

南京航空航天大学 论文集

(二〇〇〇年)

第17册

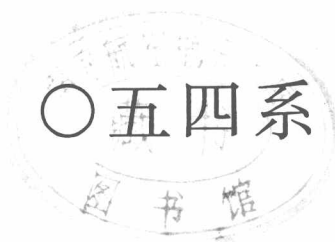
五院

南京航空航天大学科技部编

二〇〇一年六月

124 483

五 院



目 录

序号	姓名	职称	单位	论文题目	刊物、会议名称	年、卷、期	类别
496	高 霖 童国权 骆 飞 刘建业	副教授	054	恒应变速率超塑气胀成形试验系统的测控原理及实现	数据采集与处理	001502	H
497	陈明和 傅桂龙 张中元	工程师	054	O Cr17Ni7 新型不锈钢板材的冲裁性能研究	机械设计与制造工程	002901	J
498	陈明和 傅桂龙 张中元	工程师	054	SiC 陶瓷在航天器高温结构件研制中的应用	南京航空航天大学学报	003202	J
499	陈明和 傅桂龙 周建华	工程师	054	板料塑性成形多媒体应用系统的开发	锻压技术	002501	J
500	陈明和 张中元 余亚平	工程师	054	TC4/SiC 扩散焊接工艺研究	航空制造技术	000001	
501	王化明 张中元	硕士	054	半管类零件橡皮成形的数值模拟	‘2000ANSYS 中国用户年会	2000	
502	陈文亮 曾建江 李卫国 丁秋林	副教授	054	复杂曲面刀具轨迹干涉的消除算法	东南大学学报	003006	H
503	陈文亮 崔 英 李 磊	副教授	054	基于自动碰撞技术的最优排样算法	计算机应用研究	001707	J
504	陈文亮 李卫国 吴 鹏 曾建江	副教授	054	基于 Web 的数控加工参数优化	计算机应用研究	0017 增	J
505	陈文亮 李卫国 曾建江 丁秋林	副教授	054	Web-based Manufacturing Process Developer	南京航空航天大学学报 (英文版)	001702	J
506	陈文亮 曾建江 李 磊 丁秋林	副教授	054	An Approach to Gouging Avoidance for Sculptured Surface Machining	Proceedings of the Ninth International Manufactureing Conference in China	2000	
507	李卫国 陈文亮 丁秋林	博士	054	利用径向基函数重建飞机表面的 Cp 值曲面	计算机辅助设计与图形学学报	001202	H
507	李 磊 陈文亮 王奇峰	硕士	054	用 ARX 开发冲裁模 CAD/CAM 软件	机电工程	001706	
509	徐 岩 陈文亮 王奇峰	硕士	054	数控加工自动编程中环方向的判断算法	机电工程	001705	
510	张 胜 陈文亮 曾建江	硕士	054	数控加工过程可视化的实现方法	计算机应用研究	001709	J

序号	姓名	职称	单位	论文题目	刊物、会议名称	年、卷、期	类别
511	吴 鹏 陈文亮 李卫国	硕士	054	基于 Web 应用系统开发的纯 Java 实现技术	计算机应用研究	001705	J
512	张丽艳 周儒荣 周来水	副教授	054	Model Reconstruction from cloud Points	IMCC'2000	2000	
513	黄 翔 葛友华 廖文和	副教授	054	基于 Web 的智能 CAPP 系统的研究	中国科协 2000 年学术年会	2000	*
514	黄 翔 廖文和	副教授	054	面向高速加工的 NURBS 插补技术的研究	中国科协 2000 年学术年会	2000	*
515	葛友华 安鲁陵 廖文和 周儒荣	副教授	054	基于特征和实例的工艺路线决策方法	机械设计与制造	000001	J
516	葛友华 廖文和 周儒荣	副教授	054	PDM 中的编码技术及实现	计算机工程与应用	000009	J
517	葛友华 安鲁陵 廖文和 周儒荣	副教授	054	基于 PDM 的工艺特征模型	航空制造技术	000005	
518	葛友华 朱海华 廖文和 周儒荣	副教授	054	PDM 系统中的编码模型及应用	机械设计与制造工程	002901	J
519	葛友华 廖文和 周儒荣	副教授	054	PDM 中的关键技术	机械设计与制造工程	002902	J
520	葛友华 廖文和 周儒荣	副教授	054	A Fuzzy Optimization of Machining Parameters and the Implementation	IMCC'2000	2000	
521	葛友华 廖文和 周儒荣	副教授	054	CAPP 系统中的模糊匹配方法	东南大学学报	003002	H
522	伍铁军 周来水 周儒荣	副教授	054	数控仿真的实时真实感图形显示	计算机辅助设计与图形学学报	001204	H
523	伍铁军 廖文和 周儒荣	副教授	054	Some Essential Algorithms for NC Machining Simulation and Verification	IMCC'2000	2000	
524	周儒荣 安鲁陵 徐啸峰 周来水	教授	054	A New Algorithm of Generating Milling Tool Path of Pocket with Contour-Parallel Strategy	5 th ICPMT(Beijing), Aviation Industry Press	2000	
525	周儒荣	教授	054	逆向工程与快速原型制造	计算机辅助设计与制造	000009	
526	董洪伟 周来水 周儒荣	博士	054	一种曲面裁剪的快速新算法	工程图学学报	002102	J
527	王孜孜 安鲁陵 徐啸峰 周来水	硕士	054	截平面法加工刀轨算法的研究与实现	计算机辅助工程	000003	J

序号	姓名	职称	单位	论文题目	刊物、会议名称	年、卷、期	类别
528	唐 杰 周来水 周儒荣 卫 炜	博士	054	STL 文件修补算法研究	机械科学与技术	001904	H
529	安鲁陵 葛友华 周来水 周儒荣	副教授	054	基于实体模型的加工特征提取与识别	机械科学与技术	001904	H
530	安鲁陵 卫 炜 周来水 周儒荣	副教授	054	自由曲面型腔粗加工刀轨生成算法研究	南京航空航天大学学报	003206	J

恒应变速率超塑气胀成形试验系统的测控原理及实现

高 霖 童国权

(南京航空航天大学机电工程学院 南京, 210016)

骆 飞

刘建业

(南京航空航天大学测试工程系 南京, 210016)

(南京航空航天大学自动控制系 南京, 210016)

摘要 采用一种新颖的激光器+光纤阵列+光电池+步进电机螺旋机构构成的非接触式位移测量装置,研制了一种新型计算机控制恒应变速率超塑胀形试验系统,可以进行超塑胀形的成形极限试验。研制表明,系统的机械、数据采集硬件接口以及软件的数据处理三部分的有机结合,可以以不太高的成本,研制出具有较高性能的实用试验系统。

关键词: 超塑变形; 应变速率; 数据处理; 计算机控制

中图分类号: TP206.1

Design and Implement of a Constant Strain Rate Controlled Superplastic Bulging Tester

Gao Lin Tong Guoquan

(Department of Mechanical Engineering,
Nanjing University of Aeronautics & Astronautics Nanjing, 210016)

Luo Fei

(Department of Measurement and Testing Engineering,
Nanjing University of Aeronautics & Astronautics Nanjing, 210016)

Liu Jianye

(Department of Automatic Control,
Nanjing University of Aeronautics & Astronautics Nanjing, 210016)

Abstract To cope with the requirements of the superplastic behavior of metal matrix composite materials for a better understanding under biaxial stretching, a brand new superplastic bulging tester controlled in a constant strain rate is developed with a non-contact displacement measurement setup composed of a laser source, an optical fiber array, a photoelectric cell and a step motor driven screw mechanism. The depth of the deformed specimen so detected is then put into a target control function which yields the proper gas pressure for a constant strain rate controlled superplastic bulging. The superplastic bulging deformation can be carried out up to the fracture range. Reliable testing results and effective functioning of the tester come from a proper and balanced mix-up of the mechanical design,

hardware design of the data acquisition interface and software design of the data processing.

Key words: superplastic deformation; strain rate; data processing; computer control

引 言

板料超塑气胀成形是超塑性最成功的应用之一^[1]。气胀成形时板料主要处于平面应力状态,由于存在诸如晶体学各向异性(如织构)和组织各向异性(如纤维组织)等现象,单向拉伸试验所得性能数据并不能严格描述平面应力状态下的材料变形行为。

近年来,随着金属基复合材料等常温下难成形材料越来越广泛地使用,对气胀成形时平面应力状态下材料及工艺参数对成形性能影响的直接试验研究越来越活跃。试验数据可比较的研究主要集中在圆形腔中进行的超塑气胀成形方面,其中相当多的一部分为恒压下的胀形^[2]。由于恒压胀形时应变速率不为常数,使得应变速率敏感指数即 m 值的作用不明确,因此恒应变速率控制下的胀形研究更具实际意义。本文的主要工作是开发研制了一种基于胀形气压-胀形位移($P-h$)控制的光、机、电一体化的超塑胀形试验系统,与已有的同类控制相比,具有成本不太高但测控精度较高的特点。

1 恒应变速率超塑胀形基本目标控制函数

恒应变速率超塑胀形控制的分析基于圆板自由球面胀形假设:胀形时板料为均匀球壳的一部分,变形的弯曲效应予以忽略^[3]。超塑成形时,设材料流动符合 Backofen 关系

$$\sigma = k \dot{\epsilon}^m \quad (1)$$

式中, k 为一与材料有关的常数。受气压 P 作用,原厚度为 T_0 的平板变形某时刻成为厚度为 T , 曲率半径为 ρ , 拱高为 h , 拱底圆半径为 a 的球冠。由静力平衡得等效应力 σ

$$\sigma = \sigma_1 = \sigma_2 = \frac{P\rho}{2T} \quad (2)$$

式中, σ_1 和 σ_2 为切向应力, 而曲率半径和厚度分别由几何关系和体积不变条件由下式确定

$$\rho = \frac{a^2 + h^2}{2h} \quad T = \frac{a^2 T_0}{a^2 + h^2} \quad (3)$$

综合式(1~3), 得气压-胀形位移关系

$$P = \frac{4hT_0 k \dot{\epsilon}^m a^2}{(a^2 + h^2)^2} \quad (4)$$

此即($P-h$)目标控制函数。按此式控制, 就需实时测量胀形位移, 通过式(4)求得目标压力, 与实际气压比较, 并根据偏差情况调整实际气压。当板料变形过程中始终为均匀球面且等效应变速率

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_3 = \frac{dT}{T \cdot dt} = -\frac{2h}{a^2 + h^2} \cdot \frac{dh}{dt} \quad (5)$$

为常数时, 积分上式, 并引入 $t=0$ 时 $h=0$ 的初始条件, 得

$$h = a \sqrt{e^{\alpha} - 1} \quad (6)$$

将式(6)代入式(4), 就可以把压力看作时间函数, 从而进行更为简单的($P-t$)控制。但是由于($P-t$)控制比($P-h$)控制多了一层假设, 因而也就多了一层误差环节。故本文采用的是($P-h$)关系控制。

2 恒应变速率超塑胀形试验系统测控原理

($P-h$)模式控制时, 实时胀形位移的测量大部分是接触式的^[4,5]。这对于成形极限的试验研究是不可行的, 因为机械接触必然导致材料的提前破坏。非接触测量又分两种: 早期的研究主要将胀形位移通过模拟量形式的光电转换采集进计算机^[6], 由于零件表面呈曲面, 且加热炉内存在相对较强的热辐射干扰, 使得在数据采集及标定中存在较大偏差。另一种是作者新近开发的开关量非接触测量的恒应变速率胀形试验系统, 它具有测量精度高和抗干扰能力强的特点, 已获得成功应用^[7]。图1为本系统的测控原理图。

($P-h$)模式恒应变速率胀形测控原理是: 氩气瓶里的高压氩气在减压后经步进电机驱动的进气阀给加热炉里的胀形装置供气, 气压由气压传感器变换后送入计算机。激光穿过加热炉上的玻璃窗口射向另一侧由光纤阵列和光电池组成的固定不动的光电转换器。当激光畅通无阻时, 经光电转换成高电平送入计算机, 此时计算机不发出任何动作指令而是继续查询

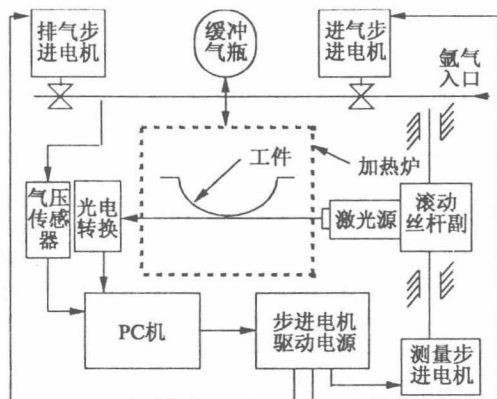


图1 恒应变速率胀形测控原理框图

外部数据端口。当激光被胀出的零件遮挡时,光电转换为低电平送入计算机。计算机随即发出步进信号使驱动滚珠丝杆的测量步进电机前进,装在丝杆螺母上的激光器随之下行,直至光电转换器重新收到足够强的激光信号并转换成高电平送入计算机时为止。由步进电机的脉冲当量和走步次数就可以得到胀形位移量 h 。当零件的性能参数、几何尺寸和试验参数已确定时,便可以由式(5)求得理论目标压力,再与采集到的实际压力相比较,并根据比较结果决定相应进、排气阀的启闭动作。设置缓冲气瓶可以使气压变化平稳。式(5)在 $h=a/\sqrt{3}$ 处取得极大值,该点将目标控制曲线分为两部分,相应的控制过程也就分为两个阶段。第一个阶段气压是单调增加的。此阶段排气阀常闭,当测得的实际压力小于目标压力时,就开启进气阀,否则就关闭进气阀。第二个阶段气压是单调减少的。此阶段进气阀常闭,当测得的实际压力大于目标压力时,就开启排气阀,否则就关闭排气阀。排气通过消声器入大气。当材料参数和工艺参数设定好后,整个胀形过程在计算机监控下自动进行。

3 测控系统硬件设计

胀形位移测量系统原理如图2所示。采用半导体激光器,电源由PC插卡提供。由于激光器外壳与电源正极相连且安装在金属支架上,为安全起见,采用负电压供电。该电压由PC机的+5V经DC/DC转换为-5V,再经稳压和限幅保护电路成为激光器所需的稳定的-3.6V。步进电机控制卡及驱动电源

借用现成的数控机床配件,步进电机采用三相六拍控制。光电转换器及其信号转换PC插卡为自制。采用直径为 $50\mu\text{m}$ 的传输光纤,随机排成 $50\text{mm}\times 1\text{mm}$ 的受光阵列,按0.8的填充系数计算,大约需要25000根光纤。排紧的光纤端面抛光。光纤尾端随机排列并按等截面原理收拢为直径为8.5mm的光缆束,束后有光电池进行光电转换。为了减少光电转换器输出受加热炉影响所产生的温漂,设计硅光电

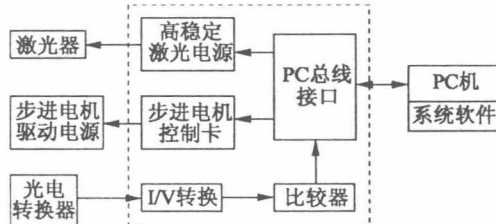


图2 非接触胀形位移测量原理框图

池处于短路工作方式(电流输出方式)。在光纤阵列50mm的测量范围内的任一位置,只要激光没有被胀形件遮挡过多,都可以被转换成高电平送入计算机。光电流首先经由低噪音运放构成的I/V电路转换成电压信号,滤波后送入比较器与设定的阈值比较,并根据比较结果送出高电平或低电平。PC机经过总线插槽读取转化结果,并据此确定测量步进电机是否步进。实时位移由式

$$h = \alpha \cdot N \cdot \frac{p}{2\pi} \quad (7)$$

求得。式中 α 为步进角, p 为滚珠丝杆的螺距, N 为测量步进电机所走过的步数。由式(4,7)进而求得此时的目标气压。

实际胀形压力是一个缓态信号,故A/D转换采用12位的双积分式器件。压力传感器采用华东电子仪器厂生产的电阻应变式传感器。毫伏级模拟信号经过采集板上的低噪音前向放大通道和二阶低通有源滤波器滤波后进入A/D转换电路。PC机将所采集到的气压与目标压力比较,并根据比较结果确定进排气阀的启闭。

4 提高测控精度的机械与软件措施

4.1 滚珠丝杆副

采用滚珠丝杆副可以减少机械传动上的间隙误差。对于本系统所要求的 $\pm 0.03\text{mm}$ 级的测控精度,在软件上可以不考虑间隙补偿。

4.2 气压微调阀门

本测控系统胀形时需要在 0~50 个大气压间实时调节,但一次试验流进零件型腔的气体体积只不过相当于常压下一升左右。为此专门设计了高压微调阀门。该阀门采用锥面密闭,并用柱面上的小缺口控制气体流量。阀杆旋转六周才能将阀门开到最大。而此时通气截面只不过为 0.6 mm^2 。

4.3 增量积分控制

对于缓态变化的气压信号,通过步进电机对多圈气阀的控制来调节,采用增量积分控制的方法是简单有效的。在算法上根据当前偏差值来确定驱动阀门的步进电机的增量运动,所以误动作影响小,且不产生积分失控。

4.4 数字滤波

光纤阵列接收到的光信号中不可避免地受到加热炉内的红外辐射、炉内气氛变化和环境背景光的影响。采集的信号在与所设定的阈值比较后是以开关量的形式输给计算机的,高电平时信号光电流大于阈值,表明变形试件对激光束的遮挡较少,计算机不发步进指令给测量步进电机;低电平时信号光电流小于阈值,表明变形试件对激光束的遮挡过多,计算机控制测量步进电机带动激光器移动直至计算机重新接收到高电平。相对而言,两种状态中高电平易在外界的干扰下误判为低电平。因此采用加权信号滤波方法,即认为高电平的可信度较高,而低电平的可信度较低(因为会有高电平被误判为低电平)。具体做法是连续采集 N 次光信号,记下其中低电平的次数 n 。当 $n > 80\%N$ 时,才承认是低电平,否则为高电平。实验表明,采用软件数字滤波技术可以在不增加硬件的复杂程度的情况下大大提高测控精度。

5 结束语

本试验系统的位移测量灵敏度达到 ± 0.01

mm,胀形压力与目标值误差控制精度优于 0.05 MPa ,可以在 50 mm 胀形深度范围内实现按 $(P-h)$ 关系测控的恒应变速率超塑成形。本系统应香港理工大学要求设计,已使用两年,效果很好。

参 考 文 献

- 1 Xing Huilin, Zhang Kaifeng, Qiao Yu, *et al.* An advanced superplastic sheet-forming machine controlled by microcomputer. *J Mater Proc Tech*, 1995, 55: 43~47
- 2 Wittenauer J, Kim W J, Sherby O D. Superplastic gas-pressure deformation of iron carbide sheet. *Mater Sci Engin*, 1995, A194: 69~76
- 3 林兆荣,等编. 金属超塑成形原理及应用. 北京: 航空工业出版社, 1990. 71~80
- 4 Guo Z X, Higashi H, Ridley N. An experimental investigation of the superplastic forming behavior of a commercial Al-Bronze. *Metall Trans*, 1990, 21A: 2957~2966
- 5 Pilling J. Effect of coalescence on cavity growth during superplastic deformation. *Mater Sci Tech*, 1985, 1: 460~461
- 6 Song Yuquan, Wang Z C. Superplastic bulge forming of domes. *Mater Sci Tech*, 1993, 9: 57~61
- 7 Chan K C, Tong G Q, Gao L. Hot formability of an Al2009/20SiCw composite sheet. *J Mater Proc Tech*, 1998, 74: 142~148

第一作者简介 高霖男,副教授,1954年12月生,发表过“On the susceptibility to localized necking of defect-free metal sheets under biaxial stretching”(《Journal of Materials Processing Technology》, 1996年第58卷)等论文。

0Cr17Ni7 新型不锈钢板材的冲裁性能研究

陈明和 傅桂龙 张中元 周建华 余亚平 (南京航空航天大学 南京 210016)

陈可与 (扬州电大宝应分校 江苏宝应 225800)

【摘要】 0Cr17Ni7 是为生产国产新型高档列车而专门研制的不锈钢板材。为满足国内列车生产厂的冲压生产需要,我们对5种不同厚度($d=1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0$)的该种板材进行冲裁性能试验,得出其在各种不同相对间隙下的不同板厚的冲裁性能数据,以便于工厂生产时参考和选用。

【关键词】 不锈钢 板材 冲裁 冲裁间隙

0 引言

0Cr17Ni7 具有优良的机械性能和化学性能,而且价格低廉,可用以替代同类进口材料。这些板材大都需要经过冲裁加工才能形成新型列车的零部件,而我国目前尚未有此钢种的冲裁性能数据及资料。为满足新型列车制造企业冲压生产的需要,我们对0Cr17Ni7 五种不同厚度的板材进行冲裁性能试验。得出各种不同间隙下的不同板厚的冲裁

力及其相对间隙与尺寸精度、相对光亮带、相对撕裂带和毛刺高度的关系曲线,以供工厂生产时参考和选用。

1 材料性能

1.1 材料组成

0Cr17Ni7 的化学组成使其具有优良的化学适应性,见表1。

表1 0Cr17Ni7 不锈钢化学成分

炉号	Al	C	Si	Mn	P	Cr	Ni	S	N
YF12589 $d=2.5\text{mm}$	0.04	0.05	0.38	1.18	0.029	17.79	7.09	0.007	0.073 7
YF12590 $d=1.0, 2.0\text{mm}$	0.10	0.05	0.48	1.20	0.026	17.30	6.94	0.006	0.062 6
YF12591 $d=1.5, 3.0\text{mm}$	0.13	0.05	0.49	1.03	0.024	17.30	6.75	0.008	0.069 2

1.2 材料性能

0Cr17Ni7 具有优良的机械性能,具体指标如表2所示。

表2 0Cr17Ni7 不锈钢机械性能

炉号	厚度 d/mm	$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	σ_b/MPa	$\delta_5\%$	HRB	180°冷弯
YF12591	3.0	510	875	43	90	完好
		489	885	41	91	
YF12589	2.5	460	840	46	92	完好
		453	835	45	86	
YF12590	2.0	485	898	41	91	完好
		470	895	43	88	
YF12591	1.5	592	905	42	91	完好
		604	902	43	92	
YF12590	1.0	472	880	44	88	完好
		463	845	47	89	

2 冲裁机理分析

如图1所示,板材冲裁过程大致依次经历以下3个阶段。a. 弹性变形阶段。凸模接触板材,将板材压平,板材开

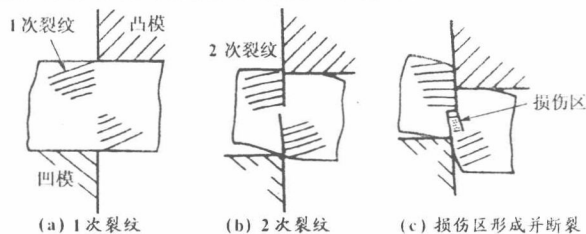


图1 冲裁过程示意图

始发生弹性变形。随着凸模继续下压,弹性变形程度增大。由于凸模和凹模之间间隙的存在,使板材略有翘曲。间隙越大,翘曲程度越严重。b. 塑性变形阶段。凸模继续加压,使部分材料拉入凹模腔内,产生塑性变形,同时还伴有

金属的弯曲与拉伸。此阶段末,刃口附近材料内应力达到最大值,相当于材料的抗剪强度。c. 断裂阶段。由于在塑性变形阶段刃口附近材料内应力达到最大值,因而在凸、凹模刃口附近首先出现显微裂纹,继而出现肉眼可见裂纹,且裂纹沿最大剪应变线(滑移线)向金属内层快速扩展,使冲裁件完全分离。若间隙合理,上下裂纹重合。在冲裁过程中,当裂纹出现时,在冲件上就留下了毛刺。

3 冲裁性能试验

3.1 冲裁力曲线测定

冲裁变形过程中,影响冲裁力的因素很多。主要有:材料的机械性能、冲裁件周边长度、模具间隙大小及刃口锋利程度等。理论上冲裁力按 $F_{理} = Ld\sigma_b$ (其中 L 为冲裁件周长, d 为材料厚度, σ_b 为材料抗拉强度) 计算。本研究采取由传感器组成的测力系统获取不同厚度材料在不同相对间隙值下的冲裁力曲线(纵坐标为冲裁力 F , 单位为 N , 横坐

标为时间 t , 单位为 s , 其测试原理如图 2 示, 其实测冲裁力 $F = k y_{\max}$ (k 为标定系数, 单位为 N/mm , $y_{\max}$ 为冲裁力曲线最大高度值, 从冲裁力曲线量得, 单位为 mm)。

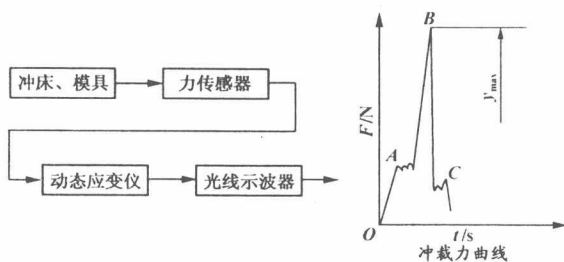
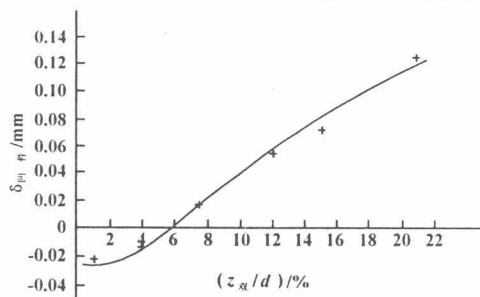


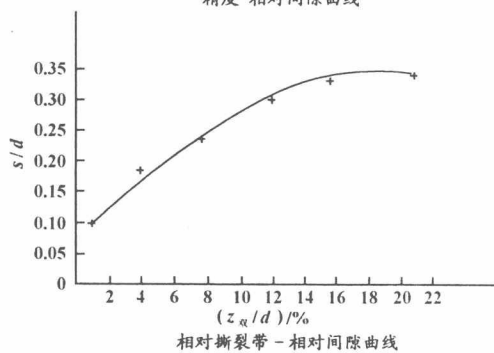
图 2 冲裁力测试原理图

3.2 冲裁间隙试验

冲裁间隙试验在 63t 偏心冲床上进行。所用冲裁模采



精度-相对间隙曲线



相对撕裂带-相对间隙曲线

用浮动式模柄, 并用滚柱导套导向。模具的凹模尺寸一定 (本试验取 $\phi = 19.935mm$), 根据其不同的相对间隙更换不同尺寸的凸模, 得到冲裁落料件和冲孔件。冲裁间隙试验包括冲裁件的尺寸精度 δ , 毛刺高度 h , 光亮带宽度 Δ 及撕裂带宽度 s 。尺寸精度 δ 用精度为 $0.02mm$ 的游标卡尺测量, 光亮带、毛刺高度、撕裂带尺寸用光学工具显微镜测量。尺寸精度计算: 对于落料件, $\delta_{\min} = \text{落料件尺寸} - \text{凹模尺寸}$; 对于冲孔件, $\delta_{\min} = \text{孔尺寸} - \text{凸模尺寸}$ 。图 3 为冲裁件断面。

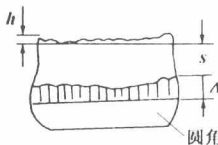
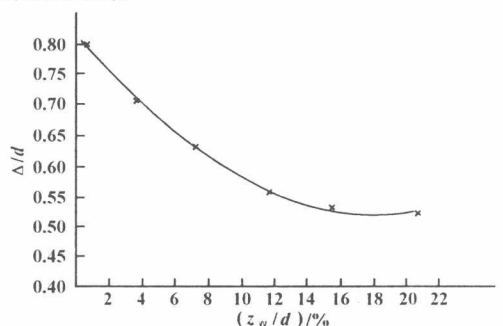
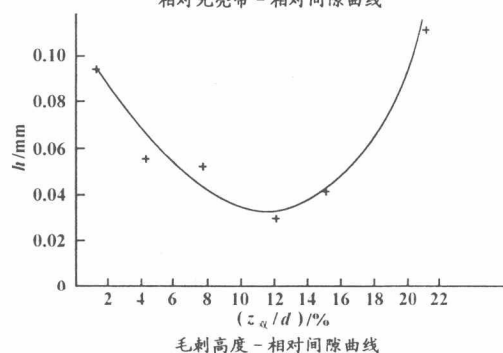


图 3 冲裁件断面参数

冲裁试验分别得到 $\delta - z/d$, $s - z/d$, $h - z/d$ 曲线 (z/d 为冲裁相对间隙)。图 4 所示为 $d = 2.0mm$ 的各种冲裁性能曲线。



相对光亮带-相对间隙曲线



毛刺高度-相对间隙曲线

图 4 $d = 2.0mm$ 的冲裁性能曲线

4 试验结果与分析

利用冲裁力实测曲线计算得如表 3 所示不同间隙下不同厚度的最大冲裁力 $F_{\max}$ 值 (相对间隙值范围 $1\% \sim 25\%$)。 $F_{\max} = L d \sigma_b$ 。利用冲裁间隙试验曲线可得如表 4 (不同相对间隙下的最小毛刺高度 h 值) 及表 5 (不同相对间隙下精度 δ 值), 限于篇幅只列出落料件的数据。

表 3 不同间隙下不同厚度的最大冲裁力 F $10^4 N$

	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
$F_{\max}$	4.5	6.40	8.40	10.20	12.0
$F_{\min}$	5.3	8.6	11.3	13.1	16.5

表 4 不同厚度落料件的最小毛刺高度 $h_{\min}$ 的相对间隙

	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
$h_{\min}/mm$	0.020	0.022	0.028	0.024	0.012
$z/d(\%)$	12.10	11.70	11.95	7.02	15.58

影响 0Cr17Ni7 新型不锈钢板材冲裁性能的主要因素是冲

裁间隙。冲裁间隙对冲裁件质量、冲裁力、模具寿命都有很大的影响, 是冲裁工艺与模具设计的一个极其重要的参数。

表 5 不同厚度落料件的精度 $\delta_{\min}$ 的相对间隙

	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
$\delta_{\min}/mm$	0.015	0.015	0.015	0.007	0.073
$z/d(\%)$	15.70	7.03	7.40	7.02	6.50

4.1 冲裁间隙对冲裁件质量的影响

冲裁件的三个质量指标是断面质量、尺寸精度和形状误差。从图 4 中曲线可以看出冲裁相对间隙在一合适值时, 其尺寸精度最高。这是因为如间隙过大, 冲裁时拉伸变形大, 冲裁后的弹性恢复使落料尺寸缩小; 如间隙过小, 材料受压缩变形, 冲裁后的弹性恢复也使落料尺寸缩小, 从而降低尺寸精度。此外, 间隙不合理还会造成冲裁件拱曲, 不能保持所要求的形状需要。冲裁相对间隙 z/d 在 10% 左右时, 冲裁断面的质量较好, 即断面较光洁, 毛刺较小。间隙较大或较小时, 其断面质量下降, 表现在撕裂带增大, 毛

(下转 62 页)

金刚石笔(图3),以很小而均匀的进给量精密地修整砂轮,然

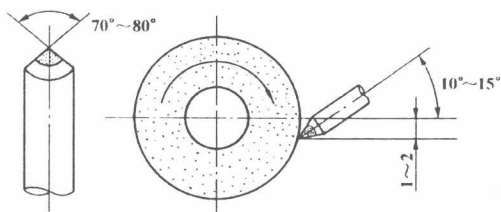


图3 金刚石笔及其合理安装

后用油石(用平面磨床磨平)或精车后的砂轮以很小而均匀的进给量进行细密地修整砂轮而获得。同时将工件放松,在两顶尖中心孔内放黄油,并放松中心架,使两支片不接触

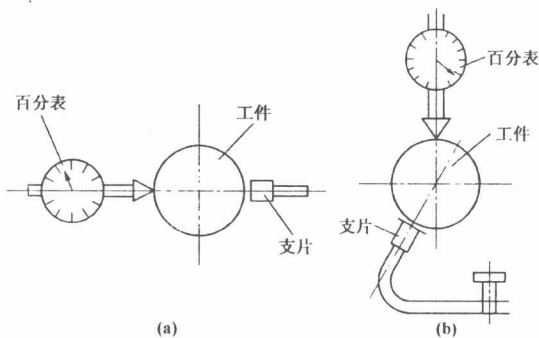


图4 中心架的合理使用

工件。然后再重新调整中心架的两个支片,方法如图4所示。百分表沿直径方向顶住工件,调整支片,当工件与支片接触,百分表立即有反应,这样我们就可控制支片的前后位置。

2.4 改进中心架的结构

一般中心架支片转动的丝杠螺距较大,每旋转一周进给量在1.25~2mm。我们利用中心架原有结构,增加一套差动丝杠,使支片后部的螺母在旋转一周时,支片移动量为0.1mm,提高了支片调整精度。

3 控制弯曲度的措施

细长轴的精度主要是由弯曲度、圆度、粗糙度等决定,

(上接52页)

刺高度变大等。因而选择合适的相对冲裁间隙对提高0Cr17Ni7冲裁件的质量有利。

4.2 冲裁间隙对冲裁力的影响

从试验结果看,冲裁力随间隙减小而增大。其原因是间隙减小时,材料所受弯矩减小,从而使拉伸力降低,挤压应力增加,材料不易撕裂,故冲裁力增大。但冲裁力在一定的范围(相对间隙在10%~30%之间)内最小。

4.3 冲裁间隙对模具寿命的影响

冲裁间隙大小主要影响到冲裁模具的磨损和凹模的胀裂,是影响模具寿命的重要因素。间隙减小,冲裁条件差,磨损就大,且冲裁件梗塞在凹模腔内的胀裂力也增大,从而减少模具寿命。

综合以上分析,冲裁间隙在8%~15%时,0Cr17Ni7板材具有良好的冲裁性能。

5 结论

a.0Cr17Ni7板材冲裁模设计时冲裁力可用 $F = Ld\sigma_b$ 计

而弯曲度和粗糙度是一个矛盾体:粗糙度在 $R_a 0.2$ 以上,砂轮的挤压力大, P_y 力也大,使工件产生弯曲,而细长轴磨

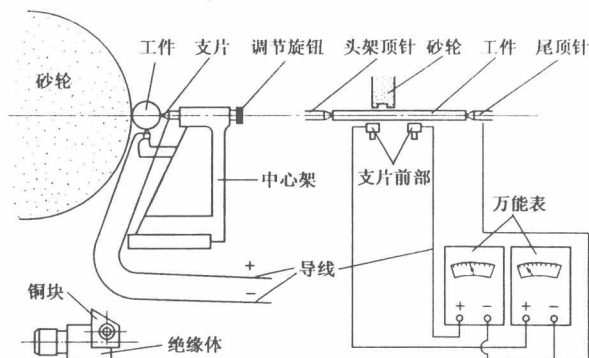


图5 中心架两支片的改进

削中的中心架调整又往往难以控制。因此,对于磨削高精度、低粗糙度的细长轴来说,的确是一个老大难问题。为此,可以应用万能表中的 μA 电流通与不通的测量原理,来测量工件与支片接触情况。先将中心架的两支片做些改进(见图5),在支片前端分别装上导电的铜块,再用电线与万能表一端接(+)极,另一端接(-)极,(+)极与中心架相连,(-)极与尾架相通,当工件与支片相接时,万能表的旋转开关拨至100k Ω 时,指针立即转动,表明整个电路相通了,其灵敏度很高,指针从0到最大读数值之间的摆动值为中心架支片上的移动量 $4\mu m$,当万能表调整到10k Ω 时,指针的摆动值为0.001mm。用这种控制方法来控制中心架支片与工件的接触,再加上“差动微调结构”来磨削高精度、低粗糙度值的细长轴,是一种比较理想的方法。这种方法就象超精磨床上的磨削指示仪那样,随时知道切削力、挤压力的大小。对于提高磨削精度,降低粗糙度值都较为有利。

陈波女,1966年12月生,1998年毕业于美国俄亥俄州托莱多大学机械工程系,获博士学位,现任托莱多大学教授。在国内外杂志上发表论文10余篇。

收稿日期:1999-06-21

算。因为从试验结果看,用 $F = Ld\sigma_b$ 计算的冲裁力比实测的冲裁力要大10%~20%,对于实际冲裁留有一定余地。

b.从表4可知,毛刺高度 h 最小的相对间隙范围大致在7%~12%之间。

c.从表5可知,尺寸精度较高的相对间隙范围在6.5%~8%之间。

在实际生产中可根据零件的具体要求,由曲线选择相应的合理间隙值。

参考文献

- 肖景容,姜奎华.冲压工艺学.北京:机械工业出版社,1990
- 血井英治.金属加工学.廉元国译.北京:国防工业出版社,1984

陈明和男,1962年4月生,南京航空航天大学机电工程学院508教研室工程师。毕业于南京航空航天大学航空宇航制造工程专业并获硕士学位。主要研究领域为计算机技术在塑性成形中的应用、陶瓷复合材料、材料超塑性及其扩散连接。获部、省级科技进步二等奖1项、三等奖2项。发表论文6篇。

收修改稿日期:1999-08-02

SiC 陶瓷在航天器高温结构件研制中的应用

陈明和 傅桂龙 张中元

(南京航空航天大学机电工程学院 南京, 210016)

徐 洁

(南京化工大学材料科学与工程系 南京, 210013)

葛国华

张中光

(上海 801 所 上海, 200065)

摘要 碳化硅陶瓷是一种具有优良的高温力学性能的新型结构陶瓷材料, 具有热膨胀系数小、比重轻(只有重金属的三分之一)、导热系数大等特性, 非常适合应用于航空航天高温结构件的制造。文中叙述了碳化硅陶瓷应用于某航天器的高温燃烧室的研制的全过程。结果表明, 碳化硅陶瓷用于制备航天器燃烧室具有独特的优势, 结果令人满意。同时, 也指出了碳化硅陶瓷在其他领域的应用前景。

关键词: 航天器; 碳化硅陶瓷; 等静压; 燃烧室

中图分类号: V259; V414.5; TH145.11; TB39

引 言

现代制造技术的迅猛发展, 对工程材料提出了愈来愈高的性能要求。尤其某些尖端学科不仅要求工程材料具备良好的机械性能, 而且要求其具有良好的化学物理性能, 诸如比重、耐腐蚀、耐高温及热传导等。如在火箭和导弹的发展中, 鼻锥是关键部件, 它要承受 $1\,500^{\circ}\text{C}$ 的高温, 要求材料具有高的高温强度和良好的抗氧化性能, 只有当今被称为现代陶瓷中的结构陶瓷才能满足其性能要求。近年来, 结构陶瓷作为一种新型的工程材料而风靡科技界。英、美、法、日等工业发达国家已广泛地将结构陶瓷材料应用于航空、航天和高精密机械的结构件的制造, 且已取得了可观的经济和社会效益。

结构陶瓷包括氮化硅、碳化硅、氧化锆、氧化铝、六方氮化硼等。而碳化硅(SiC)因其优良的高温力学性能、低热膨胀系数、高导热率、良好的抗热冲击性及比重轻(只有一般金属的三分之一)被广泛应用于航空航天器件(如火箭发动机燃烧室内壁、喷嘴、鼻锥)的制造^[1]。本项目为某航天器上的高温燃烧室, 原来曾用过金属铌(Nb)来制造, 但其比重大且高温力学性能的限制使航天器的总体性能受到了极大的影响。因此, 本研究采用碳化硅陶瓷来制造某航天燃烧室以达到其使用性能要求。

收稿日期: 1999-05-18; 修改稿收到日期: 1999-07-16

第一作者: 陈明和, 男, 工程师, 1962年4月生。

1 SiC 的基本特性

1.1 SiC 的晶体结构^[2]

SiC 是 Si-C 间键力很强的共价键化合物。SiC 有 75 种变体,主要的变化是 α -SiC 和 β -SiC。 α -SiC 是高温稳定型, β -SiC 在 2 100℃开始向 α -SiC 转变,在 2 400℃迅速转变成 α -SiC。SiC 的长程结构很复杂,但其短程结构简单。由碳、硅原子相间排列构成类金刚石的四面体结构。最常见的结构有 α 型 6H 六方、4H 六方和 β -SiC 的面心立方。SiC 的晶体结构决定了其具有高的熔点、硬度、化学惰性和高温强度。

1.2 SiC 陶瓷的性能及应用

反应烧结碳化硅和烧结、热压碳化硅一样都是致密材料。英国 Refel 反应烧结碳化硅的平均晶粒大小为 0.5~5 μm 。碳化硅陶瓷都是以穿晶断裂为主,其强度取决于碳化硅的晶粒大小。碳化硅的断裂源主要是大晶粒、表面连通孔隙和某些夹杂。在烧结 α -SiC 和烧结 β -SiC 中,断裂都同 α 相的异常长大有关。表 1 为国内外几种碳化硅陶瓷的性能^[3]。

表 1 国内外几种碳化硅陶瓷的性能

性 能	反应烧结 REFEL	常压烧结 Hexoloy, SA	热 压	
			Norton, NC-203	上海硅酸盐所 SSA
密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	3.10	3.1	3.32	3.22
抗弯强度/ $\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$	530	460	700	710
弹性模量/ $\times 10^4 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$	420	4.10		
热膨胀系数($\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$)	4.3	4.02	4.3	
导热系数($\text{卡}/\text{cm} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}$)	0.3	0.3		

SiC 陶瓷的高温蠕变速率小。在高温长时间使用中, SiC 陶瓷很稳定,抗氧化性好,强度较少受环境(例如氧化)的影响。SiC 的耐急冷急热性好,且具有优良的高温抗腐蚀性。因而,碳化硅常用在飞机、火箭等的燃烧器部件、火箭喷嘴及轴承、滚珠、机械密封等处。用 SiC 制造航天器燃烧室可以说是物尽其用了。

2 SiC 燃烧室的研制

2.1 研制要求

图 1 为某航天器燃烧室的零件简图,该制件有较高的制造精度要求。其技术要求为:(1)强度试验:压力 2.0 MPa 保压 15 min,制件无任何损坏;(2)气密试验:压力 1.2 MPa 保压 15 min,无任何泄漏;(3)零件可在温度不低于 1 300℃,压力大于 0.8 MPa 情况下连续工作 30 h。

2.2 研制工艺流程

SiC 燃烧室的研制工艺流程为:

$\left. \begin{matrix} \text{SiO}_2 \\ \text{C} \end{matrix} \right\} \rightarrow \text{合成 SiC} \rightarrow \text{除碳} \rightarrow \text{SiC 微粉} \rightarrow \text{添加烧结助剂} \rightarrow \text{混磨} \rightarrow \text{等静压成型素坯} \rightarrow \text{预烧素坯} \rightarrow \text{机加工(粗加工)} \rightarrow \text{常压烧结} \rightarrow \text{磨削(精加工)} \rightarrow \text{至图纸要求尺寸} \rightarrow \text{成品}$

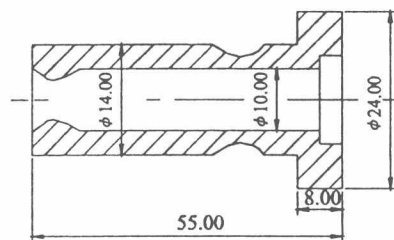


图1 某航天器燃烧室示意图

2.2.1 SiC 微粉的制备

高纯度细碳化硅粉用气凝二氧化碳和燃气碳黑合成,其反应式为 $\text{SiO}_2 + 3\text{C} = \beta\text{-SiC} + 2\text{CO}$ 。采用粒度为 $18 \sim 22 \text{ nm}$ 的 SiO_2 , $30 \sim 35 \text{ nm}$ 的碳黑,在 $1400^\circ\text{C} \sim 1500^\circ\text{C}$ 时通氩气保护,反应 4 h 获得 $2 \sim 3 \mu\text{m}$ 的纯 $\beta\text{-SiC}$ 粉。原料中加入微量 SiC 粉可抑制 SiC 的长大。反应生成的 SiC 微粉可能还有多余的碳黑,故安排除碳工序。

2.2.2 SiC 坯件的成型

该制件的成型采用冷等静压成型方法。跟模压法比较其具有可以成型形状复杂的零件,且制件密度均匀,可获得接近完全致密的材料的优点。本制件采用湿袋模具的冷等静压方法成型,成型的坯件按零件图留有适当余量。

2.2.3 SiC 制件的烧结

SiC 很难烧结。其晶界能与表面能之比很高,不易获得足够的能量形成晶界而烧结成块体。SiC 烧结时的扩散速率很低,其表面的氧化膜也起扩散势垒作用。因此,碳化硅需要借助添加剂或压力等才能获得致密材料。本制件采用 Al-B-C 作为烧结助剂。硼(B)在 SiC 晶界的选择性偏析减小晶界能,提高烧结推动力,但过量的 B 会使 SiC 晶粒异常长大。添加 C(碳)可以还原碳化硅表面对烧结起阻碍作用的 SiO_2 膜,并使表面自由能提高。但过多的碳,使制品失重,密度下降。铝(Al)有抑制晶粒长大的作用,并有增强硼的烧结助剂作用^[4],但过量的 Al 却会使制件的高温强度下降。因此,必须通过试验合理确定 Al, B, C 的用量。

2.2.4 制件坯件的粗、精加工

制件的素坯用切削(常规方法)加工方法,为后续的磨削加工(精加工)留下余量。磨削加工用特制的夹具及金刚石刀具进行。

由于碳化硅制件的许多性能可随其微粉的尺寸大小及其微粉的活性元素的含量而变化,故其微粉尺寸严格控制在 $2 \sim 3 \mu\text{m}$ 。另外,素坯和常压烧结的加热升温速率也对成品的质量产生重要的影响。

2.3 关键工艺的工艺参数

2.3.1 素坯制作工艺参数

制作素坯的目的是为下一步机加工作准备,其原则是制作的素坯有一定的强度,并使切削加工易于进行。成型素坯用冷等静压的湿袋成型方式,其冷等静压压力为 250 MPa 。冷等静压在专用设备上进行。素坯预烧结温度约为 1500°C ,烧结时间为 $1.5 \sim 2 \text{ h}$ 。

2.3.2 制件的常压烧结

本烧结碳化硅制件的最终烧结采用添加烧结助剂 Al-B-C 的常压烧结方式。在 M_0SiO_2

电阻炉内进行。其烧结温度 $2\,300\text{ }^{\circ}\text{C}$, 烧结时间为 $1\sim 1.5\text{ h}$ 。尽量使 $\beta\text{-SiC}$ 转化为高温稳定型的 $\alpha\text{-SiC}$ 。

2.4 SiC 燃烧室制件的性能(见表 2)

表 2 碳化硅燃烧室制件的基本性能

体积密度	气孔率	抗弯强度	热膨胀系数	导热系数
3.1 g/cm^3	$<5\%$	450 MPa	$4.5\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	$40\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$

2.5 SiC 燃烧室制件的试验

根据设计要求, SiC 燃烧室制件必须经过强度、气密、高温、急冷急热等性能试验。

2.5.1 强度试验

对制件施加 2.0 MPa 气压, 持续 30 min , 制件保持完好。图 2 为强度试验曲线。

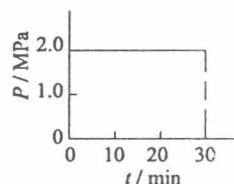


图 2 强度试验曲线

2.5.2 气密性能试验

在分别为 $0.3, 0.6, 0.9, 1.2, 1.5\text{ MPa}$ 压力下进行水中气密性能试验, 未见制件有任何泄漏。图 3 为试验曲线。

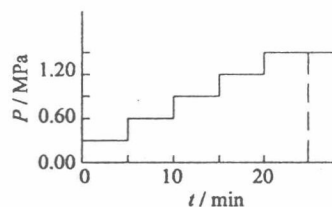


图 3 气密性能试验曲线

2.5.3 急冷急热循环试验

急冷急热循环试验方式模拟该制件的实际使用条件的方法进行。即将制件在室温下置于 M_0SiO_2 电炉中加热至 $1\,300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 而快速置于空气中强制风冷。冷却速率 $300\text{ }^{\circ}\text{C/min}$, 如此循环 10 次, 未见制件有裂纹和破坏。图 4 为急冷急热循环试验曲线。

2.5.4 高温试验

将经过 2.5.1~2.5.3 各项试验的制件用于某航天器的地面模拟装机高温试验, 试验后制件完好。

3 结 论

(1) SiC 陶瓷燃烧室制件的各种模拟现场的性能试验表明, 用 SiC 陶瓷材料代替金属材料制备航天器高温燃烧室是现实的, 且优越性明显。

(2) SiC 陶瓷材料应用于民用耐高温结构件前景良好, 在某些情况下还可能免除原先的冷却系统。

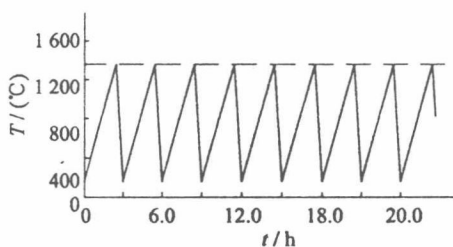


图 4 急冷急热试验曲线

参 考 文 献

- 1 邱关明. 新型陶瓷. 北京:兵器工业出版社,1993. 15~30
- 2 殷 声. 现代陶瓷及其应用. 北京:北京科学技术出版社,1990. 60~65,160~169
- 3 张清纯. 陶瓷材料的力学性能. 北京:科学出版社,1987. 150~156
- 4 David W. Richerson, modern ceramic engineering properties and use in design. Marcel Dekker, Inc, New York,1982. 135~140

Application of SiC Ceramics to Manufacture of Spacecraft Combustion Chamber

Chen Minghe Fu Guilong Zhang Zhongyuan

(Department of Mechanical Engineering,
Nanjing University of Aeronautics & Astronautics Nanjing,210016)

Xu Jie

(Department of Material Science and Engineering, Nanjing Chemical University Nanjing,210013)

Ge Guohua Zhang Zhongguang

(No. 801 Institute of Shanghai Shanghai,200065)

Abstract SiC ceramics is a new type structural material which has excellent mechanical properties in high-temperature. Besides, it has also small heat expansion-coefficient, good thermal conductivity and light density (only metal's 1/3). Therefore, the application of SiC ceramics to the manufacture of spacecraft and aircraft is applicable. This paper presents the process of the application of SiC ceramics to the manufacture of spacecraft combustion chamber. The research shows that spacecraft combustion chamber is made from SiC ceramics. It has many especial advantages and the experimental result is satisfactory. At the same time, the paper also describes the prospect of the application of SiC ceramics in other high-temperature structural parts.

Key words: spacecraft; SiC ceramics; isostatic pressing; combustion chamber