮发动机零件强度储备的确定	(267)
第一节 强度储备.....	(267)
第二节 疲劳强度储备的确定.....	(270)
第三节 零件疲劳极限的计算-试验确定法	(275)
参考文献	

第一章 持久强度及蠕变

第一节 持久强度

持久强度特性及其统计分析与预测 在一般情况下, 应力 σ 、断裂时间 t_p (寿命)和温度 T 间的联系, 可用文献[76]中提出的关系式来表达:

$$t_p = AT^k \sigma^{-n} \exp\left(\frac{b - c\sigma}{T}\right) \quad (1.1)$$

图1.1所示为ЖС6-Y铸造合金的持久强度曲线, 这曲线是在 A, k, n, b, c 各常量确定后按方程(1.1)计算出来的。

图中所示的每条曲线均可用两条线段近似地加以表示,

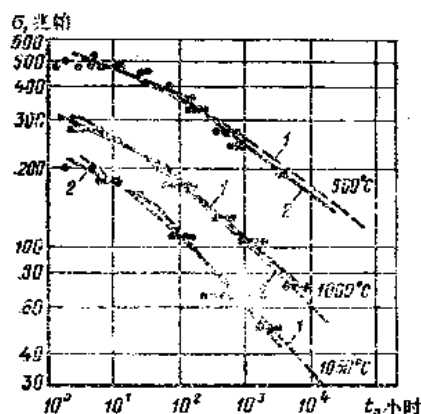


图 1.1 ЖС6-Y在 $T=900$ 、 1000 及 1050°C 的持久强度曲线

1——按关系式(1.1)绘制; 2——按关系式(1.2)绘制; ●——

实验点

这两条线段可用指数方程表达如下:

$$t_p = A_j \sigma^{-m_j} \quad (1.2)$$

式中 A_j 和 m_j 均为系数,该系数在持久强度曲线第 j 段范围内为常量^[63]。

表1-1所列为ЖС6-У合金持久强度曲线上各段方程中的系数 m_j ,表中也列出了按关系式(1.1)和(1.2)确定的持久寿命平均值。

为了可靠地确定合金的性能及其分散特性,要求对大量试样的试验结果采用统计分析。

燃气涡轮叶片及盘用镍合金(ЖС6-К、ВЖЛ12-У、ХН56ВМКЮ、ХН73МБТЮ、ХН77ТЮР等)的大量试

表1-1

T, °C	σ , 兆帕	持久寿命, 小时		m_1	m_2	m_1/m_2
		(1.1)	(1.2)			
900	580	1.06	1.07	10.23	5.36	1.91
	500	4.98	4.89			
	360	91.14	125.8			
	240	1 597	1 109			
	120	66 310	45 730			
1000	380	0.66	0.26	8.82	4.59	1.93
	280	5.82	3.85			
	160	142.2	169.6			
	100	1 245	1 464			
	50	18 740	35 190			
1050	250	1.54	0.7	7.48	3.62	2.07
	180	9.66	8.09			
	120	67.66	83.3			
	60	1 123	1 028			
	30	12 950	12 690			

验结果的统计处理表明：在同一应力水平下，对数持久寿命的分布服从标准律^[17]。

表 1-2

合 金	试验条件	试样数量	$\overline{\lg t_p} (\bar{t}_p)$	$S_{\lg t_p}$
ЖС6-У	T=975°C	53	1.609(40.7)	0.184
		449	1.692(48.4)	0.174
	$\sigma=230$ 兆帕	169	1.745(57)	0.126
ХН77ТЮР	T=650°C $\sigma=650$ 兆帕	178	1.974(94)	0.23

注：表中 $S_{\lg t_p}$ ——对数持久寿命的均方差； $\overline{\lg t_p}$ ——对数持久寿命的平均值。

对于涡轮叶片用ЖС6-У铸造合金以及涡轮盘用ХН77ТЮР变形合金试样来说，对数持久寿命的分布参数如表1-2所列。对于ЖС6-У合金，采用的是铸造试样的热强性检验结果，而对于ХН77ТЮР合金，试样是由盘的工艺余量上切取的。

根据分散性与时间和温度无关的推断，在与表1-2所列温度及应力不同的条件下，给定断裂概率的持久强度特性可用 $\sigma=f(T, t_p)$ 的诸关系式表达，这些关系式是彼此等距的曲线。评定持久强度的关系式可以是T为常量时 $\sigma=f(t_p)$ 的持久强度曲线，或者是用某一参数 $P=f(t, T)$ （例如Larson-Miller参数 $P_{L.M}$ ）表示的曲线。在Larson-Miller参数 $P_{L.M}=T(c+\lg t_p)$ 中T为温度，K； t_p —断裂时间，小时；c—等于20。

根据对 270 个 ЖС6-У 合金实验室试样在 $T = 755 \sim$

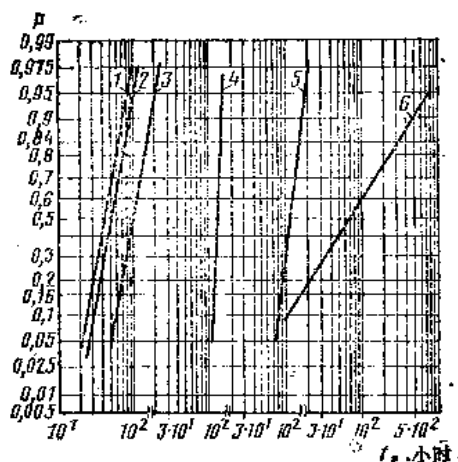


图 1.2 JC6- γ 合金对数持久寿命的分布曲线

- 1—— $T=975^{\circ}\text{C}$, $\sigma=230$ 兆帕, $S_{\lg t_p}=0.18$, 试样数=53;
- 2—— $T=975^{\circ}\text{C}$, $\sigma=230$ 兆帕, $S_{\lg t_p}=0.17$, 试样数=449;
- 3—— $T=975^{\circ}\text{C}$, $\sigma=230$ 兆帕, $S_{\lg t_p}=0.14$, 试样数=12;
- 4—— $T=900^{\circ}\text{C}$, $\sigma=36$ 兆帕, $S_{\lg t_p}=0.14$, 试样数=12;
- 5—— $T=1000^{\circ}\text{C}$, $\sigma=170$ 兆帕, $S_{\lg t_p}=0.12$, 试样数=12;
- 6—— $T=825^{\circ}\text{C}$, $\sigma=500$ 兆帕, $S_{\lg t_p}=0.66$, 试样数=12。

曲线1和2根据合金生产检验所提供的的数据; 曲线3~6按实验室试验的数据。

1 050 $^{\circ}\text{C}$ 及 $t_p=5\sim3\,000$ 小时试验结果的统计分析, 计算出 T 为常量时对数持久寿命的平均值 $\lg \bar{t}_p$ 、 T 为常量和 T 为变量时Larson-Miller参数 $P_{L.M}$ 的平均值以及这些常量的均方差值 $S_{\lg t_p}$ 和 $S_{P_{L.M}}$ 。 $\lg \bar{t}_p$ 的分布曲线见图1.2, 而 $P_{L.M}$ 的分布曲线见图1.3。

JC6- γ 合金在恒温时, 其 $S_{\lg t_p}$ 与 t_p 的依存关系不突出(见图1.4a)。

至断裂的时间恒定时, 850 $^{\circ}\text{C}$ 以上的温度对 $S_{\lg t_p}$ 几乎无

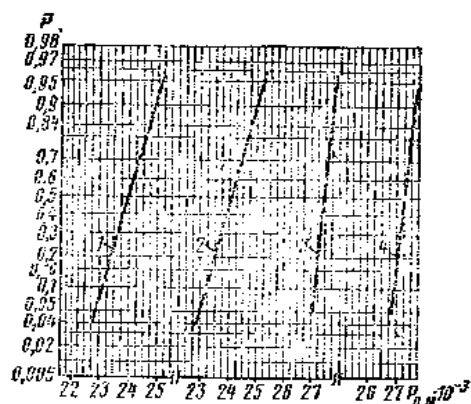


图 1.3 ЖС6-γ合金 $\sigma=500$ 兆帕的Larson-Miller参数分布曲线

1—— $\sigma=500$ 兆帕, $T=825^{\circ}\text{C}$, $S_{P_{L.M.}}=0.73 \times 10^3$; 2——
 $\sigma=500$ 兆帕, $T=\text{变量}(775, 800, 825, 850, 875^{\circ}\text{C})$,
 $S_{P_{L.M.}}=0.67 \times 10^3$; 3—— $\sigma=230$ 兆帕, $T=975^{\circ}\text{C}$,
 $S_{P_{L.M.}}=0.25 \times 10^3$; 4—— $\sigma=230$ 兆帕, $T=\text{变量}(900,$
 $925, 950, 975, 1000, 1025^{\circ}\text{C})$, $S_{P_{L.M.}}=0.37 \times 10^3$

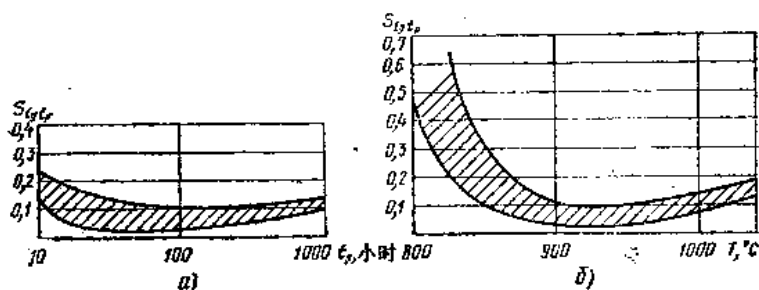


图 1.4 ЖС6-γ合金的对数持久寿命均方差
 $S_{lg t_p}$ 在 $T=900^{\circ}\text{C}$ 时与断裂时间的关系(a)和
 在断裂时间大约100小时与温度的关系(b)

影响 (图1.46)。而温度低于850°C时, $S_{1g;p}$ 却急剧增大。由图1.4可以看出, 对于XC6-Y合金来说, 在850~1000°C内, 分散度及其表征值 $S_{1g;p}$ 可以认为与温度及时间无关。

在 $S_{1g;p}$ 为恒量表征的温度范围内, 与给定概率P相对应的持久强度可以根据Larson-Miller曲线2确定。该曲线通过与曲线1等距的点, 而这些点有给定的P值。

为了得到在这样的温度范围内有给定断裂概率的持久热强度特性, 应利用 $S_{1g;p}$ 或 $S_{P.L.M.}$ 。这些值是根据 $850^{\circ}\text{C} \geq T \geq 1000^{\circ}\text{C}$ 下持久寿命分布曲线 (图1.5的曲线3) 得到的。

借助上述的处理方法, 对燃气涡轮盘及叶片用的全部热强合金测定了特性的分散度。测定结果表明, 对于一系列合

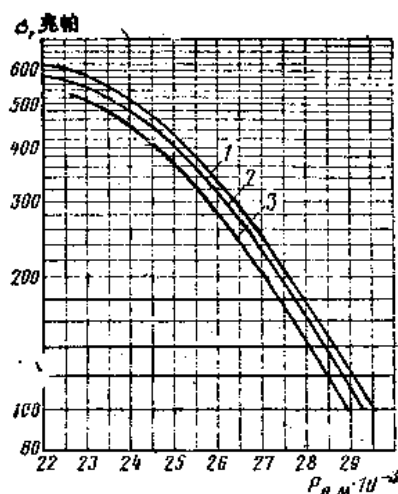


图 1.5 根据270个实验室试样的试验结果
绘制的持久强度曲线

1— $P=0.5$; 2— $P=0.25$, $S_{1g;p}=0.12$;
3— $P=0.25$, $S_{1g;p}=0.65$

金均可能存在一个无可靠性的温度-时间范围,这个范围的特征是性能的高度分散(ЖС6-Y合金在 $T < 850^{\circ}\text{C}$, XH56B MKIO在 $T < 750^{\circ}\text{C}$)。

由270个ЖС6-Y合金试样在 $T = 775 \sim 1050^{\circ}\text{C}$, $\sigma = 60 \sim 600$ 兆帕、 $t_p = 5 \sim 5000$ 小时的试验结果证明,有可能利用主Larson-Miller曲线来确定该试验温度及时间范围内的持久强度特性。

用Larson-Miller曲线对试验范围之外(指持久时间及温度)的持久强度进行外推是不可取的。

对于使用时间为数小时至数百小时的零件,必须根据直接试验结果对合金温度和持久寿命极限进行外推。

如果关系式(1.1)是根据试验数据(2~3个温度和3个应力水平以及2个极限温度范围内的持久寿命分散度数据)抽样确定的,那么该关系式用于镍基合金及热强钢^[76, 77]时,可以保证可靠地外推1~1.5个数量级的持久寿命。在有直接试验结果的温度范围之外,借助关系式(1.1)外推的极限为 $25 \sim 200^{\circ}\text{C}$ 。对于热强钢,这个范围等于 $25 \sim 50^{\circ}\text{C}$;对于铸造热强镍基合金为 100°C ;对于难熔材料为 200°C 。

关系式(1.1)推荐用作预测地面能源装置零件的寿命(这些零件工作长达几十万小时)。正如文献^[36, 41]所列的其它关系式一样,这个关系式仅在一定的温度-时间范围内才有可能外推(在这些范围内,相应方程中的系数值为常量)。为找出这样的范围,必须有直接的试验以及对材料的断裂形式和组织特征的研究。

持久静断裂时的塑性(持久塑性) 在相当低的温度下(对ЖС6-Y, $T < 850^{\circ}\text{C}$; 对于XH56BMKIO, $T < 750^{\circ}\text{C}$ 等等),持久寿命的分散度急剧增加,表明这些合金的不稳定

性。这种不稳定性表现为低的持久塑性(这个特性后面将用持久静载断裂后试样测得的相对延伸率 $\delta_{\text{дп}}$ 表示)。

ЖС6-Y合金的 $\delta_{\text{дп}}$ 值在各种试验温度下的分布曲线如图1.6所示,而XH77TiOP的分布曲线如图1.7所示。相应的分布参数、相对延伸率的平均值 $\bar{\delta}_{\text{дп}}$ 和相对延伸率的均方

表1-3

合 金	试 验 条 件	$\lg P$	$S_{\lg P}$	$\bar{\delta}_{\text{дп}}, \%$	$S_{\delta_{\text{дп}}}$
ЖС6-Y	$T=800^{\circ}\text{C}, \sigma=550$ 兆帕	1.89	0.47	1.05	1.3
	$T=900^{\circ}\text{C}, \sigma=360$ 兆帕	2.12	0.03	4.5	0.7
	$T=975^{\circ}\text{C}, \sigma=230$ 兆帕	1.98	0.14	3.92	1.3
XH77TiOP	$T=650^{\circ}\text{C}, \sigma=650$ 兆帕	1.97	0.24	3.97	1.23

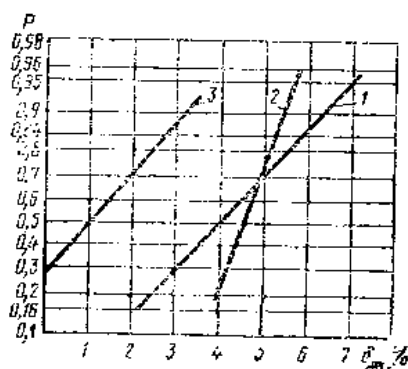


图 1.6 根据15~200个ЖС6-Y合金试样试验结果绘制的 $\delta_{\text{дп}}$ 分布曲线

- 1—— $T=975^{\circ}\text{C}, \sigma=230$ 兆帕;
- 2—— $T=900^{\circ}\text{C}, \sigma=360$ 兆帕;
- 3—— $T=800^{\circ}\text{C}, \sigma=350$ 兆帕

差 $S_{\delta_{\text{дп}}}$ 如表1-3所列。

持久塑性的统计分析表明,这种特性对于镍基合金,尤其是对铸造合金来说很不稳定,数值低($\delta_{\text{дп}}=0\sim6\%$)。

在生产中,在大量检验 XH77TiOP 合金的热强性时,发现持续时间比额定少的断裂一般带有脆性断裂性质。在 $\sigma=650$ 兆帕、 $T=650^{\circ}\text{C}$ 条

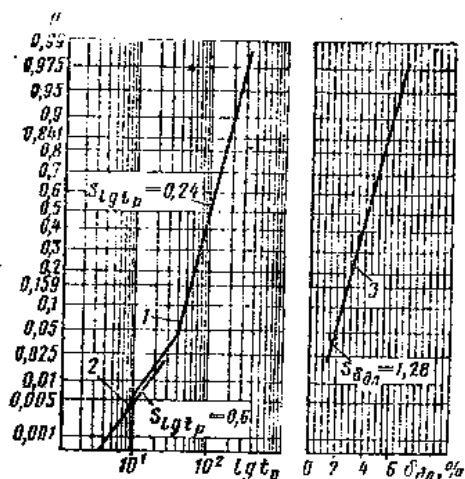


图 1.7 XH77TIOP在650°C、 $\sigma=650$ 兆帕条
件下的试验结果

1——根据178个试样断裂试验结果绘制的 $\lg t_p$ 分布曲线；2——根据4700个试样试验结果(其中76个试样发生断裂)绘制的 $\lg t_p$ 分布曲线；3—— $\delta_{\pi\pi}$ 分布曲线

件下试验的4700个XH77TIOP合金试样中,有76个试样提前断裂(t_{pmin} 小于技术条件的要求),而且塑性值低(0~2%)。

提前断裂的试样,其偏离总体试样的性能数值(分散程度)可用值 $S_{lg t_p}=0.55\sim 0.6$ 来表征,比按图1.7曲线1所测定的 $S_{lg t_p}$ 大2倍(曲线1是按178个试样试验至断裂的结果绘制而成的)。

为了防止持久寿命分散性大的合金可能出现提前断裂,必须具有确定的最低水平的持久塑性。

对XH77TIOP合金大量的持久强度试验结果的统计处理表明,可以取断裂时间小于 $\lg t_p$ 分布曲线上相应转折点(图1.7曲线1)的 $\delta_{\pi\pi}$ 作为许用的最低 $\delta_{\pi\pi}$,在该转折点处,持久

寿命的分散性急剧增加。由图1.7可以看出，这个点相当于 $\delta_{\text{нп}} \approx 2\%$ 。

对于铸造合金(尤其是上述的ЖС6-Y合金)来说，确定这样的极限值有很大困难。这是因为 $\delta_{\text{нп}}$ 的值很小，并且这个值还随温度作非单调的变化；同时也因为它的分散度大，这种分散度也随温度作非单调的变化。

鉴于铸造合金在使用中出现提前的脆性断裂(特别是在低于 850°C 的温度下，例如叶片沿榫槽断裂)，必须积累表征这种断裂倾向的性能的统计数据，并确定其极限值。

持久静载引起的瞬时强度特性的变化 为了评定表征材料可靠性的持久塑性，必须进行持久断裂强度试验。

在生产中，规定按 $t_{\text{р.м.н}} \geq t_{\text{р.норм}}$ 的条件进行持久强度检验。式中的 $t_{\text{р.норм}}$ ——至断裂的额定时间值，一般为 $(0.2 \sim 0.5)t_{\text{р}}$ 。但根据 $t_{\text{р.м.н}} \geq t_{\text{р.норм}}$ 条件检验合格的材料，在使用中却出现过脆性断裂的事例。这说明对重要的零件(如涡轮盘)，有必要在其制造过程中检验这样一种指标：表征对蠕变变形累积以及(或)对周期弹塑性变形累积能力的降低程度(这种降低表现为对应力集中的敏感程度)。

经过预先长时间静载作用后的瞬时强度、塑性和硬度特性，可以视作材料损伤的指标^[15]。对于ХН77ТЮР合金持久静载引起的脆化倾向性，作了有统计根据的评定(用了155个试样)。

从新涡轮盘上切取的试样在 $\sigma = 650$ 兆帕、 $T = 650^\circ\text{C}$ 保持30小时后(相当于 $0.3t_{\text{р}}$ ， $t_{\text{р}}$ 为该试验条件下的平均值)，在 $T = 20^\circ\text{C}$ 进行瞬时断裂试验，并测定产生永久变形的延伸率 $\delta_{\text{ост}}$ 。试验结果如图1.8所示。图中示出持久静载后测定的延伸率分布曲线、材料在原始状态的性能 δ_0 分布曲线以及