

doi: 10.7690/bgzdh.2024.01.011

某高超声速试验设备带式电阻元件测温技术

杨海滨, 刘常青, 黄 颀, 张 伟

(中国空气动力研究与发展中心高速空气动力研究所, 四川 绵阳 621000)

摘要: 针对极端条件下电阻元件的在线温度测量问题, 研制一种基于热电偶的带电测温装置。对其结构进行优化, 解决测温探头与电阻元件之间的传热、绝缘以及装置自身的密封、强度等问题; 通过试验得到装置在马赫数 5 和 6 条件下的温度测量值, 将稳态下的测量值与计算值及来流温度值进行对比。结果表明: 该装置的实测值真实可信, 电阻元件处于安全运行温度范围之内, 可为完善加热器电阻元件的状态监控提供依据。

关键词: 测温; 加热器; 电阻元件; 绝缘; 测量值

中图分类号: TJ011 **文献标志码:** A

Temperature Measurement Technology of Certain Type Hypersonic Test Facility Using Ribbon Resistance Element

Yang Haibin, Liu Changqing, Huang Ju, Zhang Wei

(High Speed Aerodynamics Institute, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China)

Abstract: Aiming at the problem of on-line temperature measurement of resistance element under extreme conditions, a live temperature measurement device based on thermocouple is developed. The structure of the device was optimized to solve the problems of heat transfer and insulation between the temperature probe and the resistance element, as well as the sealing and strength of the device itself. The temperature measurement values of the device at Mach numbers 5 and 6 were obtained through experiments, and the measured values at steady state were compared with the calculated values and the incoming flow temperature values. The results show that the measured values of the device are true and credible, which ensures that the resistance element is in the safe operating temperature range, and provides a basis for improving the state monitoring of the heater resistance element.

Keywords: temperature measurement; heater; resistance element; insulation; measured value

0 引言

电加热器是高超声速试验设备中的常用部件^[1]。某高超声速试验设备采用直热式电加热器对来流进行加热, 加热器的性能直接影响风洞试验能力水平, 具体体现在加热器功率要满足试验温度要求、高马赫数条件下电加热元件表面负荷要在安全区间内等; 因此, 对加热器中电阻元件的实时在线测量和监控十分关键。在目前常用的电加热过程中, 通常将带电电阻元件和被加热介质(如气体)直接接触, 这种方式只能直接测量气流温度, 由于电阻元件是带电体, 难以直接测量其温度, 在实际中多采用理论计算值作为参考^[2]。

为直接测量电阻元件温度, 在电加热器制造过程中固定一只热电偶在其内部, 并让测温探头接近电阻元件; 但为了避免电加热器运行时因气流引起的轻微抖动, 使热电偶探头接触到电阻元件, 一般探头距离电阻元件有一定的安全距离, 可能引起测

量值与真实值之间的误差, 因此上述方法得到的测量值也只能作为参考。

某风洞试验设备采用带式电阻元件对高压气流进行加热, 运行时电阻元件始终处于带电状态, 因绝缘防护及结构约束等原因, 对电阻元件的温度测量一直缺乏理想效果。

笔者在理论计算电阻元件温度的基础上, 研制了一种特殊的带电测温装置, 用于试验时在线测量电阻元件的温度, 通过与气流温度测量值和电阻元件温度理论计算值进行对比, 来彼此验证结果的正确性, 从而优化加热器功率匹配和温度控制策略^[3], 完善对加热器的状态监控。

在测温相关文献中, 关于带电测温技术方面的研究主要集中在高压电力设备等领域^[4-5], 在极高温条件下的在线测温技术也有一些进展^[6], 但至今还没有查阅到应用于高超声速试验设备的极端条件下带电元件测温技术研究相关文献。本研究既可作为

收稿日期: 2023-09-23; 修回日期: 2023-10-25

第一作者: 杨海滨(1972—), 男, 四川人, 硕士。

理论计算的补充, 又可为深入开展这方面的研究提供一种思路。

1 电阻元件温度理论计算

某风洞试验设备的加热器共分为 5 级, 每级安装 9 个电阻元件, 共有 45 个电阻元件^[7]。电阻元件采用高温不锈钢 Cr20Ni80 带式型材, 梳状排列, 垂直于迎风面, 以利于热交换。如图 1 所示, 单个电阻元件长度约为 22 500 mm, 宽度为 22 mm, 迎风面的厚度为 2.2 mm。



图 1 电阻元件结构

加热器布置于阀门的后端, 试验时在启动阀门调节气流压力的同时对加热器通电, 电阻元件对流动的气流进行加热, 控制系统保证加热器出口压力和温度同时调节到试验要求^[8]。对应不同的试验状态, 要求加热器出口温度、压力、流量不同, 加热器需要的功率不同, 因而加热器各级的功率匹配方式也不同。

对于温度的理论计算, 可根据传热学中平板层流的对流换热公式来描述。在计算电阻元件的温度之前应首先根据试验状态计算出对应的加热器总功率以及各级加热器功率, 算出电阻元件的表面负荷, 然后计算各级加热器的出口气流温度, 这样就便于计算电阻元件的温度。

对应某个试验状态, 加热器电阻元件温度 T 可表示为^[9]:

$$T = q/h_x + T_{\text{空}} \quad (1)$$

式中: q 为电阻元件表面负荷, W/m^2 ; h_x 为电阻元件表面传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; $T_{\text{空}}$ 为加热器出口气流温度, K 。

表面负荷及换热系数表示为:

$$q = N_0/S; \quad (2)$$

$$h_x = 0.332 * \lambda * (\text{Re}_x)^{1/2} * (\text{Pr})^{1/3} / x; \quad (3)$$

$$\text{Re}_x = Vx/\gamma \quad (4)$$

式中: N_0 为电阻元件投入功率, W ; G 为加热器内空气流量, kg/s ; S 为电阻元件表面积, m^2 ; λ 为空

气导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 取特征温度 $t_{\text{CP}} = (T + T_{\text{空}})/2$ 时的值; x 为特征长度, 这里取 0.022 m; Re_x 为以 x 为特征长度的雷诺数; Pr 为普朗特常量; V 为空气流速, m/s ; γ 为空气运动粘度, m^2/s 。

首先根据空气有关参数如流量、总压、总温以及吼道尺寸计算雷诺数, 然后计算电阻元件表面传热系数, 最后算出电阻元件的温度。

通过计算可知, 电阻元件温度还与电阻元件投入功率、电阻元件面积等因素有关。

由于加热器中每级空气温度不同, 每个电阻元件的温度也不同。如果该级加热器中电阻元件的表面负荷相同, 该级加热器最后一个电阻元件的温度就是最高的; 因此, 只计算最后一个电阻元件的温度, 代表该级加热器所有电阻元件的最高温度。

另外, 试验设备运行的状态很多(从马赫数 5 到马赫数 10), 实际计算时, 笔者选取了马赫数 5 和 6 基本状态来计算加热器功率和温度参数。马赫数为 5 时加热器出口温度为 353~363 K, 总压为 1 MPa, 流量为 14.8 kg/s, 加热器出口气流温度平均值为 358 K, 而加热器最后一个电阻元件的计算温度为 378 K。马赫数为 6 时加热器出口温度为 468~478 K, 总压为 2 MPa, 流量为 11.9 kg/s, 加热器出口气流温度平均值为 473 K, 而加热器最后一个电阻元件的计算温度为 496 K。

2 带电测温装置研制

结合加热器结构特点, 研制一种带电测温装置, 用于试验时在线测量带电电阻元件的温度, 并将其与气流温度测量值和元件温度理论计算值进行对比验证。考虑到测量装置受各种因素影响, 误差较大; 因此, 确定装置的测量值与理论值比较的误差取 $\pm 8 \text{ K}$ 。

2.1 带电测温装置初步设计

加热器属于高压容器, 工况比较恶劣, 最大工作压力为 8 MPa, 出口气流最高温度为 1 173 K(电阻元件温度的计算值约为 1 223 K), 试验时电阻元件对地电压为 400 V; 因此, 研制的带电测温装置要同时解决绝缘、高温、高压以及结构等技术难题。

测温装置的总体设计思路是在铠装热电偶头部包裹一层耐高温且传热性能好的非金属绝缘材料, 既可保护热电偶头部的感温片, 又能作为电阻元件和感温片之间的传热介质。笔者比较了几种满足上述要求的非金属导热绝缘材料: 刚玉(主要成分氧化

铝)、氧化硅、氮化硼、氮化硅、氧化锆、碳化硅,结果如表 1 所示。

表 1 几种导热非金属材料性能对比

材料	击穿电压/ (kV/mm)	莫氏硬度	导热系数/ (W/(m·K))	耐热冲击/ K
刚玉	4	9.0	30.0	1 800
氧化硅	600	7.0	25.0	1 100
氮化硼	3	2.0	33.0	2 200
氮化硅	500	9.2	16.7	1 400
氧化锆	8	7.0	2.5	2 400
碳化硅	半导体	9.2	90.0	1 550

综合来看,刚玉在高温下具有较高的机械硬度和良好的绝缘性能,导热系数也较高,传热性能好^[10],在某些蓄热式加热器中被用来作为蓄热体;

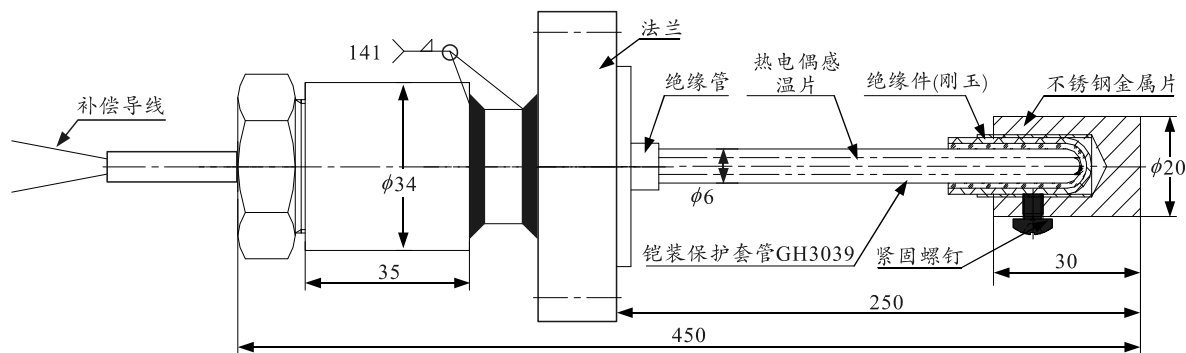


图 2 初步设计的测温装置

初步设计的带电测温装置,保护套管与安装法兰处设置了绝缘管并在穿出法兰缝隙处采用高温胶进行密封,在马赫数 5 情况下(气流压力及温度相对较低)取得了电阻元件温度的测量值。

但是,在进行马赫数 9 试验时,由于受到高温高压气流的影响(加热器出口气流温度 893 K,压力 6 MPa),安装法兰处绝缘管及密封胶均受到了损坏,导致法兰中心孔处漏气,并烧毁了外面的补偿导线;因此,必须对这种结构的带电测温装置进行

因此,选用刚玉作为测温装置与电阻元件之间的连接件是比较理想的。这样既能保证测温装置端部的耐压强度,又能将电阻元件与测量元件绝缘隔离,同时尽量减少测量过程中电阻元件的热损失^[11]。

图 2 为初步设计的带电测温装置,采用刚玉包裹热电偶铠装保护套管 GH3039 的头部,刚玉与 GH3039 材料之间采用高温胶粘接保证 2 种材料的良好接触。刚玉外部套上不锈钢金属片,通过螺钉将金属片固定在刚玉外面,再将金属片与电阻元件焊接,从而达到直接测量电阻元件温度的目的。由于电阻元件温度较高,热电偶感温片选用 K 型铠装热电偶,其最高使用温度可达到 1 300 K。

改进。

2.2 带电测温装置改进

结合初步设计的装置使用情况分析,用刚玉包裹热电偶保护套管头部,并将其外部不锈钢金属片与电阻元件焊接,已能实现使热电偶与电阻元件绝缘的目的。改进装置主要针对法兰密封部位进行优化,如图 3 所示,将热电偶套管穿出法兰后再进行密封处理^[12]。

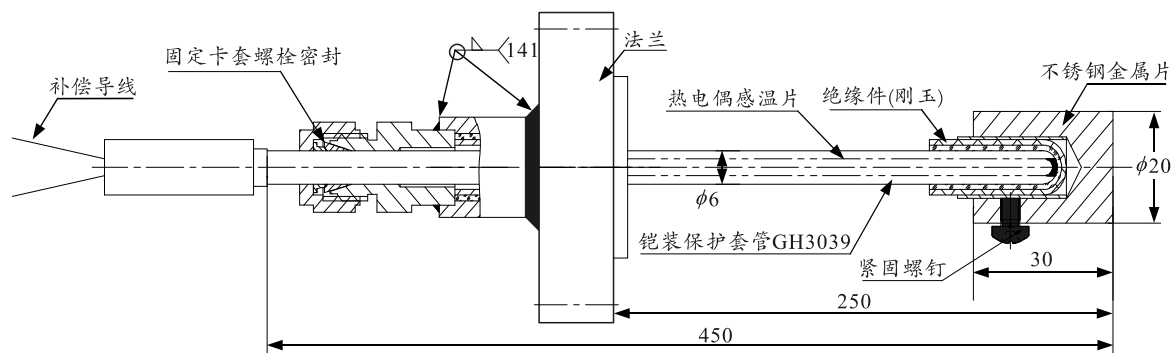


图 3 改进后的测温装置

图 4 为该装置改进后的实物,在法兰外部对热电偶保护套管进行硬密封,即采用固定卡套螺栓密封,这种密封能承受高温高压气流的作用,避免因

填充的密封材料受损坏而漏气的情况。经试验验证可知,改进后的装置能够适应加热器各种工况的密封要求^[13]。



图 4 固定卡套螺栓密封

2.3 研制中的技术难点及解决方法

本装置设计加工中主要技术难点为：在电阻元件对地电压 400 V 时，既要解决其与热电偶测温探头之间的绝缘问题，又要在二者之间实现良好传热；同时，要在极高压力下实现装置密封，以确保试验和装置安全。

本装置在热电偶感温部分与热电偶外部分别做到了隔离绝缘。感温部分的感温片与保护套管 GH3039 之间填充了一层很薄的氧化镁粉材料，该材料既是优良的绝缘材料又是导热材料；热电偶外部则通过刚玉与电阻元件绝缘，确保了测温装置的安全性。使用高温胶粘接方式让刚玉紧贴在热电偶保护套管外部，保证了刚玉的传热性能，减少了测量过程中的热损失。刚玉外部不锈钢金属片直接与电阻元件进行焊接，也减少了传热过程中的热损失，保证了整套测量装置的热传导性能^[14]。法兰引出部位采用固定卡套螺栓的硬密封技术，确保了在高温高压状态下测温装置的稳定性和密封性。

3 带电测温装置应用情况

3.1 带电测温装置安装使用

带电测温装置安装在第 5 级加热器出口位置，采用氩弧焊方式将装置前端的不锈钢金属片与加热器最后一个电阻元件进行焊接，如图 5 所示。

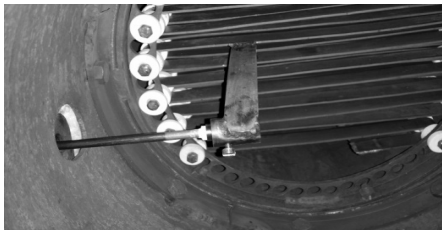


图 5 装置与电阻元件的连接

此外，为防止在长期使用过程中出现钢玉损坏或热电偶感温片脱落等意外情况，在热电偶输出端与 PLC 采集输入模块之间增加了隔离安全栅，这样可将来自加热器危险区的热电偶信号，经隔离变送输出到 PLC 模块，确保信号采集系统的安全。PLC 模块采集到温度信号后，通过 profibus-DP 总线与

上位计算机通信，计算机将采集到的温度信号进行处理和显示。

测试系统中，K 型铠装热电偶为 I 级精度，测温范围为 0~1 300℃；安全隔离栅输入为 K 型热电偶信号，输出为 4~20 mA 电流信号，精度为 0.1%；PLC 的 AI 模块采用西门子 300 系列的高速模块，模块每通道的转换时间为 52 μs，电流采集的精度为 ±0.3%，PLC 的采集周期为 30 ms。元件的带电测温原理见图 6 所示。

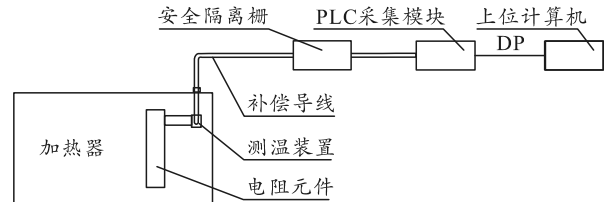


图 6 元件的带电测温原理

改进后的带电测温装置，已成功地在不同马赫数下取得了测量结果。笔者以马赫数 5 和 6 的基本状态为例，将加热器最后一个电阻元件的在线测量温度与加热器出口气流温度进行对比，气流温度仍采用 K 型热电偶测量。

3.2 结果及分析

试验开始启动阀门后，加热器同步加热运行，经过一定时间的升温运行，电阻元件和气流温度进入稳定状态，图 7 和 8 分别为马赫数 5 和 6 时两者温度的关系曲线。

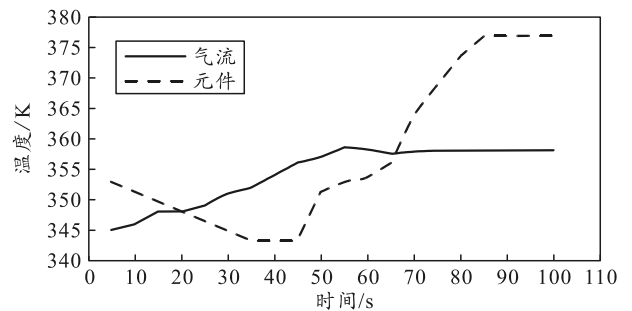


图 7 马赫数 5 元件温度与气流温度对比

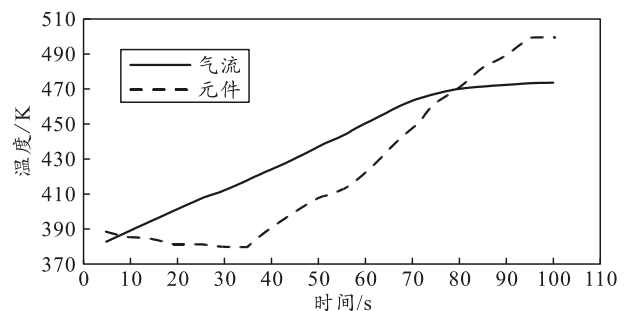


图 8 马赫数 6 元件温度与气流温度对比

以图 7 的温度曲线为例进行分析：加热初期电

阻元件温度高于出口气流温度, 表明电阻元件的初始温度高于来流速度。随着加热过程进行, 电阻元件温度先降低然后缓慢升高。在加热器运行初期, 由于电阻元件通过外延的一段电阻带与热电偶外部的不锈钢金属片进行焊接, 然后经过刚玉绝缘, 再到内层热电偶感温片, 中间经过了几个环节, 存在逐级热传导及少量温度损失等问题; 因此, 温度测量装置响应较慢。从试验结果来看, 在马赫数 5 条件下这个过程大约需要 35 s。而这时受来流冷空气的影响, 测温装置得到的电阻元件温度会降低, 温度降低到大约 343 K 才重新上升。

气流温度的测量响应时间较快, 随着加热过程进行, 出口气流温度很快高于电阻元件测量温度, 最后出口气流温度稳定在 358 K 左右, 此时电阻元件测量温度大约为 355 K。

随着加热时间延长, 电阻元件温度逐渐上升并达到稳定, 经过较长的时间(约为 80 s), 元件温度趋向于稳定值 373 K。此时加热器和气流的热交换处于一个稳定状态(本研究关注的是测温装置在稳态时测值的准确性, 对于热电偶的瞬态响应时间没有作严格要求)。

表 2 为马赫数 5 和 6 稳态时气流温度、元件温度以及元件计算温度的对比值。

表 2 稳态时气流、元件及元件计算温度 K

马赫数	气流温度	元件温度	元件计算温度	指标	结论
5	358	373	378	±8	满足
6	473	502	496	±8	满足

从上表中可以看出, 马赫数 5 稳态时电阻元件测量温度较气流温度高出约 15 K, 马赫数 6 稳态时电阻元件测量温度较气流温度高出约 29 K, 这 2 个结果均与理论计算大致吻合, 从而满足了前面提出的指标要求。

电阻元件温度测量的误差主要来源于刚玉以及不锈钢金属片的热损失、热电偶误差、隔离安全栅和 AI 模块的误差等。由此验证了带电测温装置对于温度测量的准确性。

4 结论

笔者针对某风洞试验设备加热器电阻元件的温度测量技术进行研究, 通过理论计算得到温度值作为对比验证的参考, 研制带电测温装置并运用于电阻元件温度在线测量^[15]。将电阻元件温度理论计算值、实际在线测量值以及加热器出口气流温度进行对比, 可得出以下结论:

1) 对于某风洞试验设备加热器电阻元件温度的理论计算, 采用传热学中平板层流对流换热公式来描述是准确的, 符合实际情况。

2) 电阻元件测温装置采用刚玉作为绝缘件, 其硬度、绝缘性可靠, 传热性能良好, 满足测温要求; 装置采用固定卡套螺栓密封是合理的, 保证了测温装置的密封性。

3) 采用带电测温装置测量电阻元件温度, 与采用理论计算方法得到的结果基本一致, 相互验证了结果的正确性。

4) 电阻元件测温装置的研制及其应用, 完善了加热器的状态监控, 为进一步优化加热器功率配置以及进行温度控制提供了依据, 确保电阻元件处于安全运行温度范围之内, 保障了试验的顺利进行。

参考文献:

- [1] 宋文艳, 肖隐利, 乐嘉陵. 电阻加热器在超声速燃烧研究中的应用[J]. 航空动力学报, 2008, 23(12): 2268-2273.
- [2] 许晓斌. 常规高超声速风洞与试验技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015: 137-138.
- [3] 杨海滨, 邹涵, 周立. 基于两种通讯协议的加热器温控系统[J]. 兵工自动化, 2013, 32(4): 56-58.
- [4] 陈瑞. 变电站运行设备测温技术综述及分析[J]. 科技创新导报, 2015(2): 21-22.
- [5] 项西寿, 严勇, 钱牧云. 高压设备在线温度检测方法的探讨[J]. 安徽冶金, 2014(2): 45-47.
- [6] 崔云先, 高富来, 朱熙, 等. 航天器用薄膜温度传感器的研制及性能研究[J]. 航空学报, 2020, 41(12): 405-416.
- [7] 茆青. 高超声速风洞带式电阻加热器强化换热数值研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2016: 39-45.
- [8] 周晓刚, 杨海滨, 黄昊宇, 等. 风洞测控系统技术改造[J]. 兵工自动化, 2012, 31(1): 65-67.
- [9] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2006: 206-211.
- [10] VAS E I. Flowfield measurements using a total temperature probe at hypersonic speeds[J]. AIAA Journal, 1972, 10(3): 317-323.
- [11] 王魁汉, 李友, 王柏忠. 温度测量技术的最新动态及特殊与实用测温技术[J]. 自动化仪表, 2001(8): 1-7.
- [12] TAKEYA S, CHUNGPYO H, YUTAKA A. Total temperature measurement of gas at microtube outlet[C]// ASME 2017 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Florida, USA: ASME, 2017. 1-5.