

陶瓷材料及陶瓷发动机的展望

THE DEVELOPMENT OF CERAMIC MATERIALS AND CERAMIC ENGINE

北京航空航天大学 熊昌炳

Beijing University of Aeronautics and Astronautics

Xiong Changbing

摘要 本文就结构陶瓷和功能陶瓷的许多独特性能进行了综述,讨论了陶瓷发动机的发展情况及优点,尤其是随着科学技术的飞跃发展,陶瓷材料的微观机理,产品的设计和力学特征等方面的研究,预计在不久的将来,新型的陶瓷发动机将以崭新的面貌出现。

关键词 陶瓷材料,陶瓷发动机,叶片。

Abstract This paper introduces the general development of ceramic materials, focuses on summarizing the characteristics of structural ceramic material and functional ceramic material, and discusses the development and advantages of ceramic engine. The whole field of ceramic material has made considerable progress in recent years, but micromechanism research, mechanics properties, and component design in particular have made great strides with the rapid development of relevant technique. It is sure that the advanced ceramic engine will be presented with a brand-new appearance in the near future.

Key words ceramic materials, ceramic engine, blades.

一、“陶瓷热”的形成

新型陶瓷在材料科学中占有重要的地位,也许明天陶瓷将要取代“铁器时代”而形成第二个“新石器时代”。目前开发的精细陶瓷,其功能之特异,性能之广泛,远非金属所能比拟。许多先进技术就是材料没有过关而无法实现。例如,光信息的长途传送有赖于低损耗的光导纤维,陶瓷的超导性引起了全世界的瞩目。太阳能取之不尽用之不竭,一种光电直接转换的材料很可能就是陶瓷,它将使太阳成为人类的主要能源。航天航空工业的发展,要求新材料的比强度和比刚度更高、能承受的工作温度更高、使用寿命更长和抗腐蚀抗磨损的能力更强。这些要求,金属材料已经不能满足,恰好非金属材料中的精细陶瓷在某些方面则有具

1987年9月3日收到

独特的性能。

所谓精细陶瓷是新近发展起来的一种工业陶瓷(区别于传统陶瓷), 简言之, 它是一类具有高纯度、高精密度、高密度的经过特殊工艺加工的, 而性能十分稳定的新材料。陶瓷有以下几个特点: (1) 陶瓷是金属元素和非金属元素结合而成的无机非金属性化合物。构成陶瓷的非金属元素多为氧, 也可以是氮、碳、硅、硼等其他非金属元素。构成陶瓷的金属元素可以是一种或多种。还可以同时有几种非金属元素存在于一种陶瓷内。(2) 陶瓷是多晶体, 它由无数个细小颗粒的单晶体集合起来的, 晶体与晶体之间可以直接联系起来, 也可以通过少量的玻璃体粘合起来, 玻璃体不是陶瓷, 它是无定形体, 陶瓷晶体之间的玻璃体对其性能有坏的影响。(3) 陶瓷必须将粉末状的材料加工成型, 并在一定温度条件下烧结使之具有所需要的强度和硬度。由上面三个特点, 便可给陶瓷一个定义: “陶瓷是用天然或人工合成的粉状化合物, 由金属和非金属元素的无机化合物构成的多晶体材料, 经过加工成型和高温烧结而成。”若按化学组成来分, 可分为氧化物系列与非氧化物系列; 前者 (Al_2O_3 , ZrO_2 , BaTiO_3 , MgO) 烧结性能良好, 但在高温时强度下降显著; 后者 (SiC , Si_3Ni_4 , TiN , BN , $\text{Si}_3\text{N}_4 \cdot \text{AlN}$) 多数是共价键, 烧结性能差, 但高温强度好。按应用范围, 可以分为结构陶瓷和功能陶瓷两大类。

1. 结构陶瓷

它具有一系列优异特性, 可以代替内燃机和燃气涡轮发动机热端部件中的高温合金。因其导热性差, 热耗很小, 可以极大地提高热效率。陶瓷的比重小, 可以减轻发动机的重量。各国重点发展的结构陶瓷大致有以下四种。

(1) 氮化硅 (Si_3N_4) 陶瓷: 零件制作大致有反应烧结, 热压及无压烧结, 重烧结等方法; 其中热压的 Si_3N_4 性能最佳, 目前重点发展重烧结和无压烧结等新工艺, 并且正努力解决高温强度不下降和提高抗蠕变性能的问题。

(2) 碳化硅 (SiC) 陶瓷: 其制作包括反应烧结、热压及无压烧结等方法。由于其导热性好, 高温强度高, 抗氧化性能好, 特别适合用于热交换器和燃气轮机上, 并广泛用在机械密封材料方面。

(3) 增韧氧化陶瓷: 它包括氧化锆 (ZrO_2); 增韧氧化铝, 部分稳定氧化锆陶瓷。后者的断裂韧性值比氧化锆高出 2.7 倍, 而导热系数只有氮化硅的 1/20, 是用于柴油发动机的良好材料。

(4) 纤维补强陶瓷复合材料(包括碳-碳复合材料, 硅-碳化硅复合材料)。这类材料的韧性好, 抗热冲击性能强, 是理想的热机材料。但取材困难, 价格昂贵。

高温陶瓷的制作工艺趋势是超微粉末生产的商品化, 各种成型技术和烧结工艺的不断更新。尤其是注射成型, 高温等静压和连续热压的新工艺出现, 为大规模商品化生产及降低成本创造了有利条件。

碳化物和氮化物陶瓷的熔点高, 热强度好, 远非金属材料所能比拟。图 1 为 α -碳化硅的比强度在常温与高温下与金属的比较, 它在高温下的强度基本上保持不下降。陶瓷材料的熔点在 $2000 \sim 4150^\circ\text{C}$ 之间的达 10 余种, 如表 1 所示

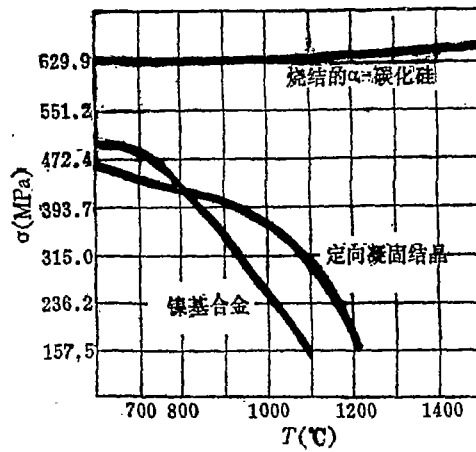


图1 陶瓷与金属的比强度随温度变化曲线

表1 高温陶瓷的熔点

名 称		熔点(°C)	名 称		熔点(°C)
碳化钨	W ₂ C	4150	硼化钛	TiB	2580
碳化钽	TaC	3850	碳化钨	WC	2850
纯石墨	C	3800	氧化镁	MgO	2798
碳化锆	ZrC	3520	氮化硼	BN	2730
碳化铌	NbC	3500	碳化硅	SiC	2500
氮化钽	TaN	3350	氧化铝	Al ₂ O ₃	2050
碳化钛	TiC	3120	氮化硅	Si ₃ N ₄	2010

2. 功能陶瓷

功能陶瓷的种类繁多, 具有优异的电、光、磁、化学、生物等功能, 是微电子、光电信息、自动化等工业的基础, 也是精细陶瓷中产量占主要地位的产品。例如, 作为超大规模集成电路基片的氮化铝和碳化硅, 着重利用其绝缘性、介电性和导热性。最活跃的敏感陶瓷如热敏、气敏、湿敏、压敏、色敏等材料, 是工业自动化控制和智能机械的基础。目前国际上著名的超导性研究, 其材料是加入氧化钇的热压氮化硅陶瓷, 它的室温强度高达1471MPa, 高温强度可以保持到1700℃以上, 远远优于金属材料。表2列出几种新型陶瓷的功能和用途。

表2 功能陶瓷材料的分类

功能	材料种类	应用	
电气功能	绝缘性 介电性 压电性 半导体 离子导电性	Al_2O_3 , BeO, AlN, SiC $Ba \cdot TiO_3$ $Ba TiO_3$, $3SnO$ SiC, $BaTiO_3$, ZrO_2 , $ZnO-Bi_2O$, ZrO_2 $B-Al_2O_3$, ZrO_2	IC基片, 密封材料 电容器 振荡元件, 点火元件 发热器, 热敏电阻 固体电介质, 氧分析器
磁性功能	Zn-Mn铁氧体, Sr铁氮体	磁心, 磁带, 磁头, 磁铁,	
光学功能	Al_2O_3 , MgO, $Y_2O_3-TnO_2$, PLZT SiO_2 , ZnO, NiO	钠灯管, 激光, 电光材料 气敏传感器	
化学功能	$MgCr_4O_4-TiO_2$, Al_2O_3 Fe-Mn-Zn化合物- Al_2O_3 , CaO	湿度传感器, 触媒载体催 化剂	
生物功能	Al_2O_3 , $Ca_3(F, Cl)P_3O_{12}$ 高强烧结体	人工骨, 人工齿	
机械功能	Al_2O_3 , B_4C , WC, SiC, TiC TiN, TiC, BN, Al_2O_3 , WC Si_3N_4 , SiC(加压烧结)	金刚石(研磨) 金刚石(切削) 发动机叶片, 耐高温零件	
热功能	ThO_2 , BeO, MgO, 烧结体 Al_2O_3 , K_2O , $nTiO_2$, 纤维CuO, $nTiO_2$ 多孔	特殊耐热材料 耐热绝缘材料	
核功能	UO_2 , UL, UC_2 , ThC_2 , BeO, C, BeC, SmO, HfO,	核燃料 中子减速, 控制材料	

二、目前在发动机上的使用情况

1. 燃气涡轮发动机当前面临的问题是提高发动机的热效率和推力。这就必须解决所谓“四高”，即高 T_3^* ，高增压比 Π_3^* ，高推重比和高可靠性。这些问题在理论上已经解决，关键是目前所使用的耐热合金（如镍基，钴基等）不能满足发动机工作的需要。例如当前 $T_{3max}^* \approx 1800K$ ，但叶片的冷却气膜非常复杂，材料已采用了定向凝固和单晶体，而镍的熔

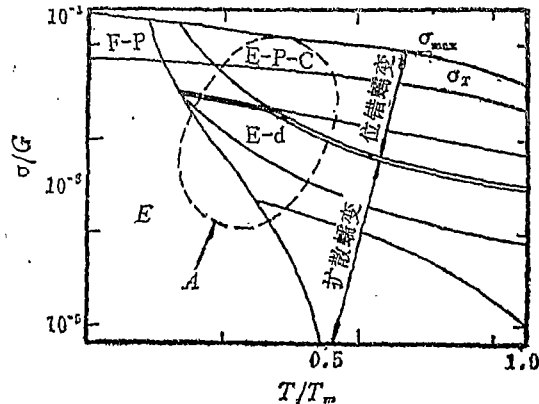


图2 材料随温度的变形机理

点大约在1500℃左右,可见材料已达极限情况。如图2所示,高温零部件的工作范围,已从图中的A区逐渐移至B区,在B区中包括弹性区(E),塑性区(P)和蠕变区(C)。此时的材料高温蠕变和塑性变形非常严重,疲劳/蠕变交互作用的损伤,使零部件产生严重破坏,以至不能工作。根据大量的统计,热端零部件的损伤约占发动机整个故障的80%。由此可见,寻求新的高温高强度材料,已是当前航空发展中的关键问题。

2. 陶瓷在FT9发动机热端部件的应用范围如图3所示,它包括燃烧室中的火焰筒(1),燃气收集器(2),涡轮导向叶片(3),工作叶片(4)及涡轮外环(5)。作为燃气发生器,已经在地面试车成功。由于陶瓷比重小,发动机的加速性好,结构轻巧,承受的离心载荷小,使整个热端部件的寿命增加。尤其涡轮前的进气温度高,可以增加推力和降低耗油率。陶瓷的热膨胀系数小,减少了叶片的间隙。高温零件不需要冷却,减少了空气的损失,使发动机的效率大大提高。与相同的金属发动机相比,输出功率增加40%,耗油率下降10%。

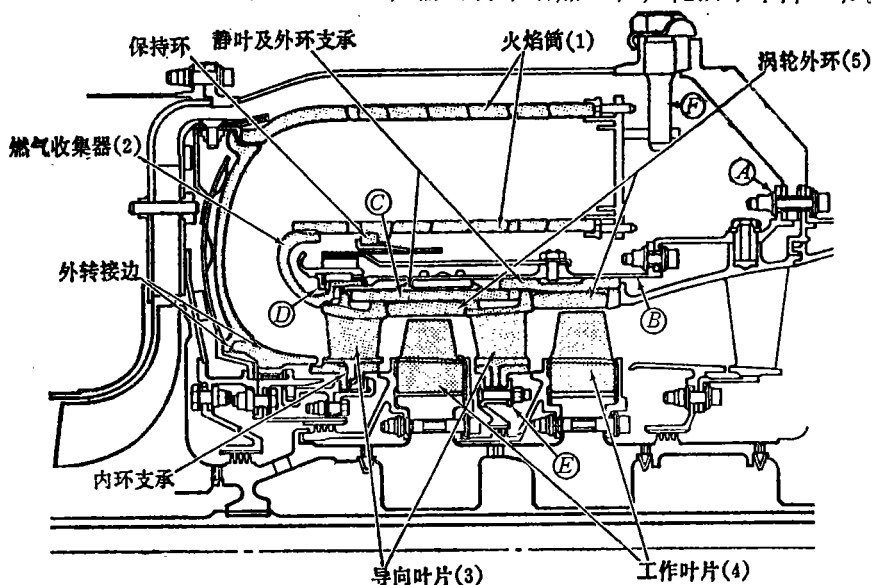


图3 发动机热端部件的陶瓷零件

在进一步发展中,应用到涡轮转子部件(包括叶片和轮盘)则是很重要的,因为转子的转速很高,叶尖切向速度大,零件的局部高应力与高温工作条件是同时存在的。美国VW陶瓷公司设计了两种类型的发动机转子,一种是整体转子(图4(a)),它由(RB-Si₃N₄)材料高压成型。由于陶瓷密度小,转子的惯性特别小,可很快达到额定转速或停车状态。转子与主轴的连接需要特别注意,以免局部损坏。另一种是叶片与轮盘分开的形式,或称混合式。叶片为陶瓷,轮盘是金属(如图4(b)所示),叶片正好能承受高温,因其密度小而离心力也小,应力水平与金属叶片相比也不大。轮盘的应力与温度变化均较大,采用高韧性耐热合金能够承受各种冲击载荷,并且与主轴容易连接。

为了防止陶瓷叶片齿根与金属轮盘直接接触产生过大的局部应力集中,在叶片一轮盘榫槽之间嵌入一块金属垫片如图5所示,并在垫片上涂上一层软性材料,减少对叶片齿根的损伤。陶瓷成型时,难免制造精度不高和表面粗糙度大;叶片插入轮盘榫槽时不允许有紧度,在工作时因叶片的离心力和气动力作用,接触表面可能产生滚动,叶片与盘受热之后,变形也

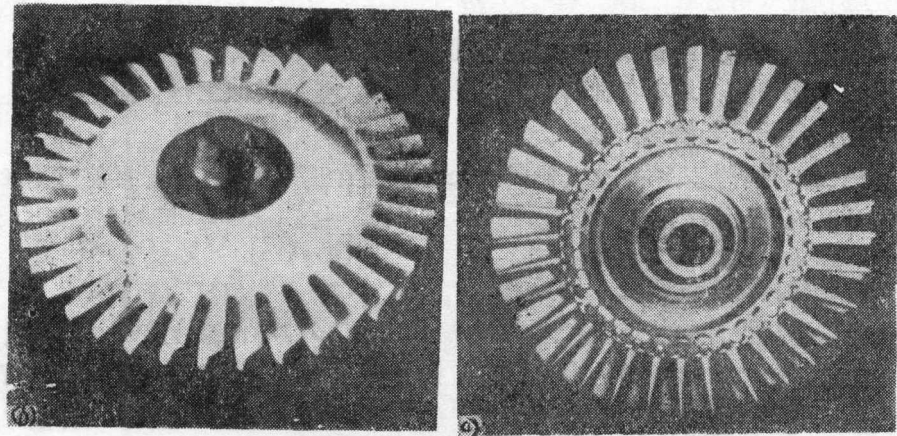


图 4 (a)整体涡轮转子; (b)盘一片分开的球轮转子

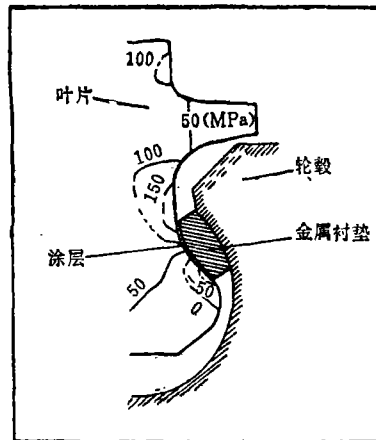


图 5 陶瓷叶片根部的应力分布

不均匀。但叶片的密度较小(为金属的 $1/2.6$)，接触应力也小得多。图 5 中叶片上的等应力曲线是在叶尖速度为 $v=460\text{m/s}$ 和 $T_3^*=1500\text{K}$ 的条件下计算出来的。叶片材料采用 RB-Si₃N₄ 注射成型。

美国 Allison 公司设计的 GT404 燃气轮发动机，1983 年公布了在 NASA Lewis 中心所作的全面试验结果。它们从 1976 年开始研究，目前通过了长达 9398h 长期试车。发动机先装在汽车上，日后准备移植到航空上。已在载重汽车上工作了 7475h，共计运行 6656km，全面考验之后，认为很成功。

美国加州的另一个 TRW 陶瓷公司所制造的涡轮部件，经过 500h 试车后的情况良好；对材料 $\alpha\text{-SiC}$ 在 1573K 下工作，结构强度与性能均很满意。通用汽车公司的陶瓷发动机，也通过了 2000h 的试车。在 4.5t 的军用卡车上试行，1986 年已完成计划，1990 年将商品化生产，并投入市场，它比一般汽车节油 30% 左右。

日本政府从 1978 年起奋起直追，目前已有数家公司研究陶瓷发动机。京都陶瓷公司发展

的一种柴油发动机,其活塞、气缸套、气缸头、推杆、摇臂等均用陶瓷,宣称能节油80%,热效率达60%,从而认为陶瓷发动机的出现是发动机的一次革命。

西德、英、法等国,均有各种研究机构,进行了大量的类似工作。西德投入的力量很大,陶瓷发动机目前已开始地面试车。

近来各国投入在研究发动机及其他产品上的资金呈直线上升,估计目前已达100亿美元,数年之后将达200亿美元以上。

3. 陶瓷的结构与强度研究

(1) 陶瓷发动机设计的特点是趋向“部件化”,即多种零件组合成一体,尽量减少零件之间的刚性连接。例如,火焰筒的冷却,其结构简单,而不需形成复杂的气路;涡轮部件可简化成静子与转子两个组合件。这样的结构在加工方法上与金属零部件相比有很大差异,它们要求直接用模具注射成型,在高温下烧结去掉液相,使固相晶粒紧密结合,避免不均匀性,以消除内部的残余应力。零件的表面质量只能在成型和烧结中保证,最好不要采用机械加工,以防止表面的微裂纹。近来也有用激光修理以提高表面光洁度的新方法,这样就难免产生局部残余应力。

陶瓷零件的最大缺点是塑性小而脆性大。在结构设计时,要避免局部区域的应力集中和温度梯度变化过大。重要零件要广泛进行三维模型的应力和温度分析,了解它们的分布规律。因为陶瓷的失效准则是最大拉伸应力,只要局部超过临界应力值,整个零件将会报废;表面和内部裂纹(或缺陷)的敏感性特别强,所以陶瓷材料的强度问题,既依赖于体积也依赖于表面质量,大的体积中所占有的缺陷比小体积要多,表面微裂纹经常导致突然性的破坏。

(2) 力学特征

陶瓷的本构方程既不同于金属也有异于复合材料,它是由粉末状的微小颗粒烧结而成的固相化合物,微观上是各向异性并具有微孔的材料;同样成份的材料,其力学性能与粒度尺寸、贴合剂的种类、加压成型方法、加温烧结温度等诸因素的关系密切。近年以来,对它的力学研究从基本状态方程开始,对脆性微裂纹影响、断裂力学的判断准则、疲劳强度与寿命分析等,均有较多的论述和各种理论上的探索。

(3) 目前存在的问题

a. 陶瓷材料的性能:它的脆性大,可塑性小,在受力之后,一旦超过许用强度,往往产生突然性的瞬时破坏,故陶瓷零件的工作可靠性,是用户十分关心的问题。解决的办法是增强陶瓷的韧性,提高材料的纯洁度,加强对原料的精选和加工,采用先进的工艺方法和改进设备,严格控制材料的成份和性能。

b. 结构设计:在发动机零部件产品设计中,既要满足结构在工作中的各种要求,也要恰当使用不同类型的材料,以满足零件在强度和磨损诸方面的要求。而脆性材料的理论分析研究尚处启蒙阶段,光凭经验势难完成设计任务。故陶瓷的微观研究如相平衡、相变和晶晶晶界特征等及产品的宏观分析,如疲劳裂纹的形成和扩展,材料的断裂韧性,本构方程的准确性,以及产品的寿命评估和可靠性研究,均须大力展开。

c. 陶瓷的加工技术问题:由于陶瓷朝着高强度和高硬度方向发展,零件所要求的尺寸

和表面精度又很高, 组合结构又大量出现, 故须保证注射成型和减少高温烧结变形的问题。又如超大规模集成电路基片和超导陶瓷材料的精密加工, 在厚度、孔径、多层配置等高精度尺寸的保证上也是问题。

d. 陶瓷与金属的连接: 陶瓷与金属零件连接的可靠性, 已是发动机转子部件能否采用陶瓷的关键问题。连接的方法, 所采用的焊料, 基体的匹配, 过渡层的结构和零件结合的工艺方法等, 都是目前设计者所关心的问题。

总之, 陶瓷发动机是下一代最有希望的发动机, 目前已在各先进国家崭露头角, 我国应该大力组织, 争取尽快赶上世界先进水平。

参 考 文 献

- 1 Wachtman John B. *Ceramic Industry*, 1983, 121, (6)11
- 2 Schulz R B. *Ceramics for High-Performance Applications Reliability*, Edited E.M. Lenoé p.21, 1983 New York
- 3 工业材料(日)1984 32, (13)101
- 4 JETRO. The Development of Structural Fine Ceramics in Japan. *The Japan Indus. Tech. Bull.*, Special Issue, 1983, (5)
- 5 *Modern Ceramic Engineering*, Edited by David W. Richerson, 1982, Marcel Debber, Inc., New York
- 6 M Langer, H Heinrich, J E Siebels. *Development of Ceramic Components for Car Cas Turbines Reprinted with permission from High Temperature Technology*, Nov. 1984. Butterworth & Co
- 7 Mel M Schwartz. *Engineering Applications of Ceramic Materials* America Society for Metals, 1985
- 8 R W Daviege. *Engineering with Ceramics Proceedings of the British Ceramic Society No.32.* 1982
- 9 Y Hermano, N Sagawa, H Miyata. *Reliability. Evaluation of Ceramic Rotor for Passenger-Car Turbochargers. J. of Engineering for Gas Turbines and Power*, ASME. 1986
- 10 G Bandyopadhyay, K W French. *Fabrication of Near-Net-Shape Silicon Nitride Parts of Engine Application. Transaction of the ASME*, July, 1986