

石墨喷管内衬瞬态温度场试验研究

孙传铮 翁中杰

摘 要

本文介绍用微机数据采集控制系统对石墨喷管内衬的温度场进行实测。文中详细地介绍了微机系统、热电偶的制作和安装工艺、实测程序,并对实测结果进行分析和讨论。实测的结果能用于分析喷管内衬的温度场及其变化情况和热应力的计算,并可用于验证用非稳态温度场有限元计算程序的可靠性。

一、前 言

小型固体火箭发动机喷管石墨喉衬承受高温、高压燃气流的作用,工作条件相当恶劣,是小型固体火箭发动机中的一个薄弱环节。其性能好坏直接关系到发动机的可靠性和工作性能。由于国内对石墨喉衬的温度分布和热应力分析研究工作做得还不多,我们和801所合作对喷管石墨喉衬进行理论分析、数值计算,用微计算机数据采集控制系统对其温度场进行了多次的实测。一方面用实测的结果来验证理论分析和数值计算,另一方面为石墨喉衬的设计提供理论依据。

小型固体火箭发动机工作时间很短,由实测可知约3.5秒左右,而且石墨喉衬处于高达3000℃左右的高温高压燃气流的冲击作用下,受到很强的热冲击作用,热应力问题相当严重。石墨喉衬的温度场又是热应力问题分析的重要前提。石墨材料是非金属各向异性体,要进行动态的多点温度实测、传感器的安装、信号线的引出都相当困难。常规的测量、记录手段都无法完成这种多点高温瞬态的温度实测。我们使用了微计算机数据采集控制系统和其他方法,成功地进行了石墨喉衬的温度场的实测,取得满意的结果。

二、微计算机数据采集控制系统

在石墨喉衬的温度场实测中,要求毫秒级甚至更短的时间对多通道的温度传感器(如热电偶)从地面试车台传到测试仪器的微弱毫伏级信号进行检测、记录和处理。因此对于二次仪表提出了很高的要求。使用MDS-1型Z-80CPU微计算机数据采集控制系统则能满足实测所需的精度、速度以及数据处理和输出等要求。

MDS-1型微计算机数据采集控制系统的结构框图如图1所示。

以Z-80CPU为核心的微计算机通过三组总线缓冲驱动器(即数据总线驱动器、地址总线驱动器和控制总线驱动及逻辑电路),与只读存储器EPROM、随机存储器RAM、CRT接口、ASCII码键盘接口、打印机接口、磁带录音机接口相接,并通过总线接口和其他外围设备如A/D转换器、D/A转换器、定时计数器相接。

微计算机的数据采集控制部分是由PIO可编程序接口芯片、12位A/D转换器、采样保持

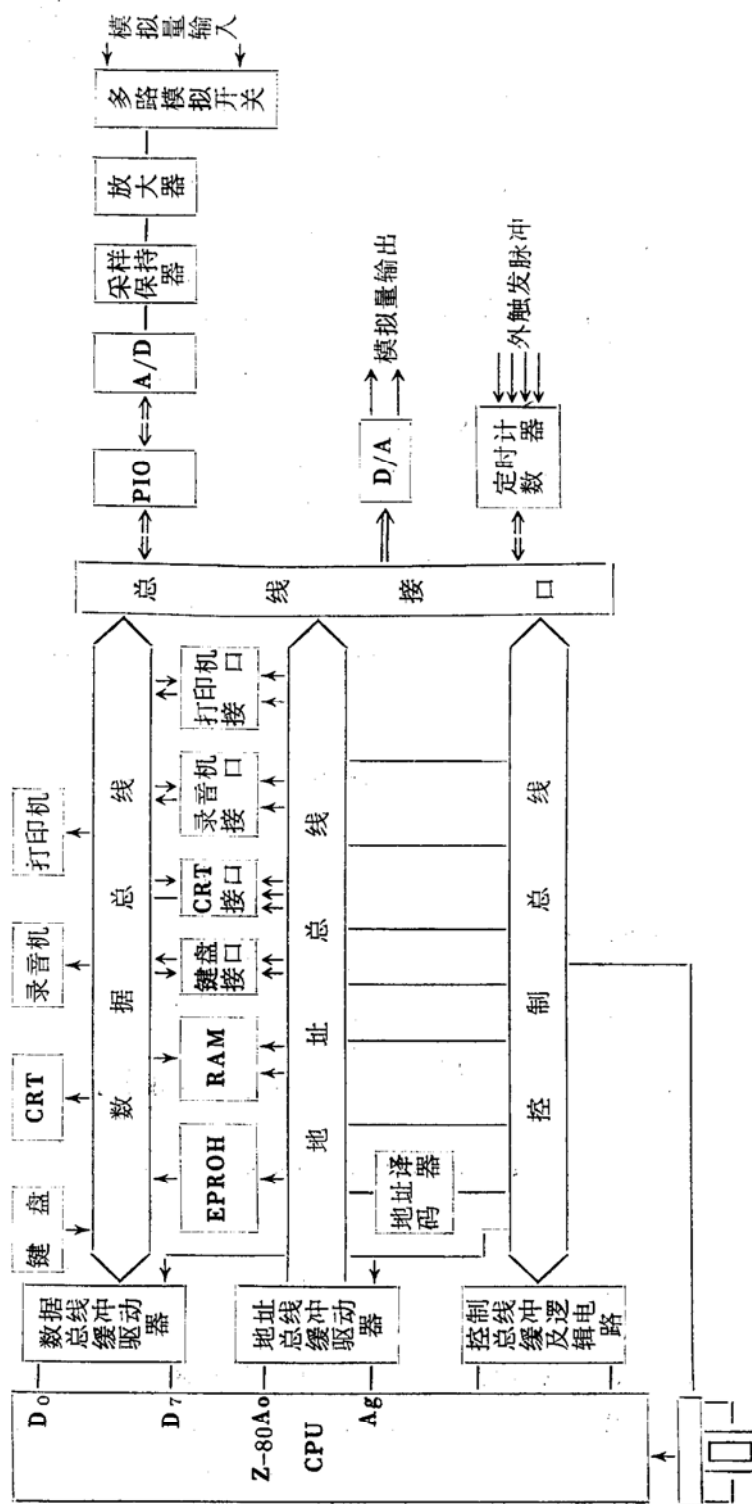


图1 微计算机数据采集控制系统框图

器、放大器、多路模拟开关、12位D/A转换器，定时计数器等通过总线接口和微计算机进行交换数据和控制。本系统的模拟量输入通道数：双极性16通道，输入电压范围 ± 50 毫伏，分辨率二进制12位，转换速度45微秒/通道。模拟量输出二通道，输出电压范围 ± 10 伏，输出电流5毫安，输出阻抗1欧，分辨率二进制12位，输出最大稳定时间10微秒。定时计数器是有四个独立通道的可编程序芯片，定时长短由程序设定，当使用计数器时可对外触发脉冲计数并可和触发脉冲同步工作，主要用于定时数据采集和协调外围动作。输入的模拟信号为热电偶的毫伏级信号，经多路模拟开关选择不同的输入通道的信号，此信号经放大器放大100倍，由采样保持器保持以保证在A/D转换时间内保持不变，在A/D转换器中模拟信号被转换为数字信号，通过PIO可编程序接口芯片和总线接口送入微计算机内贮存。

三、热电偶的布置和安装

在瞬态温度的测量中，对温度传感器提出了较高的要求。例如要具有高的动态响应速度、满足测温的范围、本身和引线的尺寸尽可能小以减少对被测温度场的干扰、有足够的抗振动冲击性能、输出信号与温度之间对应曲线容易得到校验等等。同时由于石墨是非金属各向异性体、对传感器的安装也提出了新的要求，常规用于金属的方法很难实现。针对石墨喉衬的特点，由燃气温度、理论分析和数值计算的值为依据，选用了铂——铂铑10(S型) $\phi 0.1$ 毫米和 $\phi 0.05$ 毫米裸丝自制成热电偶作为感温元件。在喷管喉口区的不同深度安装了多根这种热电偶。采用二芯外径 $\phi 1.6$ 毫米的细瓷管安装热电偶，热电偶在瓷管端部和该深处的石墨压紧，细瓷管用高温无机粘接剂在高温下固化和石墨粘牢(见图2)。固化后，用数字万用表分别测量偶丝与石墨之间、偶丝之间的电阻值确定是否接触良好。

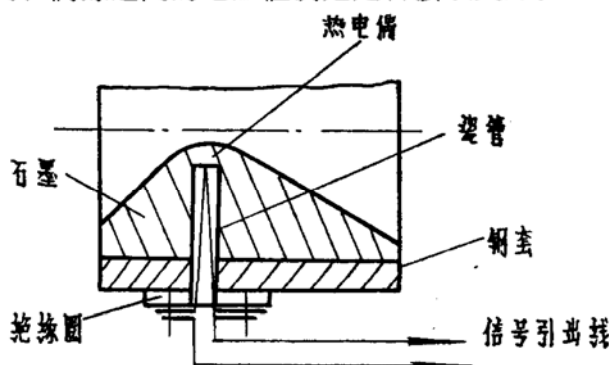


图2 喷管石墨喉衬热电偶安装图

热电偶的布置可以采用三种形式：一种沿喷管轴线成一定倾角方向打孔、另二种为喉口横切面的轴向和切向打孔(见图3)。这三种方法打孔各有利弊。因为一方面要考虑到在石墨喉口区受到高温高压的燃气作用，如打孔很深，使石墨喉口内表面的厚度很薄，一旦破坏容易引起燃气经孔外喷。另一方面要考虑到加工工艺的方便和容易精确定位。采用喉口横切面的轴向打孔工艺上容易实现，安装固定也方便，但引起事故的可能性大，而切向打孔强度好，比较安全，但打孔工艺、安装比较困难。国外资料曾介绍过采用切向打孔的方案进行试验。在沿喷管轴线成一定倾角打孔工艺上方便但精确定位较困难些。这三种方案都进行了试验，最深的孔离喉口表面2.5毫米。在实际地面试车中都未发生任何异常情况。

热电偶在石墨喉衬中的精确位置的确定：在进行石墨喉衬打孔时，虽然控制了钻头的深

度和倾角。但为了精确的定位，将全部安装好的热电偶，高温固化后送X光透视拍片，由光学仪器精确定出孔的深度和热电偶离喉口表面的距离，同时检查热电偶安装是否良好。

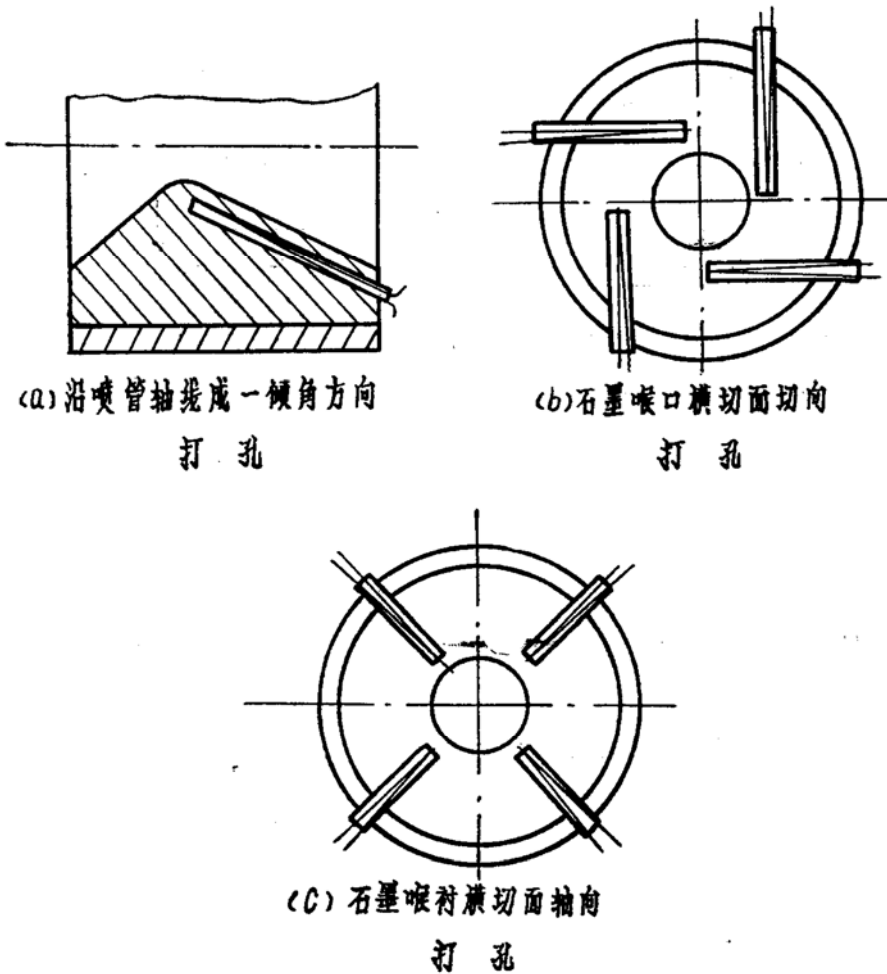


图 3 石墨喉衬中热电偶孔的布置形式

四、石墨喉衬温度场的实测

图 4 表示了石墨喉衬温度场实测的测试系统图。

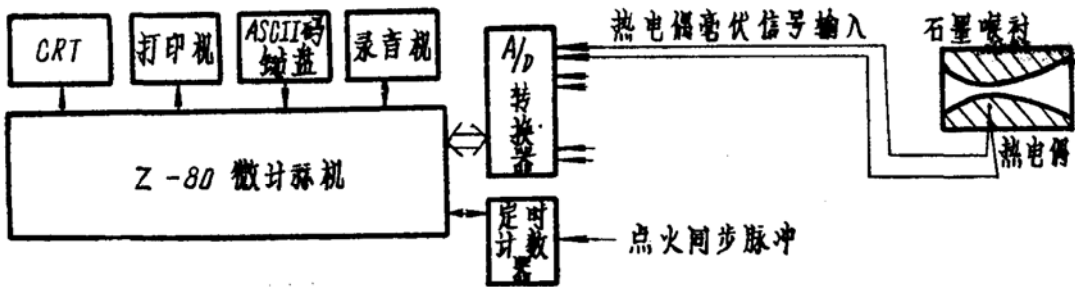


图 4 石墨喉衬温度场测试系统简图

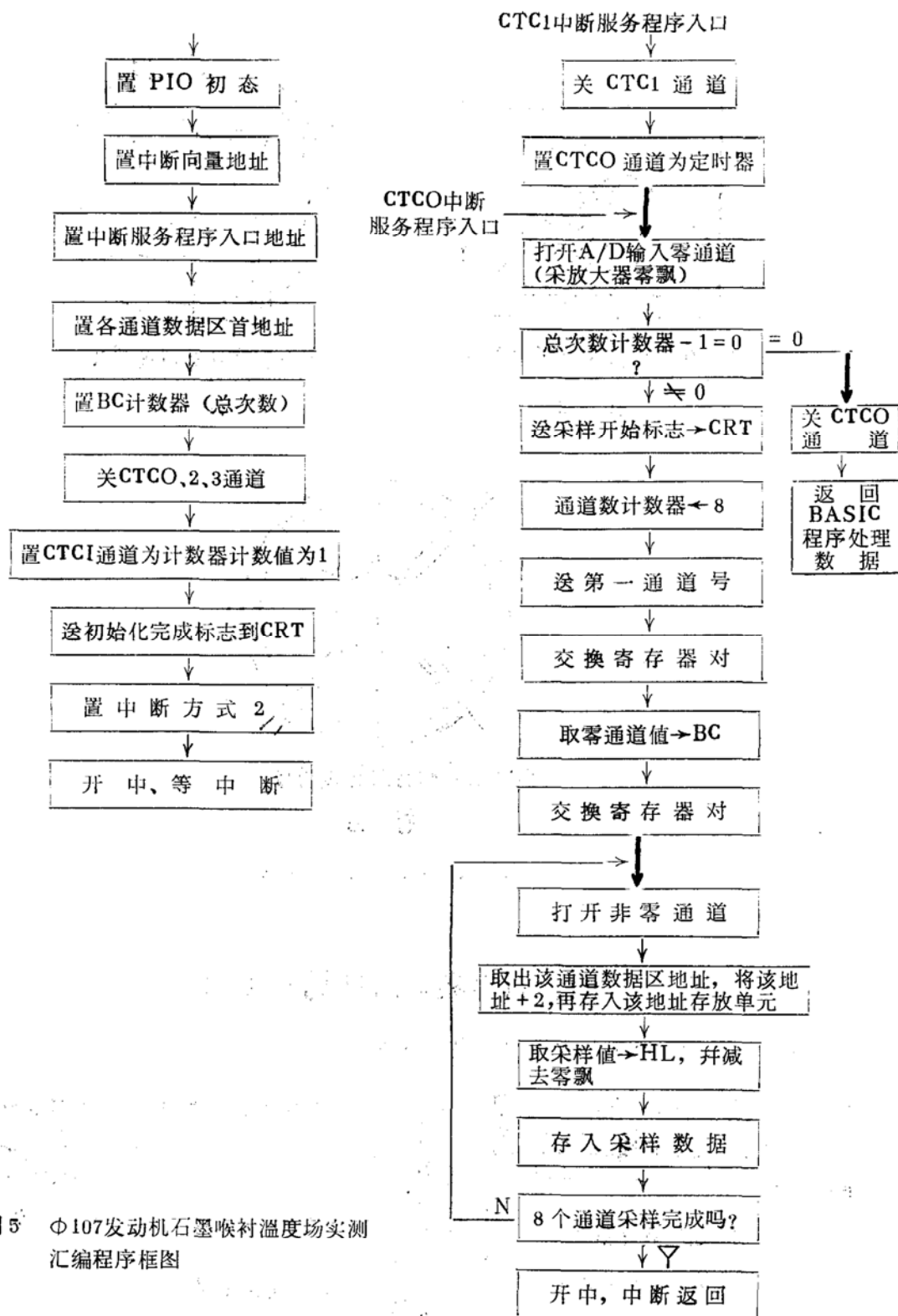
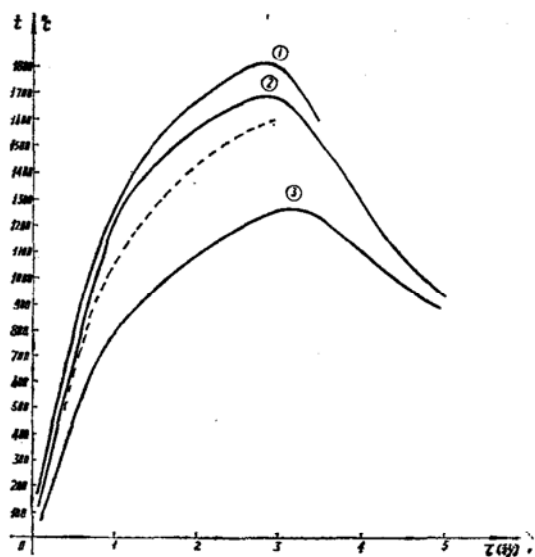


图 5 Φ107发动机石墨喉衬温度场实测
汇编程序框图

实测的 $\phi 107$ 发动机的石墨喉衬中安装了四根铂-铂铑 10 热电偶, 在石墨喉衬外表面 安装了二点热电偶, 在钢套外表面上安装了二点热电偶, 共 8 个测点, 通过 8 个模拟量输入通道将热电偶输出的变化电压信号送入 MDS-1 型微计算机数据采集控制系统。一路发动机点火同步脉冲通过定时计数器输入通道, 由点火同步脉冲启动微计算机开始定时对各通道的热电偶信号进行数据采集, 达到微计算机和发动机点火同步。

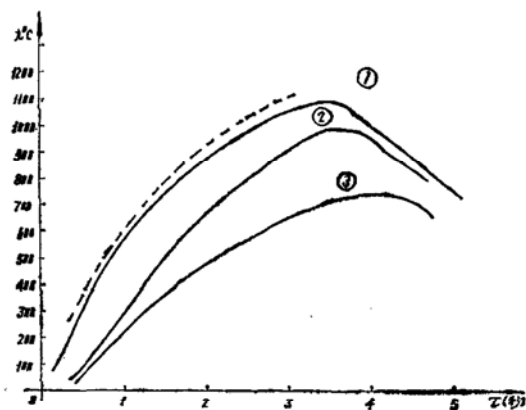
每热电偶通道实测 2000 个数据, 检测一次的时间为 2.6 毫秒, 共实测 5.2 秒, 测完后经处理每通道输出 500 个数据。

$\phi 107$ 发动机石墨喉衬温度场实测 汇编程序框图见图 5, 不同位置的温度瞬态变化曲线见图 6。



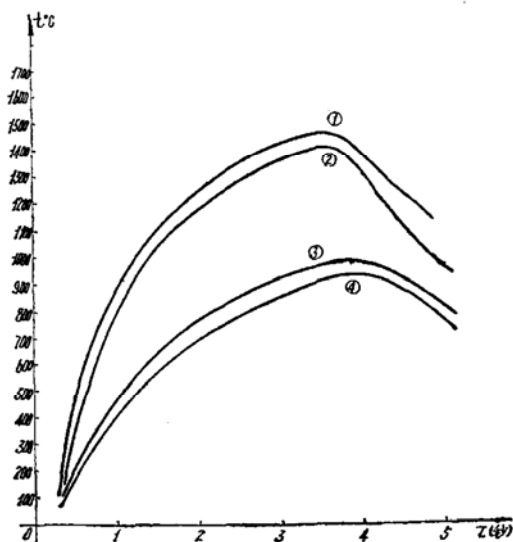
(a)

- ① 离开喉口内表面 2.5 毫米
最高温度 $t_{\max} = 1803^{\circ}\text{C}$ 3.0 秒
- ② 离开喉口内表面 2.55 毫米
最高温度 $t_{\max} = 1660^{\circ}\text{C}$ 3.0 秒
- ③ 离开喉口内表面 4.2 毫米
最高温度 $t_{\max} = 1240^{\circ}\text{C}$ 3.15 秒



(b)

- ① 离开喉口内表面 4.8 毫米
最高温度 $t_{\max} = 1100^{\circ}\text{C}$ 3.4 秒
- ② 离开喉口内表面 6.8 毫米
最高温度 $t_{\max} = 1010^{\circ}\text{C}$ 3.5 秒
- ③ 离开喉口内表面 9.0 毫米
最高温度 $t_{\max} = 725^{\circ}\text{C}$ 4.0 秒



(c)

图 6 $\phi 107$ 发动机石墨喉衬温度瞬态变化曲线

- ① 离开喉口内表面 2.7 毫米
最高温度 $t_{\max} = 1480^{\circ}\text{C}$ 3.55 秒
- ② 离开喉口内表面 3 毫米
最高温度 $t_{\max} = 1420^{\circ}\text{C}$ 3.55 秒
- ③ 离开喉口内表面 6.5 毫米
最高温度 $t_{\max} = 980^{\circ}\text{C}$ 3.8 秒
- ④ 离开喉口内表面 6.5 毫米
最高温度 $t_{\max} = 935^{\circ}\text{C}$ 3.9 秒

五、石墨喉衬温度场实测数据分析

实测石墨喉衬温度获得的某些点的瞬变温度数据是其温度时间曲线离散化的数字结果。为了得到更为精确的温度变化曲线,必须对实测数据进行修正。一般使用误差统计处理方法,并且应用对整个测试系统、热电偶进行静态和动态标定作为修正依据,提供误差范围。整个测试系统的静态标定是用热电偶纯金属定点法检定作出的^[2],其误差约为百分之一负偏离值。实际使用的是Omega公司标准的 $\phi 0.1$ 毫米和 $\phi 0.05$ 毫米S型P-P,kh10热电偶,其温度—电压分度是标准的。动态标定目前很难实现,而使用的热电偶丝很细,实际测试时间5.2秒,巡测一次为2.6毫秒,因此由热电偶热惯性引起的误差可以忽略。实测所有数据均由微机进行误差统计分析处理后输出。

对于石墨喉衬温度数据的几点分析:

1. 图6(a)中曲线①是热电偶安装最深的一点。其实测温度的最大值也超出该热电偶的分度表最大值 1768°C 。此段温度由实测电压值用线性外推法转换为温度,最高温度约 1803°C 。

2. 石墨喉衬外表面和钢套外表面的温度,实测时接近或稍高于环境温度。实测后用表面温度计测只有 $60\sim 70^{\circ}\text{C}$,在三分钟后上升到 160°C ,然后即下降。这说明热量从石墨喉衬内表面经受高温燃气传热再传到外表面较慢,温度梯度很大,这是引起过大热应力的原因之一。

3. 由于热电偶的安装有一定差异,造成同一深度的测点温度稍有差别。例图6(c)中曲线③④。这是因为有一个实际安装的热电偶端偏斜于瓷管一端,造成热阻增加。

4. 石墨喉衬的升温速度在点火开始后的第一秒钟最高,在第二、三秒降低。例如图6(a)曲线①在第一秒钟内从环境温度升高到 1240°C ,升温速率为 $1220^{\circ}\text{C}/\text{秒}$ 。在第二、三秒的升温速率为 $280^{\circ}\text{C}/\text{秒}$ 。图6(c)曲线③在第一秒钟内从环境温度升高到 450°C ,升温速率为 $430^{\circ}\text{C}/\text{秒}$,在第二、三秒钟内升温速率为 $225^{\circ}\text{C}/\text{秒}$ 。

石墨喉衬内温度梯度大。例图6(a)中离喉衬内表面2.5毫米和4.2毫米处计算同一时刻的温度梯度为:第1秒钟为 $270.5^{\circ}\text{C}/\text{毫米}$,第二秒钟为 $347.1^{\circ}\text{C}/\text{毫米}$,第三秒钟为 $329.4^{\circ}\text{C}/\text{毫米}$ 。例以图6(b)中离喉衬内表面4.8毫米和9.0毫米处计算温度梯度第一秒钟为 $90.5^{\circ}\text{C}/\text{毫米}$,第二秒钟为 $100^{\circ}\text{C}/\text{毫米}$,第三秒钟为 $100^{\circ}\text{C}/\text{毫米}$ 。

由此可见,石墨喉衬在靠近喉衬内表面处升温速率高、温度梯度大,随时间温度梯度变化也大。而在外表面处升温速率低、温度梯度小,随时间变化也较小。这说明石墨存在相当热阻。

六、结 论

通过对 $\phi 107$ 发动机石墨喉衬温度场的实测可以得出以下一些结论:

1. 微计算机数据采集控制系统应用在动态瞬变的数据采集方面性能可靠、精度高,使用方便,特别适合于各种现象的数据实测。该系统完全满足火箭发动机石墨喉衬温度场的瞬态测量。

2. 石墨喉衬温度场实测中,使用热电偶及热电偶的安装方式和方法是可靠的、合理的。其中采用横截面切向安装方法是比较好的一种。

3. 石墨喉衬内表面处的升温速率高、温度梯度大,最高温度高;在外表面处升温速率低、温度梯度小,温度低。内外表面的温度差很大,温度分布不均匀,这是引起过大热应力,造成石墨破碎的主要原因。

4. 实测的石墨喉衬数据可以用于验证用非稳态温度场的有限元计算的结果及程序的可靠性。由于实测热电偶安装的位置与采用三角形划分的有限元节点之间很难做到完全一致,只能找最接近的位置进行比较。图6(a)和(b)中的虚线分别表示在喉口截面附近部分有限元节点在三秒钟的温度计算值,把其与实测相应位置的曲线和数值比较,可以看出二者是相接近的,其变化规律也是一致。这样可基本上验证非稳态温度场计算程序的可靠性。

参 考 文 献

- 〔1〕 Temperature Measurement Handbook Omega engineering, INC 1980
- 〔2〕 翁中杰:毫秒级瞬态温度测量。上海交通大学,中国计量测试学会温度专业委员会学术讨论会论文 1983。
- 〔3〕 孙传铮:微计算机数据采集控制系统在动力机械测试技术中的应用。上海交通大学,第二届中国内燃机测试学术年会论文文集 1984。
- 〔4〕 MDS-1型微型计算机控制数据采集及处理系统用户手册。上海交通大学热科学跨系委员会、仪器厂 1983。