

# 金属蠕变及疲劳断裂试验研究的进展

周 洪 范

## 摘 要

高温蠕变及疲劳断裂是构件材料三项重要的力学性能, 与强度研究、寿命估算、设计选材均有密切关系。本文拟就这三种力学性能概述其测试技术及工程应用的现状和发展。结合我国国情, 提出本学科今后应着重研究的几点看法。

## 一、高温蠕变试验研究

蠕变/疲劳交互作用是近年来开始研究的新课题<sup>[1]</sup>。由于蠕变—疲劳—氧化在高温下发生交互作用可造成构件灾难性的破坏。如美国田纳西州大型电站转子爆破<sup>[2]</sup>, 即是晶界裂纹在交互作用下迅速扩展的结果。一般说来, 在高温低频加载下以蠕变破坏为主, 在较低温和高频加载下以疲劳破坏为主, 在某个中间温度和加载频率下, 则可能出现蠕变/疲劳交互作用(见图1及图2)。

蠕变/疲劳复合损伤及寿命预测, 目前已提出各种基于应变、应变率、应变能等多种模型。其中常用的有以下几种:

(1) 应变范围划分法(SRP)<sup>[3]</sup>: 由Manson提出, 在美国宇航系统(NASA)得到广泛应用。试验数据已列入宇航结构材料手册。方法的要点将拉压循环中的非弹性应变划

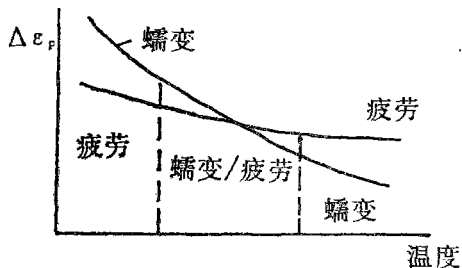


图 1 温度对断裂形态的影响

分为时间相关蠕变分量和时间无关疲劳分量两部分, 总寿命为可能出现的四种分量之和, 如图3。

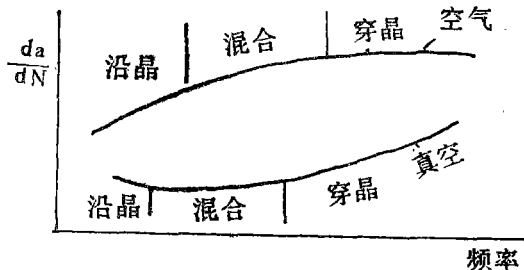


图 2 加载频率对断裂形态的影响

(2) 频率修正法<sup>[4]</sup>: 由Coffin提出, 在美国通用电气公司广泛应用, 此法是在Manson-Coffin方程中引入频率修正项:

$$\Delta \epsilon_t = \Delta \epsilon_e + \Delta \epsilon_p = A \cdot N_f^a \cdot v^b + B N_f^c \cdot v^d$$
 式中:  $\Delta \epsilon_t$  = 总应变;  $\Delta \epsilon_e$  = 弹性应变;  $\Delta \epsilon_p$  = 塑性应变;  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$  = 与材料有关的常数。

(3) 损伤函数法<sup>[5]</sup>: 由Ostergren提出, 此法以裂纹扩展拉伸进程理论为依据, 以最大拉应力和塑性应变幅乘积所表征的能量来评定循环寿命:

$$\sigma_T \cdot \Delta \epsilon_p \cdot N_f^b = C$$

式中:  $\sigma_T$  = 最大拉应力;  $\Delta \epsilon_p$  = 塑性应变幅;  $\beta$  = 材料常数

图4中阴影部分为循环应变能,  $\sigma_0$ 为裂纹闭合应力。

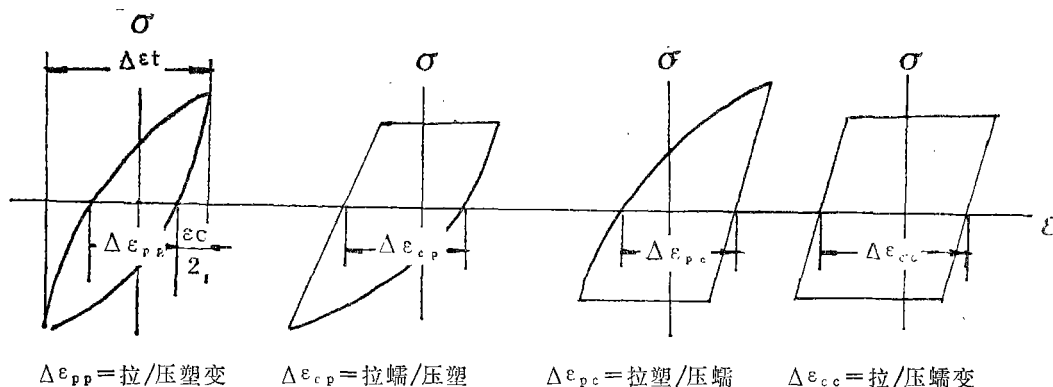


图 3 四种应变分量滞后环

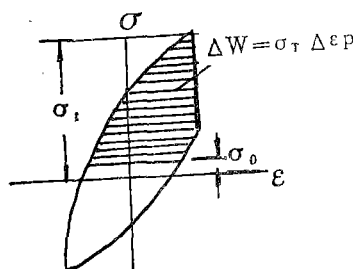


图 4 循环加载中的应变能

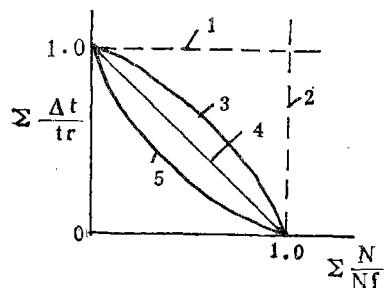


图 5 蠕变/疲劳复合损伤

(4) 线性损伤法则<sup>[6]</sup>: Lagneborg在 Miner线性累积损伤方程中引入交互作用项:

$$\sum \frac{N}{N_f} + B \left( \sum \frac{N}{N_f} \cdot \sum \frac{\Delta t}{t_r} \right)^{\frac{1}{2}} + \sum \frac{\Delta t}{t_r} = 1$$

式中:  $N_f$  = 纯疲劳寿命;  $t_r$  = 纯持久寿命;  
 $\Delta t$  = 峰值应力保持时间;  $N$  = 带有保  
 载时间的循环寿命;  $B$  = 交互作用系数。  
 蠕变/疲劳复合损伤可能出现三种情况, 如图5。

## 二、疲劳强度试验研究

疲劳断裂使80~90%以上的机件造成破坏, 二次世界大战以来, 有上百艘焊接船舶, 几十座桥梁, 大量工程机械、火车铁轨、各种发动机都因疲劳损伤而破坏。航空工业中因疲劳造成的重大事故更是屡见不鲜。国际上研究疲劳的文献近二十年来数量大增, 年平均1000篇。有关疲劳的国际会议年平均1.5~2次。疲劳研究的近期进展可简述如下:

- 1-蠕变损伤 2-疲劳损伤
- 3-负交互作用 ( $B < 0$ )
- 4-无交互作用 ( $B = 0$ )
- 5-正交互作用 ( $B > 0$ )

(1) 工程应用: 七十年代以来对安全寿命的研究日益重视, 所谓安全寿命即是考虑一定分散系数及一定存活率的疲劳无裂纹寿命。工程构件愈关键, 存活率要求愈高, 航空构件一般要求为99.9%。为了提高构件使用寿命, 推迟宏观可检裂纹的形成, 减慢扩展速率, 从构件布局细节设计、工艺方法、质量控制以及选材合理性上采取一系列断裂控制手段在工程上统称为抗疲劳设计, 目前已形成一种专门学科。

(2) 疲劳损伤: 研究材料在交变载荷下的损伤度, 即微裂纹扩展深化使构件工作面减小的程度。疲劳损伤可看成是材料裂纹几何形状、循环硬化、软化以及残余应力三者的变化。近年来国外对疲劳损伤进行大量研究, 已提出几十种损伤方程。

(3) 低周疲劳: 一般指断裂循环数在 $10^4 \sim$

10<sup>5</sup>的疲劳，由于承受低周疲劳的构件在应力集中区进入塑性状态，主要考察应变，故也称低周应变疲劳。近二十年来，国内外对低周疲劳的研究日益广泛，已发表了大量专著（如ASTM STP770）英国Roce—Royce发动机公司，美国Boing飞机公司均规定低周疲劳为控制涡轮盘使用寿命的必检项目。美国Pratt-Whitney发动机公司规定涡轮盘及压气机盘裂纹长度不得超过0.794mm，英国国家燃气轮机研究所（NGTE）规定裂纹长度不得超过0.75mm。著名应变疲劳学者L.C.Coffin近年来领导一个科研组，系统研究时间相关疲劳<sup>[7]</sup>，内容涉及加载波形、循环频率、应变范围、微观机制、以及环境介质诸方面，其研究成果已在工程设计中得到广泛应用。

（4）腐蚀疲劳：近年来国外对腐蚀疲劳研究十分重视，但有关腐蚀疲劳机理、影响因素、评定标准等问题尚未获得圆满解决。腐蚀疲劳的特点是裂纹萌生快，扩展寿命占总寿命绝大部分，由于介质作用形成裂纹数量比常规疲劳多，S-N曲线低于常规疲劳，无水平部分。与加载频率关系密切，频率愈低，腐蚀疲劳强度愈低。据欧美有关学术团体调查，由于腐蚀

造成的事故占总事故的比例和经济损失额正在持续上升，学术界呼吁有关部门迅速采取抗腐蚀破坏的有效措施。美国宇航学会（NASA）和材料试验学会（ASTM），自七十年代以来组织了一系列腐蚀疲劳学术会议，有力地推动了这一学科的发展。日本于1974年成立防腐协会，1981年日本东京大学提出评定腐蚀抗力的力学、冶金和环境三个因素的新参量<sup>[8]</sup>，即氧化膜破裂率、裂纹尖端钝化率和腐蚀液更新率三个指标，如图6。

（5）热疲劳研究：对于经受温度急剧反复变化而且构件的自由膨胀或收缩由于某种原因受到约束的构件，在进行强度设计时必须考虑热疲劳问题。实际构件只受一维拉伸及压缩热应力的情况是颇为罕见的，近年来国内外普遍开展叠加机械应力及多维热应力下热疲劳问题的研究。热—机械疲劳可定量评定各种应力和温度组合条件下材料或构件疲劳断裂特征，使传统的定性的热疲劳对比试验向前推进了一步。有人用有限元法计算出热疲劳试样温度场及应力场的定量分布以及热疲劳损伤的数值解。

（6）新型疲劳试验机的发展：目前国内外广泛使用电子计算机控制的电液伺服疲劳试验机

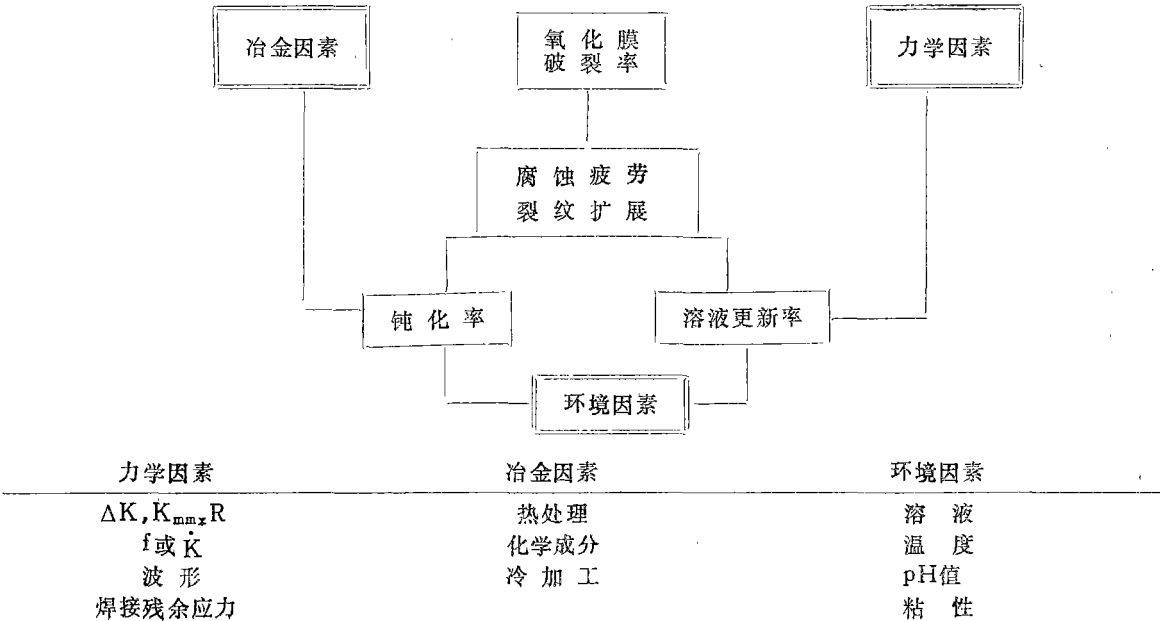


图 6 三个因素和三个参量的关系

进行材料或构件的模拟试验。材料模拟试验机的优点是样品小、设备占地面积小,便于安装、动力消耗少。其二是便于实现多功能综合模拟(如应力、温度、介质单独或同时叠加)。近年来国外厂商竞相生产带电子计算机或微型计算机的疲劳试验机,并以附带的软件数量多少作为衡量水平的标志之一。目前所谓最佳产品是美国MTS、英国Instron、西德Schenck三家生产的。近年来MTS公司在国际上的竞争地位趋于上升。1982和1983年该公司花费巨额资金在我国北京、上海等地开办技术讲座、实物展销。国内已有十多个单位引进MTS公司的产品。该公司在原有的810,811系列上又发展了819(高变形率、适用动态 $K_{Ic}$ 试验)、809(可同时叠加轴向及扭转载荷)、824(低频下达 $\pm 1000$ 吨),880(最新产品,自动化程度高、配备多种计算机软件,可完成四种ASTM标准试验方法的试验程序)。英国Instron公司近年来在原有的1250,1251系列上也发展了1270,1330,1360,1196,1600等系列产品,强调了专用性,降低了销售价,以与MTS公司相抗衡。西德Schenck公司产品以其高质量、稳定可靠赢得用户的信誉。

### 三、断裂力学试验研究

将裂纹尺寸、工作应力和材料抗断能力三者定量结合起来,从而对含裂纹构件的安全寿命给出定量或半定量的估价,是线弹性或弹塑性断裂力学方法的重要贡献。目前,线弹性断裂力学的理论和方法已趋于成熟,重点在于应用。各类断裂韧性指标如 $K_{Ic}$ , R曲线、 $K_{Ic}$ , COD,  $J_{Ic}$ 国内已建立了相应的标准试验方法。 $K_{Ic}$ ,  $K_{Ic}$ , 以及高温 $K_{Ic}$ ,  $J_{Ic}$ 方法正在着手建立。

(1)第二届国际弹塑性断裂会议及弹塑性断裂分析工程方法<sup>[9]</sup>:第二届国际弹塑性断裂会议于1981年10月在美国召开,会议宣读98篇论文、内容涉及弹塑性断裂理论分析、应用、

试验方法、材料性能、蠕变、疲劳等六个专题。论文反映了各国在弹塑性断裂研究方面的新成就、新动向。例如Paris于1977年提出的断裂判据撕裂模量 $T$ ,四年中已在工程上得到实际应用。

美国通用电气公司研究发展中心总结了三年来弹塑性试验研究的成果,出版了一本弹塑性断裂分析工程方法手册<sup>[10]</sup>。这本手册包括全塑性解、J积分、裂纹张开位移、加载点位移所表征的裂纹扩展公式、数据和图表曲线。为了便于设计人员使用,在理论分析和有限元计算基础上归纳出三种图。即裂纹驱动力图(可对裂纹起始至失稳扩展作出全面分析)、稳定性评定图(用于确定出现失稳状态的载荷范围)、失效评定图(用于作出构件是否安全的快速判断)。弹塑性工程估算评定程序如图7。

(2)疲劳裂纹扩展规律的研究<sup>[11]</sup>:疲劳裂纹扩展是一个涉及断裂力学、断裂物理和断裂化学的复杂过程。裂纹扩展微观机制可分为滑移、范性钝化和再生核三类。各种力学参量如门槛值 $\Delta K_{th}$ , 应力比 $R$ , 加载频率 $f$ , 保载时间 $t$ , 加载类型、过载峰以及环境介质、温度 $T$ 、试样厚度 $B$ 对疲劳裂纹扩展的影响如图8所示。

近年有人研究疲劳裂纹扩展与材料常规性能的关系。有人从裂纹尖端塑性变形过程或塑性区内材料累积损伤原理导出裂纹扩展公式。有人用有限元法分析裂纹尖端应力应变场,用电子扫描通过断口形貌分析确定构件初始缺陷尺寸。

短裂纹研究近年来引起人们普遍的重视<sup>[12]</sup>。由于裂纹长度只有几个晶粒直径,一些冶金因素如滑移特征、晶粒度、织构、夹杂物形态与分布等对短裂纹和早期疲劳寿命的影响更趋复杂。因此,短裂纹问题将作为一个独立的课题进行研究。

(3)蠕变裂纹扩展研究:这是七十年代后期新开发的研究课题<sup>[13]</sup>。至今,在断裂判据、测试技术、损伤评定三方面都取得了一些进展。

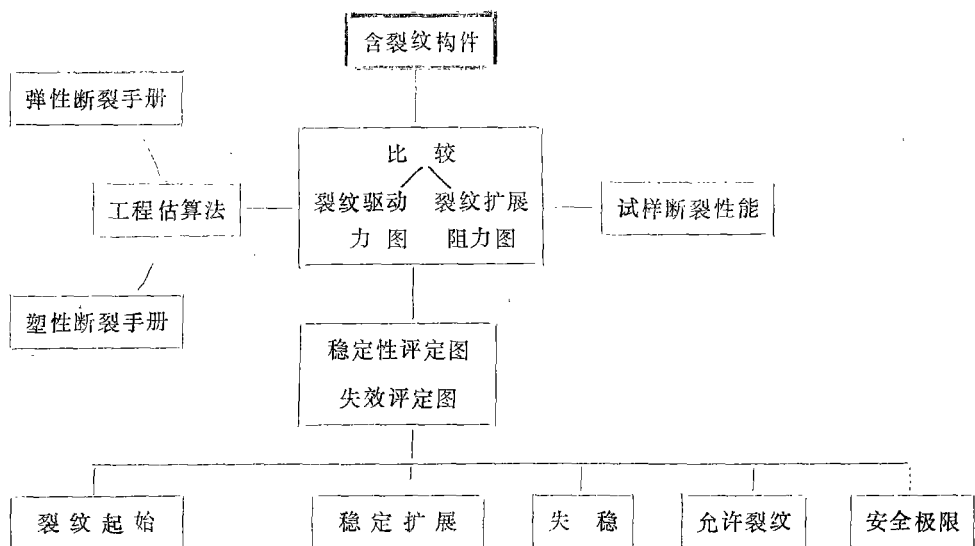


图 7 用工程方法估算含裂纹构件裂纹扩展及稳定性

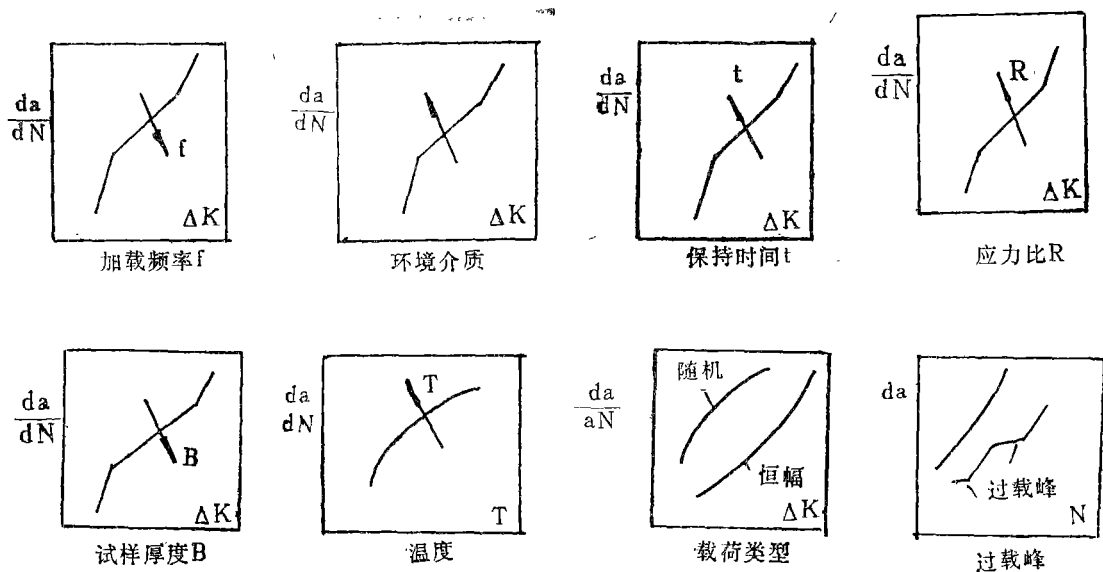


图 8 各种因素对疲劳裂纹扩展的影响

现已提出  $K$ ,  $COD$ ,  $J$ ,  $C^*$  (能量率  $J$  积分),  $\sigma_{net}$  (净截面应力)、 $\sigma_{ref}$  (参考应力) 等线弹性和弹塑性判据, 建立了这些参量与蠕变裂纹扩展率  $da/dt$  之间的函数关系。研究了应力强度、温度范围、缺口效应、材料延性对蠕变裂纹扩展的影响。

(4) 裂纹检测技术研究: 目前国内外大都

用电位法 (包括交流及直流)、电阻法、光学测微法、涡流法、声发射等检测裂纹。这些方法都有一定的局限性或测量精度不高。近年来, 美国通用电气公司发展了一种裂纹检测新技术, 称为翻转直流电位法<sup>[14]</sup>, 这种方法综合了直流和交流两者的优点, 引入一个微处理机环节, 使测试精度大大提高。

## 四、对今后工作的几点看法

1、加强蠕变/疲劳交互作用在工程应用、损伤评定及寿命预测方面的研究,建立有效的力学模型及数学模型,为提高材料抗蠕变/疲劳复合损伤能力提出有指导意义的途径。

2、在高温断裂研究中要探索线弹性及弹塑性参量的适用范围,建立有明确物理概念、计算简便的寿命预测方法。通过结构强度计算及实物试验,进一步验证这些方法的可靠性。

3、加强低周疲劳及随机疲劳研究,开展接近构件使用条件下谱载、过载效应、门槛值的研究,结合典型故障或构件延寿、定寿建立新型疲劳设计准则。

4、腐蚀疲劳研究国内还是个薄弱环节,应加强各种具有液体或混合气体介质试验装置的研制。研究腐蚀疲劳裂纹萌生及其扩展的规律,建立能综合反映材料性能、力学状态和环境介质三者交互作用的评定方法及参量。

5、热疲劳研究重点是热—机械疲劳问题,除摸清热疲劳损伤及其机理的基本规律外,应提出国产材料热疲劳数据手册。要在制订有关试验标准中提高试验数据的可比性。

6、加强弹塑性断裂力学在高温疲劳及蠕变中的应用研究。建立新的弹塑性断裂判据,编制适合设计选材实用的工程方法手册。

7、加强高温及腐蚀介质下裂纹检测技术的研究,大力开发微型电脑及计算机的应用研究。

### 参 考 文 献

- [1] 周洪范,金属蠕变/疲劳交互作用,机械工程材料,1983, No 5。
- [2] Symposium on Creep-Fatigue Interaction, ASME, MPC-3, 1976。
- [3] ASTM, STP 520, 1973。
- [4] G. E. Report, 1976。
- [5] ASME, MPC-3, 1976。
- [6] Metallurgical Transaction, 1971, No. 2。
- [7] 周洪范,关于美国材料试验现状,理化检验, 1983, No 6。
- [8] 高桥(日)一种表征腐蚀疲劳裂纹新参量

ASME, Transac. 1982, No. 1。

[9] 周洪范、周轶秋,出国考察报告, 1932。

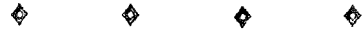
[10] V. Kumem, M. D. German, C. F. Shih. An Engineering Approach for Elastic-plastic Fracture Analysis, 1981。

[11] 颜鸣泉,金属疲劳裂纹扩展规律及其微观机制,航空材料专刊, 1980。

[12] K. J. Miller, the short Crack Problem, Fatigue of Engineering Materials and structures, Vol 5, 1982。

[13] K. Sadananda, P. Shahinian, Creep-Fatigue Crack, Growth. 1981。

[14] 周洪范,一种裂纹检测新技术—翻转直流电位法,材料试验与试验机, No 6, 1983。



(上接第45页)

一是钛与人体组织有良好的相溶性、腐蚀速度很小,并且其腐蚀产物能够阻止以后的反应。二是钛具有满意的生物力学适应性,强度高并且弹性模数低。这两点特性使得钛在医学中的应用具有得天独厚的优越性。

在医学用钛的开始阶段主要是采用工业上较成熟的合金如 Ti-6Al-4V 作原材料制造人工关节,但是通过后来的研究知道, Ti-6Al-4V 在 700℃ 退火时个别的  $\beta$  相区域有可能富集钒元素,其钒含量可高达 30% 左右,而钒是人们所公认的有害于身体的元素,所以 Ti-6Al-4V 再继续医疗中应用则被认为是不适宜的了。本届会议上西德学者 U. Zwicker 提出了一个新的专门用于医疗的钛合金,其成分是 Ti-5Al-2.5Fe。据报告说,该合金可以用于制人工关节、完整的人工臀部、骨髓钉、骨螺钉、螺帽及假牙床等。在西德的纽伦大学有一台小型真空电弧凝壳炉,他们采用铜模离心浇铸法进行生产,每炉可浇铸出两件人工臀部零件,每件重 500 克。铸件在 950℃ 下进行热等静压处理以便提高其所能承受的弯曲应力。为了确保钛人工关节能在人体内安全可靠地使用,西德的研究者还专门设计了人造臀部关节模拟试验装置。利用该装置可以将人工钛关节放在 39℃ 的 NaCl(0.9%) 溶液中进行疲劳试验。无疑,这些研究对于医学用钛的发展是具有重要意义的。