

耐热钢焊接

钱昌黔 主编

水利电力出版社

内 容 提 要

随着我国高参数、大容量火力发电机组的广泛采用,使用的钢材越来越复杂,对它们的焊接质量要求也越来越高。本书就是为了适应这种需要而编写的。

全书共分九章及附录。第一、二章介绍了耐热钢的要求和特性;耐热钢按组织的分类以及各种耐热钢的基本数据(物理常数、力学性能、连续冷却转变图以及金相组织特征等)。第三、四章系统介绍了耐热钢的焊接性以及焊接工艺选择的规律。第五至第九章,分章介绍了各类耐热钢的焊接,详细讨论了各种耐热钢焊接时存在的问题、解决的措施以及焊接时的各项工艺措施和参数选择。附录中列有国内外耐热钢钢号对照表。

本书可供从事电力建设、电力生产、动力机组、容器制造、石油、化工等部门的安装、运行、检修等工程技术人员参考;也可供有关高等院校、中等专业学校焊接以及其它金属热加工专业师生参考。

耐 热 钢 焊 接

钱昌黔 主编

*

水利电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号)

各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 32开本 12.875印张 286千字 1插页

1988年5月第一版 1988年5月北京第一次印刷

印数0001—5870册

ISBN 7-120-00069-1

TK·48 定 价: 3.00元

前 言

耐热钢广泛应用于电力、化工、石油、原子能、航空等工业部门，而其焊接质量的好坏直接关系到这些部门生产的安全可靠性。为了满足这些部门工业发展的需要，我们收集了国内在耐热钢焊接方面的生产经验和科研成果，同时也借鉴了国外耐热钢的发展，以及耐热钢焊接方面的有关资料，并加以讨论和总结，编写成《耐热钢焊接》一书。书中对电力工业高速度发展的高参数、大容量火力发电机组所应用的各种有代表性的耐热钢焊接进行了介绍，以期促进我国电力建设焊接技术水平的提高。

本书的主要内容有：耐热钢的概念，耐热钢按组织状态的分类，耐热钢的焊接性，耐热钢的焊接工艺选择，珠光体、马氏体、铁素体、奥氏体耐热钢的焊接，异种耐热钢的焊接。对高温合金的焊接也作了简单介绍。

本书注重实用性，除了对耐热钢焊接中的普遍规律进行了较为系统、详细的讨论之外，还收集、列举了常用耐热钢及其焊接的各项基本参数，供现场工程技术人员查用。

本书第一章由上海电力学院宋琳生执笔编写，其他各章均由武汉水利电力学院钱昌黔执笔编写；上海电力学院励德成、内蒙电力局陈文孝为本书编写提供了素材，并参加了书稿大纲的编拟和讨论。全书由钱昌黔主编，陈文孝初审，水利电力部电力建设研究所魏明德主审。

书中全部图、表由武汉水利电力学院陈燕临绘制，书中大部分金相图借用了西安热工研究所、华东电力试验研究所、

北京电力科学研究所、山东电力科学研究试验所等出版的有关图谱。在编写过程中，得到了水利电力部有关单位的大力支持和帮助，其中很多同志提供了研究成果和生产经验。在本书出版之际，特向对本书作过支持和帮助的单位 and 同志表示衷心的感谢。

由于我们水平有限，生产经验不足，书中难免有缺点和错误，恳切希望读者批评指正。

编 者

1987.4.

目 录

前 言

第一章 耐热钢概论	1
第一节 耐热钢的概念	1
第二节 钢的热强性及其评定标准	2
第三节 钢的耐腐蚀性能	12
第四节 耐热钢的组织稳定性	15
第五节 耐热钢中的合金元素及其作用	27
第二章 耐热钢分类	39
第一节 珠光体耐热钢 (包括贝氏体耐热钢)	39
第二节 马氏体耐热钢	69
第三节 铁素体耐热钢	82
第四节 奥氏体耐热不锈钢	87
第三章 耐热钢的焊接性	103
第一节 焊接性的概念	103
第二节 耐热钢的冶金焊接性	105
第三节 耐热钢的热焊接性	118
第四节 耐热钢的焊接裂纹	125
第五节 几种常用的裂纹试验方法	129
第六节 耐热钢焊接性的判据	138
第四章 耐热钢焊接工艺的选择	149
第一节 焊接热输入量的选择	149
第二节 预热和层间温度	152
第三节 后热	163
第四节 焊后热处理和消除应力裂纹 (再热裂纹)	167
第五节 脱碳	179
第六节 焊接材料的选择	181

第五章 珠光体耐热钢的焊接	189
第一节 常用的焊接方法	189
第二节 珠光体耐热钢焊接时存在的问题	207
第三节 珠光体耐热钢焊接接头的性能	218
第四节 珠光体耐热钢焊接举例	235
第六章 马氏体和铁素体耐热钢的焊接	255
第一节 马氏体耐热钢的焊接特点	255
第二节 X20CrMoV121 (F12) 钢焊接热规范的选择	264
第三节 X20CrMoV121 (F12) 钢主蒸汽管道的焊接工艺	269
第四节 铁素体耐热钢的焊接	274
第七章 奥氏体耐热不锈钢的焊接	279
第一节 奥氏体耐热不锈钢的特性	279
第二节 奥氏体耐热不锈钢的焊接性	286
第三节 奥氏体钢焊接接头的高温性能	295
第四节 奥氏体钢焊接接头的辐射损坏	306
第五节 奥氏体耐热不锈钢的焊接工艺	308
第八章 异种钢的焊接	321
第一节 异种钢焊接概况	321
第二节 异种钢焊接接头焊缝金属的化学成分和金相组织的控制	324
第三节 珠光体钢与奥氏体钢焊接时存在的主要问题	331
第四节 异种钢焊接接头的热强性	349
第五节 异种钢的焊接工艺	352
第九章 高温合金的焊接	362
第一节 高温合金的分类和合金化	362
第二节 高温合金的焊接性	375
第三节 高温合金的焊接工艺	384
附录 国内外耐热钢钢号对照表	399

第一章 耐热钢概论

第一节 耐热钢的概念

一、耐热钢的定义

在高温状态下能够保持化学稳定性(耐腐蚀、不氧化),叫做热稳定性。在高温状态下具有足够的强度,叫做热强性。既具有热稳定性,又具有热强性的钢材,就称为耐热钢。

钢材的耐热性能主要是通过合金化来达到的。所谓合金化,就是在碳钢的基础上加入可以提高热稳定性和热强性的合金元素。最常用的合金化元素是铬、钼、钨、钒、钛、铌、硼、硅和稀土元素等。所加入的合金元素种类和含量不同,钢的组织结构和耐热性能就不一样。

这里要说及的一点是:不锈钢中加入的主要元素也是铬。铬加入到钢中后能有效地提高耐腐蚀性能;铬还能强化基体,提高钢的热强性,所以不少种类的不锈钢是具有耐热性能的,也可以属于耐热钢,有人将这种类型的钢称为“耐热不锈钢”。但是必须指出,有不少种类的耐热钢虽然具有一定的耐腐蚀性能,但由于含铬量小于11.7%,耐腐蚀性能还没有达到规定的技术要求,仍然不能叫不锈钢。

工程上有些设备是在高温及有腐蚀介质的工况下工作的,这些设备的零部件应该选用耐热钢来制造。

二、热力设备的工作特点

热力设备中许多零部件是在高温、高压和有腐蚀性的介

质中长期工作的。例如火电厂锅炉的过热器管子，其外部受高温烟气的作用，内部受高温蒸汽的作用，一般情况下管子的壁温要比管内蒸汽温度高 50°C 左右，若蒸汽温度为 540°C ，则其管壁温度就为 590°C 左右，在这么高的工作温度下长期运行，一般钢材的组织结构将会发生变化，从而会引起高温强度的降低，腐蚀损坏也会明显地表现出来。再如火电厂汽轮机的叶片，是在高温、高压、高转速的条件下工作的，所以叶片不仅要受到蒸汽的腐蚀，而且还要承受振动和交变载荷，常常因腐蚀、疲劳而引起损坏。这些现象都可能引起事故，影响锅炉和汽轮机的安全运行。为了防止高温和腐蚀所引起的零部件损坏，这些设备的主要零部件必须采用耐热钢来制造，才能满足对热稳定性和热强性的要求。

耐热钢还必须具有足够的室温强度、塑性和韧性，具有良好的焊接性和其它加工性能。

第二节 钢的热强性及其评定标准

钢材在高温时所表现出来的性能和室温时的性能是有很大的差别的，因为在高温下长期使用会使钢材的组织结构发生显著的变化，组织结构的变化将导致钢材性能的改变。所以不能仅仅根据钢材在室温时的机械性能来评定和选用，还必须研究钢材的高温性能变化和测定其高温性能指标。

一、高温下钢材强度的特点

1. 温度对强度的影响

钢材的强度极限(σ_b)一般都限定在一定的温度范围之内，超过某一温度时，钢的强度极限要降低，并且在高温下使用的时间越长，强度极限也就越低。

对退火后的40号钢，在不同温度下进行拉伸试验，试验的数据证实了上面的结论。从表1-1中可以看出：如果在20℃或200℃，强度与加载的时间无关系；但是在500℃时，情况就大不相同了，此时钢的瞬时强度 $\sigma_s=392\text{N/mm}^2$ ，若加 294N/mm^2 的应力时，经过20min左右就会使试样断裂。从这个例子不难看出，如果钢材在高温下长期使用，则瞬时强度的数据是不能作为长期性能指标的依据。

表 1-1 40号钢在不同温度及试验速度下的 σ_s (N/mm^2)

温 度 (℃)	拉断试样的时间 (min)					
	1	5	10	20	30	60
20	686	686	686	686	686	686
200	735	735	735	735	735	735
500	392	343	314	294	284	279
600	294	245	206	176	167	157

机械性能与温度的相互关系，还可以用性能与温度曲线表示。图 1-1 表示了工业纯铁的强度极限随试验温度而变化的规律。铁及其合金的典型特点是在200~300℃时的强度要比室温时高，这种现象叫做兰脆。此时在强度增加的同时，韧性下降，即脆性增加了。

从图1-1中可以看出，高于350℃有两条试验曲线，下面一条是工业纯铁在缓慢试验时的强度变化曲线，而上面一条则是以通常试验速度将工业纯铁的试样作拉伸试验时的强度变化曲线。从 350℃开始，铁对试验速度具有敏感性。应力如果大于上面一条曲线时，试样就断裂。若所加的应力比下面一条曲线低时，则在这种应力的作用下，一般可以认为试

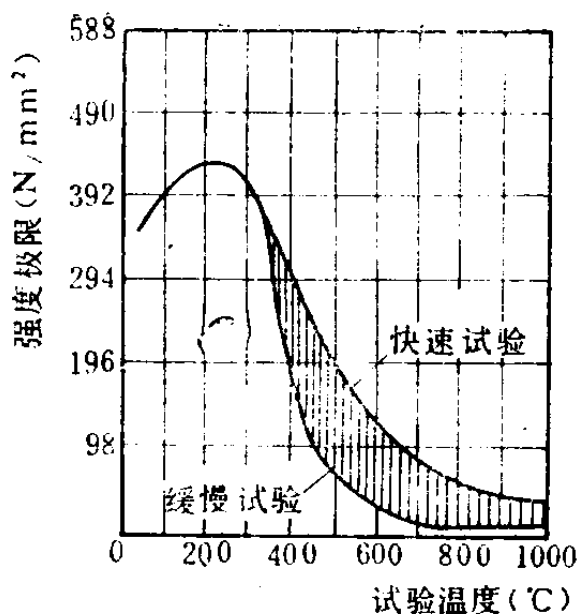


图 1-1 工业纯铁的强度极限与试验温度的关系

(影线区表示引起蠕变的应力)

样根本不会断裂。如果应力的大小在上下曲线之间，即在影线区内时，则经过一定时间以后，试验才断裂。应力值越接近上面的曲线，拉断试验所需要的时间就越短。位于影线区内的应力使金属逐渐发生塑性变形，而在断裂时塑性变形数值达到最大值。

2. 温度对晶内强度和晶界强度的影响

金属的强度是由晶粒内原子的引力（决定了晶内强度）和晶界的结合力（决定了晶界强度）两部分组成。

常温下晶界强度大于晶内强度，这是由于晶界处的原子排列得不规则，晶体缺陷又较多（如位错、空位等），因而具有较大的抗形变能力，因此金属的破坏总是带有晶内破坏（穿晶破坏）的特点，先是晶内滑移而引起塑性变形，然后是塑性断裂。

随着温度的升高，虽然晶内和晶界的原子结合力都同时下降，但是由于晶界处的原子比晶内的原子更不稳定，晶界的缺陷又比晶内的多，所以原子的活动能力较大，扩散速度也就比晶内的大，因此晶界处的原子结合力下降速度比晶内原子的引力下降速度要大。到达一定温度后，晶界强度就低于晶内强度，如图 1-2 所示。如果晶界强度低于晶内强度，这时金属的破坏就开始转为晶粒之间的破坏（沿晶破坏），

即在晶界处因晶粒之间相对滑移而先产生裂纹，然后沿裂纹扩大导致脆性断裂。

晶内强度与晶界强度相等时的温度称为平衡温度，或叫做等强度温度。等强度温度与载荷速度（变形速度）等因素有关。随着载荷速度的降

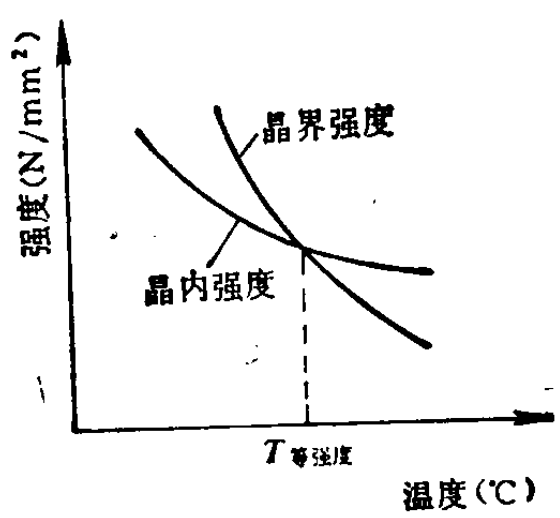


图 1-2 温度对金属晶内强度和晶界强度的影响

低，等强度温度下降，因此在热力设备中有些零部件在高温和应力长期作用下（相当于载荷速度很小的情况），钢材的破坏往往属于晶间的脆性断裂形式。假如在高速载荷下，如短期超温爆管等（相当于冲击或短时拉伸），即使温度较高往往仍然表现为晶内塑性断裂形式。

二、蠕变及蠕变极限

1. 蠕变

金属在一定温度和应力作用下，随着时间的增加慢慢地发生塑性变形的现象称为蠕变。某些低熔点金属，如铅、锡等，在室温下就会发生蠕变。碳钢当温度超过300~350℃，低合金钢当温度超过350~400℃时，在应力的长期作用下都有蠕变现象。而且温度越高，应力越大，蠕变速度就越快。

在中、高压锅炉和汽轮机设备中，产生蠕变的零部件很多，例如过热器的蛇形管及其出口联箱、过热蒸汽管道和紧固件等。蠕变严重时会造成管壁减薄，最后引起爆管破坏。因此蠕变是衡量耐热钢热强性能的一个重要方面。

2. 蠕变曲线

金属的蠕变现象可以用蠕变曲线——变形与时间的关系曲线来表示。蠕变曲线可描述金属在蠕变时的整个变形过程。它可以用高温蠕变试验方法求得。典型的蠕变曲线如图 1-3 所示。

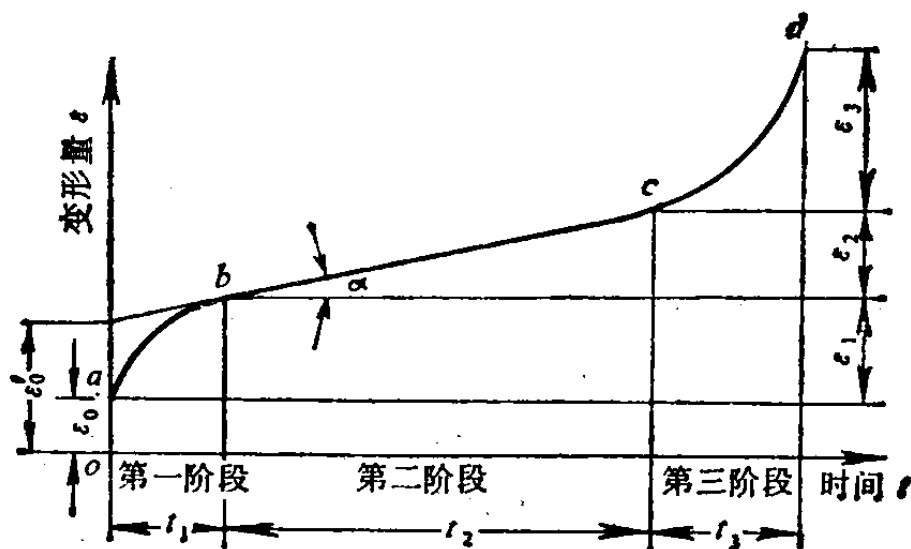


图 1-3 蠕变曲线
($T = \text{常数}$, $\sigma = \text{常数}$)

典型的蠕变过程可分为三个阶段：

oa ——开始部分，是加上负荷后所引起的瞬时变形。如果施加的应力超过该温度下的弹性极限，则这种变形实际上是由弹性变形和塑性变形组成。这一变形量还不能标志蠕变现象，只是由外加负荷所引起的一般变形过程。

ab ——蠕变第一阶段，也称为蠕变的不稳定阶段。此阶段中，金属以逐渐减慢的变形速度积累塑性变形量。这一阶段的蠕变速度很大。

bc ——蠕变第二阶段，也称为蠕变的稳定阶段。此时金属以恒定的速度进行着变形。这一阶段变形速度很小， bc 段近似直线， bc 的倾角 α 的正切表示蠕变速度。

cd ——蠕变第三阶段，即蠕变的最后阶段。在这个阶段

中，蠕变速度逐渐增加，塑性变形量逐渐积累，直至 d 点发生断裂。

不同的金属在不同的外界条件下所得到的蠕变曲线是不同的。同一种金属的蠕变曲线也随应力和温度的不同而不同。应力和温度对蠕变曲线的影响，见图1-4及图1-5所示。

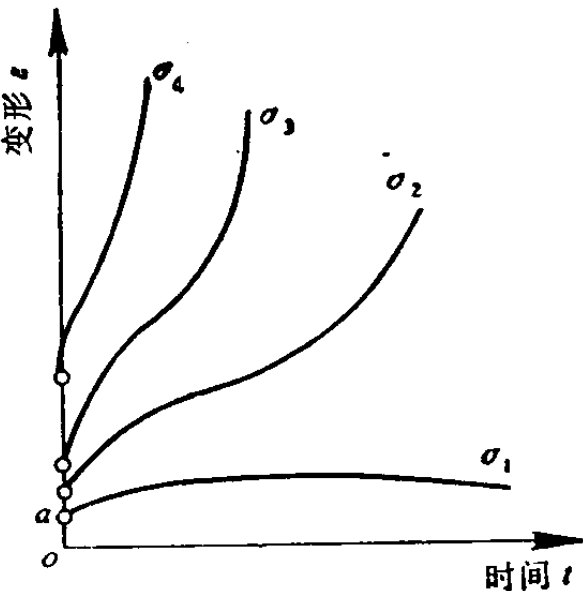


图 1-4 应力对蠕变曲线的影响
($\sigma_4 > \sigma_3 > \sigma_2 > \sigma_1$)

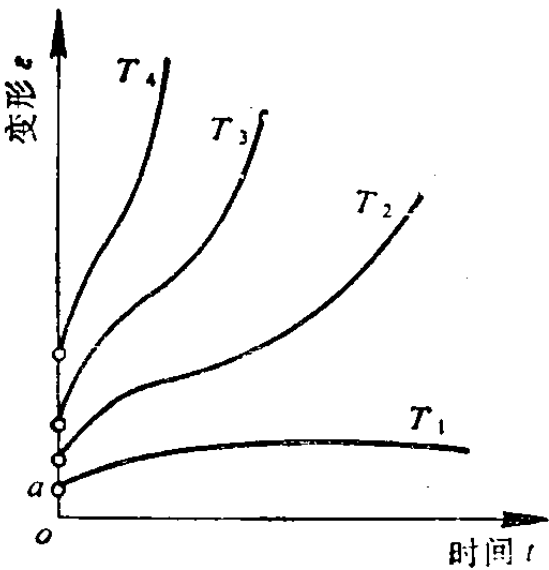


图 1-5 温度对蠕变曲线的影响
($T_4 > T_3 > T_2 > T_1$)

蠕变曲线的形式虽有不同，但一般都包含有三个基本阶段，只不过各个阶段持续的时间长短不同。图1-4表示温度不变时，应力的变化对蠕变曲线的影响，应力越大，蠕变速度就越快；图1-5表示应力不变时，温度的变化对蠕变曲线的影响，温度越高，蠕变速度也越快。蠕变速度快，钢材断裂就早。

在温度给定，应力很小的情况下，蠕变第二阶段即稳定阶段将持续很久，甚至蠕变的第三阶段可能不发生。相反，在温度给定，应力很大的情况下，蠕变第二阶段便很短，试样将在很短的时间内发生断裂。

3. 蠕变极限

蠕变曲线只能表达钢材在一定温度和一定应力下所产生的蠕变速度。而在工程上实际应用时，是用蠕变极限（也称为条件蠕变极限）作为衡量热强性的指标。

蠕变极限有两种表示法：

一种表示方法是：在一定的工作温度下，引起规定变形速度的应力值。这里所指的变形速度是蠕变第二阶段的变形速度。热力设备零部件中规定的变形速度一般是 $V = 1 \times 10^{-5} \% / \text{h}$ 或 $V = 1 \times 10^{-4} \% / \text{h}$ ；蠕变极限可相应地书写为：

$\sigma_{1 \times 10^{-5}}$ 或 $\sigma_{1 \times 10^{-4}}$ ，单位是 N/mm^2 。有时以 $\sigma_{1 \times 10^{-5}}^T$ 或 $\sigma_{1 \times 10^{-4}}^T$ 表示在某一温度 T 时的蠕变极限。

另一种表示方法是：在一定工作温度下，在规定的使用时间内，使钢材发生一定量总变形的应力值。锅炉和汽轮机设备中的主要零部件，一般工作时间规定为10万h(约12a)。因此，蠕变极限的确定一般是以工作了10万h总变形量为1%时的应力值，用符号 $\sigma_{1/10^5}$ 表示。

多年来的实践证明，锅炉设备中的过热器、联箱、主蒸汽管道等零部件，若出现了少量的蠕变对正常运行影响不大，只要不引起零部件的破坏是允许的。所以蠕变极限可以适当放宽一些，一般都定为10万h总变形量为1%。为了预防和避免事故，火电厂对锅炉过热器的管子、联箱、主蒸汽管道等零部件的蠕变还是很重视的，不少火电厂都安装了蠕变测点，进行监督，经6000~7000h运行后检查一次，对蠕变已经比较严重的管子及时更换，以确保运行的安全。汽轮机叶片和隔板等零部件的装配精度和间隙要求十分严格，所以对蠕变总变形量也限制得很严，因为叶片的微量伸长，就可能碰坏，使汽轮机发生事故。因此，在汽轮机中，有些零部件

的蠕变极限定为运行了10万h后引起总变形量为0.1%的应力值，而且将蠕变极限作为热强性能的主要考核指标。制造汽轮机主要零部件的材质，必须按照蠕变极限来选用。

三、持久强度

蠕变试验仅仅是测定第二阶段的变形速度或蠕变的总变形量，还不能反映出钢材在高温断裂时的强度和塑性。而持久强度不但能反映出钢材在高温断裂时的抵抗能力，同时还能反映钢材在高温断裂时的塑性。因此要全面评定钢材的热强性，除了要进行蠕变试验外，还必须做持久试验，测定出钢材的持久强度。

所谓持久强度是指钢材在高温和应力的长期作用下抵抗断裂的能力。在锅炉设计中是以零件在高温运行10万h断裂时的应力作为持久强度的，以 σ_{10^5} 表示，单位为 N/mm^2 。有时书写成 $\sigma_{10^5}^T$ ，表示温度 T 时的持久强度。

10万h是相当长的时间。对钢材进行高温持久试验时，一般是不可能进行到10万h再来确定其断裂应力，通常只是试验到5000~10000h，再用外推法推算到10万h断裂的应力值。

做持久强度试验时，用5到6根试样，在规定的温度下，让每根试样在承受不同的应力下做拉伸试验，经一定时间后拉断。不同应力值对应于一定的断裂时间，将所得的结果描绘到应力和时间的双对数坐标上去，然后将各点（即不同的试验应力和断裂时间的坐标点位置）连成直线，再将此直线延伸外推到10万h的应力，即为持久强度值。图1-6即是用此试验方法所求得的持久强度曲线。

上面所叙述的外推法是比较粗略的。到目前为止，对于持久强度的外推还没有一个完整的方法。为了避免太大的误

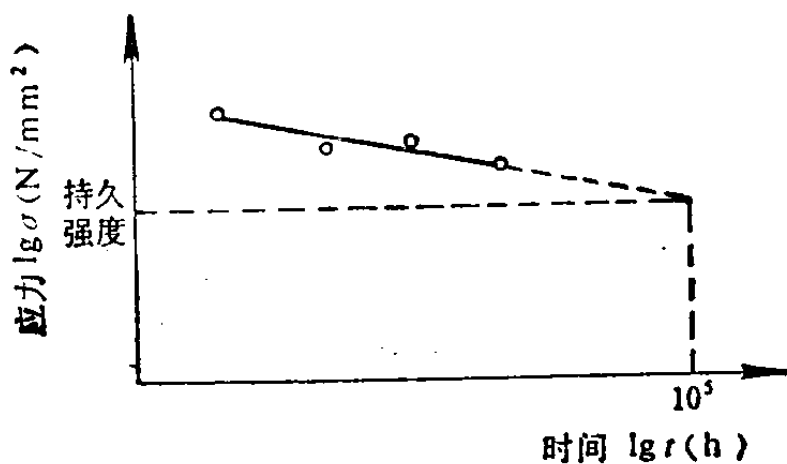


图 1-6 持久强度曲线

差，做持久试验的时间不宜太短。

四、应力松弛

零件在高温和应力状态下工作时，如维持总变形量不变，随着时间的增长，零件的应力逐渐降低，这种现象叫做应力松弛，也可简称为松弛。

松弛过程中变形和应力的变化过程：

总变形

$$\lambda = \lambda_{\text{弹}} + \lambda_{\text{塑}} = \text{常数}$$

应 力

$$\sigma \neq \text{常数}$$

其中 $\lambda = \text{常数}$ ，但 $\lambda_{\text{弹}} \neq \text{常数}$ ， $\lambda_{\text{塑}} \neq \text{常数}$ ， $\lambda_{\text{弹}}$ 逐渐向 $\lambda_{\text{塑}}$ 转化。 $\sigma \neq \text{常数}$ ，而且逐渐减小。松弛过程是弹性变形逐渐减小，塑性变形逐渐增加的过程。并且两者是同时、等量发生的。

锅炉、汽轮机和燃汽轮机中的许多零部件，如紧固件、弹簧、汽封、弹簧片等，处于松弛条件下工作。当这些零件松弛到一定的程度后，就会引起汽缸和阀门漏汽，安全阀过

早起跳，影响机组的正常运行。

图1-7是总变形量一定时，应力随着时间的增长而逐渐降低的应力松弛曲线。由图可知，整个应力松弛曲线可分为两个阶段：第一阶段应力随着时间的增长而急剧降低；第二阶段应力下降逐渐缓慢并趋向稳定。有了应力松弛曲线就可以初步评定钢材的松弛稳定性程度。

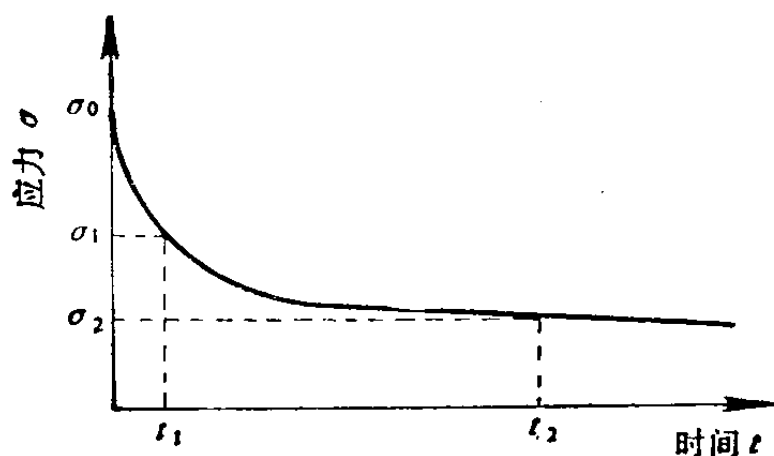


图 1-7 应力松弛曲线

松弛和蠕变在含义上是有差别的，蠕变是在恒定应力作用下，塑性变形随着时间的增加而逐渐增大；松弛是在恒定总变形下，应力随着时间的增长而逐渐降低。松弛和蠕变也有一定的联系，可以将松弛理解成在应力不断变小的情况下，弹性变形逐渐向塑性变形转化的一种特殊的蠕变过程，它们的本质是一样的。

应力松弛性能与持久强度一样，一般情况下是不做长时间的试验，而只做1500~3000h的试验，绘出应力松弛曲线，然后也是用外推法推测出规定时间的松弛性。通常是用在规定的时间内，残余应力 σ 的大小来评定钢材抗松弛性能的好坏。