

热强钢及  
高温合金手册

72-62

27



TG 142.73-62  
M 17

# 热强钢与高温合金手册

C.B. 马斯林柯夫著

王炳林 李云威译

(17-36.16)



219183

С. Б. МАСЛЕНКОВ

# 热强钢与高温合金手册

ЖАРОПРОЧНЫЕ СТАЛИ

И СПЛАВЫ

手册所录数据与现行国家标准相符

Москва "МЕТАЛЛУРГИЯ"

1983

## 前 言

苏联莫斯科冶金出版社出版的《热强钢与高温合金》一书（С.Б.马斯林柯夫著，1983年版），广泛蒐集整理了苏联国内和国外有权威性的文献资料和相关研究院发表的材料性能数据，这些数据是花费了很大精力、很多时间，付出了很大的经济代价才获得的，是极为难得的资料。作者在列出这些数据之前，还比较精辟地论述了各种类型材料的合金化原理，以及成份、工艺、组织、性能和使用的关系，对指导正确选用材料和使用材料具有很大的实用参考价值。作者还介绍了热强钢和高温合金的一般要求，各种零部件材料受载和交变载荷下的变形特性及其类型和原理，并介绍了各种热强性能的测试方法和原理。

我们以为这是一本有用的书，为此组织力量进行了翻译，以饕广大冶金工作者。

本书由王炳林、李云盛翻译，并由朱之琴、刘同忻校阅。限于翻译水平和技术水平，错误之处难免，尚祈广大读者指正。

**兵器工业部标准化研究所**

**航空工业部六二一研究所**

## 原书緒論

战后，动力和燃气涡轮技术发展的特点之一，就是工作温度持续地上升。固定动力装置的温度达585℃，而运输动力装置的温度则高达1000℃或更高。温度能上升到如此之高，主要是由于新型金属材料——热强钢和高温合金的高度发展。这些材料具备了能在高温下复杂应力、同时受外部浸蚀介质作用的状态下长期工作的能力。

自然，对这些材料来说，为其研究和制订了特有的合金化和热处理方法，它与仅仅在气候变化温度范围使用的一般钢与合金材料是截然不同的。

战后，研制了大量的钢种和合金，但不是所有的钢和合金都能经受住时间的考验，其原因是错综复杂的。诸如所用合金化元素昂贵、个别组份的工艺性能低劣、设计参数的变化以及在使用过程中出现性能下降（主要是塑性急剧下降）现象等。

作者编写本手册的目的在于从理论方面对热强合金的一定发展时期加以简单的总结及为经实际考验合格的优秀钢种和合金汇集参考数据。为此目的，作者曾查阅和汇集了前些年出版的各类刊物、文献中的数据以及作者本人在这方面的研究成果。

作者殷切期望，本手册能对设计师们、工程技术人员、科研工作者、高等院校的师生，在为设计选择钢种和合金、研制新钢种和合金、研究它们在生产条件下或在高温下长期工作的各种装置使用过程中的行为时有所裨益。

作者预先对本手册编写方法和收集参考数据范围等方面提出宝贵意见的读者表示衷心的感谢。

## 原作者序

苏共第十六次代表大会决定把加速科学技术进步以及提高产品效率和质量，作为发展我国国民经济的首要任务。

对于钢和合金材料来讲，最重要的质量指标是其性能水平及其稳定性。

相应国家标准（ГОСТ）的制定和颁布，是提高金属产品质量最重要的一环；众所周知，在ГОСТ制定和颁布之前需要为积累和丰富各类钢与合金的性能数据进行大量的工作。

适用于热强钢和高温合金的主要国家标准是ГОСТ5632-72，但它只是钢与合金的等级分类标准，即规定了材料的类型、化学成份及大致使用范围。本手册的出版，将促使热强钢和高温合金这样重要产品，在实现标准化的道路上向前迈进一步。

这些材料的特性，在论述高温合金的各种专题学术文章、专题文集以及定期刊物中均有刊载。

在编写本手册的过程中，参阅的有关热强钢和高温合金的各种著作和参考文献主要有：《热强钢和高温合金》Ф·Ф·希姆申，冶金工业出版社，1964年；《锅炉、涡轮制造业用钢与合金性能指南》1966年；《黑色冶金产品—抗氧化和热强钢与高温合金》目录；黑色冶金情报资料（1976年）以及定期刊物中的各种参考资料。

高温合金主要分为铁基合金和镍基合金。也就是这类材料用来作为固定和运输蒸汽和燃气涡轮的主要结构材料。根据ГОСТ5632-72变形热强钢和高温合金技术条件，依其基体元素和所含合金化元素的多寡，分为热强钢（和铁基高温合金）以及镍基高温合金两大类。而热强钢本身又可分为低合金钢和高合金钢。

铁基合金中，当含铁量不低于45%、合金元素总量（按上限计算）不低于10%的为高合金钢，合金化更低的铁基合金则属于低合金钢。成份中铁和镍的总量超过65%、铁与镍的近似比值为1.5:1的合金，称为铁镍基合金。镍基合金指镍含量不少于55%的合金。

所谓热强钢和高温合金，系指能在高温下经受相当大的机械载荷时，能工作相当长时间，同时又具有足够高的抗氧化水平的钢和合金。

抗氧化（热稳定）钢和合金，系指在高于550℃下能抗燃气腐蚀及能在低载荷状态下工作的钢和合金。工作寿命大致可分为：短时间的——100小时以下；有限时间的——100到1000小时；长时间的——1000到10000小时；极长时间的——10000到100000小时以上。

本手册所述论的材料是按下述方式排列的，开始列举的是低合金化及热强性能相应较低的材料。然后列举的各类合金的数据，首先是铁基合金，继之是镍基合金。论述镍基高温合金于本手册倒数第二章，这种由热强性能从较低到较高的论述规律性则有所变化。镍基合金是按工厂牌号中数字大小来排列的，文献中也采用这种牌号名称；首先列出的是ЭИ牌号，而后为ЭП牌号。

所有的机械性能和物理性能数值均采用国际单位制（СИ即同英文SI）。

单位对照

| 性能符号 | 度量单位                                                                               |                                                               | 量值对比                                                                                                                             | 本手册采用的<br>英文符号*                    |
|------|------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|
|      | 米·公斤(力)·秒制<br>(MKFCC)                                                              | 国际单位制 (SI)                                                    |                                                                                                                                  |                                    |
| 强度   | 公斤/毫米 <sup>2</sup><br>( $\text{KF/mm}^2$ )                                         | 兆帕 (MPa)                                                      | $1\text{KF/mm}^2 = 9.8\text{MPa} \approx 10\text{MPa}$                                                                           | MPa                                |
| 冲击韧性 | 公斤·米/厘米 <sup>2</sup><br>( $\text{KF} \cdot \text{M}/\text{CM}^2$ )                 | 千焦耳/米 <sup>2</sup><br>( $\text{kJ}/\text{M}^2$ )              | $1\text{KTM}/\text{CM}^2 = 98\text{KJ}/\text{M}^2$<br>$\approx 10^2\text{KJ}/\text{M}^2$                                         | $\text{KJ}/\text{m}^2$             |
|      | KCU                                                                                |                                                               |                                                                                                                                  |                                    |
| 密度   | 克/厘米 <sup>3</sup><br>( $\text{G}/\text{CM}^3$ )                                    | 公斤/米 <sup>3</sup><br>( $\text{KG}/\text{M}^3$ )               | $\text{KG}/\text{CM}^3 = 10^3\text{KG}/\text{M}^3$<br>$= 1 \cdot 10^3\text{KG}/\text{M}^3$                                       | $\text{KG}/\text{m}^3$             |
| 导热率  | 卡/厘米·秒·度<br>( $\frac{\text{Kcal}}{\text{CM} \cdot \text{sek} \cdot \text{grad}}$ ) | 瓦特/米·开(尔文)<br>( $\frac{\text{BT}}{\text{M} \cdot \text{K}}$ ) | $1 \frac{\text{Kcal}}{\text{CM} \cdot \text{sek} \cdot \text{grad}} = 4.2 \times 10^3 \frac{\text{BT}}{\text{M} \cdot \text{K}}$ | $\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$ |
|      | $\lambda$                                                                          |                                                               |                                                                                                                                  |                                    |

\* 为便于统一阅读和记忆, 采用英文符号。——译者注

## 本手册采用的符号

- $\sigma_B$ ——拉伸强度；  
 $\sigma_{0.2}$ ——残余变形0.2%的屈服强度；  
 $\delta_5, \delta_{10}$ ——延伸率（数字5和10表示五倍和十倍于试样直径（或宽度）的标距长度）；  
 $\psi$ ——断面收缩率；  
KCU——冲击韧性；  
 $n$ ——扭转次数；  
E——弹性模量；  
HB——布氏硬度；  
 $\sigma_{-1}$ ——旋转弯曲疲劳极限；  
 $t$ ——试验温度；  
 $\sigma$ ——应力；  
 $\tau_D$ ——断裂时间；  
 $\tau$ ——持续时间；  
 $\sigma_{1 \cdot 10^{-2}}, \sigma_{1 \cdot 10^{-3}}$ ——蠕变速度  $1 \cdot 10^{-2}$ 、 $1 \cdot 10^{-3}$  及其它速度的蠕变极限，%/小时；  
 $\sigma^{0.2/100}$ ——变形0.2%、100小时试验时间或其它试验时间的蠕变极限；  
 $\sigma^{1/15}$ ——变形1%、15分钟试验时间的蠕变极限；  
 $\sigma_{\text{Hn}}$ ——持久强度极限；  
 $\sigma_{\text{Hn}}^{\text{II}}$ ——缺口试样持久强度极限；  
 $\sigma_{100}, \sigma_{1000}$ ——100、1000小时及其它时间的持久强度极限；  
 $\sigma_0$ ——起始应力；  
 $\sigma_r$ ——残余应力；  
 $\gamma$ ——密度；  
 $\alpha$ ——线膨胀系数；  
 $\lambda$ ——导热率；  
 $\rho$ ——比电阻；  
 $\mu$ ——导磁率；  
 $\sigma_3$ ——比电导率；

# 目 录

|                                   |      |
|-----------------------------------|------|
| 原书绪论.....                         | (1)  |
| 原作者序.....                         | (2)  |
| 本手册所用的符号.....                     | (4)  |
| <b>第一章 金属材料的热强性</b> .....         | (1)  |
| 1. 对热强材料的一般要求.....                | (1)  |
| 2. 钢与合金在有限载荷作用下的变形.....           | (2)  |
| 3. 多晶体试样加载变形的形式.....              | (2)  |
| 4. 蠕变强度和持久强度.....                 | (2)  |
| 5. 应力松弛现象.....                    | (3)  |
| <b>第二章 测试金属和合金主要热强性能的方法</b> ..... | (5)  |
| 1. 蠕变试验.....                      | (5)  |
| 2. 持久强度试验.....                    | (6)  |
| 3. 松弛试验.....                      | (7)  |
| 4. 物理和组织因素对金属和合金热强性的影响.....       | (7)  |
| <b>第三章 低合金热强钢</b> .....           | (9)  |
| 1. 合金化、热处理、组织.....                | (9)  |
| 2. 化学成分和性能.....                   | (11) |
| 20号低合金钢.....                      | (11) |
| 12XM低合金钢.....                     | (13) |
| 15XM低合金钢.....                     | (14) |
| 12X1MΦ珠光体型低合金钢.....               | (16) |
| 15X1M1Φ珠光体型钢.....                 | (18) |
| 12X2MΦCP珠光体型钢.....                | (21) |
| 12X2MΦБ (ЭИ531) 低合金钢.....         | (23) |
| <b>第四章 高合金铬钢</b> .....            | (25) |
| 1. 合金化、热处理、组织.....                | (25) |
| 2. 化学成分和性能.....                   | (28) |
| 20X13马氏体型钢.....                   | (28) |
| 30X13马氏体型钢.....                   | (31) |
| 15X11MΦ马氏体型钢.....                 | (33) |
| 18X11MΦБ (ЭП291) 马氏体型钢.....       | (36) |

|                                      |      |
|--------------------------------------|------|
| 13X12H2B2MΦ (ЭИ961) 马氏体 型 钢 .....    | (37) |
| 2 X12H2BMΦ (ЭИ962) 马氏体 型 钢 .....     | (38) |
| 10X 7 MBΦEP (ЭП505) 马氏体 型 钢 .....    | (40) |
| 18X12BMБΦP (ЭП993) 马氏体—铁素体 型 钢 ..... | (42) |
| 12X12MBΦEP (ЭП752) 马氏体—铁素体 型 钢 ..... | (45) |
| 12X 2 MB8ΦБ (ЭП503) 铁素体 型 钢 .....    | (48) |
| 15X12BHMΦ (ЭИ802) 马氏体—铁素体 型 钢 .....  | (51) |

## 第五章 碳化物强化奥氏体钢..... (53)

|                                         |      |
|-----------------------------------------|------|
| 1. 合金化、热处理、组织.....                      | (53) |
| 2. 化学成份和性能.....                         | (55) |
| 31X19H9MBBT (ЭИ572) 奥氏体 型 钢 .....       | (55) |
| 4 X14H14B2M (ЭИ69) 奥氏体 型 钢 .....        | (57) |
| 4 X15H 7 Γ 7 Φ2MC (ЭИ388) 奥氏体 型 钢 ..... | (60) |
| 37X12H8Γ8MΦБ (ЭИ481) 奥氏体 型 钢 .....      | (62) |

## 第六章 碳化物—金属间化合物强化奥氏体钢和合金..... (65)

|                                     |      |
|-------------------------------------|------|
| 1. 合金化、热处理、组织.....                  | (65) |
| 2. 化学成份和性能.....                     | (67) |
| 08X16H13M2Б (ЭИ680) 奥氏体 型 钢 .....   | (67) |
| 09X14H16Б (ЭИ694) 奥氏体 型 钢 .....     | (69) |
| 10X11H20T3P (ЭИ696) 奥氏体 型 钢 .....   | (70) |
| 09X14H19B2EP (ЭИ695P) 奥氏体 型 钢 ..... | (71) |
| 09X14H19B2B1P (ЭИ726) 奥氏体 型 钢 ..... | (73) |
| 08X15H24B4TP (ЭП164) 奥氏体 型 钢 .....  | (74) |
| XH32T (ЭП670) 铁镍基高温合金.....          | (76) |
| XH35BT (ЭИ612) 铁镍基高温合金.....         | (77) |
| XH35BTЮ (ЭИ787) 铁镍基高温合金.....        | (79) |

## 第七章 镍基高温合金..... (81)

|                                    |       |
|------------------------------------|-------|
| 1. 合金化、热处理、组织.....                 | (81)  |
| 2. 化学成份和性能.....                    | (87)  |
| XH77TЮP (ЭИ437Б和ЭИ437БУВД) 合金..... | (87)  |
| XH70MBTЮБ (ЭИ598) 合金.....          | (91)  |
| XH80TБЮ (ЭИ607) 合金.....            | (92)  |
| XH70BMTЮ (ЭИ617) 合金.....           | (94)  |
| XH73METЮ (ЭИ 698) 合金.....          | (96)  |
| XH70BMЮT (ЭИ 765) 合金.....          | (98)  |
| XH70BMTЮΦ (ЭИ826) 合金.....          | (101) |

|                                 |              |
|---------------------------------|--------------|
| ХН70ВМЮ (ЭИ827) 合金.....         | (104)        |
| ХН62МВКЮ (ЭИ 867) 合金.....       | (105)        |
| ХН65ВМТЮ (ЭИ 893) 合金.....       | (107)        |
| ХН55ВМТКЮ (ЭИ929) 合金.....       | (109)        |
| ХН55ВМКЮ (ЭП 109) 合金.....       | (111)        |
| ХН56ВМТЮ (ЭП199) 合金.....        | (112)        |
| ХН67МВТЮ (ЭП 202) 合金.....       | (113)        |
| ХН55МВЮ (ЭП454) 合金.....         | (116)        |
| ХН57МТВЮ (ЭП590) 合金.....        | (117)        |
| ХН62МБВЮ (ЭП709) 合金.....        | (119)        |
| ХН60КМВЮБ (ЭП800) 合金.....       | (121)        |
| ХН62ВМКТЮБ (ЭП885) 合金.....      | (123)        |
| <b>第八章 抗氧化钢和铁基与镍基高温合金.....</b>  | <b>(126)</b> |
| 1. 合金化、热处理、组织.....              | (126)        |
| 2. 化学成分和性能.....                 | (129)        |
| 10Х14Г14Н4Т (ЭИ711) 奥氏体型钢.....  | (129)        |
| 12Х18Н9 奥氏体型钢.....              | (131)        |
| 0Х18Н12Б (ЭИ402) 奥氏体型钢.....     | (132)        |
| 08Х13 铁素体型铬钢.....               | (134)        |
| 12Х17 铁素体型钢.....                | (134)        |
| 12Х13 马氏体—铁素体型铬钢.....           | (135)        |
| 20Х23Н18 (ЭИ417) 奥氏体型钢.....     | (138)        |
| 36Х18Н25С2 奥氏体型钢.....           | (140)        |
| 15Х25Т (ЭИ439) 铁素体型钢.....       | (141)        |
| 12Х25Н16Г7АР (ЭИ835) 奥氏体型钢..... | (142)        |
| 15Х28 (ЭИ349) 铁素体型钢.....        | (144)        |
| 10Х18Н18Ю4Д (ЭП841) 奥氏体型钢.....  | (145)        |
| ХН45Ю (ЭП747) 铁镍基高温合金.....      | (146)        |
| ХН75МБТЮ (ЭИ602) 镍基高温合金.....    | (148)        |
| ХН60ВТ (ЭИ868) 镍基高温合金.....      | (149)        |
| ХН78Т (ЭИ435) 镍基高温合金.....       | (152)        |
| ХН60Ю (ЭИ559) 铁镍基高温合金.....      | (154)        |
| ХН70Ю (ЭИ652) 镍基高温合金.....       | (155)        |

## 第一章 金属材料的热强性

### 1. 对热强材料的一般要求

由于涡轮制造业的发展, 热强钢与高温合金作为特种类型的结构材料也获得迅速的发展。

涡轮作为一种能源或能的转换装置, 在热能技术(动力电站)、船舶和航空发动机方面获得广泛的应用。近些年出现了供地面车辆(坦克、装甲汽车)用的燃气涡轮。在近代涡轮结构设计中, 热强合金占重量的40—60%。涡轮进气温度越高, 发动机越经济。随着燃气温度的提高, 单位功率的燃料与空气的消耗比下降。这种情况也促使在短期内涌现出各种不同成份, 并适用于各种工作温度和使用寿命的热强钢和高温合金。

热强钢与高温合金系指能在高温下规定时间内, 于复杂应力状态下工作的材料。决定合金工作能力的主要性能就是热强性。

设计结构金属材料在一定温度下和规定时间内, 能经受住引起一定的变形而不导致断裂的应力, 被认为热强性。如果只表示应力和时间关系, 则该性能为持久强度极限。如果表示的是应力、时间和变形关系, 则这种性能称作蠕变强度极限。

评定金属的工作可靠性不仅仅依靠强度, 还要考虑其达到寿命时所保持的塑性。故热强材料第二位的重要性能是塑性储备, 它是通过持久强度试验测得的 $\delta$ 和 $\psi$ , 长期时效后的KCU及缺口试样持久强度试验测得的缺口敏感性等各项指标来确定的。对热强材料来讲, 如果持久强度试验测得的 $\delta$ 和 $\psi$ 值相应为10和10%, 则可认为是最佳指标。KCU值根据材料的工作条件来确定。

缺口敏感性按同一试验温度和应力下, 缺口试样和光滑试样试验的断裂时间的比值来测定。如果比值大于或等于1, 则该合金被认为是无缺口敏感性。

由于温度上升到工作温度需要一定的时间, 工作开始时通常相当于环境介质的气温, 所以对材料的室温强度和塑性的要求亦相当重要, 并希望能尽可能地高些。对弥散强化的镍基和铁镍基合金而言, 强度值应为 $\sigma_B > 1200 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_{0.2} > 800 \text{ MPa}$ 。尽管绝大多数的高温合金无脆性转变明显的临界温度, 当由于工作温度较低或工艺操作温度下, 对于实际结构中亦存在各种应力集中源, 不可避免地会提出合金对缺口或尖锐裂纹应具有低敏感性的问题。为此, KCU值应尽可能高一些。

由于热强合金是在以载荷不断变化为特点的复杂应力状态下工作, 高的抗高温疲劳性能, 如同在一般环境介质条件下工作的材料的疲劳性能一样, 是至关重要的。

解决现代设计结构的技术日趋复杂, 要求材料应具有良好的工艺性能。例如, 燃气涡轮发动机叶片的制造, 需采用锻造或精密模锻、棒材和成品叶片的机械加工、磨削、抛光及精密铸造等。用高温合金板材制造燃烧室, 则需广泛采用冷冲压、模压、弯曲、点焊和胶焊等。近些年广泛采用电焊焊、扩散焊、摩擦焊和钎焊等焊接工艺。

对热强钢和高温合金还不能忽视这样一个固有的因素, 即它们不仅在工作温度以下, 而且在工艺操作温度以下均能保持高的强度值, 在其整个加工工艺过程中, 即从铸锭开始变形

到制件最后精加工，底至所需尺寸和表面光洁度，均保持着自己的特性。

## 2. 钢与合金在有限载荷作用下的变形

如果作用于金属上的应力接近于屈服极限，则金属随时间发生缓慢地变形，它与应力大小和试验温度有关。这种现象被称为蠕变。在从绝对零度到熔点的所有温度下都有蠕变发生，但蠕变的机理与温度范围有关。蠕变分为对数蠕变、高温蠕变和扩散蠕变。

对数蠕变产生在低温，这是由于元素的扩散活性低，机械性能不可能恢复。在蠕变过程中，金属逐渐强化及蠕变速度下降。低温蠕变的典型特征是延伸与时间对数成比例关系。

工程技术中最普遍的蠕变形式是高温蠕变，其温度为基体金属熔点的  $0.4-0.7T$ 。本手册所列数据属于该温度范围。

当温度超过基体金属熔点  $0.7T$  时，由于受施加应力的作用，原子定向扩散，蠕变发展的非常迅速。这样一来，如果对材料施加应力，则合金内的原子向试样两端的方向扩散。而原子空穴则向相反的方向移动。试样的长度从而增大。

## 3. 多晶体试样加载时变形的形式

对测定持久强度和蠕变方法进行论述之前，必须对蠕变现象本身加以详尽的介绍。大批供应工业用途的金属，绝大多数都是多晶体材料。在施加于金属上的应力作用下，多晶体经受各种形式的变形，包括弹性、粘滞性（Вязкий）和塑性变形。弹性变形  $\epsilon$  遵从虎克定律： $\epsilon = \sigma / E$ ，式中： $\sigma$ —施加应力； $E$ —杨氏模量。

粘滞性流动与弹性变形不同，前者特点是在变形速度，而不是变形量与施加应力成比例的条件下才有变形存在。多晶体金属中的粘滞性变形，主要与晶界产生攀移有关。粘滞性变形特别是在高温下表现的尤为明显，可与弹性变形同时发展，导致机械能呈热能形式散失，这就是所谓的内耗。

加载时，观察到的塑性变形与弹性和粘滞性变形不同，它在解除载荷后并不消失，即机械性能试验后的残余延伸率和收缩率。

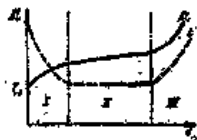
低温试验时，由于粘滞性流动量小，经常被忽视掉，只限于确定弹性和塑性变形。

## 4. 蠕变和持久强度

如果给出高温加载后试样的延伸随时间变化的特点，就可以获得如图1所示的表明试样在所有试验阶段的关系曲线，该曲线可分为三个部份。第I部份的延伸迅速达到一定值，此区域为非稳定蠕变，蠕变速度确定为  $de/d\tau$ ，此处总是下降的。第II部份称为稳定蠕变区域，蠕变速度保持不变。第III部份的蠕变速度不断上升，直至金属产生断裂为止。

图1 蠕变  $\Delta\epsilon(\tau)$  和蠕变速度  $e$  的典型曲线

- I — 非稳定蠕变阶段；  
II — 稳定蠕变阶段；  
III — 断裂阶段。



根据试验材料、试验温度和应力的不同，三个区域的大小如同导致破坏的变形量 $\epsilon$ ，可以在大的范围内变化。在大应力和高焯下，稳定蠕变第Ⅰ部份缩小，而蠕变速度增加，因此第Ⅰ部份有时难以区分出来。在这种情况下，已不称作蠕变试验，而称为持久强度试验。

如果对蠕变第一和第二阶段进行讨论的话，则可以说，蠕变试验时，变形机理主要与位错攀移有关。在高压和低温时，位错之间相互作用，还与第二相质点、晶界及亚晶界相互作用，伴有金属冷作硬化，从而使金属产生强化。如果温度比 $1/2 T_m$ ，则可以使蠕变强度提高。如果温度相当高，则位错趋向滑移，攀移及硬化会降低强化效应。

除了晶内滑移外，高温下晶粒相互间的攀移也起明显的作用。根据蠕变变形机理，可以认为，蠕变强度取决于与合金化有关的晶格强度、原始状态的亚结构、滑移过程中形成的亚结构、第二相析出物及晶界结构。一般地说，固溶体合金化的程度越高，蠕变强度则越高，但不是所有元素的作用程度都是一样的。对铁基和镍基合金来讲，采用铬、钼和钨进行合金化时，可以获得最大的强化效应。

应当指出，对蠕变强度作用特别大的是弥散强化，故蠕变强度最高的是含有人量第二相的合金。蠕变时的晶界与低温变形时比较具有另一种作用。低温（如低于 $0.3T_m$ ）时，晶界对冷作硬化现象起很大的作用，故细晶材料的强度要比粗晶的优越。相反，高温时，晶界开始活动，它使位错激烈攀移及开始出现新的性质——相互攀移，结果晶界的强度变得比晶粒弱。因此，对每种合金而言，都存在一种晶界和晶粒两者强度相同的温度，该温度称为等强温度。如果钢或合金是在高于等强温度下工作，则热处理时力求获得粗大晶粒，以便削弱晶界对蠕变所起的促进作用。粗晶和细晶试样的等强温度不是在那一个严格固定的温度下观察到的，而是在一个温度范围内。此外，该温度范围的位置与变形速度有关。

应当指出，蠕变第三阶段即缓慢断裂阶段所起的特殊作用。蠕变速度在第三阶段不断地上升直至断裂。第三阶段开始的条件是形成缩颈及由此而增大了应力、再结晶、强化相溶解或聚集、形成微裂纹或形成圆形的，常为椭圆形空穴。

### 5. 应力松弛现象

根据零件的工作条件，金属不总是经受不断增加的载荷。紧固件、弹簧及某些其他零件承受载荷时或以后也不改变自己的尺寸。但曾发现，如果预先强制施加于试样两端的试验载荷时，则随时间的推移，试样内的应力永不停降。在保持原有固定直线尺寸条件下，金属与合金内机械应力自然下降的现象称为应力松弛。同样，蠕变、松弛在各种温度下都可产生，并在一系列情况下均可伴随零件的断裂破坏。松弛机理类似蠕变机理。过程的实质是给定的弹性变形最初部份地转为塑性变形。尽管表现为使塑性变形不断增长的蠕变和应力松弛现象的外表相类似，但在这些过程中塑性变形发展的条件则截然不同。

蠕变时，试样的总变形（弹性和塑性）不断增加，而应力松弛时则相反，总变形是不变的。

蠕变时的塑性变形可能大得惊人，而应力松弛时的塑性变形不会超过，即使超过也是少量地超过最初给定的弹性变形值。如果蠕变时作用于试样上的应力一直不变到断裂开始，而应力松弛时，则不断减少。后一种情况表现出变形机理的差别[1]。蠕变时，在相当了变形速度不变的部份上出现强化速度与软化速度间相平衡。位错源使它们产生固定速度；由于作用应力下降出现松弛现象时，活动位错的数目不断减少。但是，既然松弛和蠕变时的变形机

理相类似。为了获得高抗应力松弛值，也应采用相同的合金化和形成组织结构的原则。为了提高松弛稳定性，在钢和合金中必须设法得到一定的晶粒度，如同为了提高疲劳强度是一样的。当低于等强温度时，细晶粒材料的应力松弛抗力要好些，而高于等强温度时，则粗晶粒材料为好。具体的晶粒度大小由零件的工作条件来确定。对于紧固件接件，通常都在应力松弛条件下工作，故其中不允许有粗晶粒，这是因为粗晶粒金属对应力集中的敏感性增高。

## 第二章 金属与合金主要热强性能的测试方法

### 1. 蠕变试验

蠕变试验的目的是为了测定蠕变极限—应力，在此极限，一定时间间隔内的变形或蠕变速度不会超出给定值。除了蠕变极限外，经常用于研究目的是测定断裂延伸率和寿命——由试验开始到断裂瞬间总的寿命。蠕变试验可以采用多种不同的加载图：拉伸、扭转、弯曲及复杂的应力状态。为了测定标准值，可以采用给定温度下单轴向拉伸的蠕变试验。试验结果可以绘制成《时间—变形》座标的蠕变典型曲线。根据试验条件，蠕变曲线形状是多样的（图2和3）。



图2 应力对恒定温度下蠕变曲线形状的影响：

$$\sigma_1 > \sigma_4 > \sigma_3 > \sigma_2 > \sigma_1$$



图3 温度对恒定应力下蠕变曲线形状的影响：

$$T_1 < T_2 < T_3 < T_4 < T_5$$

蠕变试验可以采用圆形试样，也可采用扁平试样。后一种试样一般用于板材。由于温度对蠕变速度有强烈的影响，对测量温度的精度和温度场沿试样分布的均匀性要求都应相当高。试样的变形亦应按高精度进行测量，不得差0.001毫米。先将试样加热到给定温度，然后加载并经一定时间间隔，用变形测量仪器记录其变形量。

室温下加在试样原始截面上的恒定载荷，在给定的时间内可以引起一定量的蠕变，该载荷被称作蠕变极限。对此应始终清楚地认识到用简单的乘法加以外推是不允许的。例如，相应于1000小时、0.1%变形的蠕变极限不等于10000小时引起1%变形的蠕变极限。一定残余延伸率与其相应的蠕变极限可以写成  $\sigma_{0.1/1000}^{500}$ ，这表示在500℃，1000小时引起0.1%残余变形的应力值。

在计算和试验中采用的另一个特性是蠕变速度极限。对一定温度下蠕变速度极限应理解为室温下并引起一定蠕变速度，加在试样截面上的恒定载荷，该值是在第1部份（见图1）上测定。

蠕变速度极限也以字母  $\sigma$  表示，但在指数中指出蠕变速度，例如  $\sigma_{1 \cdot 10^{-4}\%}^{700}$  表示700℃，1小时引起  $1 \cdot 10^{-4}\%$  蠕变速度的应力。材料试验一般在使用温度下进行，也在低于或高于使

用温度下进行。这种温度通常规定以50℃成倍增加。

虽说每种合金的试验范围还包括其他的一些范围，但试验时间的长短和变形的容限都是按材料为其指定的具体结构中的使用条件决定的。

蠕变极限按试验时间为100, 300, 500, 1000小时或更长。允许0.1至1%范围内的延伸来测定。

按蠕变速度测定蠕变极限时，总的试验延续时间为2000—3000小时，其条件是蠕变曲线上直线部份Ⅱ（见图1）占的时间间隔不应少于500小时。在选择材料时，允许蠕变速度的选择原则是蠕变总的变形不应破坏构件在规定寿命内的工作能力。此时，尚应考虑另一个因素，即在蠕变过程中金属塑性的储备在不断下降，总变形的容限应当在零件寿命结束时，金属还应保留一定的塑性值。

实际上通常采用 $1 \cdot 10^{-5}$ 至 $1 \cdot 10^{-6}\%$ /小时的蠕变速度，这相当于 $1 \cdot 10^{-6}$ 至 $1 \cdot 10^{-7}$ 毫米/（毫米·小时）的延伸。

以数学公式描述蠕变时变形与应力的关系，可采用经验公式，该温度的蠕变速度可按下式求得。

$$\dot{\epsilon} = K_{\sigma, T} (\sigma / \sigma_0)$$

式中：K—常数； $\sigma_0$ —初始应力； $\sigma$ —测量瞬间的真实应力。

非稳定蠕变阶段，可令人满意地以 $\epsilon = \sigma^m$ 指数函数形式表示，式中 $\sigma$ ， $m$ ——该合金和温度的恒定值。指数 $m$ 变动范围由1/2到1/3。

非稳定蠕变速度与时间关系为： $\epsilon = A t^n$ ，式中A， $n$ ——该合金和温度的恒定值。常数 $n$ 值的变化范围由0到2。

一定温度的蠕变速度与应力关系，可根据 $\dot{\epsilon} = R h \sigma^h / A$ 表示，式中A， $h$ ， $R$ ， $s$ ——给定温度下的恒定值； $\sigma$ ——真实应力。

如果指定变形 $\epsilon$ 的允许值，则与其有关的蠕变稳定阶段的应力也可按经验式 $\sigma = A \sigma^p$ 测定，式中A， $p$ ——常数。由于公式是经验式，故对每一具体合金和试验条件，每次都应测定其常数。

## 2. 持久强度试验

如果蠕变极限的测定与研究蠕变第Ⅰ和Ⅱ阶段（试样尚未达到断裂）的蠕变性质有关的话，那么持久强度的测定则与蠕变的各个阶段均有关，而且试样必须进行到断裂为止。综合蠕变和持久强度试验所获得的有关材料性能的数据，以评定材料的热强性能。

如蠕变试验，除了测定强度性能外，还要测定塑性——相对延伸率和相对收缩率。与蠕变试验的区别是持久强度的测定是在大应力和大蠕变速度下进行，计算试样在载荷上停留点的时间，由加载瞬间开始计算到断裂时间为止，对持久强度概念应理解为：室温时加在试样原始截面上的一种载荷，并能使试样在其载荷的不断作用下，在给定的时间内断裂。由于断裂时间和应力受 $\tau = A \sigma^p$ 公式的制约，式中A和 $p$ ——一对数座标上的经验系数，故持久强度极限与试验时间的关系呈直线（图4，曲线1）。其

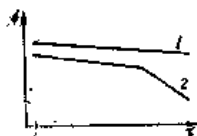


图4 持久强度与试验时间的关系