

单晶叶片用氧化铝基陶瓷型芯 AC-1

Alumina-base Ceramic Core AC-1 for Single Crystal Blades

曹腊梅 杨耀武 才广慧 蒋增荣 (北京航空材料研究院)
Cao Lamei Yang Yaowu Cai Guanghui Jiang Zengrong
(Institute of Aeronautical Materials, Beijing)

[摘要] 研究了单晶叶片用氧化铝基陶瓷型芯 AC-1的材料组成及焙烧、强化和脱芯工艺;介绍了 AC-1型芯的各项性能和应用情况。
关键词 氧化铝基 陶瓷型芯 单晶

[Abstract] Material composition, processing about sintering, strengthing and leaching of alumina-base ceramic AC-1 for single crystal blades has been investigated. The properties and applications of AC-1 core are described.

Keywords alumina-base ceramic core single crystal

1 前言

我国广泛用于定向空心叶片生产的型芯是以氧化硅为基体的材料,随着单晶叶片的发展和应用,这类材料的现有性能已难承受制造单晶叶片时极为苛刻的浇注和凝固条件,因此必须研究一种高温性能更佳、综合性能更好的型芯材料,以适应航空发动机的发展。本文对经过多年努力研究成功的一种以 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 为基体的新型陶瓷材料 AC-1 予以介绍。

2 试验方法

将选定的基体材料、矿化剂和增塑剂搅拌配成均匀的浆料;在 Y41-10C 型液压机上以传递模方式压制型芯试样或零件,压制时浆料温度不超过 120 ;在 RX2-25-13 型箱式炉中按预定工艺焙烧型芯,型芯须埋入耐火匣钵内的氧化铝粉隔料中。

对烧成的型芯试样测试了抗弯强度、挠度、线膨胀系数、孔隙率等性能。室温抗弯强度在 XL-50A 型试验机上进行,高温抗弯强度在 XCZ-1600 型试验机上测试。

用 JEOL-35 扫描电镜和 BD90 型 X 射线衍射仪对型芯微观组织进行分析。

用 AC-1 型芯料制成的不同型号涡轮叶片的型芯,分别在 ZGD-1 (国产)、VBHK-817 (俄) ISP2/

(德) 和 5241-2A/SA (美) 型炉子上浇注单晶叶片。

3 结果和讨论

3.1 型芯基体材料及矿化剂的选择

作为陶瓷型芯主要组成的基体材料,必须具备足够的耐火度、与金属熔体之间不发生激烈反应、组成和结构稳定并且易控制等特点。因此选用了熔点达 2054 的 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 作为基体材料,并对不同工艺方法获得的 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 试验了化学组成、粒度分布及微观结构,最后选定一种粒度易控制、化学成分稳定并且价格适宜的 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 粉作为型芯的基体材料,表 1 为其化学组成。

表 1 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 基体料的化学成分 (%)

Table 1 Chemical composition of $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ based material

Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O	Na_2O	CaO	SiO_2	TiO_2
99.12	0.03	< 0.01	0.40	0.04	0.21	-

研究中,选用了 4 种不同粒径的 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 粉 (分为粗细两类) 进行粒度级配试验,比较了不同方案下粉料的堆积状况;相同增塑剂下的浆料成形能力、型芯料的烧结能力 (烧成收缩率 δ 、烧成强度 σ) 等。最后选用的基体粉料,以烧成收缩率较小、烧成抗弯强度适中的粒度级配粉料组成。

试验了 9 种不同的一元、二元及三元复合矿化材料对选定粒度的基体材料烧结性能和高温性能的影响,结果表明:二元复合矿化剂 TC-1 作为 AC-1 的矿化剂较为

理想。它可以显著降低 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 基体的烧成温度，简化氧化铝型芯的焙烧装置。而且，矿化效果明显，添加量少，可保持基体 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 本身的高耐火度。TC-1 加入量以不超过 8% 为宜。

根据上述研究结果，确定 AC-1 氧化铝基陶瓷型芯组成为：92% ~ 99% $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ，1% ~ 8% TC-1，外加 13% ~ 18% 增塑剂。 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 是由不同粒度的粉料混合而成，其中粗粉含量为 60% ~ 75%。

3. 2 型芯焙烧工艺的确定

与氧化硅基型芯不同，氧化铝基型芯在升温过程中没有晶型转变，因此可以直接升温。但是研究发现：不同的终烧温度和升温速度对型芯性能有明显影响。

随着终烧温度的提高，烧成收缩率 (δ) 和室温抗弯强度提高 (见图 1)。随着升温速度加快，型芯烧成收缩率和烧成抗弯强度呈下降趋势 (见图 2)。同时发现，过高的升温速度会使焙烧后的型芯表面出现鼓包、粘砂；过低的升温又会使复杂型芯因 δ 过大而出现裂纹，影响型芯的烧成率。由其微观结构 (图 3) 可见，过快的升温速度使型芯内部孔隙的大小、分布不均匀。其原因在于过快的升温速度使导热性差的陶瓷各部位受热不均衡，先受热的部位，增塑剂先挥发；受热弱的部位在同一时间内增塑剂烧失程度小，进而影响随后的矿化过程。这将降低型芯的室温强度并使强化处理后高温性能波动较大。试验确定：50 ~ 200 /h 升温速度较为合适，从图 3b 可见，这时的孔隙分布均匀，晶粒粗细合适。终烧温度的高低取决于烧成抗弯强度及气孔率的要求，当烧成抗弯强度 $\sigma^{20} = 20 \sim 29\text{MPa}$ 、气孔率 π_0 达到 32% ~ 36% 时，型芯能满足压蜡模、脱蜡及强化和脱芯要求，因此确定 AC-1 型芯终烧温度为 1250 ~ 1450，保温时间 4 ~ 10h。

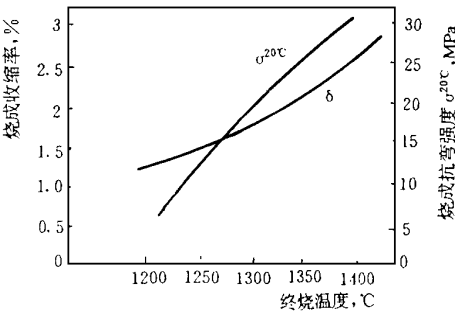


图 1 终烧温度对型芯烧成收缩率 (δ) 和室温抗弯强度 (σ^{20}) 的影响
Fig. 1 Effect of final sintering temperature on core shrinkage ratio and bending strength

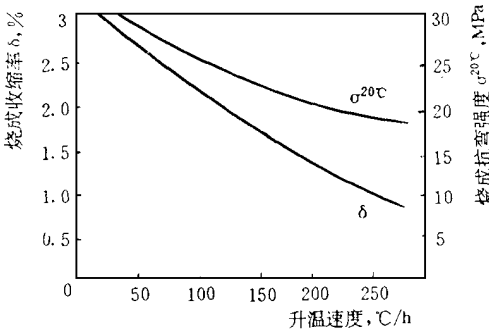


图 2 升温速度对型芯烧成收缩率 (δ) 和抗弯强度 (σ^{20}) 的影响
Fig. 2 Effect of heating speed on core shrinking ratio and bending strength

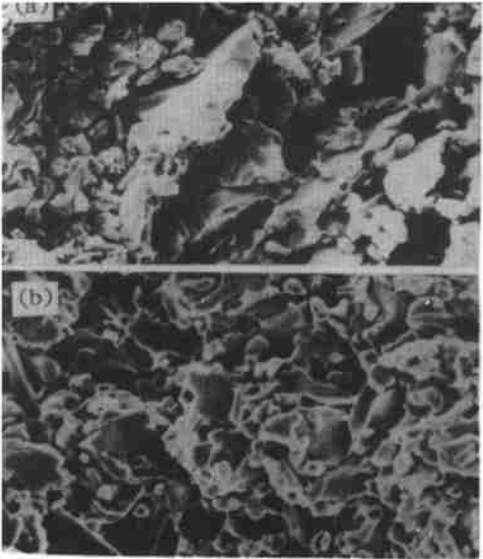


图 3 不同升温速度下焙烧的型芯断口组织 (SEM 照片) 300 ×
Fig. 3 SEM fracture micrograph of AC-1 core sintered at various heating rate
(a) 250 ~ 300 /h; (b) 50 ~ 200 /h

通过上述试验，确定 AC-1 型芯的焙烧制度为：以 50 ~ 200 /h 的升温速度从室温升到 1250 ~ 1450，保温 4 ~ 10h 后停电，炉冷到 200 以下出炉。按此工艺可获得 80% 以上烧成率。

3. 3 型芯烧成后的强化

试验中发现，烧成后的叶片型芯直接用于浇注单晶叶片，因高温性能太低而发生严重漏芯现象。因此，必须对烧成后的型芯进行强化处理。配制了 4 种不同的溶液进行试验。结果发现：用 CS-1 溶液处理的型芯，高温性能明显提高 (见表 2)，1500 抗弯强度由 0.3MPa 提高到 8.0MPa；1550 / 0.5h 挠度由 20mm 降至

0.7mm；线膨胀曲线拐点向高温段移动（图4），叶片烧成率大于70%。

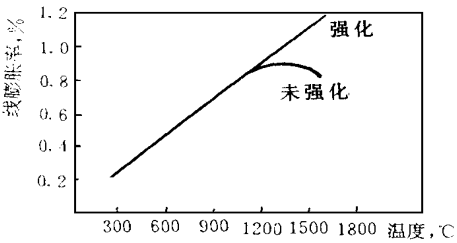


图4 强化前后 AC-1型芯的线膨胀曲线
Fig. 4 Linear expansion curve of AC-1 core

观察型芯强化前后的显微结构（见图5）可以看出：烧成后强化前的型芯断口（图5a）颗粒比较圆钝，颗粒间出现一定的熔接，存有一定的玻璃相；强化后，颗粒表面出现了大量的新生弥散相（图5b）。图5c为新生相的局部放大，新生相以柱状晶群形式存在。经X射线衍射定性和定量分析（见表3）表明，新生相为莫来石。莫来石的形成，主要是强化处理过程中CS-1溶液渗入烧成型芯的孔隙里，到达颗粒边界，在一定温度和时间条件下， Si^{4+} 与活性组分 Al_2O_3 发生扩散和传质运动，形成了莫来石 $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ 相。该相在陶瓷型芯内局部形成了高强的互锁网络，在单晶铸造条件下，它阻隔了液相的粘滞流动，使得型芯的高温变形速度下降，提高了AC-1型芯的高温性能和单晶浇注时叶片的浇成率。

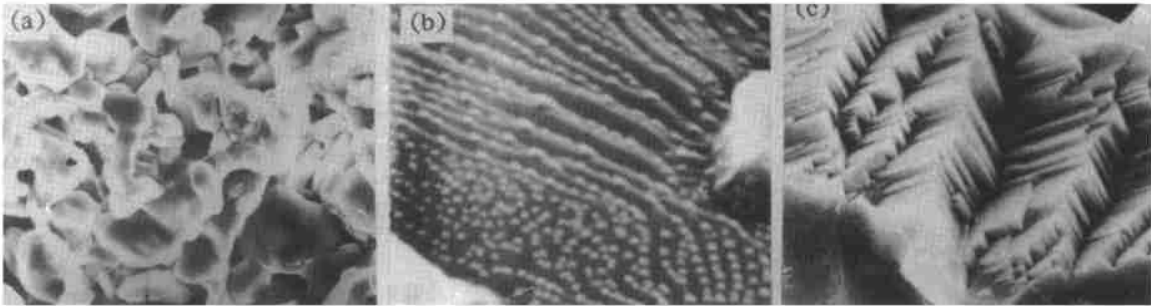


图5 AC-1型芯强化处理前后的断口组成
(a) 强化前 1000×；(b) 强化后 2000×；(c) 图b中新生相局部放大 5000×
Fig. 5 Fracture surface of AC-1 core
(a) before strengthening 1000×；(b) after strengthening 2000×；(c) new phase in (b) 5000×

表3 AC-1型芯的X射线衍射相分析

Table X-ray diffraction analysis of AC-1 core

状态	$3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$, %	SiO_2 , %	$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, %
强化前	0	1	98
强化后	27	3	69

3. 4 AC-1型芯的脱芯性能

氧化铝基型芯高温强度好，化学稳定性高，脱芯困难。试验了多种方法和多种脱芯剂，并在模拟叶片定向凝固条件下对焙烧过的型芯于不同脱芯介质中溶蚀掉的时间做了测定。结果发现LM-1脱芯剂对AC-1型芯效果最好，它是一种常温下为固体而加热后便熔化成液体的物质。用它对三种型号空心叶片进行了试验，孔型较简单的导向叶片，不到1h即可脱除干净，对于内腔极为复杂的单晶叶片，一般要12h以上才可脱完。

3. 5 AC-1型芯的性能

测试了AC-1型芯烧成后室温性能和强化后高温性能。其中，室温烧成强度27.7MPa，烧成收缩率2.1%，气孔率34.6%；1450 抗弯强度10.3MPa，1550 时为6.9MPa，1580 时为5.8MPa；1550 挠度0.5%~0.7%，1600 时为1.0%~2.8%；线膨胀曲线拐点高于1550 。说明AC-1型芯达到设计指标，符合单晶叶片铸造要求。

4 AC-1型芯的应用

AC-1型芯研制成功后，用其制成了4种不同型号发动机叶片型芯，并用DD3、DZ4、DZ22合金在四种不同类型定向凝固炉中浇注了近250片的定向和单晶叶片（图6），并且顺利地脱芯。实践表明，AC-1型芯能承受高达1560 的工作温度，浇成率一般大于70%，浇注的叶片壁厚较为均匀。

（下转第27页）

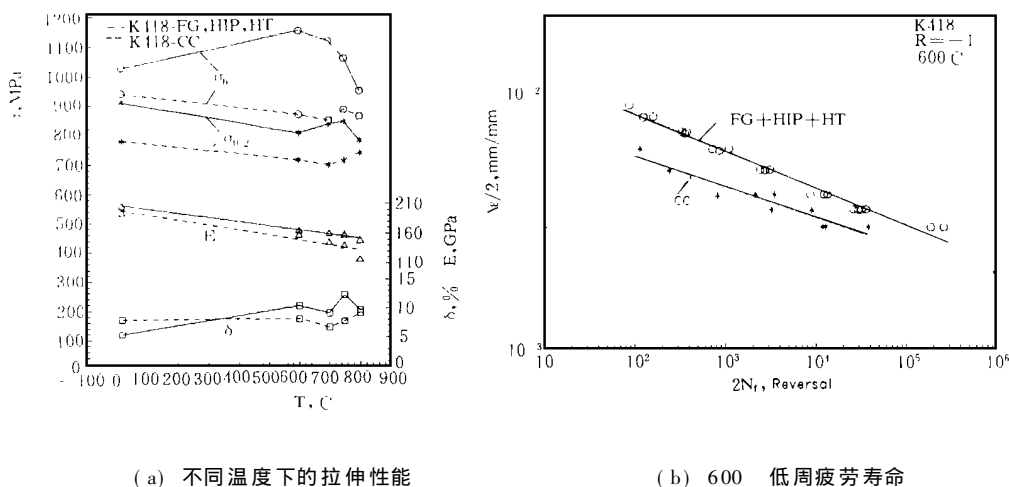


图5 K418合金细晶铸造 (FG) 和普通铸造 (CC) 力学性能对比

Fig. 5 Comparison of mechanical properties in K418 alloy samples prepared by FG and CC process

(a) tensile properties at several temperatures; (b) LCF life at 600

与普通铸造相比, 细晶铸造 K418 合金的低周疲劳寿命至少提高3倍, 拉伸性能也有一定程度的提高, 晶粒越细, 提高的幅度越大。

参考文献

- 1 Michael Woulds and Howard Benson. Development of a conventional fine grain casting process. SUPERALLOY 1984. 3 ~ 12
- 2 Kathleen M. Young. The effects of vibration and electromag-

netic forces on casting. DE88002721

- 3 John F. Wallace. Grain refinement of steels. Journal of metals, 1963, (5): 372 ~ 376
- 4 Cal A. MacIntyre and P. Neil Agarwal. Development of fine grain cast MAR-M247 axial and radial turbine wheel. Advanced Aerospace Materials Technology, October 1984, 35 ~ 45
- 5 汤鑫, 刘发信. K418高温合金细晶叶片铸造工艺的研究. 材料工程增刊, 1996, 108 ~ 109
- 6 刘发信, 袁文明等. 材料工程, 1995, (5): 7 ~ 11

(上接第23页)

5 结论

(1) 能够在1540 ~ 1600 条件下使用的氧化铝陶瓷型芯 AC-1组成为: 92 ~ 99% α - Al_2O_3 , 1 ~ 8% TC-1, 另加13 ~ 18% 增塑剂。

(2) AC-1的焙烧工艺为: 以50 ~ 200 /h 的升温速度, 由室温升到1250 ~ 1450 , 保温4 ~ 10h。

(3) 烧成型芯用CS-1溶液处理后, 型芯高温性能满足不同内腔结构的单晶空心叶片的浇注要求, 浇成率大于70%。

(4) 用 LM-1脱芯剂能顺利脱除复杂形状涡轮叶片内的 AC-1 型芯。

(5) 用 AC-1型芯浇注的单晶空心叶片符合叶片使用要求。

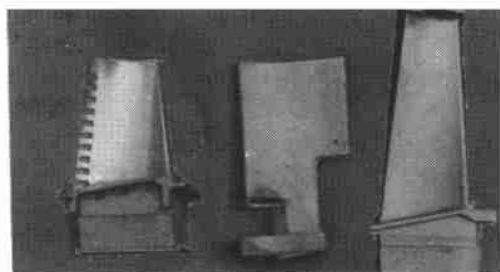


图6 用 AC-1型芯浇注的各种单晶叶片

Fig. 6 Single crystal blades casting using AC-1 core