

三头部燃烧室火焰筒壁面温度测试研究

熊庆荣, 朱国成, 钟 明
(中国航空工业集团公司 中国燃气涡轮研究院, 四川 江油 621703)

摘 要: 为对 3 种不同冷却结构形式的三头部燃烧室冷却效果做出评定,采用 K 型铠装热电偶和示温漆技术同时对燃烧室 3 种火焰筒的表面温度进行试验测试研究. 试验结果表明:有限的热电偶只能测试局部的火焰筒温度,难以全面反映燃烧室火焰筒冷却效果;示温漆测试技术能有效的区分出燃烧室火焰筒壁面温度及显示温度场分布,示温漆等温线判读精度可达 $\pm 10^{\circ}\text{C}$,为燃烧室 3 种火焰筒冷却结构效果的评定提供了数据支撑.

关 键 词: 燃烧室; 火焰筒; 示温漆; 壁温测量; 等温线

中图分类号: V231.3 **文献标志码:** A

Experimental investigation of temperature measurement on the wall of flame tube for a triple combustor

XIONG Qing-rong, ZHU Guo-cheng, ZHONG Ming
(China Gas Turbine Establishment,
Aviation Industry Corporation of China, Jiangyou Sichuan 621703, China)

Abstract: In order to study the best cooling style for a triple combustor of three different cooling styles, temperature-sensitive paints and thermocouple were used to study of wall temperature profiles of the flame tube. The result show that, it is difficult to distinguish cooling effect when using a few thermocouples to measure the wall temperature; the best cooling style of flame tube could be analyzed by temperature-sensitive paints, including wall temperature and temperature distribution; the temperature recognition accuracy based on isotherm temperature identification is $\pm 10^{\circ}\text{C}$, the experiment result is an important reference to compare and assess the cooling effect of flame tube.

Key words: combustor; flame tube; temperature-sensitive paints; wall temperature measurement; isotherm

航空发动机燃烧室工作在高温高压环境下,为保证燃烧室安全工作,必需测量火焰筒冷却后的壁面温度,借此分析燃烧室内流场、热疲劳和使用寿命^[1-7]. 火焰筒壁面温度测量一般采用示温漆法和热电偶法^[8-12]. 热电偶主要优势是测试精度高,在试验过程中可以实时监测试验件温度、局部验证示温漆测试结果,但用大量热电偶测量燃烧室火焰筒的壁面温度是不现实的,偶丝引线有可能影响燃烧室二股通道中气流的流动,甚至影响燃烧室空气流量分配,且有限的热电偶只能记录有限点的温度,不能全面地反映燃烧室火焰筒壁面温度分布及温度梯度. 为弥补热电偶测试不足,本次试验采用热电偶和示温漆同时对燃烧室火焰筒壁面温度进行测量. 用示温漆测量发动机高温部件表面温度是大部分国际航空制造商通用的方法,示温漆是一种温度传感特种涂料,涂敷在物体表面,通过在特定温度范围内呈现特定颜色来指示物体表面温度及温度分布,特别适用于一般温度传感器无法或难以测量的场合,被广泛应用于航空航天发动机热端部件的表面温度测量. 英国罗-罗公司和法国透博梅卡公司评定新研发的发动机是否满足设计要求,首先用示温漆测量

发动机所有高温部件表面温度,其测试是专项试验,试验是在最大状态下运行 3~5 min,给出的等温线测试判读误差为 $\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[13-15]。

1 示温漆标定

三头部燃烧室火焰筒壁面实际温度的判读来源于示温漆的校准标定。根据三头部燃烧室预估温度范围 500~900 $^{\circ}\text{C}$,共选用了 4 种单、多变色示温漆^[16-19],由于燃烧室在最大状态持续工作时间长,因此选择的示温漆按《示温漆使用技术要求》(Q/11S 692-2012)^[20]规定的最长恒温时间 30 min 进行标定校准,标准试片恒温 30 min 等温线温度校准值见表 1 和图 1,校准所用的热电偶保

表 1 示温漆型号及温度

Table 1 Performances of temperature-sensitive paints

示温漆型号	变色温度/ $^{\circ}\text{C}$
TSP-S01	610
TSP-S05	410
TSP-M02	470,560,590 695,760,790
TSP-M04	390,580,693,765,795

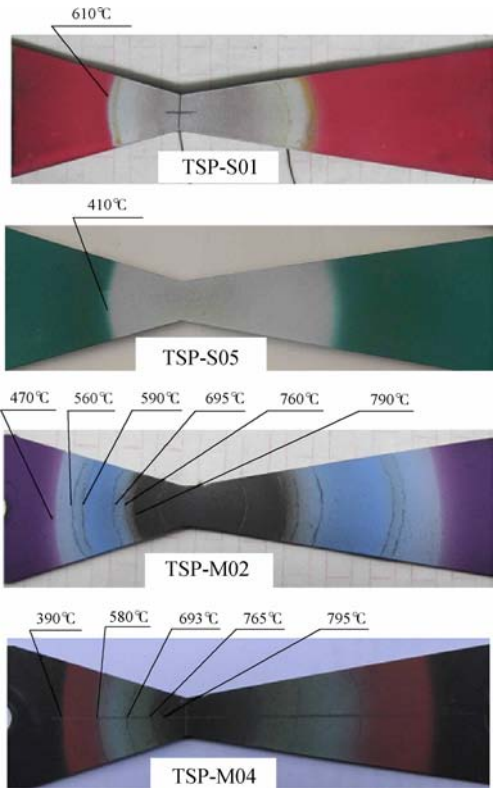


图 1 标准试片等温线温度

Fig. 1 Isotherm of standard model

护套管为 GH3030, I 级 $\phi 0.5\text{ mm}$ 的 K 型铠装热电偶。若燃烧室火焰筒按恒温 30 min 进行试验,示温漆等温线判读精度可达 $\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

2 火焰筒壁面温度测试

火焰筒壁面温度测试试验在高温高压燃烧室试验器上进行。燃烧室试验件台架安装示意图如图 2 所示。测量前,按文献[20]完成试验件表面喷砂、清洁、漆膜制备、漆膜干燥处理后,将喷涂好示温漆的三头部燃烧室安装在高温高压燃烧室试验器上。燃烧室点火时,进口温度 $t_{3av}\approx 77\text{ }^{\circ}\text{C}$,燃烧室点火后加热器开始加温,至完成所有试验状态总时间约为 4.5 h,达到试验最大状态时进口平均温度为 $t_{3ave}=527\text{ }^{\circ}\text{C}$,出口平均温度 $t_{4ave}\approx 1257\text{ }^{\circ}\text{C}$,之后加热炉降温。整个燃烧室持续工作时间超过文献[20]规定的试验时间。

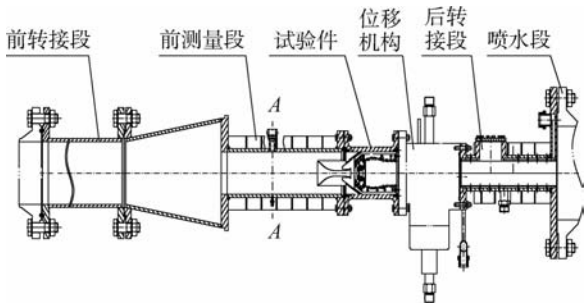


图 2 试验件台架安装示意图

Fig. 2 Installation diagram of experiment device

3 结果及分析

3.1 火焰筒结构差异

试验用 3 种火焰筒采用不同的冷却结构,3 号,5 号火焰筒都采用多排气膜缝槽冷却结构,但两个火焰筒每排孔数和孔径存在差异,6 号火焰筒采用多斜孔冷却结构。

3.2 判读结果

热电偶测试结果见表 2。试验前 5 号,3 号和 6 号火焰筒上下壁面喷涂的示温漆颜色见图 3,试验后 5 号火焰筒上下壁面示温漆判读结果见图 4(a)、图 4(b),3 号火焰筒上下壁面示温漆判读结果见图 4(c)、图 4(d),6 号火焰筒上下壁面示温漆判读结果见图 4(e)、图 4(f),5 号,3 号和 6 号火焰筒热电偶测试位置见图 5,5 号,3 号和 6 号火焰筒都进行了两个状态试验,结果为试验状态稳定后采集的平均值。

表 2 热电偶测试结果
Table 2 Test results of thermocouple

火焰筒	热电偶测试温度/℃				
	1	2	3	4	5
5 #	663	678	622	641	633
3 #	672	625	654	652	607
6 #	679		650		

3.3 结果分析

从示温漆测试结果可知,3 个火焰筒中的 1# 和 2# 热电偶的温度应大于 3#,4# 和 5# 热电偶的温度,见图 4(a)、图 4(c)、图 4(e)和图 5,但 3# 火焰筒中 2# 热电偶温度明显低于 4# 和 5# 热电偶温度,说明该热电偶热电势超差.另外,5# 燃烧室中的 3# 热电偶测试温度偏低,是由于 3# 热电偶测温端固定不牢,测温端滑出测试位置引



图 3 各火焰筒上、下壁面示温漆原色

Fig. 3 Primary color of the wall of different flame tubes

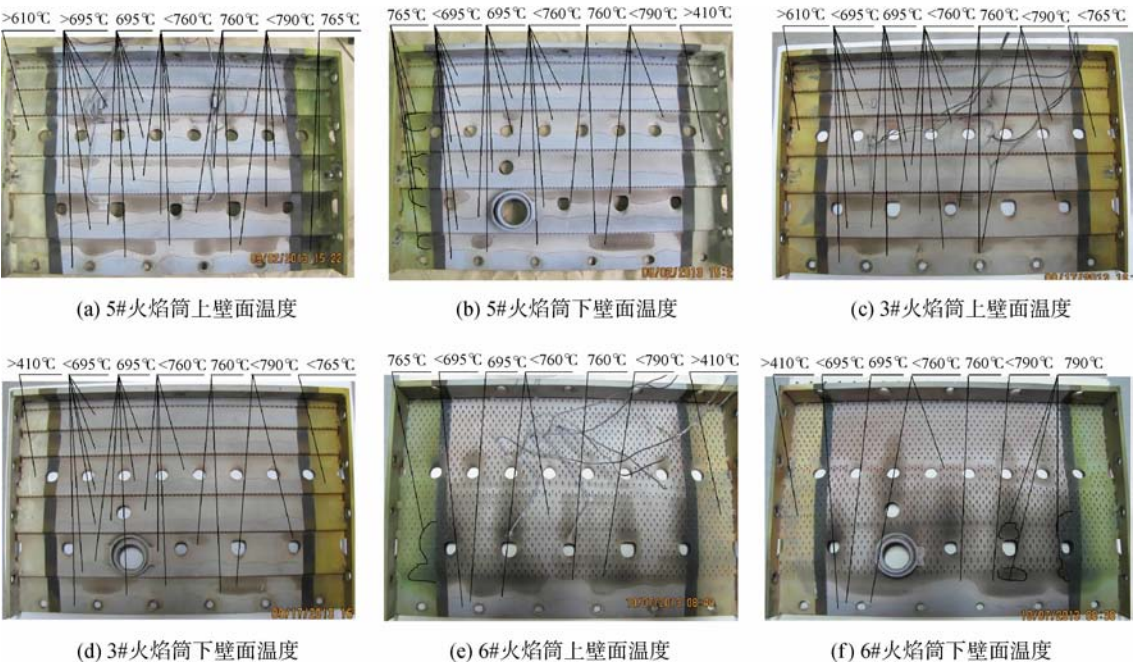


图 4 各火焰筒上、下壁面热电偶分布

Fig. 4 Distribution of thermocouple on the wall of flame tube

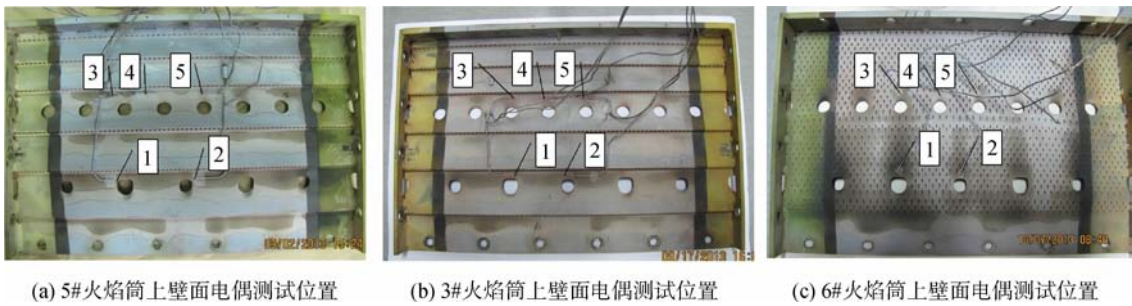


图 5 火焰筒上壁面热电偶测试位置

Fig. 5 Distribution of thermocouple on the up wall of flame tube

起的,从示温漆测试结果也能看出 3 号热电偶温度应大于 4 号和 5 号热电偶温度.

由于燃烧室持续工作时间超过文献[20]规定的试验时间,燃烧室上的实际温度应低于判读温度,采用恒温时间对变色温度影响的经验公式(1),估算长时间工作时的温度值

θ = a - b lg τ (1)

式中 θ 为变色温度(℃);a,b 为系数,对某一种示温漆而言为常数;τ 为恒温时间(min).

如图 1 中 TSP-M02 示温漆,从左到右第 4、第 5 和第 6 个等温线峰值 3 min 和 30 min 的变色温度计算出的常数 a,b 值见表 3,将恒温 1~4.5 h 分别代入经验公式,计算出其等温线温度的近似值见表 4,以示温漆 TSP-M02 为列,按 4.5 h 计算,各区域颜色温度分布见表 5,以 5 号火焰筒上壁面为例,其壁面温度分布见图 6.

表 3 系数 a,b 值
Table 3 Value of coefficient a and b

TSP-M02	变色温度/℃		a	b
	3 min	30 min		
第 4 条线	735	695	754.08	40
第 5 条线	805	760	826.47	45
第 6 条线	840	790	863.85	50

表 4 等温线温度
Table 4 Isotherm temperature

TSP-M02	等温线温度/℃				
	1 h	2 h	3 h	4 h	4.5 h
第 4 条线	682	670	663	658	656
第 5 条线	746	733	725	719	717
第 6 条线	775	759	751	745	742

表 5 区域温度分布
Table 5 Temperature distribution

区域	蓝色	白色	浅黑色
温度/℃	≤656	656~717	717~742



图 6 5 号火焰筒上壁面温度

Fig. 6 Wall temperature of flame tube

从恒温时间对变色温度影响的经验公式(1)估算结果知,3 号和 5 号火焰筒大部分表面区域示温漆颜色处在蓝色区域内,该区域温度在 656℃ 以下.

经验公式(1)只能粗略估算某一示温漆长时间工作时的温度值,要取得准确的测试结果,应按文献[20]规定的时间进行测试,文献[8]也介绍了用示温漆测试时,试验器起动后,应尽快调至规定的试验状态,以示温漆高温反应所需最短时间为限.文献[13]要求示温漆测试应在最大功率下运行 5 min.因此,示温漆测试必需进行专项试验,在最大工作状态下运行 3~5 min.

从示温漆测试结果可以看出,3 号燃烧室火焰筒仅下面 2 个区域有少部分高温区(见图 4(c)、图 4(d)浅黑色区域),而 5 号燃烧室火焰筒有 4 个高温区(见图 4(a)、图 4(b)浅黑色区域),6 号燃烧室火焰筒高温区更多于 3 号和 5 号燃烧室火焰筒(见图 4(e)、图 4(f)浅黑色区域),综上,3 号燃烧室火焰筒高温区最少,冷却效果最佳.

4 结 论

准确测量火焰筒壁温,确定温度分布范围对评定燃烧室火焰筒冷却效果具有重要意义,本文采用示温漆和热电偶两种测量方法录取了 3 种冷却结构不同的三头部燃烧室火焰筒壁温,试验测试结果表明:

- 1) 示温漆测量得出 3 号燃烧室火焰筒表面高温区较少,壁温分布较均匀,冷却效果最佳.
- 2) 受安装工艺的限制,有限的热电偶只能测试局部的火焰筒温度和局部的验证示温漆测试结果,不能全面的反映燃烧室火焰筒冷却效果.
- 3) 示温漆经验公式只能粗略估算示温漆的温度值,要取得准确的测试结果,应遵守示温漆测试要求,并与其有效的校准标定时间相匹配.

参考文献:

[1] 姚四伟,李建军,张力先. 燃烧室故障导致涡轮叶片烧蚀的原因分析[J]. 江苏航空,2007(4):25-26.

[2] 程勇,汪军. 旋流燃烧室内三维等温流场研究[J]. 上海理工大学学报,2004,26(5):388-392.

CHENG Yong,WANG Jun. Investigation on the three dimensional isothermal flow field in a swirl combustion chamber[J]. University of Shanghai for Science and Techndogy,2004,26(5):388-392. (in Chinese)

[3] 耿小亮,郭运强,张克实,等. 火焰筒热疲劳分析与寿命估计[J]. 机械强度,2007,29(2):305-309.

GENG Xiaoliang, GUO Yunqiang, ZHANG Keshi, et al. Thermal fatigue analysis and life prediction of combustor liner[J]. Journal of Mechanical Strength,2007,29(2):305-309. (in Chinese)

[4] 李名家,钱程,何万国,等. 燃气轮机燃烧室故障分析及试验研究[J]. 热能动力工程,2010,25(5):478-481.

LI Mingjia, QIAN Cheng, HE Wanguo, et al. Fault analysis and experimental study of a gas turbine combustor[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2010,25(5):478-481. (in Chinese)

[5] 高建辉,温卫东,崔海涛. 火焰筒浮动瓦块的壁温-结构一体化优化[J]. 航空动力学报,2012,27(3):588-594.

GAO Jianhui, WEN Weidong, CUI Haitao. Optimal design for temperature and structure of the float-wall of flame tube[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(3): 588-594. (in Chinese)

[6] Giampaolo T. Gas turbine handbook principles and practices[M]. Philadelphia, USA: Taylor and Francis,2005.

[7] Facchnl B, Tarchi L, Toni L, et al. Investigation of circular and shaped effusion cooling arrays for combustor liner application; Part I experiment analysis[R]. ASME Paper GT2009-60037, 2009.

[8] 侯晓春,季鹤鸣,刘国庆,等. 高性能航空燃气轮机燃烧技术[M]. 北京:国防工业出版社,2002.

[9] 蔡静,杨永军,赵俭,等. 航空发动机热端表面温度场测量[J]. 计测技术,2009,29(1):1-3.

CAI Jing, YANG Yongjun, ZHAO Jian, et al. Aero-engine hot end surface temperature field measurement[J]. Metrology Measurement Technology, 2009, 29(1): 1-3. (in Chinese)

[10] 张兴,薛秀生,陈斌,等. 示温漆在发动机测试中的应用与研究[J]. 测控技术,2008,27(1):18-20.

ZHANG Xing, XUE Xiusheng, CHEN Bin, et al. Research and application of thermal indicating paint in aeroengine test[J]. Measurement Control Technology, 2008, 27(1): 18-20. (in Chinese)

[11] Duboue J M, Liamis N, Pate L. Recent advances in aero-thermal turbine design and analysis[R]. AIAA 2000-3355, 2000.

[12] 王倚阳,宋双文,陈延庚. 某折流燃烧室火焰筒壁温试验[J]. 航空动力学报,2011,26(11):2480-2484.

WANG Yiyang, SONG Shuangwen, CHEN Yangeng. Experiment on the liner wall temperature of a slinger combustor[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(11): 2480-2484. (in Chinese)

[13] 王光发,王玉芳,荆卓寅,等. 航空发动机测试校准技术译文集:三 [M]. 北京:中航工业北京长城计量测试技术研究所,2013.

[14] 刘国杰. 特种功能性涂料[M]. 北京:化学工业出版社,2002.

[15] 黄春峰,侯敏杰. 现代航空发动机测试技术研究[M]. 成都:中国燃气涡轮研究院档案馆,2008.

[16] 熊庆荣,石小江,侯敏杰,等. 基于等温线辨识的单变色不可逆示温漆及制造涂层的方法:中国, ZL 200910124282. 5 [P]. 2012-03-14.

[17] 熊庆荣,石小江,侯敏杰,等. 基于等温线辨识的单变色不可逆示温漆及制造涂层的方法:中国, ZL 200910124283. X[P]. 2012-03-14.

[18] 熊庆荣,石小江,侯敏杰,等. 基于等温线辨识的七变色不可逆示温漆及制造涂层的方法:中国, ZL 200910124284. 4 [P]. 2012-03-14.

[19] 熊庆荣,石小江,侯敏杰,等. 基于等温线辨识的五变色不可逆示温漆及制造涂层的方法:中国, ZL 200910124285. 9 [P]. 2012-03-14.

[20] 李杨. 示温漆使用技术要求(Q/11S 692-2012)[S]. 成都:中国燃气涡轮研究院档案馆,2012.

(编辑:秦理曼)