

我国航空涡轮高温材料及工艺进展

Progress in Cast High Temperature Materials and Technology for Aero-engine Turbine Components in China

殷克勤 (北京航空材料研究院)

Yin Keqin (Institute of Aeronautical Materials, Beijing)

[摘要] 扼要介绍了北京航空材料研究院 (BIAM) 近年来在航空发动机涡轮部件用铸造热强材料及工艺的新进展, 包括: 单晶合金; 铸造金属间化合物基叶片合金; 细晶铸造工艺; 生产单晶叶片用的模料、型芯、壳型。

关键词 涡轮叶片 单晶合金 金属间化合物合金 细晶铸造 熔模铸造

[Abstract] In this paper, the new progresses of high temperature materials and technology for aero-engine turbine components in Beijing Institute of Aeronautical Materials (BIAM) has been introduced which include single crystal superalloys, cast IMC-based alloy, fine-grain casting, and ceramic core, shell-mould, wax materials.

Keywords turbine blade single crystal superalloy IMC alloy fine-grain casting investment casting

1 前言

近半个世纪以来, 航空发动机技术取得了巨大的进步, 军用发动机推重比已从初期的2~3提高到7~8。最近几年, 美国和西欧等国已研制出推重比10一级的发动机 (如P119和EJ200), 到2000年美国还计划使推重比达到20的水平, 这就对材料和制造技术的发展提出了更高的要求。

我国航空发动机的发展是沿着测绘的路子走过来的, 由于受到临战战略和投资强度不足等因素长期影响, 造成发动机预先研究和储备不足的被动局面, 现与西方的差距达25年之久。因此, 必须立足于独立研究, 争取在有限目标方面缩短与世界水平的差距。“八五”期间针对我国发动机研制的要求, 开展了新材料和工艺研究, 取得了重要成果。本文主要叙述北京航空材料研究院 (BIAM) 在下列几方面的研究进展。

2 单晶合金

目前, 我国正在研制的几个新型发动机选用了定向合金 (DZ22、DZ125) 作为涡轮叶片材料。但是发动机性能的进一步改善和发展, 必须使用性能水平更高的单晶合金才能满足要求, 为此重点研制了DD2、DD3、DD4

等我国第一代单晶高温合金。

DD3单晶合金是我国自行研制的第一个已用于发动机的单晶合金。该合金不含Ta、Re、Hf等稀有元素, 密度低、成本低, 其性能水平与国外使用最广的PWA1480单晶合金相当。该合金已成功地用于发动机高压涡轮叶片, 并经过了高速试车试验。目前, 正与美国PW公司合作, 拟在此基础上共同研制新的第二代单晶合金DD398。

DD2单晶合金是八五期间研制的新合金, 合金性能达到并超过国外同类合金的水平 (见本期《DD2单晶高温合金》)。该合金有较好的疲劳性能、抗氧化、抗腐蚀性能和良好的铸造工艺性能, 成功地制成了空心叶片样件 (图1), 可在新机上使用。

通过该合金研制, 建立了计算机实时数据采集及热分析计算系统。在单晶工艺上, 采用两区加热及复合式挡板, 将温度梯度控制到 $G = 60 \sim 80$ /cm, 使单晶成功率大大提高。

DD4单晶合金性能水平达到了 $\sigma_{1000}^{0.40} = 145$ MPa的技术指标。由于该合金含有较多的W、Mo、Ta、Nb等高熔点元素, 所以具有多元强化、高体积百分比 γ (54%) 第二次强化作用及无碳无晶界强化元素等特点, 用其制成的发动机封严篦齿环 (图2) 已挂机试车。合金在熔炼、成形热处理、零件制作工程化等方面突破

了许多技术关键,为今后推广使用打下了良好的技术基础。



图1 DD2单晶合金空心无余量高压涡轮叶片
Fig. 1 Cooling turbine blades manufactured from DD2 single crystal superalloy

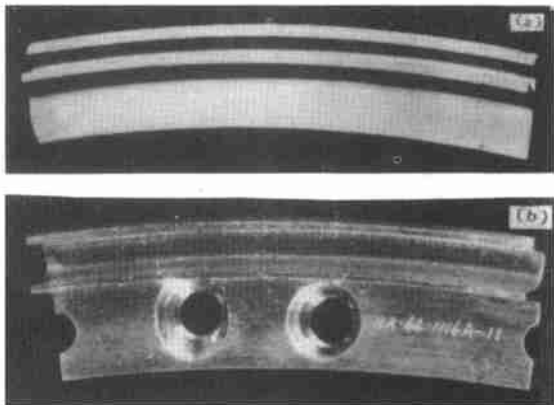


图2 DD4单晶合金封严箍齿环 (a) 毛坯件 (b) 试车件
Fig.2 HPT aft seals manufactured from DD4 single crystal superalloy: (a) blank, (b) finished product

单晶合金的应用在国内还刚刚起步,其中,DD3单晶合金研制和使用中遇到的不少技术问题,为单晶合金在航空发动机上的应用创造了条件,起到了促进作用。如:

- (1) 低碳高纯单晶合金熔炼技术: 利用高温高真空加搅拌等一系列技术措施,将DD3单晶合金熔炼成较纯的低碳单晶合金,合金中C 0.005%,S 0.001%,O 0.001%,N 0.0005%。
 - (2) 热处理工艺: 一般单晶合金采用三步热处理(如DD2合金的热处理制度为1310 /4h.AC+1100 /4h.AC+870 /20h.AC),而DD3单晶合金只
- 4 •

采用固溶+时效两步热处理,将涂层工序放在时效之后,确保合金性能有利于生产。

- (3) 单晶螺旋选晶器结构研究: 单晶螺旋选晶器结构对选晶效果有较大影响,尤其是螺旋角的控制更为重要。但是,螺旋选晶器却无法控制横向结晶取向。横向取向的控制国外一般采用籽晶法,我们则实现了螺旋选晶法对横向取向的控制,效果良好。
- (4) 采用Pt-Al涂层: 为提高叶片服役过程中的抗氧化抗腐蚀性能,采用了Pt-Al涂层,经过40多小时发动机试车,无任何故障。

3 Ni₃Al基铸造高温合金

IC6合金是我国首次研制成功并用于发动机的金属间化合物(Ni₃Al)基铸造高温合金。合金的性能水平见表1,可以看出,IC6合金比俄罗斯的合金性能好。该合金已制成形状复杂、尺寸较大的发动机级导向叶片,实现了整件定向铸造(图3),经过试车考验取得良好效果,在国内尚未见类似报道。但是,由于该合金含有较多的Mo,其抗氧化、抗腐蚀性能稍差,必须加涂层才能较好使用。目前正在进一步改进,提高合金本身的抗氧化腐蚀性能,同时改善铸造性能,以获得一种优良的导向叶片材料。

表1 先进Ni₃Al基铸造高温合金的主要性能

Table 1 The main properties of Ni₃Al-base cast superalloy

性能	美国 EX-7	俄罗斯 BKHA-4	俄罗斯 BKH-4y	中国 IC6
密度, g/cm ³	8.0	7.84	7.91	7.9
900 -100h 持久强度, M Pa	-	245	274	343
1050 持久强度, M Pa	-	196	196	147
持久寿命, h	-	11	11	40
1100 -100h 持久强度, M Pa	69	64	93	100

4 高温合金细晶铸造工艺

航空发动机导向器叶轮、喷嘴环、形状复杂的扩压器机匣、风扇框架等整体结构铸件,一般都在中低温条件下工作,承受交变载荷,低周疲劳是其破坏的主要机制。采用细晶铸造技术,控制铸件宏观晶粒度,改变碳化物等形状大小,有效地提高了材料的低周疲劳性能。因此,高温合金薄壁整体结构铸件的细晶铸造技术是制

备发动机大型薄壁铸件的基础工艺。



图3 IC6合金 级导向叶片

Fig. 3 2nd stage vanes manufactured from IC6 alloy

目前,国外生产细晶薄壁整体结构铸件用的主要方法是控制参数法(FGC)和Howmet公司的MX工艺。FGC法是采用适当的型壳预热温度并控制浇注温度,使铸件组织整体细化。MX法是将过热度为11~17的合金液浇注到预热铸型中进行快速凝固,并在凝固过程中伴以机械搅动,获得等轴状细晶组织的整体结构铸件。

我国细晶铸造工艺研究刚刚起步,航材院按细晶工艺的特点设计制造了一台细晶铸造炉,在该台设备上用热控法浇注了细晶叶片,叶片晶粒度达到ASTM 2~3级(见图4);用机械振动法浇注的发动机启动器2级整体叶盘正在进行试车。

细晶铸件的性能有明显改善,如K418合金细晶铸造棒低周疲劳性能为普通铸造的3倍以上,可见细晶铸造工艺有着广阔的前景。

5 单晶叶片精铸用的模料、型芯、壳型的发展

由于单晶合金本身的特点和单晶叶片要在较高的温度下进行制造,因此精铸单晶空心无余量叶片所用的模料、型芯和型壳也将有特殊的要求。近年的模料、型芯、型壳研究已取得了一定的进展,研制出了适用于单晶合金、单晶叶片精铸用的模料、型壳、型芯及相关工艺。

5.1 单晶合金用模料和制模工艺

单晶合金用的模料,要求在不降低模料流动性前提

下提高强度、减少收缩。经过研制,新的单晶模料性能见表2。



图4 热控法制造的发动机涡轮叶片

Fig. 4 Turbine blades manufactured from controlled temperature

表2 单晶合金模料的性能

Table 2 Properties of mould material for single crystal superalloy

强度	线收缩率	流动性	热稳定性	灰分	粗糙度
6.3MPa	0.49%	13mm	8.1mm	0.049%	Rz0.1~0.4μm

用这种模料制备单晶叶片,质量良好。同时研制了一种制作螺旋选晶器模料,其性能见表3。这种螺旋选晶器的模料经过多次使用效果较好。

表3 螺旋选晶器模料的性能

Table 3 Properties of mould material for a pig tail

强度	线收缩率	脆性	热稳定性
7.6MPa	0.71%	18mm	2.47mm

5.2 单晶空心无余量叶片用陶瓷型芯

单晶空心叶片要求型芯在较高的温度下进行定向凝固,故普通的SiO₂型芯使用受到了限制,须研制一种新的Al₂O₃基型芯。我们在俄罗斯BИАМ Al₂O₃型芯材料的基础上做了进一步改进,取得了较好的效果。这种Al₂O₃型芯的基本性能如下:

$\sigma^{20} = 29.0\text{MPa}$, $\delta = 2.1\%$, 与俄罗斯BИАМ的Al₂O₃型芯相当;高温性能 $\sigma^{1300} = 8 \sim 10\text{MPa}$, $\sigma^{1380} = 3 \sim 6\text{MPa}$, $\Delta H^{1550} \times 0.5h = 0.5 \sim 0.8\text{mm}$, $\Delta H^{1600} \times 0.5h = 1.0 \sim 2.0\text{mm}$, 优于俄罗斯BИАМ的Al₂O₃型芯。这种型芯

(下转第12页)

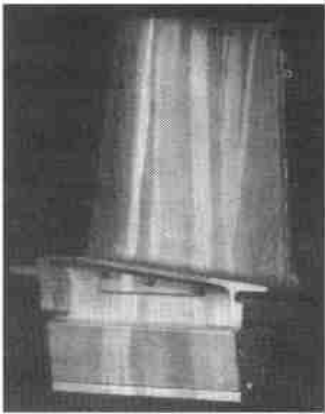


图6 DZ125合金涡轮叶片

Fig. 6 The turbine blade made of DZ125 alloy

4 结论

- (1) DZ125定向凝固高温合金具有高的中、高温力学性能,其性能水平达到甚至超过美国广泛应用的高性能定向凝固高温合金 PWA1422。
- (2) DZ125合金具有良好的可铸性和小的薄壁效应,可用于制造内腔复杂的薄壁空心涡轮叶片。

参考文献

1 P. Aldred. SAE 751049, 1975
2 渡边力藏. 铁と钢. 1975, 61 (9): 2274
3 D. N. Duhl. USP3711737, 1973
4 J. M. Marder. AD- A077270, 1979
5 郑运荣. 金属学报. 1986, 22 (2): A119

(上接第5页)

在1540~1600 浇注单晶空心叶片, 经过50多炉次浇注, 其叶片包芯率大于66%, 叶片壁厚经工业CT 检测符合要求, 型芯能用化学法脱除。

由于采用了二元矿化剂改变了型芯矿化剂分布不均匀问题和本身团聚的缺点, 故型芯的综合性能较好, 采用了两级焙烧法改善了烧成型芯的表面质量, 提高了型芯的烧成率, 达到80% 以上。

5.3 薄壁高强度壳型

由于单晶叶片在较高温度和较大的温度梯度下进行定向凝固, 因此要求单晶叶片用型壳具有较高的高温强度和较好的耐急冷急热等性能。一般来说, 壳型工作温度为1540~1600 , 1500 抗弯强度为3~5MPa, 1600 圆环自重变形小于5mm, 平均壁厚为4~6mm, 而且适用于快速凝固。研制出的一种高强薄壁新壳型, 其基本性能满足了上述要求, 称为811B 壳型。经过不同

单晶炉浇注单晶试棒和叶片试验, 表明性能良好。

俄罗斯 BIAM Al₂O₃壳型的壁厚为5~7mm, 每批生产周期为2周, 壳型要求在低于600 下入炉浇注, 这种壳型条件在我国定向炉使用中难以达到, 不利于连续工作。南非制造的壳型, 其壁厚为7~8mm, 工作温度为1500 , 但经常漏钢, 难以制备单晶。811B 壳型与俄罗斯、南非壳型相比, 具有较大的优点, 它可以在1600 工作, 可以在1200 入炉, 定向单晶炉中连续工作, 而壁厚仅3~6mm, 生产周期仅5天, 故有明显的优越性。

综上所述, “八五” 期间航材院在航空发动机的几个关键材料和工艺方面的研究, 取得了令人鼓舞的进展。这些成果的推广应用, 必将推动我国航空工业更快发展。

(上接第8页)

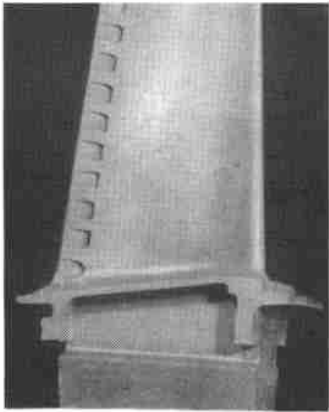


图6 DD3单晶空心叶片

Fig. 6 Single crystal hollow turbine blades of DD3

4 结论

BIAM 和 P&W 经过共同评估认为: DD3单晶合金具有成分简单, 成本低的优点, 力学性能与 PWA1480 相当, 并具有良好的组织稳定性和良好的单晶铸造工艺性能, 但抗氧化腐蚀能力较 PWA1480差。为此, 双方商定在此评估基础上, 将共同研制综合性能与 P&W 公司第二代单晶合金 PWA1484相当的低成本合金。

参考文献

1 陈荣章. 材料工程, 1995, (8): 1
2 D. M. Shah and D. N. Duhl. Proc. of 5th Inter. Symp. on Superalloys 1984: 105