

汽轮机强度

〔苏〕Л. А. 舒本柯-舒宾 主编

Books on Engineering Industry and Technics

Books pour l'Industrie Mécanique et Technique

きかいこうぎょうぎじゅつとしょ

Books for Maschinenbauindustrie und Technologie

Технический Производственный и Технике

机械工业出版社

本书介绍现代汽轮机基本零件的强度问题。书中系统叙述了汽轮机的各种基本零件（动叶片、叶轮、转子、隔板、汽缸等等）的实用计算方法，并附有较详尽的计算公式和计算表格；有专门章节讨论许用应力的选取和介绍汽轮机常用金属材料的性能和检查方法。

本书可供从事汽轮机设计、计算和运行的科研人员、工程技术人员使用，也可供大专院校有关专业的师生参考。

ПРОЧНОСТЬ ПАРОВЫХ ТУРБИН

Л. А. ШУБЕНКО-ШУБИНА

Издание второе,

переработанное и дополненное

Москва «МАШИНОСТРОЕНИЕ», 1973

* * *

汽轮机强度

〔苏〕 Л. А. 舒本科-舒宾 主编

卢沛璠 译 杨光海 校

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印张 23 · 字数 563 千字

1980年7月北京第一版·1980年7月北京第一次印刷

印数 00,001—3,000 · 定价 2.35 元

*

统一书号：15033·4721

目 录

第一章 汽轮机制造用金属材料的基本性能和许用应力	1
1.1 汽轮机制造用金属材料	1
1.2 短时机械性能	4
1.3 蠕变、持久强度和松弛	7
1.4 机械疲劳和热疲劳	11
1.5 腐蚀和水蚀	14
1.6 许用应力	16
第二章 动叶片的强度	20
2.1 动叶片的结构	20
2.2 动叶片的强度计算	21
2.3 动叶片的拉伸计算	22
2.4 蒸汽作用力所引起的单只叶片弯曲的计算	27
2.5 动叶片的安装计算	31
2.6 叶片截面的几何特性计算	37
2.7 叶片的蠕变计算	41
2.8 末级动叶片的设计和强度	45
2.9 动叶片根部连接的结构和强度计算	59
2.10 动叶片连接件的计算	75
2.11 动叶片、连接件和锁块的制造用金属材料 and 许用应力	86
第三章 动叶片的振动	90
3.1 叶片固有振动的类型	90
3.2 根部固定弹性、温度和离心力对振动频率的影响	92
3.3 激振力和调频措施	93
3.4 叶片自由振动的方程	96
3.5 扭曲度较大的变截面叶片的弯曲振动	98
3.6 扭曲度较小的变截面叶片的切向振动	116
3.7 等截面叶片的切向振动	137
3.8 变截面叶片的扭转振动	142
3.9 等截面叶片的扭转振动	158
第四章 叶轮、整锻转子和焊接转子	160
4.1 转子结构的选择	160
4.2 叶轮设计	160
4.3 不均匀受热的旋转叶轮应力状态的计算	162
4.4 有中心孔的薄叶轮的计算	166
4.5 叶轮红套在轴上的计算	171
4.6 减少套装叶轮应力的结构措施	174
4.7 无中心孔的叶轮的计算	175

4.8	叶轮的应力计算	175
4.9	汽轮机叶轮应力状态问题的求解 (作为弹性理论的空间轴对称问题来处理)	177
4.10	整锻转子的强度计算	179
4.11	焊接转子的计算	184
4.12	在蠕变条件下工作的叶轮的应力计算	190
4.13	轮系轴向振动	196
4.14	叶轮、整锻转子、焊接转子和轴的制造用金属材料及许用应力	206
第五章	轴的临界角速度和轴的扭转振动	216
5.1	临界角速度的概念	216
5.2	有一只叶轮的无重轴的临界角速度	217
5.3	有均布质量的等截面轴的临界角速度	219
5.4	计算多叶轮转子的临界角速度的能量法 (瑞利法)	221
5.5	计算两支承变刚度轴的临界角速度的分析方法	226
5.6	考虑到叶轮回转效应的轴临界角速度的计算	232
5.7	在柔性支承上的轴的振动	236
5.8	多支承转子的临界角速度的计算	241
5.9	发电机突然短路时的汽轮机轴扭转振动的计算	245
第六章	隔板和喷嘴装置	256
6.1	隔板结构及其强度计算的一般原则	256
6.2	隔板计算的史密斯法和华尔法	257
6.3	隔板支承边界的柔度的计算 [43]	265
6.4	静叶片的斜弯曲	271
6.5	哈尔科夫汽轮机厂 (ХТГЗ) 的隔板计算方法	275
6.6	中央锅炉透平研究所 (ЦКТИ) 的隔板计算方法	288
6.7	隔板的蠕变	291
6.8	隔板试验及其结果	291
6.9	喷嘴装置的计算	293
6.10	隔板和导向装置制造用金属材料及许用应力	296
第七章	汽缸、法兰和隔板套	301
7.1	汽缸的强度计算	301
7.2	法兰连接的密封性和双头螺栓紧力的确定	303
7.3	双头螺栓 (螺栓) 的附加应力	310
7.4	汽缸法兰连接的双头螺栓的强度估计	312
7.5	汽缸法兰连接的双头螺栓和螺栓的拧紧	314
7.6	汽缸的较精确计算	318
7.7	温度应力对汽轮机汽缸零件强度的影响	320
7.8	隔板套和端汽封	321
7.9	蒸汽管道与汽轮机汽缸相连的接管的计算	328
7.10	管道的法兰连接的计算	333
7.11	阀壳、汽缸、隔板套和紧固件制造用金属材料及许用应力	335
第八章	锻件、铸件的金属强度和试验方法	341
8.1	锻件、模锻件和轧件	341

8.2 铸钢件	344
8.3 铸铁件	345
8.4 焊接结构的金属	346
8.5 高温下的机械性能(短期)试验	347
8.6 宏观研究	348
8.7 叶轮和转子的残余应力	348
8.8 持久强度、蠕变和松弛试验	349
8.9 疲劳试验	351
8.10 X射线检查法和X射线照相术	352
8.11 γ 射线检查	353
8.12 超声波探伤法	354

第一章 汽轮机制造用金属材料的基本性能和许用应力

1.1 汽轮机制造用金属材料

安装在热力发电站和原子能发电站的现代大功率汽轮机的安全运转，很大程度上依赖于汽轮机零部件的金属材料的性能。

汽轮机的安全运转是由下面这些基本因素所决定的：金属材料的良好性能、精确的强度计算（为实验证实的）和遵守运行规程。金属材料和零件的非破坏性缺陷检查方面的最新成就，以及运行期间零件金属材料性能的经常检查，也在很大程度上促进了汽轮机的安全运转。

汽轮机大部分的零件是由铁基合金制造的：钢和铸铁；汽轮机小部分的零件是由镍基合金和钛基合金制造的。汽轮机基本零件所采用的钢种，其含碳量通常不超过0.5%〔117, 143〕。

依含碳量多少，铸铁和钢的性能会有很大变化。但是，甚至是普通碳钢，它也是成分复杂的合金；仅只为了简化金属性能的分析 and 确定它在熔化、固化以及进一步冷却（或加热）的过程中的变化规律，才把它看作是铁-碳二元系。

下面我们来介绍铁-碳系统的各种基本结构名称和性能（按照波徐华尔（А. А. Бочвар）的叙述方法）：

铁素体——在 α -铁或 δ -铁中的碳固溶体；

渗碳体——铁的碳化物 Fe_3C （精确来说应是在铁的碳化物中的铁固溶体）；

奥氏体——在 γ -铁中的碳固溶体；

珠光体——在 α -铁中的碳固溶体和铁的碳化物的共析混合物；

马氏体——在 α -铁中的碳固溶体〔11, 27, 28, 95〕。

铁素体是塑性材料，在退火状态中有很大的延伸率（可达40%），而且质地很软（HB65~130）。在室温情况下，铁素体的碳溶解度是很小的，不超过千分之几。渗碳体是脆性和很硬的材料（HB800）。奥氏体是塑性和软的材料（ $\delta_s = 40 \sim 50\%$ 或甚至更大一些）。奥氏体与铁素体相比，具有较大的密度，并且有导热性较差和非磁性等特性。石墨是软和脆的材料，而且十分难熔，甚至在 $t = 3500^\circ\text{C}$ 时它也不会熔化。石墨的晶体很容易裂开。只要铁素体中的含碳量超过碳的极限溶解度时，就会出现渗碳体。

从汽轮机基本零件用钢的本身结构来看，它可以分为四大类：珠光体，铁素体，马氏体和奥氏体。

属于珠光体的钢种有碳钢、铬钼钢、铬钼钒钢和其他类似的钢种（包括大多数的结构钢〔11, 27, 64〕），这种类型的钢在缓慢冷却过程中有如下的结构：带有珠光体的铁素体，纯珠光体和带有渗碳体的珠光体，这将视含碳量多少而定。

铁素体类型钢种，例如高铬钢，有由铁素体和碳化物组成的结构。当含铬量足够高时，合金不会有相变，亦即在任一温度下合金的结构仍旧保持在 α -铁状态（铁素体状态）中，

在热处理和不同的冷却速度下亦不会发生变化。属于这种类型的钢种有 1X13 和 2X13 等。

0X13, 1X13, 2X13, 3X13 等高铬钢的结构和性能, 很大程度上与碳和铬的相对含量有关。例如, 低含碳量 (不到 0.1%) 和含铬量低于 15% 的钢种, 在冷却过程中有马氏体结构 [117, 143]。

镍或锰含量足够高的高合金钢是属于奥氏体类型的钢种, 它甚至在 20°C 时仍能保持稳定的奥氏体结构。

碳钢的缺点是它的淬硬性差 (大型零件几乎不可能在零件截面所有深度淬硬)。此外, 碳钢易受潮湿空气腐蚀, 并且在高温下处于蒸汽介质中会剧烈氧化。

像钼、钒、铬、钨、镍和钛等的合金元素, 会对钢和铸铁的性能有很大影响。在汽轮机制造中广泛应用含有上述成分并经过特殊热处理的钢。

钼是最重要的合金成分之一, 它对钢的耐热性和热脆性、回火脆性方面有良好影响。珠光体钢的含钼量很少超过 1.5%, 只有奥氏体钢和镍 (或其他元素) 基合金才会有较高的含钼量。钼对钢的晶粒度有良好影响: 能缩小焊接时可能存在的淬硬区; 正确选择热处理方法能提高再结晶温度, 这就可提高蠕变强度。当作为结构成分之一的珠光体为片状时 [11, 27, 28, 64, 95, 105], 钼钢具有最好的性能。

在温度 (高于 500°C) 的长期作用影响下, 珠光体中的渗碳体颗粒就会凝聚, 并呈球状, 这样就会使钢的蠕变极限降低好几倍。所以, 对于汽轮机零件来说, 应在钼钢中加入铬元素, 以防止在珠光体结构中的渗碳体球化。

在汽轮机制造中广泛采用铬钼钢 (15XM 和 20XM) 和铬钼钒钢 (例如热稳定的铁素体-珠光体钢 20XMΦЛ), 这些钢种能在 540°C 以下长期工作。它们没有机械时效和热脆性倾向, 并且在非常长时间地处于工作温度下仍具有稳定的机械性能。这些钢种的特点是, 必须严格调节热处理时铸件的冷却速度, 以避免出现室温下韧性低。

铸造和可变形状态的铬钼钒钢 15X1M1Φ, 被广泛应用于工作温度在 570°C 以下的汽轮机零件和蒸汽导管中。

由这些钢种制成的铸件和锻件的机械性能, 很大程度上取决于正火时的冷却均匀性和冷却速度。为了制造特别重要的零件 (例如汽轮机汽缸、配汽阀、保安阀、隔板体和外缘), 金属材料中有害杂质和气体 (特别是硫、磷、铝和铜) 的含量应该低。

对于工作在 540~550°C 温度范围内的整锻转子来说, 最广泛采用的材料是铬钼钒钢 P2MA 和铬钼钒钨钢 20X3MBΦ (ЭИ415)。这是稳定的珠光体热强钢。

焊接转子的轮盘采用珠光体合金钢 34XM1A 材料, 蒸汽导管采用 12X1MΦ 钢材料 [64, 117]。

热强钢和耐热钢有较高的持久强度极限, 而且对于抵抗应力松弛有较好的稳定性, 所以可以作为紧固件的材料。

低压缸的受载较大的叶轮和整锻转子, 可采用珠光体铬镍钼钢 34XH3MA 和 34XH1MA 材料, 也可采用铬镍钼钒钢 35XH1M2ΦA 和 38XH3MΦA 材料。提高镍的含量能够使锻件有较好的淬透性 (这点对于有较大轮毂厚度的叶轮和有较大直径的整锻转子来说是特别重要的), 而且能保证截面的机械性能的均匀性和提高韧性。这些钢种若有适中的屈服极限数值, 那么它们对切口不大敏感, 并且有较大的塑性储备。但是, 由于这些钢种容易形成白点, 所

以必须力求在真空中浇成钢锭。与此同时，我们要求在酸性平炉中熔炼，并借酸洗严格控制。减少硫的含量并努力防止偏析线的发展，对于这些钢种来说是很重要的（见第八章）。

工作温度在 580°C 以下的动叶片和静叶片，用铬不锈钢材料来制造；工作温度在 $580\sim 680^{\circ}\text{C}$ 的叶片采用铬镍奥氏体不锈钢材料；工作温度在 $650\sim 680^{\circ}\text{C}$ 以上、或者工作温度稍低但受载较大的叶片，采用镍基合金材料。

铬不锈钢是所有不锈钢种类中加工性能最好而且价格最便宜的一种。

铬含量 $10\sim 17\%$ 的铬不锈钢在淬火时具有马氏体型结构。含铬量 12% 并且有复杂的合金成分（含有钼、钒、钨和其他元素）的马氏体铬不锈钢与奥氏体钢 1X18H9T 相比，有较好的持久和短期的强度性能（在温度 600°C 以下）。含碳量小于 0.09% 和含铬量大于 15% 的钢种具有铁素体结构。

含碳量较小的钢（0X13，1X13）可有一定数量的游离铁素体，它们对钢的机械性能会有不良影响。所以，要对叶片的钢材的化学成分（特别是碳和铬）有很严格的要求。减少有害杂质的含量是非常重要的。为了大大降低发纹数量，叶片装置（特别是动叶片）希望采用电渣重熔或真空电弧重熔法生产的钢材。

有如下化学成分的低碳铬钢具有最佳的机械性能：铬含量 $12.5\sim 14.5\%$ ，硅含量不大于 0.5% ，锰含量 $0.2\sim 0.6\%$ ，镍含量不大于 0.6% ，硫含量不大于 0.03% ，磷含量不大于 0.035% [117, 143]。

在室温情况下，钢 1X13 与钢 2X13 相比，有较小的强度性能：前者的屈服极限为 45公斤力/毫米^2 ，后者为 50公斤力/毫米^2 。但是，钢 1X13 比钢 2X13 有较高的持久强度极限和蠕变极限。它的空气淬硬倾向要小得多，这对用银焊连接件加固的叶片尤为重要。钢 1X13 通常不大会有热脆性和回火脆性。但是，它在温度 $450\sim 550^{\circ}\text{C}$ 下回火时，会降低冲击韧性和耐腐蚀性。钢 1X13 对应力集中不敏感，有较高的阻尼性质：它的振动衰减率比其他铬钢要高。

汽缸和喷嘴装置的各个零件可采用耐热铬不锈钢 1X11MΦБЛ (X11ЛA) 和 1X12BHMΦЛ (X11ЛB)，此时各零件能十分可靠地工作。

为了制造在温度高于 580°C 情况下工作的动叶片和静叶片，我们可采用奥氏体铬镍不锈钢。这些钢通常含有大量的镍，热处理和机械加工中工艺性能较差。由于这些钢材有低的热传导系数，所以它们抵抗热冲击的性能比铬钢差。奥氏体钢的热膨胀系数比铬钢大得多。

诸如 ХН80ТБЮА (ЭИ607А)，ХН65В9М4ЮТ (ЭИ893)，ХН70ВМЮТ (ЭИ765) 一类镍基合金，有不高的线膨胀系数，只略大于珠光体钢。其热传导系数是低的。镍基合金对热处理规程是很敏感的。它们经常有大小不同的金属晶粒度，这会大大降低零件的耐用性。镍基合金在温度 $500\sim 600^{\circ}\text{C}$ 下能很好抵抗应力松弛，所以它们经常用来制造重要的紧固件、弹簧等等。应该注意到，某些镍基合金在一定温度范围内对应力集中的敏感性会大大提高。

上述的镍基合金可用来制造工作温度直至 700°C 的汽轮机动叶片（工作寿命为 $50000\sim 100000$ 小时）[117]。

钛基合金可用于大功率汽轮机低压缸末级动叶片。合金元素是铝、铬、钼和锡。末级叶片的最合适的是含铝约 $4\sim 5\%$ 的钛合金。但是，我们也可采用含其他合金元素的合金。

钛合金的比强度是很大的：在较低的屈服极限（等于 65公斤力/毫米^2 ）情况下，合金密度不过 4.51克/厘米^3 。很显然，钛合金比铬不锈钢轻 $40\sim 45\%$ ，而它们的屈服极限水平相同 [24, 117]。

钛基合金在蒸汽介质中能很出色地抵抗腐蚀。在抗冲蚀性能方面，也超过铬不锈钢。其第一类弹性模量较低（10000~13000 公斤力/毫米²）。振动衰减率比钢 1X13, 1X11MΦ 低得多。

钛合金的屈服极限与强度极限很相近，这就给压力加工带来某些困难。应该考虑到，模锻件表面的气体饱和层深度可达 5 毫米，所以机械加工时的余量应不少于 8~10 毫米。钛合金对应力集中是敏感的。

钛合金是没有磁性的，这给检查叶片成品及其表面带来较大困难。钛合金的疲劳极限比钢高，并与零件的表面状态有关，例如，磨光试样的疲劳极限为 25 公斤力/毫米²，抛光试样的疲劳极限为 40 公斤力/毫米²。

因为钛合金甚至在室温情况下，它的强度性能也会随时间而下降，所以在叶片强度计算中必须考虑到这一点。此外，当温度提高时，钛合金的屈服极限下降会比铬不锈钢厉害。由于末级动叶片长期工作在温度 25~40℃ 范围内，但在无负载运转时温度可达 200℃，所以在叶片计算时也必须考虑到屈服极限下降这一事实。

最广泛采用的钛合金是 BT5 和 BT3-1。钛合金 BT5 可采用氩弧焊、埋弧焊和接触焊等方法进行很好的焊接。

1.2 短时机械性能

用来确定金属材料的强度、塑性和韧性等性质的基本性能有：比例极限 $\sigma_{0.2}$ 、弹性极限 σ_e 、屈服极限 $\sigma_{0.2}$ （或 σ_s ）、短时强度（或强度极限） σ_b 、断裂时的延伸率 δ 、断裂时的横截面收缩率（收缩率） ψ 、冲击韧性 α_k 、第一类弹性模量（或拉伸弹性模量） E 、硬度（布氏硬度、洛氏硬度或其他类型的硬度）、对称循环下的疲劳极限 σ_{-1} 和冷弯角 α° 。

像持久强度极限和蠕变极限这样的性能，只是在高温工作的汽轮机零件的强度计算中才用到。钛基合金甚至在室温情况下也具有《滑动》性质（蠕变）。对于有较大工作应力的零件（末级叶片）来说，这种蠕变更显著。

卸荷之后会完全消失的纯弹性变形是不存在的。变形时所产生的应力的某一部分在卸荷后仍然存在，即使当初应力的数值小于弹性极限时，也是这样。但是，这剩余的弹性应力的一部分会随时间逐渐消失，其余的大部分可用加热的方法使其消失。这个现象叫做弹性后效。所以，弹性极限这个概念是人为约定的[108, 140, 147]。剩余变形量在 0.001~0.03% 范围内。

比例极限同样也是一个纯粹人为约定的机械性能。在试样的拉伸曲线中（图1），是不存在从直线部分过渡到曲线部分的任何的过渡点的[6, 108, 123, 140, 147]。

屈服极限是最重要的强度机械性能之一。只在为数不多的金属材料（例如，退火态碳钢）的拉伸曲线中，才有明显的屈服台阶存在。我们经常可利用锻造、淬火和加进特殊的成分等办法，来消除给定金属材料的拉伸曲线中的太突出的台阶。

从物理意义来看，合金的屈服极限 σ_s 是指这样一个应力：在这个应力作用下该合金的试

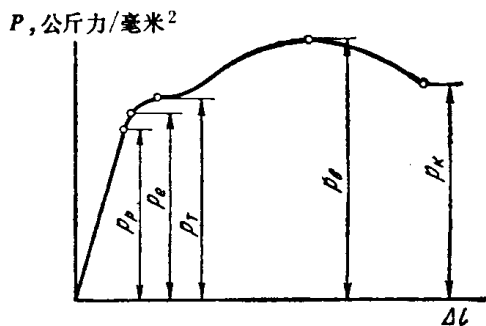


图1 退火态低碳钢的拉伸曲线

样会发生《流动》，亦即在无显著增加载荷情况下，该试样会发生变形。如果在拉伸图中不存在屈服平台线（在试验机的指示器中将示出载荷不变或略有下降），我们可用如下方法确定某一应力数值为人为约定的屈服极限 $\sigma_{0.2}$ ：在该应力作用下，试样首次得到0.2%的剩余变形〔95, 147〕。

强度极限也是人为约定的概念，这是因为确定强度极限时，我们不是取断裂时的试样细颈的真正截面积，而是取试样的原始截面积。但是，我们都知道，在真实零件中的应力数值也是用最大载荷与零件原始截面积之比来求的。在十分脆性的金属材料中，断裂时的细颈截面积与原来的试样的原始截面积是差不多的，所以强度极限值与真实强度极限是很相近的。试样断裂时的载荷与断裂后试样的最小截面积（细颈面积）之比值，叫做真实的或有效的强度极限（有时称为断裂强度） S_t 。通常，对于工程上所采用的合金来说，强度极限值不能哪怕是近似地作为真实应力和真实强度的正确表述〔6, 95, 123, 147〕。

第一类的弹性模量（杨氏模量）也可叫做法向弹性模量，此量在数值上等于应力和对应的弹性延伸率之比值：

$$E = \frac{\sigma}{\frac{\Delta l}{l}}$$

式中 σ ——试样的应力；
 Δl ——试样的绝对伸长；
 l ——试样的初始长度。

应力和延伸率数值，都是在拉伸曲线的弹性段范围内得到的。

当我们改变钢材的机械性能和结构时，第一类弹性模量的数值是几乎不变的。通过热处理和合金化的方法是很难提高此弹性模量的数值的〔147〕。冷压能使晶格序向，所以它能略微提高法向弹性模量。第一类弹性模量的数值，正比于金属熔点温度的平方，反比于金属原子体积的平方。

硬度（精确说是宏观硬度）表征金属抵抗另一金属压入的性质，因为硬度和强度极限之间存在某一确定关系，所以硬度亦可表征金属的强度程度。此时我们要注意到，通常确定宏观硬度的方法（布氏硬度，洛氏硬度等等）都不考虑微孔和晶间夹层的作用。当存在大量这类缺陷时，硬度和强度极限之间的关系就会遭受破坏。

金属的塑性，亦即大多数工程上采用的金属（合金）在载荷作用下能塑性变形的性质，在一般情况下可用试样断裂时剩余的延伸率 δ 和截面（原始）面积收缩率 ψ 来表征。 δ 和 ψ 的数值用百分数来表示。

延伸率是由试样断裂时的剩余伸长与试样的计算长度的比值（表示成百分数）来确定。延伸率不可能完善地表征金属的塑性〔95, 123, 147〕，这是因为在试样断裂的最后阶段（在拉伸图中从达到最大值的时刻到试样断裂的时刻）中得到的伸长数值具有局部性质，并且伸长只集中出现在试样某一部分。在确定延伸率的数值时，我们要考虑到试样的计算长度与试样直径的比值，这是因为在其他条件相同的情况下，延伸率的数值将与这个比值有关。

在汽轮机零件的金属材料试验时，我们将采用这样的试样：试样的计算长度等于试样直径的五倍（五倍试样）。如果不可能制造出五倍试样，那么我们可采用倍数较小的试样。在采用五倍试样的情况下，延伸率用 δ_5 表示。在用来确定金属变形能力方面，横截面积收缩率

ψ 将比延伸率精确得多。收缩率 ψ 是用试样断裂时细颈的最小截面积与试样原来横截面积之比值来表示。收缩率可用来确定单向拉伸时的金属材料的极限展性。

对于塑性金属材料来说，延伸率不能足够精确表征金属的展性，收缩率能很精确表征该金属材料的展性程度。但是，对于脆性金属材料来说，延伸率比收缩率更能精确表征金属的塑性。

金属的韧性是指当逐渐增加塑性变形直至金属破坏为止时的金属吸收机械能的能力。冲击弯曲载荷试验时，在有削弱切口的试样横截面单位面积上使试样破坏所耗费的功，叫做比冲击韧性 α_k 。这个特性对金属结构状态的微小变化很敏感，如果金属内部晶间或晶粒内表面有脆性夹层、或者存在脆性片状杂质（例如石墨）和晶粒界面有易熔成分的极少量熔化的话，那么冲击韧性就会减少（有时会减少好几倍）。

一些在 2000 倍的光学显微镜中都不能观察到（有时甚至在电子显微镜内才能勉强观察到）的合金结构的微小变化，也会对冲击韧性的数值产生影响。

如果用来制造汽轮机基本零件的钢和合金，经过不同程度挤压轧制变形，然后用被挤压的金属制造试样，那么我们可得到如下的规律性：屈服极限、强度极限和硬度都会增加；而延伸率、收缩率和韧性都会减少。上述现象是因为个别晶粒的规则结构受到破坏和晶粒细化使金属大大强化而产生的。

韧性破坏的特点是它的整个过程可分为两个阶段：塑性变形和本身的破坏。试验结果指出 [106, 122, 127]，对于同一种钢材来说，当试样和试验条件（温度和介质等）一样时，有较高冲击韧性的试样和有较低冲击韧性的试样，有相同的断口颗粒尺寸和颜色光泽。电子显微镜的研究指出，这两类的试样都有塑性和脆性的破坏区域。但是，在有较低冲击韧性数值的试样的断口处，脆性破坏区将占 50% 以上的面积。晶粒的不均匀性也会降低冲击韧性的数值。

现在，我们已广泛采用“脆性转变温度”这个术语来估计合金的脆性破坏倾向（这个温度也可叫做合金从韧性状态过渡到脆性状态的临界温度）。转变温度的降低会大大加剧金属脆性破坏程度（与转变点下降程度有关）。这个温度可用冲击试样断口存在 50% 纤维结构（亦即 50% 的纤维）来确定。

转变温度与真实晶粒尺寸、晶粒微结构、碳（硫、磷）的局部偏析和其他一些因素有关 [122]；特别危险的是硫的偏析线存在。真实晶粒尺寸愈大，硫的偏析愈加厉害，这会提高从韧性状态过渡到脆性的临界温度。在其他条件相同的情况下，对于每一种牌号的钢材的临界转变温度，都会随大型锻件（转子、轴）的外部到中心的方向增加；例如，对于由 35XH3MΦA 钢制成的大型毛坯来说，从韧性状态过渡到脆性状态的临界温度，在毛坯中心处就会提高 30°C；对于叶轮（轮毂尺寸为 600 毫米，轮缘尺寸为 200 毫米）来说，临界转变温度在轮毂处为 38°C，在轮缘处为 0°C（此时轮毂和轮缘的微观结构是一致的）。一般来说，增加零件（由常用的钢种制成）的横向尺寸，会对脆性转变的温度有不良影响（激烈增加）。

当金属或合金材料有脆性倾向时，材料对应力集中特别敏感，此时尺寸效应很容易出现。研究表明 [106, 107, 122, 167]：脆性材料的结构在中等应力下，有时在远低于屈服极限的应力作用下便会发生破坏；当提高零件的金属材料的强度特性时，会使零件更易发生脆性破坏。例如，叶轮模型试验研究结果表明：在其他条件相同的情况下，减少叶轮横截面尺寸到 1.8 分之一，就会使结构（实际）强度增加到 1.6 倍。

弯曲试验是重要的机械特性试验之一，它特别能显示金属的纯度（见第八章）。

能量耗散程度是叶片材料的重要特性。衰减振动的振幅的消减可用所谓振动的对数衰减率来表征，它等于衰减振动中相隔一个周期的两相邻振幅之比的自然对数。

各种广泛采用的叶片材料的阻尼性能与一系列因素有关。应该指出，铬不锈钢 1X13 和 2X13 有很好的阻尼性能，1X11MΦ 钢亦有良好的阻尼性能；1X12BHMΦ 钢虽然差一些，但阻尼性能还好，上面这些结论对整个叶片工作温度范围都适用。我们选择奥氏体钢和镍基、钛基合金作动叶片材料时，应预先知道这些材料在整个工作温度范围内反映能量耗散性能的数据。

现在，我们已经有了在简单拉伸或压缩（亦即单向应力状态）情况下表征金属强度和塑性性能的非常大量的实验数据。汽轮机制造中所采用的材料的强度和塑性性能数据，大多数是从试样拉伸试验中得到的。

在汽轮机基本零件计算中，经常遇到复杂的应力状态情况：二向和三向应力状态。例如，如果叶轮有较短的轮毂（或者没有轮毂）的话，那么可应用平面应力状态规律计算叶轮应力；但是，当叶轮有较长的轮毂的话（轮毂长度大于 300 毫米），那就要用三向应力状态理论计算叶轮应力了。

三向应力状态下的材料拉伸试验是很难进行的，特别是确定屈服极限和强度极限值更十分困难。实际上我们是不能实现各个方向都均匀拉伸的试验；但是，实验确定平面应力状态是完全可能的，类似的试验曾反复多次进行过，并且所得到的结果与第四强度理论（形变能量理论）很好符合。其中薄壁圆筒的试验就是一个典型的例子，当圆筒承受内压和轴向拉伸时便在壁上出现应力；试验确定在各种不同的主应力比值情况下，材料的屈服极限数值。我们应注意到，破坏的开始（裂纹出现）可作为脆性材料（例如灰铸铁 CЧ21-40 和其他一些材料）制出的零件计算时的强度判则。对于汽轮机制造中广泛采用的钢种（例如，1X13，1X12BHMΦ，1X11MΦ，20X3MBΦ）制出的零件的计算来说，大量残余变形是强度的判则。

在复杂应力状态的情况下，我们利用如下的假设，就可以从屈服极限和强度极限的数值（单向应力状态试验得到的）确定材料的强度判则：预先假定哪一因素（例如最大法应力或最大切应力）对材料强度起主要作用；这些假设就叫做强度理论。

对于塑性材料来说，试验结果验证了形变能量理论，并指出此理论比其他理论能更好反映屈服应力情况〔6，22，104，108，129，140〕。

1.3 蠕变、持久强度和松弛

在不变的应力情况下，金属材料会发生连续和缓慢的塑性变形（亦即会出现连续增长的残余变形），这个性质叫做蠕变。在蠕变过程中，这个不变的应力数值通常远低于同一温度下的屈服极限。对于汽轮机基本零件的材料来说，蠕变过程只在高温情况下发生。每一种牌号的钢材，都有特定的产生蠕变的温度。虽然钛合金有较高的熔点温度，但是它在室温情况下也显示出蠕变倾向〔24，117〕。

“蠕变”金属的尺寸变化会引起微观缺陷和微观裂纹，并且在长时间过程中不断发展；在这些裂纹附近出现应力集中，并削弱试样的横截面，最后试样便发生断裂〔47，54〕。

由于蠕变而发生材料破坏的特点是变形的局限性，以及由此而来的伸长量小（尽管在高温情况下）；后者通常只提高短时工作的塑性（亦即延伸率和收缩率这样的特性）。在蠕变过程中塑性不断降低，断裂时伸长值通常是不大的。

因蠕变而引起的材料破坏，可以发生在晶粒体内或晶粒界面上：通常观察到的是混合型式的破坏。在同一材料中可观察到不同形式的破坏；在高温、小应力和小变形速度的情况下，破坏是发生在晶粒界面上；在工作温度较低（相对该材料来说）、应力和变形速度较大的情况下，材料破坏是发生在晶粒体内；在上述两极端情况之间，材料将发生混合型式的破坏[47, 92, 105, 111]。

在定常应力情况下，变形的时间变化可用“经典”的蠕变曲线来描述（图2）。

蠕变曲线通常分为四段。初始段 OB 是当加载时瞬时得到的，这段称为初始段或瞬时变形段。如果应力大于该材料在该温度下的弹性极限的话，那么变形 OB 是由弹性变形 OB 和塑性变形 BB 两部分组成；当应力解除后，变形 OB 就会消失；应该指出：变形 OB 完全不能表征该材料的蠕变过程。

曲线段 BF 是蠕变起始段，也称为第一阶段；在这个阶段中，变形增长率逐渐减少。蠕变曲线 FD 段表征蠕变过程的第二阶段；在这个阶段中，强化过程和弱化过程大致相互补偿；由于变速率不变，对于汽轮机所广泛采用的材料来说，直线段（ FD ）可在几万工作小时内都观察到。

蠕变曲线 DK 段表征蠕变第三阶段（亦即最后阶段）；在这阶段中将发生两个过程：第一过程与金属材料蠕变有关，第二过程与材料破坏有关； DE 段表征第一过程，变形速度增加是这蠕变第三阶段的特点； EK 段表征第二过程，此时由于材料激烈破坏使塑性变形大为增长，裂纹尺寸终于达到临界值。在 DE 段过程中，金属材料还能有效地工作。

给定材料的蠕变曲线与应力值和温度有关，因应力和温度数值不同，蠕变曲线将有很不同的形状（见第八章）。在很小应力的情况下，蠕变曲线的第三阶段有时不会出现；在高应力情况下，蠕变曲线的第二阶段实际上常常不会出现，材料破坏现象会在第一阶段之后立即出现。一系列零件在运行状态下会产生较高应力，这样就会使这些零件在不太高温下，出现蠕变和松弛现象（与有较小应力数值的结构相比而言）。例如，对于由碳钢制成的结构来说，当应力为 16 公斤力/毫米² 时，蠕变现象直到 350°C 时还不会出现；而对于冷拉的高碳钢来说，当应力为 94 公斤力/毫米² 时，在 150°C 时就能观察到蠕变现象。

描述蠕变过程的方程可用满足实验数据的经验公式表述，也可由蠕变机理假设数学推导出来，后者的处理方法必须经受实验考核。

钢材在给定温度下的蠕变极限是指这样的应力数值：在该应力作用下，在给定时间内连续增加的残余变形达到预先规定的数值；很显然，蠕变极限是一个人为约定的量。在其他条件（温度、钢材牌号和总残余变形值）相同的情况下，蠕变极限会随所规定的时间而变化；同样准确地，也可以改变总的变形值，而时间则不变。在汽轮机的零件计算中，蠕变极限是取 100000 小时后引起变形为 1% 的应力数值；这相应于蠕变速度为 10^{-7} 毫米/毫米·小时，或者相应为 10^{-5} %/小时。必须经常考虑到这个情况：在 100000 小时长期承载过程中，镍铝钢、镍铝钒钢和其他类似钢的破坏会在较小的总蠕变变形值（2~4%）就开始；对于碳钢来说，这个变

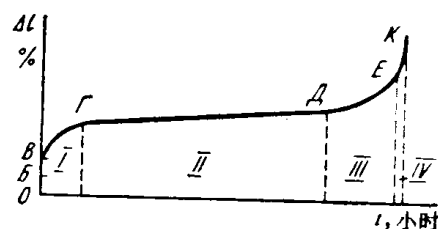


图2 在变形-时间座标系统下的（理想化的）蠕变曲线

形达到 10% [12, 47, 105]。

在蠕变条件下材料周期性加热和冷却，会引起蠕变极限的降低。在能引起数量级为 10^{-7} 毫米/毫米·小时的蠕变速度的小应力作用下，温度的循环性变化能显著增加蠕变速度，这个周期变化将加强时效过程；温度周期变化能降低蠕变极限 15~25% [12, 25, 47, 134]。设计过程中必须注意到这个事实。在蠕变条件下工作而又处于复杂应力状态下的零件（例如叶轮）的蠕变计算，可利用在单向拉伸试样试验所得到的试验数据。但是，用试验室小型标准试样所得的蠕变极限，会和用大型试样所得的不同；试验表明，较长的试样比较短的试样具有较小的蠕变速率（在相同的应力下）。

甚至当我们已选取较大的蠕变（持久强度）试验的基准时间（例如 10000 小时），将试验结果外推到 100000 小时仍得出不完全可靠的结果 [12, 47]。应特别指出，汽轮机制造业中所有蠕变计算都以 100000 小时为标准。非常希望在计算中改用外推到 200000 小时的持久强度极限数值。但是，直到目前为止这还未得到推广使用。

将光滑和有切口试样的长时间（约 200000 小时或更长一些）的试验结果外推后，将得到很可靠的结果；但是，即使这些数据也呈现一定的分散。有关钢的塑性变形性能和不存在时效脆化倾向的数据也是相当重要的。

为了计算（与时间有关的）零件的应力和变形，我们必须采用蠕变理论。此时，假定对于该金属材料来说，某些常数和其他一些试验结果为已知。当然，最合适的理论应与试验数据有很小误差，并且能直接建立在试验曲线上。实际上很重要的还有：这个理论不应引起很大的数学困难，以致在汽轮机零件工程计算中不能广泛采用。目前在各种蠕变理论中主要有下面几种：塑性流理论、时效理论、强化理论和塑性后效理论；上面每一种理论又有各种不同的形式和表述。一系列的理论和试验工作表明，最准确和工程实际最合适的是时效理论；这个理论首先由佐得贝尔格 Soderberg 表述出来，然后由苏联科学院院士拉波特诺夫（Ю. Н. Работнов）进一步发展 [104]。这个理论不是在任何情况下都能适用的，例如在交变载荷情况下就不能采用它。对于汽轮机基本零件（例如叶轮、整锻转子等等）来说，在大部分工作时间内是承受定常载荷的，所以由拉波特罗夫所建立的时效理论能很好与试验数据相符合。

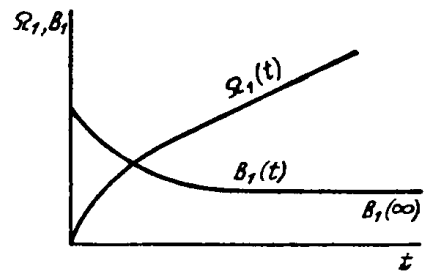


图 3 各种函数的变化图

利用时效理论可建立变形、应力和时间三者的关系式：

$$\epsilon_{na} = \Omega_1(t) \sigma^n$$

这里， $\Omega_1(t) = \int_0^t B_1(t) dt$ 是正值单调增加的时间函数（图 3）； $B_1(t)$ 是正值递减的时间函数（从蠕变开始时刻算起），并渐近趋于极限值 $B_1(\infty)$ ； n 是与材料和温度有关的特征常数。

当 t 的数值很大时，函数 $\Omega_1(t)$ 是时间的线性函数。此时有：

$$\Omega_1(t) = B_1(\infty) t$$

计入弹性变形的总变形公式为：

$$\epsilon_{na} = \Omega_1(t) \sigma^n + \frac{\sigma}{E}$$

时效理论只是在定常应力情况下才适用；很显然，当 $\sigma = \text{const}$ 时，蠕变速率和应力之间的关系可用如下公式表述出来[47, 104]：

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon_{\text{rx}}}{dt} = B_1(t)\sigma^n$$

估计汽轮机基本零件的强度，不能只限于将真实应力与蠕变极限相比较。当试验周期后所产生的总变形量较小时，蠕变极限还不能完全反映金属材料承受蠕变塑性变形的极限能力；后一种情况是很重要的，其原因是对于大多数金属材料来说这个变形是很有限的[54, 64, 105, 117]。由于这个情况和其他原因，我们必须进行持久断裂试验，此时试样到达蠕变第三阶段。在给定（恒定）的温度下，我们可以用持久强度极限作为给定的钢种或合金的持久强度的基本判则；在整个零件使用期间能引起零件破坏的应力，叫做持久强度极限。对于汽轮机零件来说，持久强度极限通常是在 100000 工作小时下确定的。

为了确定不稳定金属材料的强度判则，在一系列情况下要求进行 10000 小时或更长时间的持久试验，然后将结果外推到 100000 小时去。可以指出，为了确定金属使用期间和温度之间的关系，拉尔松（Larson）和密勒（Miller）^①提出了某一确定的参数关系式[163]。但是，这个方法是近似的，所以我们应很谨慎地应用它，特别是在换算到与实验温度差别超过 50°C 以上时尤其要注意。

确定持久强度可采用光滑试样和有切口的试样。在计算有近似切口形状的零件时，采用切口试样特别重要。

研究工作指出[12, 47]，在温度小周期变化条件下工作的零件的计算中，我们可推荐在最大恒定循环温度下取得的持久强度极限数值。我们最希望能在蒸汽介质中确定蠕变极限和持久强度。

松弛的拉丁文写法为 *relaxatio*，意即放松、减轻。零件承受载荷时所产生的应力随时间而减少的过程叫做松弛。在金属学中，对给定变形时的试样中应力衰减下降的现象叫做松弛[12, 111, 123]。有恒定变形的应力松弛叫做简单松弛。

松弛可以由如下的塑性变形发展的条件来确定：

$$\epsilon_0 = \epsilon_y + \epsilon_{\text{rx}} = \text{const}; \quad \sigma \neq \text{const};$$

$$\epsilon_y \neq \text{const}; \quad \epsilon_{\text{rx}} \neq \text{const}$$

这里， σ ——应力； ϵ_0 ——起始的（总的）变形； ϵ_y ——弹性变形； ϵ_{rx} ——塑性变形。

汽轮机（汽缸中分面、阀等等）

的法兰连接螺柱和螺栓的工作情况，就是松弛发展的典型例子。由于弹性变形部分逐渐变为残余变形部分，所以螺柱初次拧紧所引起的应力将随时间而减少。应力松弛过程亦表现在汽轮机叶轮和汽封弹簧的紧力随时间而减小。松弛速率与该时作用的应力成正比。

在零件应力过大的地方的塑性变形，可以产生松弛现象[111]和显著延缓（甚至消去）裂缝发展过程。应力松弛和应力再分布可以使得切口尖度有所减少（由于切口顶部有塑性变形）。松弛现象在高温情况下表现特别明显。

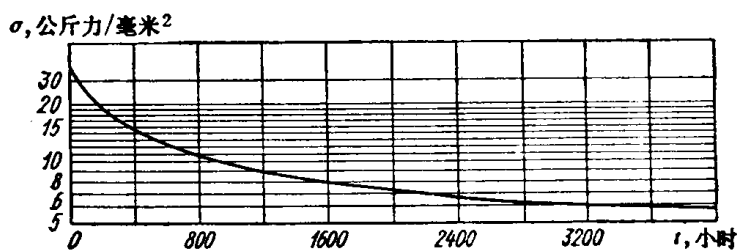


图4 恒定温度下的松弛曲线

① 校者注。

松弛曲线（图4）很明显分成两段：第一段特征是应力急剧下降（左部），第二段特征是应力缓慢下降（右部）。第二段逐渐趋于横坐标轴。

1.4 机械疲劳和热疲劳

当金属试样或汽轮机零件承受次数众多的重复载荷并存在卸载间隔或者变向载荷（交变载荷）的作用时，我们说金属将承受疲劳。如果循环载荷是由机械因素（例如，水和蒸汽的压力、体积力和惯性力）所引起，那么上述现象叫做机械疲劳。

金属疲劳断裂的特点是脆性断裂：通常情况下细颈根本不存在，如果将试样断开的两部分重新放回在一起的话，我们还可以完全恢复试样的原来的形状〔95, 110, 144, 147〕。这个过程称为疲劳是因为：试样中的裂缝逐渐扩大，过了很长时间裂缝还不能显示出来。疲劳过程是在多次重复载荷条件下发生的持久、渐变过程。

金属本身存在微观和亚微观的不均匀性。按金属本质来说（在现情况下指试样），它是多晶积聚体（由弹性变形微体和弹塑性变形微体所组成）。在受不均匀应力的积聚体内部，将发生塑性变形、强化和弱化等过程。破坏是出现在兼有应力极大提高和强度极为降低可能性最大的区域；很显然，发展过程的初始阶段和疲劳破坏的最后阶段的出现是具有统计性质的。

疲劳曲线与交变应力的数值有关，此时交变应力的循环次数应能使试样破坏或者变形达到某一确定数值；此曲线称为维勒尔（Веллер）曲线。

疲劳曲线有明显的渐近性质，这样就可能存在一个实际的疲劳极限数值，亦即材料所能承受次数极多（实际上相应于次数无限）的交变应力最大幅值。金属材料的试样承受次数无限的应力循环而不发生破坏的最大应力绝对值，叫做疲劳极限〔120, 147〕。

对于在室温情况下的钢材和铸铁来说，相应于循环次数为 $10^6 \sim 10^7$ 的应力数值，通常就可认为是疲劳极限；当试样的截面尺寸较大时，所取的循环次数也应较大。此时，维勒尔曲线会过渡到与横坐标平行的直线，在那里循环次数将不起作用〔48, 83, 120, 143, 144〕。在其他条件相同的情况下，温度有数值不大的提高是不大会影响疲劳极限的实际数值。对于给定的合金材料来说，超过一定的温度，疲劳曲线就会与表示循环次数的座标轴有较大的倾斜，甚至循环次数很大时（直到十亿次或更大一些），曲线也仍不与该轴平行。与高温的情况相似，疲劳曲线也受到侵蚀介质（带有碱性混合物和各种侵蚀杂质的蒸汽和水）的影响；此时疲劳极限值与循环次数（亦即试验基准数，见第八章）有关；我们通常采用的基准数是 10^6 次。

在各种循环变形阶段中的疲劳裂纹的产生，与给定材料的特性和应力状态的类型有关。研究表明〔120, 144〕，在较均匀的金属材料（例如结构钢）中，当它承受均匀的应力状态（例如，光滑试样的拉伸-压缩）、或者承受非均匀性较小的应力状态（圆柱试样的扭转）时，裂纹是在循环次数等于产生破坏的循环次数的 $0.8 \sim 0.9$ 时出现的；对于较不均匀的金属材料（灰铸铁）来说，在同样的载荷条件下，裂纹是在循环次数等于产生破坏的循环次数的 $0.2 \sim 0.3$ 时出现的；对于较均匀的金属材料（结构钢）来说，在较不均匀的应力状态（例如应力集中）下，裂纹是在循环次数等于产生破坏的循环次数的 $0.3 \sim 0.4$ 时出现的。

在一般的情况下，疲劳极限与下面的因素有关：金属材料的纯度（存在杂质）、材料的非均匀性（存在晶粒的空缺、位错和畸变）、热处理的特点和均匀性、机械加工的特点（冷切，表面层状态和表面光洁度）、周围介质、温度和试样的尺寸。一般说来，在其他条件相

同的情况下，结构元件或者零件的疲劳强度，是低于光滑标准试样的疲劳强度的。这是由于存在各种形式的应力集中和尺寸效应的缘故。在结构中出现变号应力和重复应力时，我们必须避免出现圆角和过渡段半径过小，即使在零件的强度和疲劳计算中预先计入了这些地方的应力集中系数。特别是对于汽轮机的轴和转子零件更应这样做；疲劳裂纹常常出现在轴截面变化处和凹槽地方等等。

尺寸因素（有时叫尺寸效应）与固体强度和破坏的物理本质有密切关系。合金材料的机械性质，特别是在变号载荷或重复载荷作用下，取决于试样和结构的绝对尺寸（甚至在几何形状和试验条件完全相似情况下〔48, 61, 88, 144〕）。当试样尺寸增加时，光滑试样的疲劳极限就会降低，这可用截面绝对尺寸影响系数计入。对于有非均匀结构的材料（铸钢、铸铁）来说，与有均匀结构的材料相较，它的试样尺寸对疲劳极限有更大影响。在试样截面有不均匀的应力分布时（例如试样弯曲时），试样尺寸的增加会大大降低疲劳强度。确定有多大部分金属处于最大应力作用下的试样的横截面形状，对其疲劳极限有较大影响；在平面弯曲情况下，矩形截面的试样与圆柱试样相较，它的尺寸对疲劳极限会有较大影响。在光滑试样的截面有均匀的应力分布（交变的拉伸-压缩）时，尺寸效应实际上是不会出现的。在有应力集中的情况下，对于所有各种应力状态形式，尺寸效应无例外都会出现。钢材强度愈大，尺寸效应愈显著。

库特拉捷夫（И. В. Кудрявцев）和沙维那（Н. М. Саввина）曾对由钢材 34ХНЗМА 制成的阶梯轴（有倒角）进行研究并指出，当保持过渡段半径与轴直径之比不变，轴的直径从 5~20 毫米增加到 170 毫米就能使轴的强度降低 40%〔61〕；而将倒角用滚压法处理，疲劳极限则会提高。但是，经强化或未经强化的轴的尺寸增加时，疲劳强度的降低程度将具有同一数值。

对于汽轮机广泛采用的钢及镍基合金和钛基合金来说，疲劳极限和屈服极限之间并不存在恒定的关系。

那乌辛柯夫（Н. Е. Наумченко）〔61, 88〕的研究工作，证实了由锻造和铸造试样而得的尺寸效应对疲劳强度影响的一般规律性，也可推广到焊接连接。这是在设计重载荷焊接转子时必须考虑的。当试样的尺寸从 28/16 毫米增加到 245/220 毫米时，焊接连接的疲劳强度就会降低 45~33%。在下面的情况下尺寸效应是特别显著的：焊接连接有从强度角度看来危险的应力集中（例如存在切口和焊缝等突然中断处）。

一系列的汽轮机基本零件（例如汽缸、调节阀和其他阀门、整锻和焊接转子以及中分面的连接件）在工作期间中，将承受静压、离心力、紧力等等引起的应力和加热、冷却等不稳定过程所引起热应力；上述这个不稳定过程通常是周期性重复变化的。在温度变化率不大的、稳定的不均匀温度场条件下，零件的强度破坏危险性只由机械载荷所决定，这是由于零件长期工作过程中会产生应力松弛的缘故〔4〕。但是在很多情况下，汽轮机起动时的工况急剧变化，运行的紧急改变和不同的给定工况，不可避免地会引起某些零件的温度有某种程度的急剧变化；在整个汽轮机工作周期中这些循环次数是很大的；也有这样一些情况：在很短的时间间隔内温度会产生很激烈变化。由于上述这些运行条件，一些零件可能会受到很类似疲劳的损害。所以对于工作在不稳定的热工况下的零件材料来说，应要求在运行期间内能承受足够大的温度激烈变化循环次数。

由于循环热应力作用而引起零件的裂纹的现象叫做热疲劳〔4〕。在零件的几何尺寸不能