

# 粉末冶金涡轮盘寿命研究进展\*

Progress in Life Research on Powder Metallurgy Turbine Disk

西北工业大学力学与土木建筑学院 敖良波 温志勋 李 磊 虞跨海 岳珠峰



敖良波

西北工业大学博士, 固体力学专业, 主要从事航空发动机高温材料和结构设计优化方面的研究。

粉末高温合金主要用于航空发动机的涡轮盘、压气机盘、涡轮轴、封严环以及涡轮盘叶片挡板等高温承力转动部件的制造, 是现代高推重比航空发动机涡轮盘等关键部件的必选材料<sup>[1]</sup>。从 20 世纪六七十年代美、俄等国开始研制粉末盘起, 至今已有

\* 国家“863”计划(2007A A04Z404)、国家自然科学基金(50375124)、教育部博士点基金(N6C J0001)、西北工业大学研究生创业种子基金(Z200822)项目。

建立更合理的本构模型, 深入研究蠕变疲劳相互作用的机理, 加强损伤容限定寿方法的实际应用, 追求更高的可靠性, 将会使粉末冶金涡轮盘的应用更为安全、经济, 进而促进航空发动机事业的发展。

四五十年的历史, 粉末盘已在航空发动机领域获得了广泛的应用。比如 Rene88DT 粉末盘已先后用于美国 GE 公司的 GE80E1、CFM56-5C2 和 GE90 发动机上。粉末冶金涡轮盘作为航空发动机的主要零部件之一, 其工作环境恶劣, 承受载荷复杂, 一旦发生破坏性故障将导致严重的后果, 因此, 涡轮盘的定寿工作十分重要。涡轮盘应确定的寿命主要与起落和飞行过程相关的低循环疲劳寿命及与工作时间相关的蠕变 / 应力断裂寿命有关, 考虑到涡轮盘部分裂纹可测, 所以轮盘的寿命还应包括裂纹扩展寿命<sup>[2]</sup>。粉末冶金涡轮盘的寿命预测经历了从应力疲劳定寿到蠕变疲劳交互作用预测寿命, 再到损伤容限定寿及全寿命预测方法的过程<sup>[3-4]</sup>。本课题在前人总结<sup>[2-11]</sup>的基础上, 对近 10 年来粉末冶金涡轮盘寿命的研究进行了综述, 主要介绍了粉末冶金材料的本构模型研究、粉末冶金涡轮盘蠕变 - 疲劳交

互作用下的寿命预测、损伤容限定寿方法及寿命预测中的可靠性研究。

## 粉末冶金材料的本构模型研究

确定粉末冶金材料合理的本构模型, 对它在高温复杂载荷下的应力应变响应及寿命预测至关重要。国外从 20 世纪 60 年代起开始对弹塑蠕变统一模型进行研究, 提出了多种本构模型, 尤其是 Bodner-Partom 模型(B-P 模型)及改进的 B-P 模型, 这些模型在 Rene95 的研究上取得了较理想的效果<sup>[3]</sup>。近年来, 国内外学者在此基础上开展了许多研究<sup>[12-16]</sup>, 宋迎东等通过对 FGH95 粉末高温合金进行拉伸和循环加载试验, 研究了该材料的应变率敏感性和循环应力应变特性<sup>[17]</sup>; 结合试验建立了 FGH95 的 B-P 统一弹 - 粘塑性本构模型<sup>[18]</sup>; 在总结 B-P 模型及其应用的基础上, 修正了材料常数估计公式, 并提出了新的材料参数的

估计方法<sup>[19-21]</sup>；通过用户子程序将 B-P 本构模型引入通用有限元程序中，增强了 B-P 模型在发动机热端部件应力分析中的应用<sup>[22-23]</sup>。杨晓光等<sup>[24-30]</sup>通过对 B-P 模型进行修正，改善了其对材料加载速率相关的粘塑性和循环硬化的模拟精度；采用 Lemaitre 应变等价原理引入损伤因子，推导了耦合损伤的 Chaboche 粘塑性本构方程，并采用 Robotnov 蠕变演化方程，使本构方程能够描述整个蠕变阶段。吕和祥等<sup>[31-35]</sup>将粘弹性变形引入到统一本构模型中，有效地改善了材料的过渡段变形模拟，建立了粘弹塑性统一本构理论，创立了包括粘弹性变形的更广泛的统一概念，扩大了统一本构理论的内涵。张麦仓等<sup>[36]</sup>通过等温恒应变速率压缩试验，按最小二乘法原理，采用多元非线性回归方法，建立了 FG H95 合金的本构关系。华林等<sup>[37]</sup>通过对二次函数椭球面粉末冶金材料屈服条件分析，提出了线性函数六棱锥面简化粉末冶金材料屈服条件，结果表明，六棱锥面简化粉末冶金材料不仅在数值上与椭球面屈服条件较接近，而且是全致密熔铸材料 Tresca 屈服条件的推广。

## 蠕变疲劳交互作用寿命分析

### 1 粉末冶金涡轮盘低循环疲劳寿命预测

涡轮盘的低循环疲劳是发动机起动—停车过程应力集中处的应力应变历程，涡轮盘低循环疲劳寿命预测的理论基础是应变疲劳理论，即等应变历程—等损伤—等寿命理论<sup>[2]</sup>。许超等<sup>[38]</sup>通过对 FG H95 粉末高温合金在 600℃ 和 650℃ 下的低周疲劳性能 (LCF) 的研究，获得了中值和置信度  $\gamma=95\%$ 、存活率  $P=99.7\%$  的低周疲劳数据，以及表征材料特性的应变—疲劳寿命曲线、循环应力—应变曲线和各应变疲劳参量，为飞机发动机粉末涡轮盘的设计选材和

寿命预估提供了依据。魏大盛等<sup>[39-40]</sup>对 FG H95 进行了 650℃ 时不同应变率的拉伸试验和应变率为  $10^{-3}/s$  的应变控制循环试验，研究了 FG H95 的变形特征，并在此基础上通过不同保载形式的疲劳试验，分析了其变形特征和疲劳寿命分布特征以及保载对疲劳寿命的影响，并提出了迟滞环位置—形状修正因子的概念，进而得到了一种修正的非弹性应变能—寿命方程。本课题组<sup>[41-43]</sup>对镍基粉末冶金高温合金的压缩疲劳性能进行了试验，结合拉—拉应变疲劳试验数据，证明粉末冶金高温合金具有良好的耐压性能，压—压疲劳性能十分优良，不易产生压缩疲劳破坏；采用光滑圆棒试样和带孔平板试样对处于不同温度的复杂应力状态下的 FG H95 高温合金的 LCF 性能进行了试验研究和有限元分析，初步探讨了复杂应力条件下 LCF 寿命模型的一般规律；研究了 FG H95 在不同应力比下温度对 LCF 寿命的影响，指出 FG H95 为循环硬化材料，其低周疲劳寿命几乎由裂纹萌生阶段所决定。

粉末合金在制造过程中存在的非金属夹杂是微小缺陷的主要来源，夹杂物对粉末高温合金的 LCF 寿命有显著影响<sup>[44]</sup>，因此研究非金属夹杂对粉末冶金涡轮盘寿命的影响至关重要。夹杂的尺寸越大，疲劳寿命就越低，位于表面的夹杂比位于内部的夹杂危害更严重<sup>[45-46]</sup>。Grison<sup>[47-48]</sup>研究了平板试样的裂纹萌生及表面夹杂对裂纹初期生长的影响，并比较了夹杂处于表面、亚表面及内部时对疲劳失效的影响，建立了基于夹杂尺寸、形状和位置的寿命预测模型。D.N.Dai 等<sup>[49]</sup>研究了亚表面夹杂对裂纹生长的影响。国为民<sup>[50-52]</sup>、张莹等<sup>[53-54]</sup>介绍了原始粉末及粉末处理过程中的夹杂及分类，研究了 FG H95 粉末高温合金的夹杂对材料 LCF 性能的影响，建立了夹杂的位

置和尺寸与 LCF 性能的关系曲线。邹金文、汪武祥<sup>[55]</sup>和王旭青等<sup>[56]</sup>研究了 FG H96 粉末高温合金的夹杂特征及其对材料力学行为的影响。谢锡善、曾燕屏等<sup>[57-61]</sup>采用扫描电镜原位拉伸和原位疲劳试验，直接跟踪观察人工植入夹杂的微观力学行为，特别是夹杂尺寸对合金力学性能及寿命的影响。何承群等<sup>[62]</sup>运用无因次方法，探讨了夹杂位置和二维尺寸与 FG H95 断裂周次之间的关系。贾波等<sup>[33]</sup>指出了夹杂物对合金的疲劳性能影响显著，并对含夹杂物粉末高温合金材料的损伤机理和疲劳寿命预测模型进行了介绍。研究结果表明：合金的疲劳强度随着夹杂物尺寸的增大迅速降低；相同尺寸时，表面夹杂或亚表面夹杂比内部夹杂对粉末高温合金的寿命影响更大；夹杂数量越多，寿命越差。

### 2 粉末冶金涡轮盘蠕变寿命预测

粉末冶金涡轮盘蠕变寿命预测的理论基础为盘材在单向应力状态下的蠕变实验结果，预测涡轮盘蠕变寿命的方法可以分为 2 类：考虑蠕变和应力松弛的持久寿命分析方法、考虑蠕变和应力松弛的低循环疲劳寿命分析方法<sup>[2]</sup>。A. Toshimitsu Yokobori Jr.<sup>[64]</sup>比较了蠕变韧性和脆性材料的蠕变裂纹生长行为。John D. Landes<sup>[65-67]</sup>等从背景介绍、试验研究和数值计算 3 个方面详细分析了蠕变变形参数。柴国钟等<sup>[68]</sup>提出了一种三维表面裂纹蠕变断裂力学参量分析的蠕变线弹簧模型方法，并在非稳态蠕变条件下的位移、裂纹简单 J 积分和 C 积分的工程估算公式及弹塑性线弹簧模型的基础上，建立了蠕变线弹簧模型方法的基本方程。荆建平<sup>[69]</sup>采用非线性连续损伤力学模型，对涡轮盘在典型任务工况下的蠕变损伤和寿命进行了分析，并与累积损伤理论进行了比较，指出连续损伤模型能更合理地描述材料蠕变损伤的累积发展过程。

周柏卓等<sup>[70]</sup>建立了考虑蠕变和应力松弛的航空发动机高温构件的持久寿命和低循环疲劳寿命预测方法。刘洋等<sup>[39]</sup>通过蠕变曲线的测定及组织形貌的观察,研究了FGH95粉末镍基合金的蠕变行为及变形特征,得出FGH95粉末镍基合金在试验温度和应力范围内具有明显温度和应力敏感性的结论。本课题组<sup>[72]</sup>对FGH95平板小试样和缺口小试样高温拉伸和蠕变试验结果进行了分析,结果表明:“钝”缺口和“尖”缺口对蠕变断裂分别起到了硬化和软化作用,缺口试样蠕变寿命的应力敏感度较平板试样低,下图给出了变形率与规范化时间 $t/t_f$ ( $t_f$ 为断裂寿命)的函数关系;有限元计算表明“尖”缺口试样的缺口根部有强烈的轴向应

力集中和高的TF值,三轴应力因子的大小不能用来判定FGH95缺口小试样蠕变断裂寿命的长短。

### 3 粉末冶金涡轮盘低循环疲劳/蠕变寿命预测

蠕变疲劳是粉末冶金涡轮盘主要的失效形式之一,要较精确地预测粉末冶金涡轮盘的寿命,必须要考虑低循环疲劳与蠕变交互作用对寿命的影响。早期研究的应变范围区分法(SRP)及应变能区分法(SEP),应用于非弹性的小应变范围时,都存在着一定的困难,而随后提出的总应变范围区分法(TS-SRP)则不必明确区分非弹性应变范围,可用于高强度粉末冶金涡轮盘的寿命预测<sup>[3]</sup>。Vasisht Venkatesh等<sup>[73]</sup>和Goswami T等<sup>[74]</sup>都提出了一些

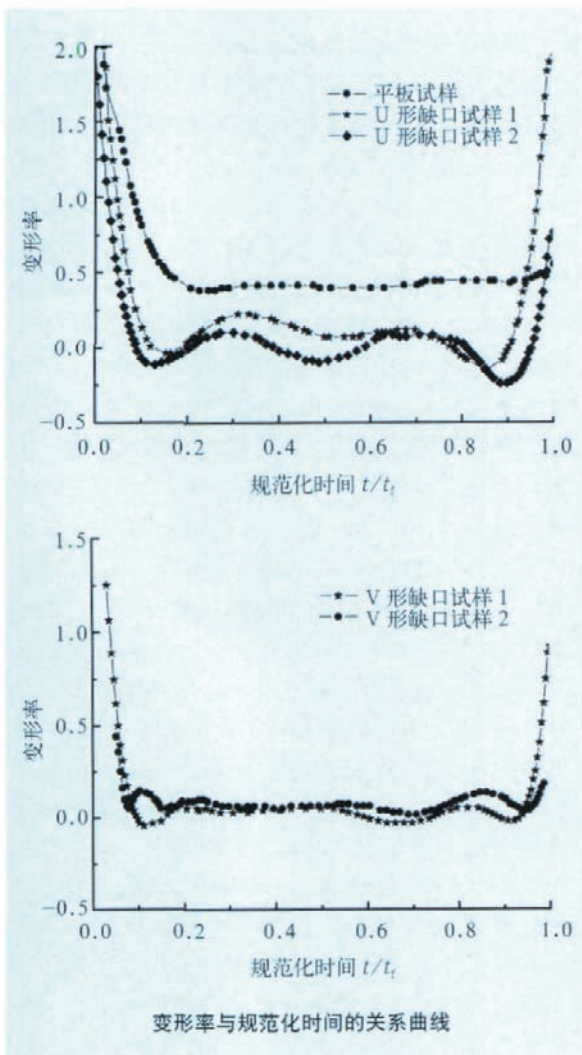
蠕变疲劳寿命预测模型。Tae-Won Kim等<sup>[75]</sup>利用连续损伤力学研究了蠕变疲劳载荷作用下镍基高温合金的寿命预测。W. O. Ngala等<sup>[76]</sup>研究了氧化物弥散强化镍基PM1000的蠕变疲劳交互作用。Michel Nganbe等<sup>[77]</sup>研究了PM3030的强度、疲劳寿命及断裂特性。苏翰生等<sup>[40]</sup>将SEP的数学模型延拓于拉-拉循环应力状态下蠕变-疲劳研究的应用,研究了蠕变-疲劳寿命预测的应变能区分法的数值计算方法(SEP-NCM)。刘相新等<sup>[79-80]</sup>采用基于损伤力学的蠕变-疲劳交互作用下的寿命预测模型,通过引入损伤变量,来处理蠕变-疲劳多种损伤相耦合的载

荷形式,并将此方法与ANSYS的结构分析结合起来,实现了对构件的损伤计算和寿命预测。南航的胡绪腾等<sup>[81-83]</sup>提出了修正的应变范围区分法(MSRP)、修正的总应变范围区分法(MTS-SRP),提高了蠕变疲劳寿命预测的精度;并基于SEP,建立了总应变-应变能区分法(TS-SEP),在试验验证的基础上,指出TS-SEP在4种方法(TS-SEP, TS-SRP, SEP和SRP)中具有最高的预测精度。张国栋等<sup>[84-85]</sup>研究了不同荷载情况下的热/机械疲劳寿命,并将其与上限等温低周疲劳寿命进行了对比。结果显示,在高温应变疲劳试验中同时存在疲劳、蠕变和氧化损伤,同相位三角波载荷情况下的热/机械疲劳寿命比梯形波寿命长,比等温低周疲劳寿命短。

### 损伤容限寿命分析

为了既保证构件轮盘安全可靠,又能充分利用其固有寿命,对发动机断裂关键件引入了损伤容限定寿。损伤容限定寿法主要是确定涡轮盘的容许工程裂纹长度和检查周期,然后每隔一个使用周期对涡轮盘检测一次,当涡轮盘上裂纹长度小于容许长度时,可继续使用;当超过容许长度时,则应予以报废。同一批次的涡轮盘,其实际使用寿命的长短是不一样的<sup>[2]</sup>。文献[2]给出了WP6 I级涡轮盘损伤容限定寿的方法,所用材料为高温合金,但损伤容限定寿的原理与粉末冶金涡轮盘一致。裂纹扩展寿命很大程度上决定了轮盘的循环寿命,采用试验的方法进行应力强度因子的计算和应力分析,研究裂纹的扩展特性,将为粉末涡轮盘的损伤容限设计提供依据<sup>[3]</sup>。

Dai Heng Chen等<sup>[86]</sup>用体积力法研究半无限大平面内椭圆夹杂界面裂纹问题,探讨了夹杂形状对应力强度因子的影响。J.Grisson等<sup>[48]</sup>研究了镍基粉末高温合金中表面夹杂对



变形率与规范化时间的关系曲线

应力强度因子的影响,得到了 K 因子的半经验公式。Helsing<sup>[87]</sup> 对处于均匀应力场下无限大平板中夹杂界面裂纹进行了研究,提出了可以对形状复杂的夹杂界面裂纹进行应力强度因子求解的分析方法。S.B.Thomas 等<sup>[88]</sup> 采用有限元交替法研究了圆孔和夹杂对无限大平板中心裂纹应力强度因子的影响,获得了使应力强度因子最小的圆孔 / 夹杂位置。Naoki Noda 等<sup>[89-90]</sup> 用奇异积分方程对广义应力强度因子进行了研究。S.C.Fan 等<sup>[91]</sup> 应用扩展的 PU 法对裂尖应力强度因子进行了研究。W. Zhou 等<sup>[92]</sup> 应用可变阶奇异边界元法研究了三维弹性问题中的应力强度因子。Colin E. Freese 等<sup>[93]</sup> 研究了单边缘裂纹应力强度因子的求解。

李晓<sup>[94]</sup> 研究了夹杂物在原位拉伸试验下的导致裂纹萌生、扩展机制的微观行为。李先军<sup>[95]</sup> 研究了夹杂物对粉末高温合金应力分布的影响,建立了粉末高温合金涡轮盘低周疲劳概率定寿模型。陈勇<sup>[96-97]</sup> 用有限元方法研究了夹杂裂开以及夹杂与基体界面脱开对应力强度因子的影响,结果表明对于含  $Al_2O_3$  夹杂的 FGH95 粉末高温合金材料,当夹杂裂开或界面脱开时,应力强度因子均小于将夹杂视为初始裂纹时的应力强度因子,并且建立了考虑裂纹面接触的有限元模型,较传统的不考虑裂纹面接触的方法更适合于模拟裂纹扩展和裂纹闭合效应; 并采用修正的体积力法研究了热机械载荷作用下圆形夹杂与裂纹的相互作用。赵勇铭等<sup>[98-99]</sup> 用有限元方法研究了夹杂对粉末高温合金裂纹应力强度因子及裂纹扩展寿命的影响,结果表明,夹杂对裂纹应力强度因子的影响范围在裂纹为夹杂半径的 3 倍内比较明显,并分别分析了软夹杂和刚性夹杂对应力强度因子的影响,结果表明在 FGH95 粉末高温合金中不考虑

夹杂的影响,可以得到比较保守的裂纹扩展寿命的计算结果。吴嘉伟<sup>[100]</sup> 分析了 FGH97 粉末高温合金裂纹扩展速率的影响因素及其断裂特征,为进一步研究合金的裂纹扩展性能提供了依据。本课题组<sup>[101-104]</sup> 研究了不同加载速率和不同的缺口形状对 FGH95 缺口小试样拉伸断裂性能的影响,结果表明,应力集中因子越大的试样,缺口敏感性越强; 采用 GURSON 本构方程对含夹杂粉末冶金材料 I 型裂纹紧凑拉伸试样进行了有限元分析,模拟了裂尖与夹杂的相互作用对基体的损伤及裂纹扩展性能的影响; 圆形夹杂对基体材料的损伤及裂纹扩展性能是最保守的形状,对于椭圆形夹杂,硬夹杂在椭圆短轴方向受力较为安全,而软夹杂则相反,在椭圆长轴方向受力对基体的损伤更小; 夹杂与基体间的界面不产生开裂,基体材料的损伤及微裂纹源集中于切口区域,且有最小值; 当夹杂从基体上沿界面逐渐脱落时,基体损伤及微裂纹源集中于夹杂周围区域,且在界面拉伸强度等于基体材料的屈服强度时,基体损伤最小。

### 粉末冶金涡轮盘可靠性研究

非金属夹杂及气孔等缺陷增加了粉末冶金涡轮盘寿命的分散性,因此需要对涡轮盘寿命进行可靠性研究。徐凌志等<sup>[105]</sup> 通过建立考虑应力及断裂参数随机性的裂纹扩展失效功能函数,提出了亚表面裂纹扩展寿命计算方法。J.Luo 等<sup>[106-107]</sup> 研究了含表面缺陷的 Udimet 720 裂纹生长行为,并用概率方法建立了 Udimet 720 的疲劳寿命预测模型。R.E.Melchers 等<sup>[108]</sup> 进行了基于 MPP 的可靠性灵敏度分析。Y-T.Wu 等<sup>[109]</sup> 提出了基于结构响应 CDF 的可靠性灵敏度分析方法。吕震宙等<sup>[111-117]</sup> 基于限界不确定原理和方法,对粉末冶金涡轮盘寿命进行稳健性分析与设计; 基于对某粉

末冶金材料的力学性能试验结果,结合专家经验、同类产品信息和现场数据,对某粉末冶金涡轮盘在实际谱循环载荷作用下最危险部位的应力进行了计算,得到了不同置信度下粉末冶金涡轮盘的实际安全寿命; 以粉末冶金夹杂裂纹扩展寿命预测理论为基础,建立了裂纹扩展可靠性分析的剩余强度干涉模型与寿命干涉模型,并以此为基础建立了多夹杂裂纹扩展的可靠性灵敏度分析模型; 研究了涡轮盘寿命可靠性灵敏度随基本变量变异系数变化的趋势,分析变化趋势对设计的影响。蒋向华等<sup>[118]</sup> 对比分析了应力 - 强度干涉法和模糊概率积分法 (FPI) 计算航空发动机涡轮盘关键位置结构可靠度的结果,说明了 FPI 方法的有效性和快速性,并通过 FPI 方法得到了整个涡轮盘的结构可靠度分布。冯引利等<sup>[119]</sup> 通过对某亚尺寸粉末冶金盘试验件的低循环疲劳试验,对考核部位的寿命概率分布参数的敏感性进行了分析,得到了一种适合于亚尺寸粉末盘寿命可靠性的预估方法。

### 结束语

涡轮盘是航空发动机的主要零部件之一,粉末高温合金因具有组织均匀、晶粒细小、屈服强度高、高温疲劳性能好等优点,而成为涡轮盘的首选材料。国外粉末冶金涡轮盘的研制已经到了第 4 代,寿命预测方法也日渐成熟,而我国粉末冶金材料和国外还有一定差距,寿命预测方法还在发展阶段。建立更合理的本构模型,深入研究蠕变疲劳相互作用的机理,加强损伤容限定寿方法的实际应用,追求更高的可靠性,将会使粉末冶金涡轮盘的应用更为安全、经济,进而促进航空发动机事业的发展。

本文有参考文献 119 篇,由于篇幅所限未能一一列出,读者如有需要,请向编辑部索取。(责编 岩石)