

引文格式: 邓杨芳, 王标, 赵浩川, 等. 模拟环境下TB12 阻燃钛合金燃烧特征与应用设计[J]. 航空制造技术, 2023, 66(12): 128-132.

DENG Yangfang, WANG Biao, ZHAO Haochuan, et al. Combustion characteristics and application design of TB12 burn resistant titanium alloy in simulated environment [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(12): 128-132.

模拟环境下 TB12 阻燃钛合金燃烧特征与应用设计

邓杨芳, 王 标, 赵浩川, 韦 林

(中国航发四川燃气涡轮研究院, 成都 610500)

[摘要] 采用摩擦试验方法在模拟航空发动机压气机环境下对 TB12 阻燃钛合金的起燃和扩散燃烧等特性进行了研究。结果表明, TB12 阻燃钛合金在摩擦生热作用下会发生燃烧, 表现为转静子试验件初始碰磨会引发突然燃烧, 局部燃烧烧损使得试验件的高度尺寸减小, 但其对扩散燃烧不敏感, 燃烧快速停止, 未发生类似与 TC4 钛合金的持续扩散燃烧现象。TB12 阻燃钛合金燃烧产物具有较强的黏附性能、较高的强度、润滑功能和导热系数低的特点, 黏附在试验件表面可降低摩擦生热量, 阻止摩擦热向基体传导, 减少了转静子试验件再次引发燃烧的可能性。根据 TB12 阻燃钛合金燃烧特点, 在航空发动机中设计应用于压气机静子叶片, 初始碰磨引发 TB12 阻燃钛合金叶片局部烧损后快速停止, 形成的燃烧产物将阻止静子叶片与转子鼓筒直接碰磨, 可降低因鼓筒失稳鼓包以及鼓包与悬臂静子叶片碰磨导致航空发动机钛火这一故障风险。

关键词: 航空发动机; TB12 阻燃钛合金; 钛火; 模拟压气机环境; 摩擦试验

Combustion Characteristics and Application Design of TB12 Burn Resistant Titanium Alloy in Simulated Environment

DENG Yangfang, WANG Biao, ZHAO Haochuan, WEI Lin

(AECC Sichuan Gas Turbine Establishment, Chengdu 610500, China)

[ABSTRACT] The ignition and diffusion combustion of TB12 flame-retardant titanium alloy were studied by friction test under simulated environment of aircraft engine compressor. The results showed that TB12 alloy could be burning under friction heat. The rotor and stator test piece could be ignited at the very beginning of friction, resulting in the size reduction of the test piece. However, because of the insensitivity to diffusion combustion of TB12 alloy, the combustion stop quickly, which is different from TC4 titanium alloy continuous diffusion combustion. The combustion products of TB12 alloy were possessed of good properties of strong adhesion, high strength, lubricating function and low thermal conductivity, thus making them adhesive to the surfaces of the test pieces, which reduced the friction heat and prevented the friction heat transition from surface to the matrix. According to the combustion characteristics of TB12 alloy, it can be designed for compressor stator blades. The TB12 blade could stop burning after initial combustion, and the combustion products will prevent friction between stator blades and rotor drum afterwards. The design and application of TB12 alloy in stator blades can reduce the risk of titanium fire failure caused by drum instability and friction between drum and stator blades.

Keywords: Aero-engine; TB12 burn resistant titanium alloy; Titanium fire; Simulated environment of compressor; Friction test

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2023.12.128

钛合金广泛应用于航空发动机压气机叶片、轮盘和整体叶盘等构件,是航空发动机不可缺少的轻质结构材料^[1-3]。但钛合金在航空发动机高压压气机环境(高温、高压、高流速)以及因构件失效或外物吸入故障导致的碰磨作用下可能发生燃烧。国外多型航空发动机都曾发生因钛合金燃烧^[4-5](钛火)引发的重大故障,造成严重的经济损失。

国内外针对钛火故障开展了大量的防钛火技术研究,其中阻燃钛合金是防钛火的一项关键技术。美国普惠公司和特里达因公司联合开发出 Ti-V-Cr 系阻燃钛合金 Alloy C,并已成功应用于 F119-PW-100 发动机的高压压气机机匣和喷管零部件^[6]。俄罗斯研制了 Ti-Al-Cu 系阻燃钛合金 BTT-1 和 BTT-3, BTT-1 已在压气机转子叶片上得到应用,高压压气机机匣也通过了试车台试验。国内西北有色金属研究院、中国航发北京航空材料研究院、南京航空航天大学等单位研制了 Ti-V-Cr 系钛合金^[7-8]、Alloy C 和 TF550 阻燃钛合金^[1,9]。在阻燃钛合金抗燃烧性能方面,朱康英等^[10]采用直流电弧激发燃烧法获得了 TB12 和 Alloy C 比 TC4 具有更好的阻燃性能;弭光宝等^[11-12]采用摩擦试验方法在富氧环境下研究 TB12、TF550 和 TC4 燃烧边界条件,研究表明,TF550 合金具有最好的抗点燃性能。以上直流电弧激发燃烧法和摩擦法的试验环境与航空发动机发生钛合金燃烧的高温、高压、高流速环境具有显著差异,不能直接用于研究航空发动机中钛合金零件真实燃烧特征行为。

本文采用摩擦试验方法,在模拟压气机高温、高压、高流速的工况环境条件下,开展 TB12 阻燃合金燃烧试验研究,获得了 TB12 的燃烧行为特征,根据燃烧行为特征探讨工程应用设计,对深入认识阻燃钛合金燃烧和推动阻燃钛合金应用有一定的指导意义。

1 试验方法

1.1 试验设备与方式

试验在摩擦法钛合金燃烧试验模拟平台^[13]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、气压和气流速度共同作用下引发钛合金试验件燃烧。试验环境温度、气压和气流速度分别为 (640 ± 5) K、300 kPa 和 50 m/s。静子件推进方式为恒位移推进,当推进受阻速率降低时,自动提高推力值,为保护试验设备,设定推力最高值为 4000 N。通过摄像机记录获得碰磨并引发燃烧试验过程。

1.2 试验件及测试方法

本文通过模拟压气机叶片、机匣和鼓筒等零件,开展碰磨试验件结构设计,如图 1(a)和(b)所示。转子件为双层碰磨环结构,内环高度 12 mm、外环高度 10 mm、内外环壁厚 1 mm;静子件碰磨面壁厚为 3 mm,试验中转静子件装配关系如图 1(c)所示。静子件碰磨部位背面埋置 2 支 K 型热电偶(图 1(c)红色标记处),K 型热电偶最高测量温度为 1100 °C,用以测量碰磨实时温度。

2 试验结果与分析

2.1 试验件碰磨及燃烧过程

图 2(a)为 TB12 阻燃钛合金碰磨生热燃烧典型的碰磨燃烧-稳定碰磨-碰磨燃烧试验过程。整个碰磨燃烧试验持续时间约 230 s;图 2(b)为 TC4 钛合金碰磨引发燃烧的过程。直观对比 TB12 与常规钛合金碰磨燃烧区别,可见, TB12 合金转静子试验件接触瞬间,碰磨部位迸发出大量且短暂的燃烧火花,随后进入稳定摩擦状态,形成一个白亮摩擦热环带,经过约 34 s 热量累积,摩擦热环带宽度有少量扩大,接着碰磨部位迸发出大量且短暂的燃烧火花,很快又进入稳定摩擦状态,未发生持续扩散燃烧;观察 TC4 钛合金,接触瞬间产生相对较少碰磨火花,相近时间段的摩擦热量累积特征明显,随着摩擦热量累积,碰磨部位间歇性迸发出燃烧火花,进一步促进静子件热量累积和扩散,表现为静子件白亮区域逐步扩大,并在碰磨 56 s 时发生扩散燃烧。

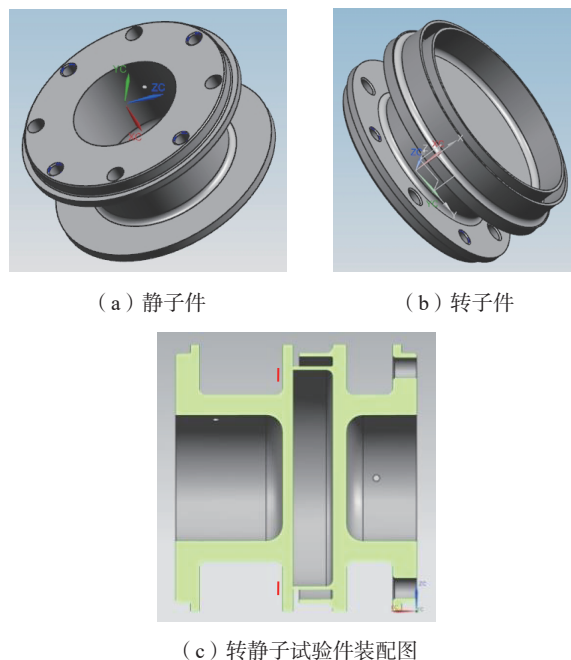


图 1 转静子碰磨试验件结构

Fig.1 Structure of rotor and stator rubbing test piece

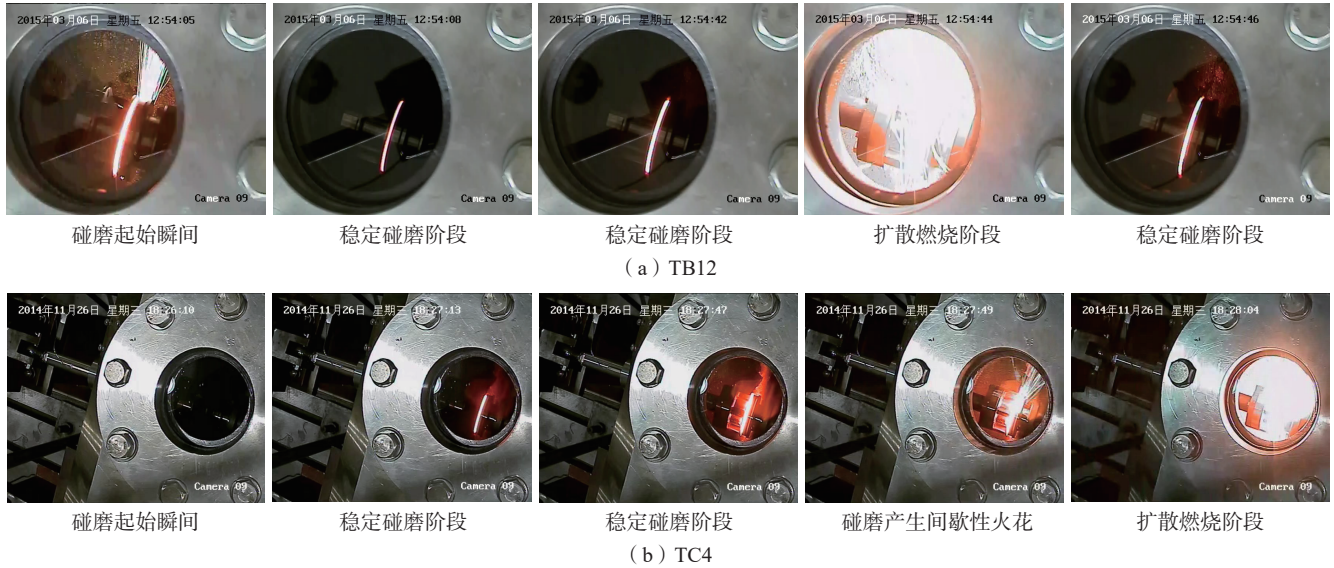


图2 钛合金摩擦生热引发燃烧过程

Fig.2 Combustion process of titanium generated by friction heat

2.2 试验数据曲线

碰磨试验中静子件温度与位移随时间的变化如图3所示,数据曲线总体上分为AE和EF两部分。转静子试验件在A时刻发生接触,AB时段静子件位移曲线平缓,推进位移量相对较小;在B时刻,位移发生突然跳跃,而BC时段继续保持相对平稳。根据时间轴,B时刻位移曲线跳跃与图2(a)中TB12扩散燃烧阶段碰磨部位迸发出大量且短暂的燃烧火花相对应;同时静子件温度曲线在B时刻后4~5s突然升高,说明转静子碰磨部位在B时刻发生突然燃烧,烧损使得试验件的高度减少,由于静子件推进方式为恒位移推进,位移曲线表现出突然跳跃;因热传导延迟,温度曲线变化相对缓和。BC、CD、DE时段试验过程和现象与AB时段基本相当。试验中,EF时段静子件推力达到4000N,推进机构启

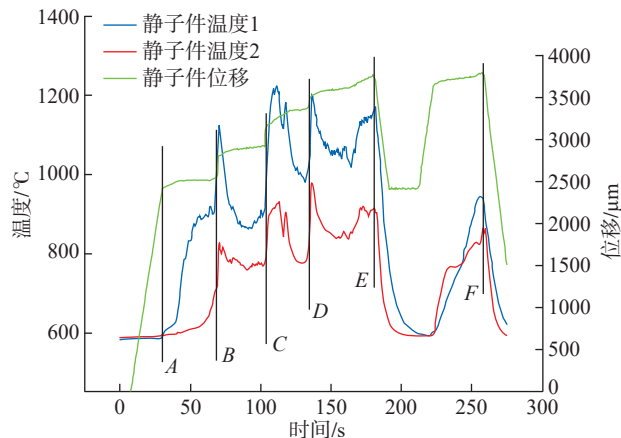


图3 碰磨试验过程中温度、位移随时间变化图谱

Fig.3 Temperature and displacement variations with time during rubbing process

动保护程序自动退出,再次推进碰磨后发生推力保护第2次自动退出并停止试验。

2.3 试验件燃烧后形貌

如图4所示,在温度642K、环境气压300kPa、流速50m/s的环境条件下,TB12阻燃钛合金碰磨试验后转静子试验件的宏观形貌如图4(a)和(b)所示。转静子碰磨部位受热影响区域呈黑色,突出的转子件内环被磨损(燃烧)后与外环等高,剩余高度约9mm,内环实际磨损3mm,外环实际磨损1mm,内外环顶部呈光

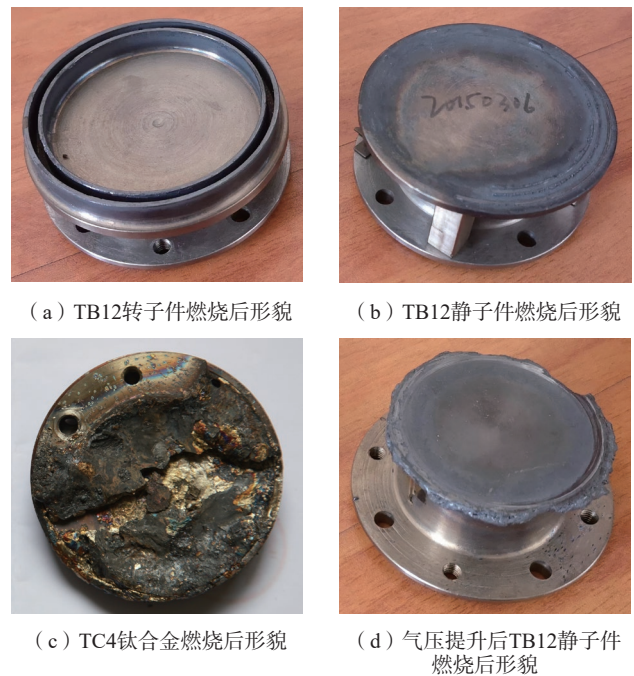


图4 试验件燃烧后形貌

Fig.4 Morphology of sample after combustion

亮特征。静子件本体无烧损特征,碰磨面与转子件碰磨内环对偶部位粘附有约 120° 圆周的燃烧氧化物,与外环对偶部位粘附有约 180° 圆周的燃烧氧化物,经持续摩擦后形成光亮的摩擦环带,其他圆周部位仅有微量磨损。采用该试验方法,对比 TB12 和 TC4 钛合金的燃烧特性,在同等试验条件下,TC4 钛合金已出现严重燃烧发黑,可以得出 TB12 钛合金扩散燃烧程度远低于 TC4 钛合金(图 4(c));当环境气压从 300 kPa 提高至 510 kPa 后,其余温度和流速等环境条件不变, TB12 钛合金也发生扩散燃烧,但烧损仅限于碰磨部位(图 4(d))。

3 TB12 阻燃钛合金应用分析

图 3 中可以看出位移曲线在 B、C、D 3 个时刻发生突然跳跃,结合图 2(a)中 TB12 扩散燃烧阶段碰磨部位迸发出大量且短暂的燃烧火花,静子件碰磨部位在对应时刻发生突然燃烧,烧损使得试验件高度减少;温度曲线显示,在 B、C、D 3 个时刻,静子件温度曲线开始快速上升,热电偶测得温度为 900 °C、875 °C、1005 °C;试验后 TB12 静子件宏观形貌显示,静子件本体无明显烧损特征,仅在碰磨部位有微量磨损痕迹,说明 B、C、D 3 个时刻发生燃烧、烧损部位为转子件碰磨环。

图 3 位移曲线特征还表明,试验过程中转静子试验件长时间处于持续碰磨状态,但持续碰磨位移推进量远低于 B、C、D 时刻跳跃推进量。说明摩擦磨损减少的转子件碰磨环高度较小,燃烧是转子件碰磨环高度减小的主要原因。静子件碰磨面与内外环对应部位无燃烧产物黏附的圆周仅有微量磨损,判断转子件碰磨环燃烧产物黏附在静子件碰磨部位。受燃烧产物(热和氧化物)影响,基体由金属色变为黑色,黏附在静子件上的氧化物阻止了转子件碰磨环与静子件基体直接接触,降低了静子件磨损程度,试验中因碰磨和振动导致部分燃烧氧化物脱落。TB12 燃烧氧化物黏附在静子件表面,并与碰磨环持续摩擦后形成光亮的摩擦环带,说明 TB12 燃烧氧化物具有较强的粘附性能以及较高的抗压溃强度,根据接触面积和推力值计算获得接触面压强 8.9 kPa,氧化物摩擦环带抗压溃强度大于 8.9 kPa。图 2 所示的静子件碰磨过程中,与 TC4 钛合金相比,经持续碰磨后 TB12 钛合金转静子碰磨部位白亮区域扩大程度不明显,转子件由于高速旋转摩擦生热,并且转子件较静子壁薄,温升更高,因此首先发生燃烧。由于燃烧产物的阻燃作用,后续转静子碰磨会再次进入稳定碰磨阶段。根据图 3 位移曲线显示,在 AB、BC、CD 和 DE 4 个持续碰磨时段,顶紧力随时间逐渐增加,摩擦生热基本公式为

$$Q = \mu A p v \quad (1)$$

式中, Q 为摩擦生成热量; A 为碰磨面积; p 为顶梁压强; μ 为摩擦系数; v 为线速度。

在线速度不变的情况下,顶紧力增加,摩擦系数减小才能保持热量相对稳定(碰磨部位白亮区域扩大程度不明显),说明碰磨面黏附的燃烧氧化物具有较低的摩擦系数,氧化物具有润滑作用,静子件试验后氧化物光亮的摩擦环带也反映了这一特点。

图 3 的温度曲线也印证了这一推力,在 B、C、D 时刻后,因燃烧热传导,静子件温度先升高,达到最高后呈下降趋势。对应的位移曲线反映转静子试验件却处于持续碰磨状态,燃烧氧化物具有润滑功能且导热系数低,阻止摩擦热量向静子件传导,缺乏持续热传导的静子件在环境气流散热作用下温度降低。

相同环境参数条件下,TC4 钛合金静子件发生大规模扩散燃烧,一直扩散燃烧至对燃烧不敏感的不锈钢转接段部位;TB12 钛合金静子件无烧损特征,仅局部因转子件碰磨环燃烧产生的高温或高温燃烧氧化物作用下发生颜色变化;在更高的环境气压条件下, TB12 钛合金静子件扩散燃烧也仅限于碰磨部位,说明 TB12 钛合金在模拟压气机环境下对扩散燃烧不敏感。

上述分析表明, TB12 钛合金在模拟压气机环境下摩擦法燃烧试验中具有以下特点:(1)在较低的温度条件下,首先发生燃烧;(2)燃烧氧化物具有较强的粘附性能以及较高的强度;(3)燃烧氧化物具有润滑作用且阻止摩擦热传导;(4)对扩散燃烧不敏感。

根据 TB12 钛合金燃烧特点,开展工程应用设计,

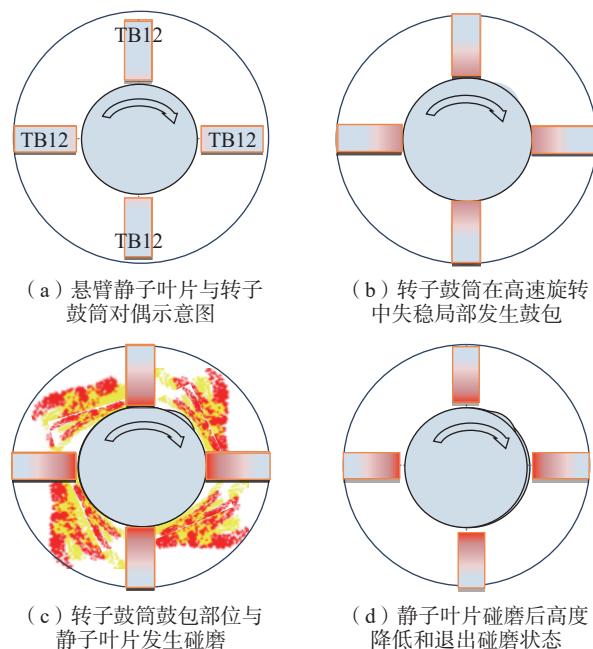


图 5 TB12 阻燃钛合金应用设计

Fig.5 Application design of TB12 alloy

如图 5 所示。悬臂静子叶片采用 TB12 阻燃钛合金加工,与转子鼓筒对偶(图 5(a));非正常情况下,转子鼓筒在高速旋转中失稳,鼓筒局部发生鼓包(图 5(b));鼓包部位与静子叶片发生碰磨,较薄的 TB12 静子叶片尖部在相对较低的摩擦热量(或温度)作用下局部燃烧烧损(图 5(c)),由于 TB12 对扩散燃烧不敏感,燃烧无法持续;静子叶片高度降低,静子叶片与鼓筒将退出碰磨状态,不再摩擦(图 5(d)),避免了因持续碰磨累积热量并引发更严重的发动机钛火故障。

即使静子叶片尖部燃烧烧损后仍存在碰磨,由于 TB12 钛合金燃烧氧化物具有较强的黏附性能和较高的强度,且具有润滑功能,黏附在静子叶片叶尖部位的燃烧氧化物将阻止静子叶片与转子鼓筒直接碰磨,降低摩擦热量且阻止热量向静子件传播,从而降低静子叶片因高温发生扩散燃烧的风险。

综上所述,压气机静子叶片采用 TB12 钛合金可降低因鼓筒失稳鼓包后与悬臂静子叶片碰磨导致航空发动机钛火这一故障模式风险。

4 结论

(1) 模拟压气机温度、气压、流速等工况环境下, TB12 阻燃钛合金在摩擦生热作用下会发生燃烧,但对扩散燃烧不敏感,不会发生持续扩散燃烧。

(2) TB12 阻燃钛合金燃烧氧化物具有较强的黏附性能、较高的强度、润滑功能和导热系数低等特点,黏附在试验件表面可降低摩擦生热量,阻止摩擦热向基体传导。

(3) 根据 TB12 阻燃钛合金燃烧特点,将其应用于压气机静子叶片,可降低因鼓筒失稳鼓包与悬臂静子叶片碰磨导致航空发动机钛火这一故障模式风险。

参考文献

[1] 蔡建明, 弭光宝, 高帆, 等. 航空发动机用先进高温钛合金材料技术研究与发展 [J]. 材料工程, 2016, 44(8): 1-10.

CAI Jianming, MI Guangbao, GAO Fan, et al. Research and development of some advanced high temperature titanium alloys for aero-engine[J]. Journal of Materials Engineering, 2016, 44(8): 1-10.

[2] 陈子勇, 刘莹莹, 靳艳芳, 等. 航空发动机用耐 650 °C 高温钛合金研究现状与进展 [J]. 航空制造技术, 2019, 62(19): 22-30.

CHEN Ziyong, LIU Yingying, JIN Yanfang, et al. Research on 650 °C high temperature titanium alloy technology for aero-engine[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(19): 22-30.

[3] 王清江, 刘建荣, 杨锐. 高温钛合金的现状与前景 [J]. 航空材料学报, 2014, 34(4): 1-26.

WANG Qingjiang, LIU Jianrong, YANG Rui. High temperature titanium alloys: Status and perspective[J]. Journal of Aeronautical Materials,

2014, 34(4): 1-26.

[4] ELROD C W. Review of titanium application in gas turbine engines[C]//Volume 3: Turbo Expo 2003. Atlanta, 2003.

[5] BOLOBOV V I. Mechanism of self-ignition of titanium alloys in oxygen[J]. Combustion, Explosion and Shock Waves, 2002, 38(6): 639-645.

[6] 曹京霞, 黄旭, 弭光宝, 等. Ti-V-Cr 系阻燃钛合金应用研究进展 [J]. 航空材料学报, 2014, 34(4): 92-97.

CAO Jingxia, HUANG Xu, MI Guangbao, et al. Research progress on application technique of Ti-V-Cr burn resistant titanium alloys[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2014, 34(4): 92-97.

[7] 赵永庆, 周廉, 周义刚, 等. Ti40 阻燃钛合金的基础研究 [J]. 航空材料学报, 2006, 26(3): 233-237.

ZHAO Yongqing, ZHOU Lian, ZHOU Yigang, et al. Research on basic theories of Ti40 burn resistant titanium alloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2006, 26(3): 233-237.

[8] 刘玉庆, 徐九华, 丁文锋, 等. 阻燃钛合金 Ti40 铣削加工性研究 [J]. 航空制造技术, 2013, 53(14): 48-52.

LIU Yuqing, XU Jiuhua, DING Wenfeng, et al. Research on machinability of burn-resistant titanium alloy Ti40[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 53(14): 48-52.

[9] 赖运金, 张平祥, 辛社伟, 等. 国内阻燃钛合金工程化技术研究进展 [J]. 稀有金属材料与工程, 2015, 44(8): 2067-2073.

LAI Yunjin, ZHANG Pingxiang, XIN Shewei, et al. Research progress on engineered technology of burn-resistant titanium alloys in China[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2015, 44(8): 2067-2073.

[10] 朱康英, 赵永庆, 曲恒磊, 等. TB12 和 Alloy C 在燃烧过程中的氧化界面分析 [J]. 稀有金属材料与工程, 2002, 31(6): 17-20.

ZHU Kangying, ZHAO Yongqing, QU Henglei, et al. Burning interfaces analysis of burn resistant titanium alloys TB12 and Alloy C[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2002, 31(6): 17-20.

[11] 弭光宝, 黄旭, 曹京霞, 等. Ti-V-Cr 系阻燃钛合金的抗点燃性能及其理论分析 [J]. 金属学报, 2014, 50(5): 575-586.

Guangbao, HUANG Xu, CAO Jingxia, et al. Ignition resistance performance and its theoretical analysis of Ti-V-Cr type fireproof titanium alloys[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2014, 50(5): 575-586.

[12] 弭光宝, 梁贤焯, 李培杰, 等. 航空发动机钛合金在微尺度下摩擦着火特性数值计算分析 [J]. 航空制造技术, 2020, 63(16): 68-85.

MI Guangbao, LIANG Xianye, LI Peijie, et al. Numerical calculation and analysis of friction ignition characteristics of aero-engine titanium alloy at micro-scale[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2020, 63(16): 68-85.

[13] 邢鹏, 向宏辉, 王标, 等. 可变环境条件下钛合金旋转摩擦着火试验研究 [J]. 燃气轮机试验与研究, 2017, 30(4): 34-44.

XING Peng, XIANG Honghui, WANG Biao, et al. Experimental investigation on titanium alloys rotating friction fire under variable environmental conditions[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2017, 30(4): 34-44.

通讯作者: 邓杨芳, 高级工程师, 硕士, 研究方向为航空发动机材料应用。

(责编 七七)