

图 2 粉末高温合金涡轮盘件

(a)先进涡轴航空发动机 FGH 95 涡轮盘及叶片;

(b)高推重比涡扇航空发动机 FGH 96 高压涡轮盘

Fig 2 Turbine discs made from P/M superalloy

(a) FGH 95 turbine disc and blades used for advanced turboshaft engine

(b)HP turbine disc used for turbine fan engine with high thrust to weight ratio

固溶线温度热处理,得到各种  $\gamma'$  尺寸相匹配的细晶组织;第二代合金是以 FGH 96 合金为代表的,使用温度为  $750^{\circ}\text{C}$  的损伤容限型粉末高温合金,  $\gamma'$  强化相含量占总体积的 35% 左右,采用高于  $\gamma'$  固溶线温度热处理,得到具有弯曲晶界的粗晶组织,该合金具有良好的抗疲劳裂纹扩展性能<sup>[2]</sup>。为了适应更高性能航空发动机发展对材料的需要,近期将展开第三代使用温度为  $800^{\circ}\text{C}$  以上具有高强 + 损伤容限型特性的合金研制。

### 1.2 快速凝固预合金粉末的对比研究

采用预合金化粉末快速凝固技术,以等离子旋转电极 (PREP) 和氩气雾化 (AA) 方法制备高温合金粉末,得到了无宏观偏析,均匀的预合金粉末。图 3 为粉末的形貌及组织。由于氩气雾化粉 (AA 粉) 是母合金经二次重熔后通过氩气雾化成粉末,粉末粒度较细;等离子旋转电极粉 (PREP 粉) 是固态微区熔化后再经离心雾化成粉末,粉末粒度较粗。另外由于合金过热度不同,对粉末冷却微观组织也会带来一定的差异。比较两种合金的组织可以看出,AA 粉是以胞状晶为主,树枝晶为辅的混合组织;PREP 粉是以树枝晶为主,胞状晶为辅的组织。

### 1.3 粉末处理技术

#### 1.3.1 高温合金粉末夹杂分离与检测技术

粉末纯净度是粉末高温合金冶金质量的关键控制技术,为此北京航空材料研究研制了一台新型高温合金粉末摩擦电选分离与夹杂检测设备,设备的原理是根据粉末中金属颗粒、陶瓷类夹杂在带电金属滚筒动态摩擦表面导电特性的差异进行陶瓷分离。试验结果表明,经电选后分离率达 85% 以上,粉末中夹杂检测的准确度和可靠性得到提高。该技术对解决国内粉末盘夹杂物超标难题进行了有益的

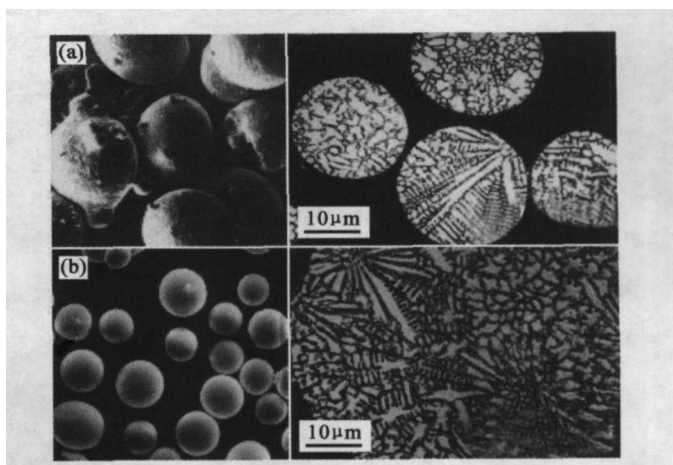


图 3 粉末的形貌及组织

(a) AA 粉; (b) PREP 粉

Fig 3 SEM morphology of powder and its micro-structure

(a) AA powder (b) PREP powder

探索。另外,建立的水淘洗法粉末夹杂物检测装置与技术也验证了上述检测方法的可靠性。

#### 1.3.2 粉末表面净化处理技术

热诱导孔洞 (TIP)、原始颗粒边界 (PPB) 和夹杂物是三种危害粉末盘冶金质量与力学性能的主要缺陷。原始颗粒边界碳化物析出将严重阻碍颗粒之间的扩散连接而形成弱界面,成为裂纹优先形成的源区和扩展通道。热诱导孔洞是影响合金致密化的关键因素。粉末表面净化处理技术,是利用粉末颗粒在真空温度场下解吸脱附的原理,使粉末在经过真空环境的温度场下动态运动时粉末表面吸附的气体充分解吸,因而有效解决了原始颗粒边界和热诱导孔洞缺陷问题,并且建立了自己的分析方法和理论表达式。图 4 为粉末表面热动态除气处理 PPB 改善效果比较<sup>[3]</sup>。

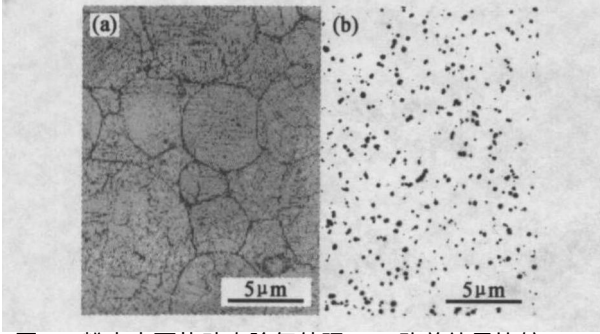


图 4 粉末表面热动态除气处理 PPB 改善效果比较  
(a) 未经处理; (b) 处理后

Fig 4 Comparison of improved PPB effect by powder degassing  
(a) untreated powder; (b) treated powder

### 1.3.3 粉末表面强韧化处理技术

粉末表面改性是利用粉末自由表面易于扩散的特点,通过热等静压前粉末在包套中表面改性预处理 (PHT),使粉末颗粒表面析出相的特征参数  $\lambda/\rho$  ( $\lambda$ 析出相间距,  $\rho$ 析出相直径)明显增大,表面析出相稳定性增强,从而保证热等静压时颗粒界面的充分扩散,热等静压后合金的颗粒界面得到韧化。研究表明,经粉末颗粒界面韧化处理,合金的塑性和持久性能提高近一倍,并改善了合金的断裂行为,断裂由沿颗粒断裂变为穿颗粒断裂。图 5 为粉末表面改性处理对合金性能的影响<sup>[3]</sup>。

### 1.4 夹杂物的遗传性研究

粉末高温合金中的夹杂物主要来源于母合金熔

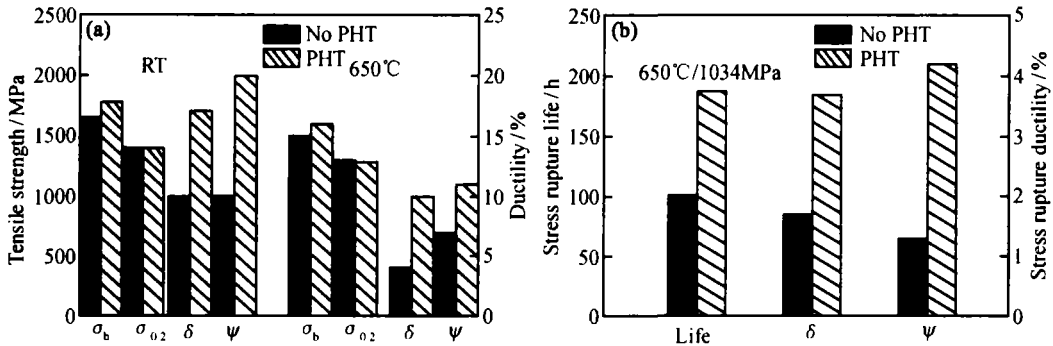


图 5 粉末表面改性处理对合金性能的影响

(a) 拉伸性能; (b) 持久性能

Fig 5 Effect of PHT on alloy properties

(a) tension property (b) rupture property

炼的坩埚耐火材料、熔炼过程中的脱氧产物、雾化制粉用的漏包、喷嘴及粉末的后续处理过程。目前,已采取相应的去除夹杂措施,粉末的纯净度已获得明显改善,但合金中的非金属夹杂物尚未达到技术要求。夹杂物对粉末高温合金盘件的冶金质量和力学性能的影响直接关系到盘件使用的安全、可靠性。为此,开展了对三种有代表性的夹杂物 ( $Al_2O_3$ ——既不与基体反应也不变形;  $SiO_2$ ——与基体反应但不变形; 莫来石——既与基体反应又变形)从母合金熔炼到最终热处理过程中各工艺状态的特征(成分、尺寸、形态及分布等)进行遗传性分析研究<sup>[4]</sup>。结果表明,三种夹杂物在各工艺过程中与基体之间的界面结合方式和元素分布表现出不同的行为特征。同时,开展了夹杂物对粉末高温合金涡轮盘低周疲劳(LCF)寿命的影响研究:在扫描电镜(SEM)下观察含有夹杂物的FGH96合金原位拉伸和原位

疲劳的微观力学特征,从微观角度揭示了夹杂物对裂纹萌生、扩展和材料失效的影响规律,并结合计算机模拟夹杂物对合金盘件低周疲劳寿命的影响,为涡轮盘中夹杂类缺陷容限的研究提供依据<sup>[5]</sup>。

### 1.5 热等静压包套设计的数值模拟及包套充填与封焊技术

为实现复杂形状涡轮盘的热等静压近尺寸成形,应用有限元模拟技术研制了热等静压致密化过程分析软件,实现了复杂形状包套近尺寸成形的高精度设计和盘件的近尺寸成形。该软件还可针对盘件大中心孔在热等静压过程中的扩张或收缩、包套封焊的设计以及包套壁厚的选择等问题进行可靠的预测。图 6 为涡轮盘包套热等静压前后计算机分析与实测结果比较。近尺寸包套设计与制备技术在航材院的电子束包套充填封焊设备上装套后经热等静压成形得到了满意的验证结果<sup>[3]</sup>。

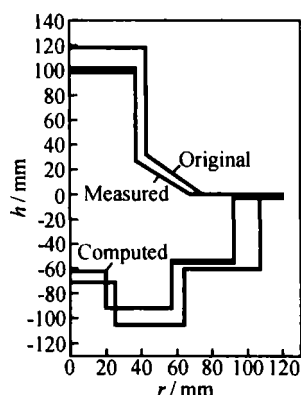


图 6 涡轮盘包套热等静压前后计算机分析与实测结果比较

Fig 6 Comparison of computed and measured results of capsule sizes before and after HIP

### 1.6 粉末高温合金热等静压致密化成形与组织控制技术

热等静压技术是国内外用于粉末制件致密化成型的重要技术手段。通过对粉末高温合金在热等静压过程中压力、温度和保温时间对材料致密化以及组织性能影响的研究,实现粉末高温合金涡轮盘热等静压致密化和近尺寸成型工艺过程控制,还为后续的等温锻造和热处理提供预制坯的形状、尺寸和组织准备。

### 1.7 双合金热等静压复合连接技术

采用热等静压 (HIP) 技术可将粉末高温合金涡轮盘材料与铸造叶片材料复合连接成无机械连接的具有剪裁结构的整体涡轮叶盘 (Blisk)。它可将具有高温高强的叶片材料与中温高疲劳性能的涡轮盘材料通过热等静压工艺复合在一起,实现双合金盘片的最佳组合。而整体铸造叶盘单一铸造合金不能兼顾盘心、盘缘及叶片的性能;与机械榫槽连接的叶盘结构相比,它可以大大减少机加工量,减轻部件结构重量,从而提高涡轮转速和性能。在整体叶盘的制备中,盘与叶片材料的匹配,对偶材料的界面处理,以及盘与叶片热等静压复合连接及热处理工艺等是关键技术。图 7 是 FGH95 粉末盘 + K418 精铸叶片环复合成型的整体叶盘<sup>[6]</sup>。

盘芯、盘缘双合金热等静压复合连接技术还可以用于制造双合金双性能涡轮盘,使得盘芯材料具有较高的屈服强度、抗拉强度和低周疲劳性能,盘缘材料具有较高的高温蠕变抗力与较好抗裂纹扩展性能。双性能盘制造技术充分体现了粉末冶金技术剪裁结构,组织控制灵活等特点。

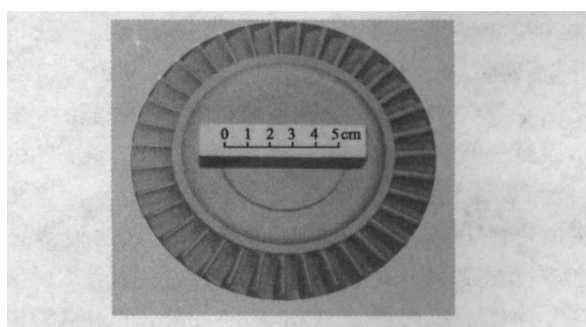


图 7 FGH95 粉末盘 + K418 精铸叶片环 HIP 复合整体叶盘

Fig 7 HIP bonded blisk produced from FGH95 disc + casted K418 blade rings

### 1.8 盘坯的热机械处理与大气下等温锻造技术

热等静压粉末高温合金盘坯经热机械处理后,可以获得平均晶粒尺寸小于  $10\mu\text{m}$  的稳定等轴细晶组织,超塑延伸率可以达到 825%;在恒应变速率等温压缩变形时,流变应力比热等静压态有较大幅度的降低,稳态流动时合金流变应力只有 50 MPa 左右。粉末盘成型采用热机械处理 + 超塑性大气等温锻造的工艺路线,已研制出外廓尺寸为  $\phi 680\text{mm}$  的粉末高温合金涡轮盘等温模锻件。等温锻造模具材料采用铸造高温合金或金属间化合物,其在等温锻造温度下的屈服强度可达  $400\sim 500\text{MPa}$ <sup>[9]</sup>。

### 1.9 盘件热处理技术

粉末高温合金涡轮盘在制备过程中热处理是最关键的工艺之一,它决定了盘件最终的组织、性能及完整性。由于粉末高温合金材料合金化程度高,  $\gamma'$  相含量高,零件形状复杂,体积及重量大,热处理工艺控制对盘件组织和力学性能、盘件热加工后的残余应力和盘件完整性至关重要<sup>[1]</sup>。为了实现粉末盘热处理后力学性能与热加工残余应力匹配控制的目标,开展了不同热处理参数对 FGH95 和 FGH96 两种合金组织和性能影响规律的研究,以及多种淬火介质的冷却特性,盘件热处理毛坯形状优化设计,盘件热处理淬火冷却路径及淬火方式优化控制等多方面研究,并建立起相应的设备工装条件。最终根据发动机对盘件的不同要求选择材料,确定相应的热处理制度,基本实现粉末盘热处理后力学性能与热加工残余应力优化控制目标。

### 1.10 粉末高温合金盘件超声波无损检测技术

在涡轮盘研制过程中,根据各工艺阶段材料声速、声衰减等超声特性,对盘件中缺陷的可检性做出分析和评价,针对材料声学特性,确定相应的检测方

法和检测参数。对比研究水浸聚焦法与接触法检测分析技术,以及分区聚焦法与不分区聚焦法检测缺陷的检测灵敏度,最终确定全尺寸高压涡轮盘采用多区聚焦检测方法,根据盘件的厚度,分多个区进行检测,设计和选择合适的探头参数,研究不同聚焦探头的声场分布情况,对盘件不同深度处的检测灵敏度进行测定和分析,并制定相应的检测标准。盘件在全深度范围内可检测到  $\phi 0.4\text{mm}$  平底孔-18dB 当量的缺陷,最高可检测到  $\phi 0.4\text{mm}$  平底孔-24dB 当量的缺陷,提高了盘件缺陷检测的灵敏度,为盘件的可靠性提供有效保证<sup>[1]</sup>。

### 1.11 粉末高温合金盘件喷丸强化处理技术

粉末高温合金涡轮盘在使用过程中,盘件表面完整性和盘件表面应力状态对使用的安全可靠性和寿命有重要影响。通过涡轮盘表面喷丸强化处理工艺可以提高盘件表面完整性,并使盘件表面形成微晶组织,同时在盘件表面形成压应力,抑制表面萌生疲劳裂纹。图 8 为 FGH 96 合金缺口试样 ( $K_t = 1.7$ ) 喷丸前后的高温旋转弯曲疲劳 S-N 曲线,可以看出,喷丸处理可以使高温疲劳抗力提高约 19.8%。

### 1.12 盘件关键加工过程计算机数值模拟技术

针对粉末高温合金盘件形状复杂,热加工工序多,难度大,质量控制要求高,价格昂贵的特点,采用计算机数值模拟的方法对粉末盘热工艺过程进行模拟与性能预测技术研究,可减少试验次数,节约昂贵的材料,加快从预研到工程化的试验进程,提高涡轮盘研制质量。

应用 Kuhu & Downey 的粉末屈服准则,将热等

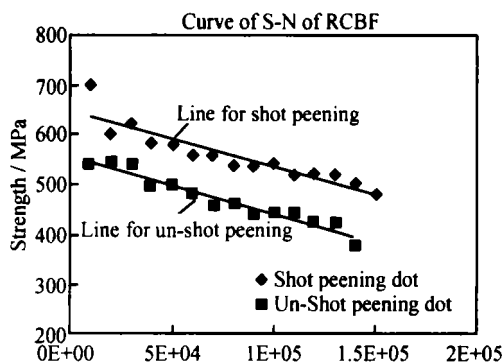


图 8 FGH96 合金缺口试样 ( $K_t = 1.7$ ) 喷丸前后高温旋转弯曲疲劳 (RBF) S-N 曲线

Fig 8 High-temperature rotate-bend fatigue S-N curve of FGH96 alloy nick specimens before and after shot peening treatment

静压的致密化过程按轴对称非稳定温度场进行有限元分析,并编制有限元分析软件,热等静压成形过程模拟得到盘件的温度和密度场分布(图 9)。经热等静压致密化工艺过程控制及验证,盘件和预制坯得到所要求的显微组织<sup>[3]</sup>。

采用 Marc AutoForge 软件对高温合金粉末盘的锻造过程进行初步数值模拟,研究变形过程中坯料的流动充填规律和各力学量场的变化规律,图 10a 为涡轮盘等温模锻工艺过程模拟分析结果。另外通过对不同尺寸、形状、结构的铸造高温合金等温锻模具加热过程的热载分析,预测模具所能承受的最大温度梯度及模具各部位的热应力分布,图 10b 为模具结构设计模拟结果。

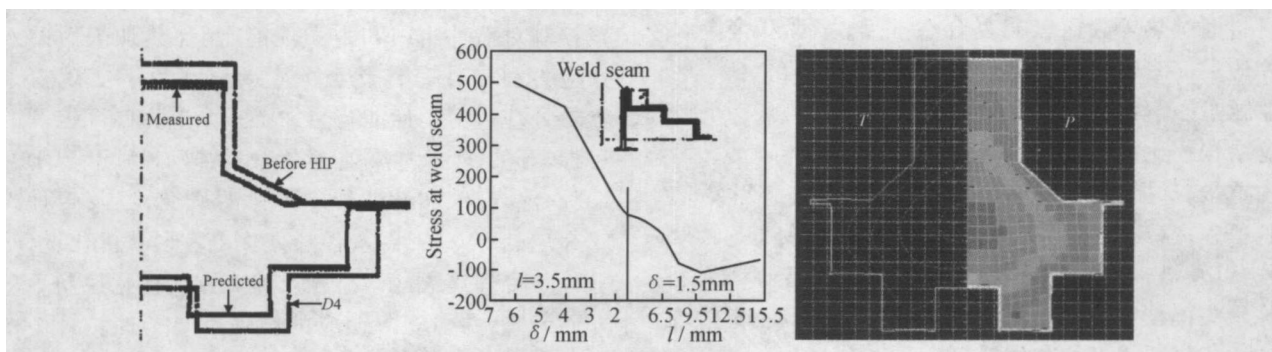


图 9 热等静压过程致密化和温度场模拟

Fig 9 Compact and temperature field simulation during HIP process

为了使盘件固溶后不产生过大的淬火相变组织应力和热应力,避免盘件在淬火时产生淬裂或变形,采用 Ansys 软件对高温合金粉末盘的热处理过程不同冷却条件下温度场、应力场及形变量进行模拟计

算分析,图 11 为热处理过程温度场、应力场模拟分析结果。该研究为保证大型复杂结构的粉末高温合金涡轮盘件热处理淬火完整性、控制盘件淬火残余应力且使盘件达到足够的力学性能奠定了基础。

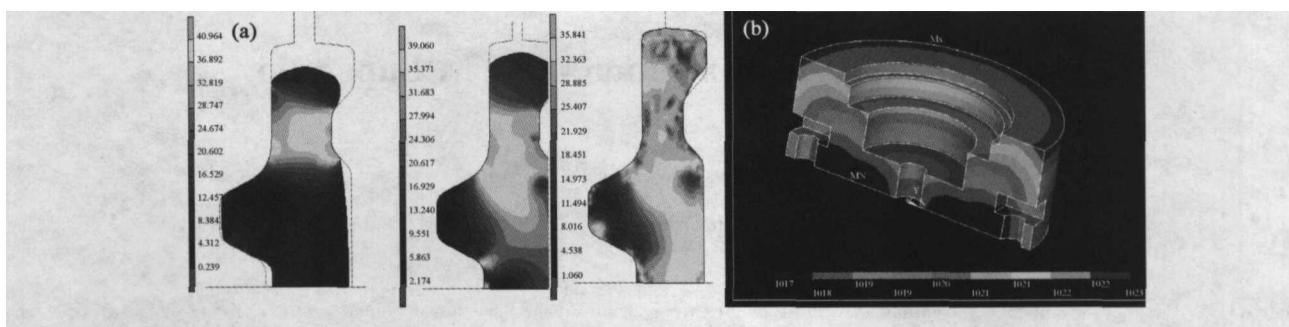


图 10 高温合金粉末盘的锻造过程数值模拟

(a) 涡轮盘等温模锻工艺过程分析; (b) K21 合金模具结构设计

Fig 10 Simulation of forging process for PM superalloy turbine disc

(a) process analysis of isothermal die-forging for turbine disc

(b) structure design of K21 alloy die

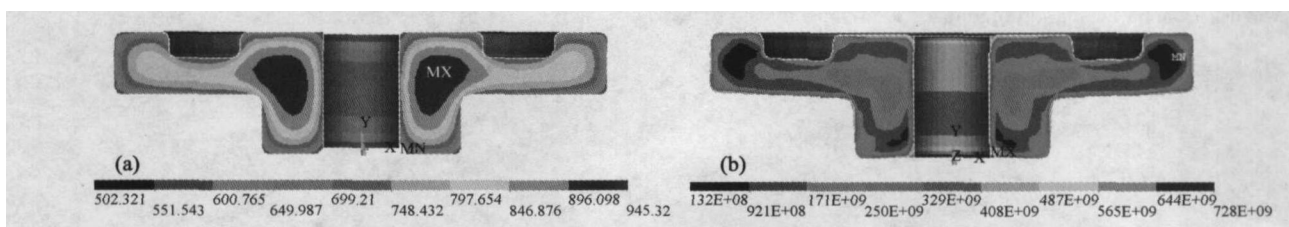


图 11 热处理过程温度场、应力场模拟分析结果

(a) 温度场模拟分析; (b) 应力场模拟分析

Fig. 11 Simulant results of HT temperature and stress fields

(a) simulant analysis of temperature field (b) simulant analysis of stress field

## 2 结束语

(1) 我国研制的两代粉末高温合金——FGH 95 和 FGH 96 通过预先研究、应用研究及工程化研究, 先后进入考核和应用。第三代 800℃ 以上粉末高温合金将起步研制。

(2) 现阶段我国粉末盘制备的基本工艺路线为快速凝固预合金粉末 + 直接热等静压成型或热等静压预制坯 + 大气下等温锻造。

(3) 粉末表面净化和表面强韧化处理技术、包套设计与装填封焊技术、热等静压致密化成型技术、预制坯热机械处理技术、大气下盘件等温锻成型技术与固溶处理组织控制技术等相关技术的突破, 保证了粉末盘组织与性能稳定化和盘件完整性。

(4) 数值模拟与验证技术的应用提高了粉末盘的质量和研发进度。

(5) 具有剪裁结构的双性能涡轮盘和整体叶盘 (Blisk) 是粉末盘制造技术的主要发展方向。

## 参考文献:

- [1] 汪武祥, 邹金文. 粉末高温合金涡轮盘技术发展研究 [A]. 航空先进材料与热工艺会议文集 [C]. 北京: 中国航空学会, 2005.
- [2] 中国航空材料手册编委会. 中国航空材料手册, 第五卷: 粉末高温合金 [M]. 第二版. 北京: 中国标准出版社, 2002 29-47.
- [3] WANG W u-xiang MAO Jian, YANG Wan-hong *et al.* The development and application of HIP of superalloys in aviation industries of China [A]. International Conference on (HIP'99) [C]. Beijing IAP, 1999 58-69.
- [4] 邹金文, 汪武祥. 粉末高温合金中夹杂物特征及其对材料断裂行为影响的研究 [J]. 金属学报, 1999, 35(10): 81-84.
- [5] 周晓明, 汪武祥, 杨洪涛, 等. HIP 态 FGH96 合金中人工加入非金属夹杂物的特征 [J]. 航空材料学报, 2005, 25(4): 1-5.
- [6] HE Feng WANG W u-xiang Study of PM superalloy blisk prepared by HIP diffusion bonding [A]. International Conference on (HIP'02) [C]. Moscow Russia VILS, 2002 75-80.

# Development and Application of P/M Superalloy

ZOU Jin-wen    WANG Wu-xiang

(Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

**Abstract** P/M superalloy becomes excellent material for fabricating turbine discs used for advanced aviation engine due to its special structure and properties. To advance the applicable property and security of aviation engine, the material from melting original alloy to engineering application of turbine disc was studied, and remarkable results in aspect of some key technologies were gained due to the result of the foundation of fabricating technique for turbine disc and the establishment of process and testing documents. Numerical simulation is widely used to fabricate P/M turbine disc for the purpose of shortening studying period and optimizing processes, and the preparatory experimental results were achieved.

**Key words** aviation engine; turbine disc; P/M superalloy