

模拟环境下钛合金起燃温度与扩散燃烧研究

王 标, 钟 燕, 董 鹏, 韦 林, 邓杨芳, 王登奎, 陈玉龙

(中国航发四川燃气涡轮研究院, 四川 成都 610500)

摘 要: 采用摩擦试验方法在模拟压气机环境下对 TC4 钛合金起燃温度和扩散燃烧条件进行了研究, 采用有限元方法计算静子件摩擦生热引发燃烧过程温度及分布特征。结果表明, 转子件碰磨环首先发生燃烧, 但静子件热量累积是扩散燃烧的必要条件; 首次获得 TC4 钛合金在模拟压气机环境下起燃温度为 1266.47 °C, 与有限元模拟计算起燃温度 1210 °C 误差为 3.6%; 当 TC4 钛合金静子件截面总加温面积达到 25%, 932~1210 °C 高温区域面积达到 3.06%, 静子件发生扩散燃烧。

关键词: TC4 钛合金; 起燃温度; 摩擦试验方法; 模拟压气机环境

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2019)12-3948-06

钛合金具有比强度高、热强性好、耐腐蚀性强等优点, 是航空发动机不可或缺的轻质结构材料^[1-3]。但是钛合金在一定条件下可发生燃烧, 具有燃烧热焓高、传播速度快、危害巨大的特点, 国外多种航空发动机曾发生钛合金燃烧^[4-7] (简称“钛火”) 引发的重大故障。典型故障模式是外部吸入物或发动机内部构件失效引发航空发动机转静子严重碰磨, 摩擦热引发钛合金构件燃烧, 在压气机环境温度、环境压力、气流速度共同作用下, 迅速传播, 烧毁整台发动机, 甚至造成机毁人亡的惨剧^[8]。

俄罗斯、美国等对钛合金燃烧开展了系统的理论分析和试验研究, Bolobov 等^[9]采用摩擦试验方法在富氧环境下研究材料种类和临界顶紧力对燃烧的影响, 获得钛合金材料燃烧与氧含量-顶紧力关系曲线, 在此基础上研制出 BTT 系列阻燃钛合金; Charles 等^[10-12]采用激光试验方法在模拟压气机环境下研究温度、压力和气流速度条件对静止钛合金试样烧损程度的影响, 结合金属燃烧学和空气动力学建立钛合金燃烧物理模型, 根据环境条件和烧损程度对 54 种常用钛合金燃烧性能进行评价。根据燃烧难易程度分为易燃、较难燃烧、难自持燃烧、很难燃烧和不燃烧等 5 个级别, 为钛合金材料研究和安全使用提供指导。中国航发北京航空材料研究院利用引进俄罗斯的摩擦试验设备在富氧条件下研究钛合金燃烧^[13-15], 对比获得 Ti40^[16-18] 阻燃钛合金燃烧条件和阻燃机理。国内外采用摩擦试验方法在富氧环境下研究钛合金燃烧, 采用激光研究

钛合金燃烧, 对比外部试验参数和试样烧损程度获得钛合金燃烧性能, 鲜见针对航空发动机工程应用, 在模拟压气机环境下研究钛合金燃烧。

因此本研究利用摩擦试验方法, 在模拟压气机环境下开展 TC4 合金燃烧试验研究, 结合有限元模拟进行分析, 获得 TC4 钛合金起燃温度和扩散燃烧条件, 期望对深入认识钛合金燃烧和推动防钛火技术研究有一定的指导意义。

1 实 验

试验在摩擦法钛合金燃烧试验模拟平台^[19] (图 1) 上开展。转子件在电机带动下达到设计转速并保持稳定, 静子件通过液压推进机构向转子件移动, 转静子接触后发生碰磨并产生摩擦热, 在环境温度、压力和气流速度共同作用下引发钛合金试验件燃烧。通过摄像机记录获得碰磨并引发燃烧试验过程。

试验环境温度、压力和气流速度参数分别为 377 °C、300 kPa 和 50 m/s。

TC4 钛合金碰磨试验件结构如图 2a、2b 所示, 转子件碰磨环厚度 1 mm, 静子件碰磨面厚度 3 mm, 试验中转静子试验件装配关系如图 2c。静子件碰磨部位背面埋置 2 支 K 型热电偶, 如图 2c 红色标记处。K 型热电偶长时有效测温范围为 1100 °C, 短时有效测温范围可到 1300 °C。钛合金燃烧温度高达 2700~2900 °C^[20,21], 远超过 K 型热电偶有效测量范围, 本研究仅采用和分析小于 1300 °C 的温度数据, 超过 1300 °C 的

收稿日期: 2018-12-05

作者简介: 王 标, 男, 1980 年生, 硕士, 高级工程师, 中国航发四川燃气涡轮研究院, 四川 成都 610500, 电话: 028-83017680, E-mail: 287220713@qq.com

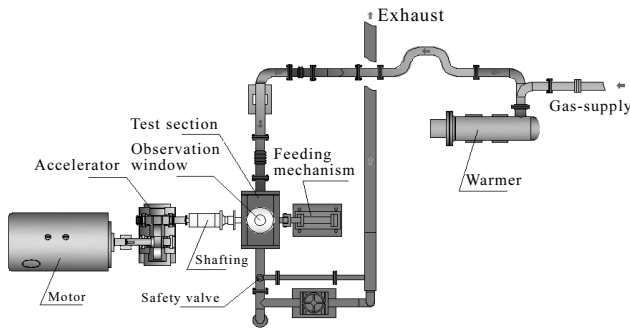


图 1 摩擦法试验平台

Fig.1 Friction tests platform

数据仅作参考。

试验件传热分析采用 ANSYS 软件进行有限元模拟计算。

2 实验结果

2.1 试验件碰磨及燃烧过程

图 3 为 TC4 钛合金转静子碰磨生热引发燃烧的试验过程。转静子试验件发生接触并开始碰磨，形成环形摩擦热源（图 3a）；热量以摩擦环为中心向低温区传导，随着热量的累积，温度进一步升高，接触摩擦部位因高温发出红光（图 3b）；随着碰磨的持续，间歇性迸发出燃烧火花，发出白色光芒（图 3c）；又经过约 8 s 热量积累，试验件发生持续燃烧并向安装座方向扩散燃烧（图 3d）；经过约 20 s 扩散燃烧，试验件基体烧毁殆尽，燃烧区域减小，逐渐停止（图 3e）。

2.2 试验件燃烧后形貌

TC4 钛合金试验件燃烧后宏观形貌如图 4 所示，转子件碰磨环几乎完全被烧损，仅在根部有少量剩余，黑色的 TC4 钛合金燃烧物在离心力作用下沿直径方向呈放射状分布；静子件仅在左上角有少量安装座残余，烧损量约 90%，烧损部位呈黑黄色，热影响区呈浅蓝、浅黄相交的颜色。

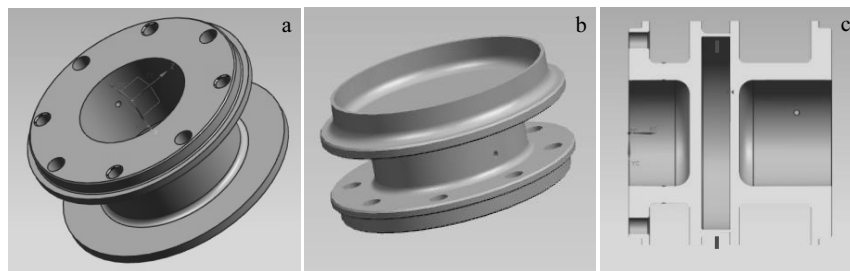


图 2 碰磨试验件示意图

Fig.2 Schematic diagrams of specimens of the rubbing tests: (a) the stator, (b) the rotor, and (c) the assembly drawing

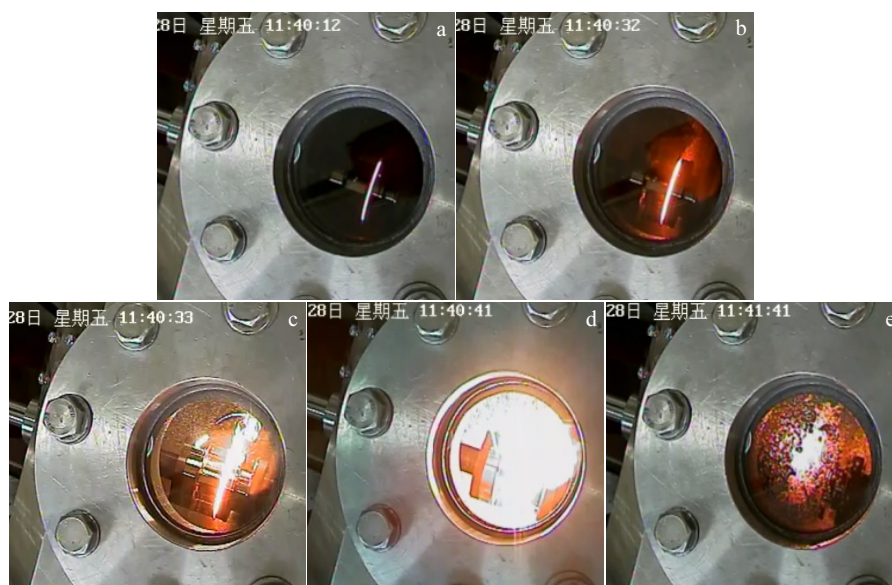


图 3 钛合金摩擦生热引发燃烧过程

Fig.3 Combustion process initiated by the friction heat of titanium alloys



图 4 TC4 试样燃烧后形态 (左为转子件, 右为静子件)

Fig.4 Morphologies of the TC4 sample after combustion (the left is the rotor part and the right is stator part)

TC4 钛合金燃烧产物主要由 TiO_2 、Al 和 Ti 组成^[22], 燃烧截面疏松多孔, 存在大量裂纹, 形成氧向基体扩散的通道, 促进燃烧向基体扩展, 静子件燃烧扩散到对燃烧不敏感的不锈钢转接段部位停止。转子件燃烧物在离心力作用下被甩出, 阻止了燃烧的进一步扩散, 烧损程度相对较轻。根据图 4 静子件左上角有少量安装座残余, 右下角完全烧损, 判断气流方向从左上角流向右下角。

2.3 数据曲线

图 5 为试验过程中温度、静子件位移与时间的变化图, 可以通过曲线的斜率表征变化速率。转子静子试验件在 A 时刻开始接触发生碰磨; BC 时段静子件位移曲线斜率不断变化, 总体推进速度加快, 结合图 3c 间歇式燃烧火花, 认为碰磨环发生局部燃烧, 碰磨环高度减小, 转子件推进阻力减小, 推进速度增加, 接触静子件后推进速率再次降低。C 时刻以后, 静子件位移速率再次加快, 分析认为试验件在此刻发生扩散燃烧, 静子件无阻碍推进。D 时刻温度曲线突然跃升, 出现拐点, 后续呈非规律性高低跳跃, 分析认为

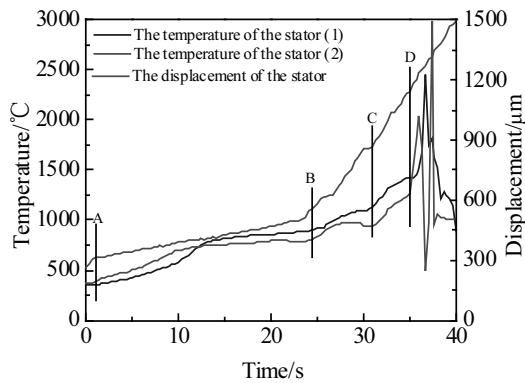


图 5 温度、静子件位移与时间的关系

Fig.5 Relationships of temperature, stator part displacement and time

静子件扩散燃烧到热电偶处。试验件扩散燃烧受高速气流的影响, 处于下风位置的测点 (静子件温度 2) 先被扩散烧损, 上风位置的测点 (静子件温度 1) 在 1.5 s 后被烧损, 表现为突然跃升和非规律性高低跳跃。

3 摩擦生热引发燃烧的有限元分析

图 6 是 TC4 钛合金静子试验件轴对称的有限元模型和网格划分。利用 ANSYS 有限元软件, 采用四面体单元划分网格, 静子试验件被离散成 148 933 个单元体, 四面体单元的最小边长为 0.094 mm, 温度、压力和气流速度参数分别为 377 °C、300 kPa 和 50 m/s。碰磨部位热源由摩擦热和氧化热组成, 涉及摩擦、传质、金属氧化、辐射、对流等多学科领域及相互耦合影响, 为简化分析, 本研究以碰磨部位热源统一描述, 但会用到摩擦生热和氧化热相关概念名词, 也不考虑静子件磨损对温度场的影响。

以图 5 中红色温度曲线 (静子件温度 2) 变化历程为对象, 在热源区域施加特定变化的热源, 通过反复迭代, 使静子件模拟温度变化与试验测试数据基本一致, 如图 7, 获得热源区域热源强度变化如表 1。

图 7 中“模拟测点温度”曲线与“试验测点温度”曲线基本吻合, 认为模拟计算结果准确反映钛合金摩擦法试验过程中静子件温度变化过程, 对应的“模拟碰磨温度”曲线反映碰磨接触区域温度变化历程, 反应了距离热电偶 3 mm 外碰磨接触区域综合温度, 钛合金导热系数低, 模拟温度曲线放大了变化值, 同一时间点蓝色曲线值高于实际测试值。模拟碰磨温度出现几次转折, 反应在该时间点热源发生了突然变化。碰磨摩擦生热是本试验的初始热源, 碰磨区域温度最高, 起燃或扩散燃烧应起始于温度最高的碰磨区域。

图 7 中 A 时刻以前摩擦热量 (温度) 快速升高, 在 A 时刻达到最高并保持基本稳定至 B 时刻。符合 Xiong^[23]等人的研究结论, 即材料种类、环境条件、顶紧力和线速度参数确定时, 摩擦最大单位热量 (或

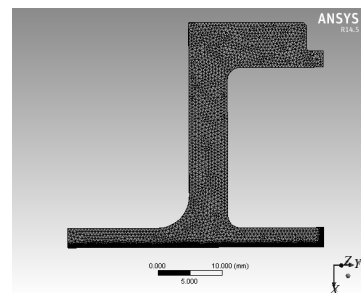


图 6 有限元网格

Fig.6 Finite element meshes

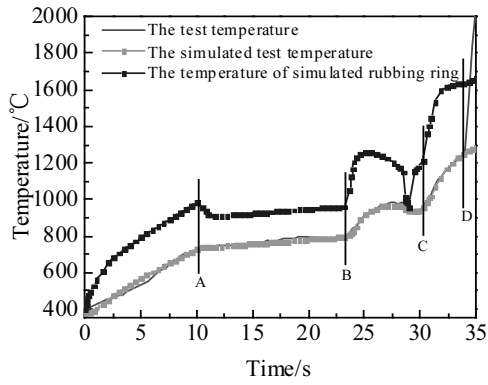


图 7 模拟温度和试验温度与时间的关系

Fig.7 Relationships of the simulated temperature, test temperature and time

最高温度) 为定值。由于碰磨点与试验测点存在因厚度产生的温度差, 在 A~B 时间段测点温度在热传导作用下缓慢升高。模拟碰磨温度曲线在 B 时刻快速上升, 额外热源是碰磨部位钛合金燃烧热, B 时刻 (图 3c) 产生火光, 说明试验件发生燃烧, 但燃烧仅限于接触碰磨区域, 未能扩散, 模拟碰磨温度曲线在 B~C 时间段温度下降也证明了上述推论。模拟碰磨温度和试验测点温度曲线在 B~C 时间段变化为上升-下降-上升, 结合该时间段位移速率变化特征和间歇式火光现象, 认为碰磨部位发生了碰磨和燃烧交替。在 BC 后段, 实际测试温度出现下降后上升的变化特征, 对应的模拟温度曲线放大了下降和上升的变化趋势, 产生两端

曲线斜率的显著变化的现象。A 点附件温度变化与之类似, 实测温度曲线只是上升趋势变缓, 经模拟温度曲线放大后显示为温度下降后上升。

C 时刻试验件火光骤亮 (图 3d) 并发生持续燃烧, 燃烧持续约 50 s 后逐步停息, 可认为试验件在 C 时刻开始扩散燃烧, 计算模拟碰磨部位温度为 1210 °C, 即 TC4 钛合金在该环境条件下的起燃温度。燃烧从静子件碰磨部位向安装座方向扩散, 燃烧扩散到热电偶处使温度曲线发生突然跃升 (D 时刻), 实测温度曲线拐点温度 (1266.47 °C) 为该环境条件下 TC4 钛合金起燃温度, 与计算起燃温度 1210 °C 误差为 3.6%。

图 5 中绿色曲线反映静子件推进位移, 曲线在 B 时刻斜率增加, 静子件推进速率加快, 结合 BC 时段位移曲线变化特征和 C 时刻试验件发生扩散燃烧的现象, 判断转子件碰磨环首先开始燃烧, 经过多次间歇式燃烧后引发静子件扩散燃烧。

研究^[24]认为, 固体物体相互滑过时, 在离摩擦界面很近的极薄层内热点或一系列非常小的实际接触斑点上, 可能产生非常高的表面温度。这些高温热点位置随着表面凸峰的磨损和新斑点进入接触而不断在变化, 热点寿命在 $10^{-4} \sim 10^{-3}$ s, 最大热点面积在 10^{-7} m^2 。本试验中碰磨产生的火花是热点宏观表现形式, 即局部微小质量的钛合金燃烧。结合本试验摩擦生热燃烧过程, 分析认为, 当钛合金基体温度 (热量) 累积到一定程度, 在局部微小质量钛合金发生燃烧条件下, 钛合金构件才能发生扩散燃烧。C 时刻静子试验件温度场如图 8a~图 8c 所示, 热量以碰磨环带为中心, 向

表 1 热源强度

Table 1 Intensity of heat sources

Time/s	0	2	10	11	23.5	24	27	28.5	28.6	29	29.2	30.2	30.3	31.5	34
Intensity/ $\times 10^{10} \text{ J}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}$	1.010	2.273	3.535	2.273	2.273	6.313	4.167	2.904	0	0	3.788	3.788	5.682	9.470	7.576

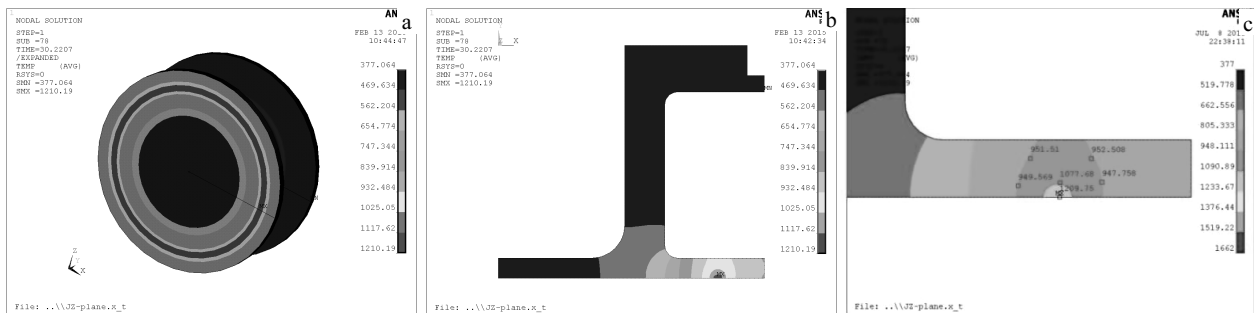


图 8 C 时刻温度分布图

Fig.8 Temperature distribution map of the time C: (a) three-dimensional temperature field of the stator part, (b) sectional temperature of the stator part, and (c) enlarged view of high temperature region in Fig.8b

静子件基体传导, 以试验采用的静子件结构截面为对象(截面面积为 $4.41 \times 10^{-4} \text{ m}^2$), 1210~1117 °C 区域面积为 $5.40 \times 10^{-7} \text{ m}^2$, 1117~1025 °C 区域面积为 $2.04 \times 10^{-6} \text{ m}^2$, 1025~932 °C 区域面积为 $1.10 \times 10^{-5} \text{ m}^2$, 932~839 °C 区域面积为 $1.90 \times 10^{-5} \text{ m}^2$, 839~747 °C 区域面积为 $5.49 \times 10^{-6} \text{ m}^2$, 747~654 °C 区域面积为 $6.02 \times 10^{-6} \text{ m}^2$, 654~562 °C 区域面积为 $1.09 \times 10^{-5} \text{ m}^2$, 562~469 °C 区域面积为 $5.56 \times 10^{-5} \text{ m}^2$, 总温升面积为 $1.11 \times 10^{-4} \text{ m}^2$, 约占静子件截面面积 25%。以热电偶可测试到的黄色高温区域为对象, 超过 932 °C 温度区域面积达到 $1.36 \times 10^{-5} \text{ m}^2$, 约占静子件截面面积 3.06%, TC4 钛合金静子件发生扩散燃烧。

4 结 论

1) 在模拟压气机环境条件(温度 377 °C, 压力 300 kPa, 气流速度 50 m/s)下, TC4 钛合金起燃温度为 1266.47 °C。

2) 利用 ANSYS 有限元软件建立静子件轴对称模型, 以静子件温度变化历程为对象, 计算获得碰磨部位起燃温度为 1210 °C, 与热电偶测试起燃温度 1266.47 °C 误差 3.6%, 吻合性较好。

3) 摩擦试验中转子件碰磨环首先发生局部燃烧, 并引发静子件扩散燃烧。

4) 热量累积是静子试验件发生扩散燃烧的必要条件, 在本试验所用的静子件结构和环境条件下, 静子件截面总温升面积达到 25%, 932~1210 °C 高温区域面积达到 3.06%, TC4 钛合金静子件发生扩散燃烧。

参考文献 References

- [1] Huang Zhanghong(黄张洪), Qu Henglei(曲恒磊), Deng Chao(邓超) et al. *Materials Review(材料导报)*[J], 2011, 25(1): 102
- [2] Zhang Lijun(张利军), Xue Xiangyi(薛祥义), Chang Hui(常辉). *Materials China(中国材料进展)*[J], 2012, 31(8): 40
- [3] Huang Zhuqing(黄注清). *Aviation Maintenance & Engineering(航空制造工程)*[J], 1994(6): 32
- [4] Littman F E, Church F M, Kinderman E M et al. *Journal of Less Common Metals*[J], 1961, 3(5): 367
- [5] Anderson V G, Funkhouser M E. *Titanium Coating Ignition Test*, AD-A1111819[R]. FAA, 1982
- [6] Strobridge T S, Moulder J C, Clark A F. *Titanium Combustion in Turbine Engines*, AD-A075657[R]. FAA, 1979
- [7] Chen Guang(陈光). *International Aviation(国际航空)*[J], 1995(1): 40
- [8] Wang Jinyou(王金友). *Aeronautical Science and Technology(航空科学技术)*[J], 1995, (2): 38
- [9] Bolobov V I. *Combustion Explosion and Shock Waves*[J], 2002, 38(6): 639
- [10] Charles W E. *Review of Titanium Application in Gas Turbine Engines*, GT 2003-38862[R]. New York: ASME, 2003
- [11] Filonenko A K. *Combustion Explosion and Shock Waves*[J], 1991, 27(6): 685
- [12] Runyan C C, Moulder J C, Clark A F. *Combustion & Flame* [J], 1974, 23(1): 129
- [13] Mi Guangbao(弭光宝), Cao Chunxiao(曹春晓), Huang Xu(黄旭) et al. *Journal of Aeronautical Materials(航空材料学报)*[J], 2014, 34(4): 83
- [14] Mi Guangbao(弭光宝), Huang Xu(黄旭), Cao Jingxia(曹京霞) et al. *Acta Metallurgica Sinica(金属学报)*[J], 2014, 50(5): 575
- [15] Mi Guangbao(弭光宝), Cao Chunxiao(曹春晓), Huang Xu(黄旭) et al. *Journal of Materials Engineering(材料工程)*[J], 2016, 44(1): 1
- [16] Xin Shewei(辛社伟), Zhao Yongqing(赵永庆), Zeng Weidong(曾卫东) et al. *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2008, 37(3): 423
- [17] Zhao Yongqing(赵永庆), Xin Shewei(辛社伟), Wu Huan(吴欢) et al. *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2009, 38(5): 779
- [18] Lai Yunjin(赖运金), Zhang Pingxiang(张平祥), Xin Shewei(辛社伟) et al. *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2015, 44(8): 2067
- [19] Qin Min(秦敏), Gu Yang(顾杨), Zhang Liang(张良) et al. *Gas Turbine Experiment and Research(燃气涡轮试验与研究)*[J], 2012, 25(3): 44
- [20] Liu Yuqin(刘玉芹), Bai Kewu(白克武), Shen Jianyun(沈剑韵) et al. *Chinese Journal of Rare Metals(稀有金属)*[J], 1998, 22(3): 204
- [21] Борнасова Е А, Скляр Н М. *Горение Пожаробезопасность Титановых Сплавов*[M]. Москва: ВИАМ, 2007: 8
- [22] Wang Biao(王标), Tian Wei(田伟). *Gas Turbine Experiment and Research(燃气涡轮试验与研究)*[J], 2012, 26(3): 50
- [23] Xiong J T, Li J L, Wei Y N et al. *Acta Materialia*[J], 2013, 61(5): 1662
- [24] Zhang Dong(张栋), Zhong Peidao(钟培道), Tao Chunhu(陶春虎) et al. *Failure Analysis(失效分析)*[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2004: 33

Ignition Temperature and Diffusion Combustion Conditions of Titanium Alloy Under the Simulated Environment

Wang Biao, Zhong Yan, Dong Peng, Wei Lin, Deng Yangfang, Wang Dengkui, Chen Yulong
(AECC Sichuan Gas Turbine Establishment, Chengdu 610500, China)

Abstract: The ignition temperature and the diffusion combustion conditions of TC4 titanium alloy were studied under the simulated compressor environment by the friction tests. The temperature and distribution characteristics of the combustion process were calculated by the finite element method. The results show that the rubbing rings of rotors first burn, which depends on the heat accumulation of stators. For the first time, the ignition temperature (1266.47 °C) of TC4 titanium alloy under the simulated compressor environment is obtained, and the error between the measured temperature and the ignition temperature (1210 °C) calculated by the finite element method is just 3.6%. The stator begins to burn when its total heating area of cross section reaches 25% and its areas of high temperature between 932 °C and 1210 °C is 3.06%.

Key words: TC4 titanium alloy; ignition temperature; friction tests; simulated compressor environment

Corresponding author: Wang Biao, Master, Senior Engineer, AECC Sichuan Gas Turbine Establishment, Chengdu 610500, P. R. China, Tel: 0086-28-83017680, E-mail: 287220713@qq.com