

文章编号:1000-8055(2012)12-2763-06

航空发动机钛火预防技术研究的进展

罗秋生, 李世峰, 裴会平

(中国航空工业集团公司 中国燃气涡轮研究院, 成都 610500)

摘 要: 针对航空发动机防钛火的控制技术, 结合国内外相关工作的研究状况, 从钛火机制分析、防钛火阻燃合金的作用机制、阻燃钛合金体系研究状况、阻燃涂层的研究及防钛火结构设计等方面, 对航空发动机钛火控制技术领域取得的研究成果进行总结和分析。重点论述了各国先进航空发动机中良好的钛火预防技术, 并提出我国应建立钛合金后燃与环境(温度、压力、流速)的关系, 从根本上解决了阻燃钛合金工程化问题上存在的风险。

关 键 词: 钛火; 阻燃钛合金; 阻燃涂层; 结构设计; 预防技术

中图分类号: V252; TG3

文献标志码: A

Progress in titanium fire resistant technology for aero-engine

LUO Qiu-sheng, LI Shi-feng, PEI Hui-ping

(China Gas Turbine Establishment,

Aviation Industry Corporation of China, Chengdu 610500, China)

Abstract: According to the titanium fire resistant technology for aero-engine, the research condition of titanium fire resistant technology was generalized and analyzed from several aspects, which include the analysis of mechanisms of titanium fire and burn resistant, the research conditions of burn resistant alloy system and burn resistant coat, and the structural design of burn resistance related to the abroad research situation. The research results of titanium fire resistant technology were mainly introduced. Meanwhile, when the relationship is established between titanium alloy Kai-burning and environments, the risk problems of burn resistant titanium alloy in the construction are fundamentally solved.

Key words: titanium fire; burn resistant titanium alloy; burn resistant coat; structural design; preventive technology

钛合金因其较高的比强度、优异的抗蚀性和耐热性能, 而被广泛应用于航空发动机和地面涡轮燃机高压压气机叶片材料。钛合金在发动机上的应用量在一定程度上反应了发动机先进设计、制造技术的水平, 也是衡量一种发动机先进程度的重要标志。

20 世纪 70 年代以来, 国外先进的军用发动机已广泛采用钛合金作为风扇叶片、压气机转静子叶片。如法国阵风战机装配的 M88 发动机的前

2 级整体叶盘均为钛合金^[1-2]; 俄罗斯米格 29 飞机装备的 RD-33 发动机的 4 级风扇、9 级高压压气机中前 6 级转静子叶片等均为钛合金材料^[3]; 据统计, 美国 F22 装备的 F119 发动机用钛量达 39%, F404 发动机钛合金使用量达 25%, V2500 发动机用钛量高达 41% 之上^[4-6]。但由于钛合金导热系数低、氧化生成热和燃烧热焓高, 燃烧敏感性问题突出, 容易着火并迅速扩展持续燃烧, 导致发动机钛火故障^[7]。因此, 研究防钛火技术成为当

收稿日期: 2011-12-05

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20121218.0859.201212.2763_019.html

作者简介: 罗秋生(1971—), 男, 四川成都人, 研究员, 硕士, 主要从事航空发动机结构设计研究。

时世界各国航空发动机研制急需解决的瓶颈问题。

今后,随着钛合金作为航空发动机高压压气机叶片、机匣的必选材料,使发动机高压压气机钛火控制技术成为发动机研制的关键技术。因此航空发动机钛火预防技术肩负着既要尽可能多使用钛合金的要求,又要满足发动机运行安全,不发生钛火危险的要求,使航空发动机具有先进性。基于以上认识,本文针对国内外航空发动机钛火控制技术,从钛火机制分析、防钛火阻燃合金、阻燃涂层的研究进展及防钛火结构设计等方面,对航空发动机防钛火技术进行了综合论述,进而提出防钛火阻燃合金存在的风险及防钛火技术的未来研究重点。

1 钛火机制分析

航空发动机钛火问题是很多国家发动机公司都遇到过的问题。20 世纪 70 年代以来,美国航空发动机已发生过 144 起钛火故障,前苏联发生过钛火 30 余起。其中,由高压压气机工作叶片故障引起钛火的比例达 22.5%,由涡轮故障引起的钛火达 20%之多^[8-10]。因此,研究钛火机制与防钛火技术已成为国内外学者共同关注与探索的技术难点,也是一直是制约新型航空发动机研制的瓶颈技术。

1.1 内部因素影响机制分析

钛合金表面氧化膜的致密性是造成其燃烧的重要因素,纯钛基合金燃烧表面的氧化层疏松、不致密,不能阻止氧向基体的输送,进而导致燃烧持续进行。

钛在正常温度下为 α 结构,表面形成致密的具有保护作用的 TiO_2 ^[11]。在加热到较高温度时,由于 TiO_2 的密度小于 Ti_3O_5 , Ti_2O_3 的密度,所以 TiO_2 单位体积较小极易破裂失去密封性能,进而在氧化物的交换放热反应中,引起氧气的输送速度急剧增大,导致热量析出速度超过热量损失速度,造成温度升高,最终促进燃烧。

1.2 外部因素影响机制分析

钛合金工作环境下的温度、压力、气流速度是影响其燃烧的主要外部因素。钛的熔点为 1660°C ,在空气中的燃点为 1627°C ,而发动机正常工作条件下,高压压气机钛合金叶片所承受的温度一般不超过 600°C ,其工作温度远低于钛的燃点,即在正常工作条件下不可能导致钛火。但在高温下,钛

具有高的氧活性,可产生放热反应,这种反应在高速气流及一定的压力下得到活化。

钛起火需要一定的温度和压力条件,其中剧烈冲击、摩擦是钛火的主要原因。如压气机吸入外物或内部零件掉块时,会冲击高速旋转的叶片,可能造成叶片损伤掉块而引起剧烈摩擦,产生大量的热量,致使叶片或机匣内局部温度过高,在一定的压力和氧气质量分数下,即可着火并持续燃烧而发生钛火故障。发动机一旦发生钛火,在火源传递的热量和相邻钛零件熔化携带来的热量使继续蔓延,直到钛燃烧耗尽,或空气压力低于某个临界值,或燃烧区域因淬熄造成热量散失,钛火才会停止。钛火是一种典型的二次事故,美国普惠公司研制的用于 F-15 飞机的 F100 发动机在试车最大状态下发生钛合金燃烧,导致整台发动机被烧坏^[12-13],具体现象如图 1 所示。

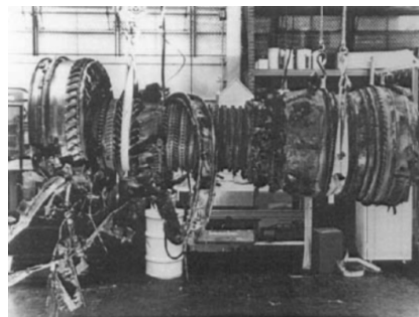


图 1 钛火故障后的发动机

Fig. 1 Engine after titanium fire

2 防钛火技术研究进展

国外从上世纪 70 年代起,开展了大量有关钛合金燃烧和防钛火技术方面的研究。美国、俄罗斯等国通过研究钛合金主要元素对其燃烧的影响规律,进而研制了 Alloy C 和 BTT 系列的阻燃钛合金^[14-16]。经过多年的研究,美国、英国、俄罗斯等航空技术先进国家掌握了航空发动机防钛火技术。近年来,国内航空动力和材料界专家多年来一直不断的探索研究钛火防护技术,已在防钛火技术方面取得突破性的进步,并成功开发了一些防钛火技术和大量防钛火产品,为航空发动机的发展作出了巨大贡献。

2.1 阻燃钛合金的研究现状

2.1.1 阻燃机制分析

钛及钛合金自身具有在空气中自维持燃烧的特性,辐射、摩擦生热及气动加热等都可能导致钛

及钛合金自维持燃烧的发生. 钛的这种特性正是一切“钛火”危害的根源, 因此, 发展阻燃钛合金就成为解决钛燃烧问题的根本途径. 目前, 国内外阻燃钛合金的研究和设计都是基于以下三个角度来开展.

1) 中断氧输送

钛合金能持续燃烧的一个重要条件是空气中氧不断通过疏松的表面氧化层送到基体, 与基体反应. 向纯钛中加入适量的 V, Cr 等元素能使燃烧前沿快速形成一层致密保护性氧化膜, 可有效地阻止燃烧^[17].

2) 热力学角度

用绝热燃烧温度来表征合金燃烧过程的总体热效应. 计算表明, 向钛中添加 V, Cr, Mo 等合金元素可以降低其绝热燃烧温度.

3) 减少摩擦发热

将钛零件间干摩擦转变为有液相润滑的摩擦, 从而急剧减少摩擦功及加热量, 达到减少摩擦发热与加热金属来抑制合金燃烧.

迄今为止, 比较成功的阻燃钛合金都是对以上 3 种因素综合运用结果, 如俄罗斯的 Ti-Cu-Al 系阻燃钛合金, 美国的 Ti-V-Cr 系阻燃合金等^[18]. Ti-Cu-Al 系阻燃钛合金的阻燃机制是将钛零件之间的干摩擦转变为有液相润滑的摩擦, 从而减少摩擦功及加热量; Ti-V-Cr 系阻燃合金是通过中断氧输送和热力学角度两方面的阻燃机制达到阻燃目的^[19].

2.1.2 阻燃钛合金体系研究状况

采用阻燃钛合金是预防航空发动机“钛火”最有效、最根本的方法. 根据不同钛合金的阻燃特性, 选择合适的阻燃钛合金, 可以有效地防治“钛火”危害. 20 世纪 70 年代以来, 各国学者始终致力于阻燃钛合金的研制. 目前, 美国、英国、俄罗斯等国都研制出了各自的阻燃钛合金, 并已在发动机上获得成功应用^[20].

俄罗斯以 Ti-Cu 共晶系为基础, 成功研制了 BTT-1 和 BTT-3 两种阻燃合金^[21]. BTT-1 合金是在 Ti-Cu 二元的基础上添加少量的铝、钼、锆等元素制成的, 其具有良好的热加工性能, 可以生产出形状复杂的发动机零件, 如压气机机匣和叶片等. BTT-3 合金工艺塑性、阻燃性能均高于 BTT-1, 特别适用于制造各种板材件^[22]. 而美国研制的 Alloy C 属于另一类 Ti-V-Cr 系阻燃钛合金, 与常规钛合金相比, 这类合金具有较高的高温拉伸强度、蠕变抗力以及良好的冷变形能力, 可以

制成板材、箔材、带材、冷成形支架和加强杆等^[23]. 迄今, Alloy C 已被成功应用于美国战机 F22 的 F119-WP-100 发动机的尾喷管和加力燃烧室上^[24]. 另外, 英国 Rolls-Royce 公司研制的 IMI834 高温钛合金已在 Trent 系列发动机上获得广泛的应用^[25].

我国阻燃钛合金的研制始于 20 世纪 90 年代初期, 一些研究单位自行研制了多种 Ti-Cu-Al 和 Ti-V-Cr 系阻燃钛合金. 如: 西北有色金属院研制的 Ti40 合金曾被应用于某发动机压气机部件做 2, 3 级机匣^[26]. 总体来看, 我国的阻燃合金技术水平与发达国家相比仍存在差距.

2.2 阻燃涂层的研究与应用状况

钛火是发动机机械故障发生后, 钛制零件直接摩擦, 热量急剧积累的结果. 因此, 避免零件直接摩擦并抑制高温下的钛元素活性成为钛火预防的又一重要手段. 国外早在 60 年代就进行了阻燃涂层方面的研究, NASA 曾进行过一项涂层研究计划, 其目的是开发一种涂层系统, 使之能在引起裸露钛燃烧的能量的输入下, 对钛机体起到保护作用^[27].

目前, 英国 Rolls-Royce 公司、德国 MTU 公司、意大利 FAIT 公司及西班牙 ITP 公司联合研制的 EJ-200 发动机中, 高压压气机内机匣 1 级~4 级和对应的转子叶片均采用钛合金, 钛火事故概率高^[28]. 在改型时特别注意了其防护问题, 通过制备氧化锆隔热底层加易磨损密封涂层手段, 有效提高了钛合金的阻燃性能. 其中, EJ200 防钛火涂层如图 2 所示.

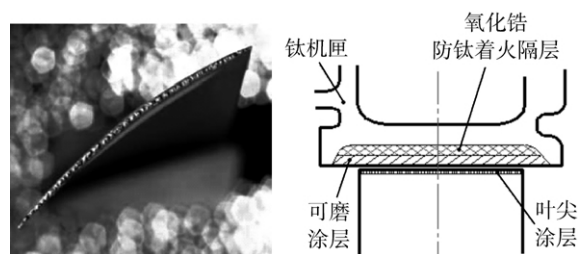


图 2 EJ200 防“钛火”阻燃涂层

Fig. 2 Anti-titanium fire coating

阻燃涂层是采用先进的喷涂工艺在钛合金零部件表面, 涂覆一层难以燃烧的材料, 防止转、静子钛合金零件直接碰磨, 减少碰磨热量积累和传导, 能够起到延缓和阻止燃烧的作用. 国内有关单位开展了包括防钛火涂层的筛选、涂层制备工艺技术、不同涂层的防钛火特性研究, 用于钛合金燃

烧防护涂层激光筛选试验的涂层种类及成分如表 1 所示. 经过相关领域学者多年的研究, 已研究出具有防钛火功能的 $\text{NiCrAl} + \text{ZrO}_2 + \text{NiCrAl}/\text{Be}$ 复合涂层. 在激光点燃试验中, $\text{NiCrAl} + \text{ZrO}_2 + \text{NiCrAl}/\text{Be}$ 复合涂层的抗燃烧性能比其他涂层系

列好, 未发现涂层中的金属元素向基体扩散, 同时也未出现基体中的 Ti 元素向涂层扩散. 其中, $\text{NiCrAl} + \text{ZrO}_2 + \text{NiCrAl}/\text{Be}$ 复合涂层经激光点燃后的涂层表面特征如图 3 所示.

表 1 常用阻燃涂层材料
Table 1 Commonly used burn resistant coat

材料	牌号	质量分数/%	粒度/ μm
阻 燃 涂 层 材 料	$\text{ZrO}_2 \cdot 8\text{Y}_2\text{O}_3$	$(\text{Y}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2) > 98.0\%$; $\text{Y}_2\text{O}_3: 6.0\% \sim 8.0\%$; $\text{Al}_2\text{O}_3 < 0.5\%$; $\text{Fe}_2\text{O}_3 < 0.5\%$; 其他 $< 1.0\%$	$-74 \sim +47$
	NiCrAl	Cr: $16.0\% \sim 19.5\%$; Al: $4.5\% \sim 6.5\%$; Ni 余量; 其他 $\leq 5.0\%$	$-140 \sim +47$
	NiMoAl	Mo: $4.0\% \sim 7.0\%$; Al: $4.0\% \sim 7.0\%$; Ni 余量; 其他(若测定) $\leq 2\%$	$-140 \sim +47$
	$\text{NiCoCrAlY}_2\text{O}_3$	$(\text{Cr} + \text{Al}) 18.0\% \sim 24.0\%$; $(\text{Ni} + \text{Co}): 73.0\% \sim 78.0\%$; Y: $0.5\% \sim 1.5\%$; C $< 0.7\%$	$-140 \sim +47$
	CuAl	Al: 10% ; Cu: 90%	$-106 \sim +47$

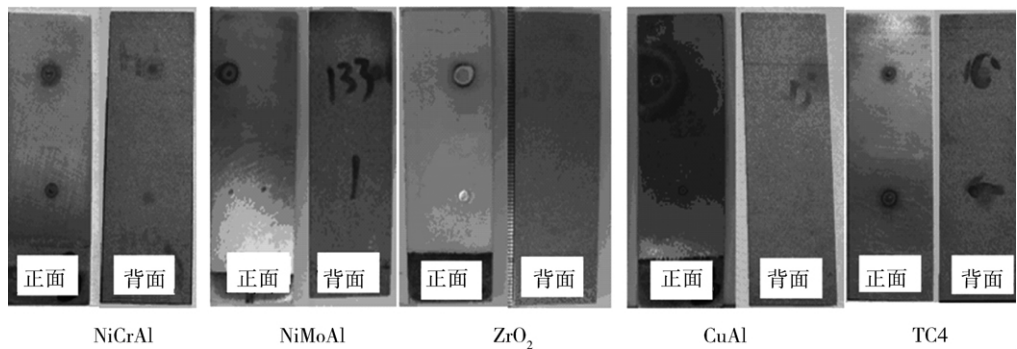


图 3 激光点燃试验后的涂层表面特征

Fig. 3 Coating surface features after laser ignition testing

2.3 防钛火结构设计分析

为了有效遏制“钛火”危害, 除研究不燃合金外, 发动机结构设计具有较大优化潜力. 目前, 国内外在防钛火结构设计时, 为避免钛合金部件之间的直接摩擦, 降低钛着火的概率, 采取了不成对使用钛合金的设计原则, 避免钛合金部件间的摩擦. 并且, 尽量减少邻近区域着火, 将钛火限制在外涵内. 据对现役的英军、美军、民用发动机用材的统计, 如 CF6-80C2, CFM56, F404, RB211-535E4/-524D4, PW4000 等发动机, 其高压压气机、转子叶片只要工作温度允许, 都采用钛合金, 但静子叶片均采用合金钢或镍基合金, 机匣大多

数采用合金钢. 前苏联根据多年对钛合金使用的经验与对钛着火现象的研究, 在统一的民航适航性标准中对钛合金零件的使用温度进行限制. 他们这样做的目的都是降低钛磨擦的可能从而降低钛着火的概率.

3 钛火防治技术未来的研究重点

航空发动机钛火防治技术的研究是研制高推质比发动机的关键. 通过多年研究积累, 我国已在防钛火技术方面取得突破性的进步, 为航空发动机的发展作出了巨大贡献. 但与发达国家相比, 国内的防钛火技术水平仍存在较大差距. 主要是阻

燃钛合金各元素对燃烧行为的影响、钛合金燃烧特性的表征及评价体系、阻燃性能评价方法、钛合金燃烧火焰及燃烧产物在发动机工况下的传播行为、阻燃钛合金相配套的防钛火涂层工程化应用等领域基础研究薄弱,将成为制约新一代航空发动机研制的堡垒。故在未来研究中,应基于钛合金燃烧条件、传播模式、防护原理等理论和方法,进行服役环境下钛火的防治技术研究,揭示阻燃钛合金各元素对燃烧行为的作用机制,建立钛合金钛合金启燃与环境(温度、压力、流速)的关系,从根本上解决了阻燃钛合金工程化问题上存在的风险。最终形成创新的具有自主知识产权的低成本、高可靠的新型钛火防治技术体系,以满足我国未来航空发动机高效、减轻质量、延寿和高可靠性的需求。

参考文献:

- [1] 韩民臣,黄淑梅. 钛在美国军工中的应用[J]. 金属世界, 2001(5):1-2.
HAN Minchen, HUANG Shumei. Military application of titanium in the United States[J]. Metal World, 2001(5):1-2. (in Chinese)
- [2] Krammer P, Rued k. Technology preparation for green aero-engines[J]. Aircraft Propulsion and Power, 2003, 6(10):14-17.
- [3] Charles W. Review of titanium application in gas turbine engines[R]. ASME Paper GT2003-38862, 2003.
- [4] 邓炬. 钛与航空[J]. 钛工业进展, 2004, 21(2):6-15.
DENG Jü. Titanium and aviation[J]. Titanium Industry Progress, 2004, 21(2):6-15. (in Chinese)
- [5] 杨健. 钛合金在飞机上应用[J]. 航空制造技术, 2006, (11):41-43.
YANG Jian. Applications of titanium alloy in aircraft[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2006(11):41-43. (in Chinese)
- [6] 霍武军,孙护国. 航空发动机钛火故障及防护技术[J]. 航空科学技术, 2002(4):32-34.
HUO Wujun, SUN Huguo. Titanium-fire fault and prevention technologies in aero-engine[J]. Aeronautical Science and Technology, 2002(4):32-34. (in Chinese)
- [7] 陈光. 高压压气机钛着火的危害与防止措施[J]. 国际航空, 1995(1):40-42.
CHEN Guang. Titanium fire hazards and prevention measures of high pressure compressor[J]. International Aviation, 1995(1):40-42. (in Chinese)
- [8] Filonenko A K. Spin combustion of titanium under reduced pressure [J]. International Journal of Self-propagating High Temperature Synthesis, 1992, 1(1):19-21.
- [9] Gunaji M V, Sinar S, Beeson H D. Ignition and combustion of titanium and titanium alloys[J]. ASTM Special Techni-
cal, 1995(1267):81-85.
- [10] 王文波,贺志勇,王振霞,等. 双辉等离子表面合金化技术形成表面阻燃钛合金的展望[J]. 世界科技研究与进展, 2005, 27(3):37-39.
WANG Wenbo, HE Zhiyong, WANG Zhenxia, et al. Prospect of forming surface burn-resistant titanium alloys by double glow plasma surface alloying technology[J]. World Sci. Tech. R&D, 2005, 27(3):37-39. (in Chinese)
- [11] Littman F E, Church F M, Kinder E M, et al. A study of metal ignitions and the spontaneous ignition of titanium [J]. Journal of Less Common Metal, 1996, 3(5):367-378
- [12] Anderson V G, Funkhouser M E. Titanium coating ignition test[R]. FAA, AD-A1111819, 1982.
- [13] Strobridge T S, Moulder J C, Alan F. Titanium Combustion in Turbine Engines[R]. FAA, AD-A075657, 1979.
- [14] 黄旭,曹春晓,马济民. 航空发动机钛燃烧及阻燃钛合金[J]. 材料工程, 1997(8):11-14.
HUANG Xu, CAO Chunxiao, MA Jimin et al. Titanium combustion in aeroengines and fire-resistant titanium alloys [J]. Materials Engineering, 1997(8):11-14. (in Chinese)
- [15] 雷力明,黄旭,王宝,等. 阻燃钛合金的研究和发展[J]. 材料导报, 2003, 17(5):21-22.
LEI Liming, HUANG Xu, WANG Bao, et al. Research and development of non-burning titanium alloys[J]. Materials Review, 2003, 17(5):21-22. (in Chinese)
- [16] Kneisel G. High-strength titanium resists ignition[J]. Advances Materials & Process, 1993(9):58-62.
- [17] 赵永庆,周廉,邓炬. Ti40 合金的阻燃性能及其阻燃机理分析[J]. 稀有金属材料与工程, 1999, 28(2):77-80.
ZHAO Yongqing, ZHOU Lian, DENG Ju. Burning resistant behavior and mechanism of a Ti40 alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 1999, 28(2):77-80. (in Chinese)
- [18] 周廉,周义则,赵永庆,等. 阻燃钛合金 Ti40 的热加工力学性能研究[J]. 西北工业大学学报, 2003, 21(4):381-386.
ZHOU Lian, ZHOU Yize, ZHAO Yongqing, et al. Processing and mechanical properties of non-burning titanium alloys[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2003, 21(4):381-386. (in Chinese)
- [19] Bania P J. Beta titanium alloys and their role in the titanium industry[J]. Journal of the Minerals, 1994(6):16-20.
- [20] 魏东博,张平则,姚正军,等. 钛合金阻燃技术的研究进展[J]. 机械工程材料, 2010, 34(8):1-5.
WEI Dongbo, ZHANG Pingze, YAO Zhengjun. Research progress of burning-resistant technology of titanium alloy [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2010, 34(8):1-5. (in Chinese)
- [21] Kneise L G. High strength titanium resisting ignition[J]. Advance Materials & Process, 1993(9):58-62.
- [22] Eylon D. High-temperature titanium alloys[J]. Journal of Materials, 1984, 1:55-62.
- [23] Berczik D M. High strength non-burning beta titanium alloy: U. K, GB2238057A[P]. 1991-05-22.

- [24] Rodney R B. The international workshop on beta titanium alloys [J]. Journal of the Materials, 1994(7):54-58.
- [25] 孙护国, 霍武军. 航空发动机钛合金机件的阻燃技术[J]. 航空制造技术, 2003(1):46-48.
SUN Huguo, HUO Wujun. Anti-combustion technologies for titanium alloys parts in aeroengine [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2003(1):46-48. (in Chinese)
- [26] 黄旭. 钛合金阻燃机理研究[D]. 西安: 西北工业大学, 1998.
HUANG Xu. Burning-resistant technology of titanium alloy [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 1998. (in Chinese)
- [27] 骆更新, 陈珠琳. 航空发动机钛合金燃烧问题及涂层防护技术[J]. 航空制造工程, 1994(2):20-21.
LUO Gengxin, CHEN Zhulin. Titanium alloy burning problems and coating protection technology in aeroengine [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 1994(2):20-21. (in Chinese)
- [28] Seward W A. Combustion of titanium laser initiated in a controlled airstream[R]. Federal Aviation Administration Report, AD-B009546L, 1975.