



氢能航空发动机研究现状及发展制约因素

刘佳育¹, 罗纳², 李俊辰³, 罗奎林³, 张小锋^{2*}

(1. 新余学院新能源科学与工程学院, 江西 新余 338000; 2. 广东省科学院新材料研究所/现代材料表面工程技术国家工程实验室/广东省现代表面工程技术重点实验室, 广东 广州 510650; 3. 国营川西机器厂再制造与叶片修理中心, 四川 成都 611937)

摘要: 为应对全球气候变暖和温室效应加剧, 欧美中等多国纷纷提出各自碳中和发展战略, 在航空航天、交通运输等多个领域推动新能源技术的应用。氢能源是航空业中较为理想、可取代传统石化燃料的能源, 目前全球各大航空公司都在着手布局氢能航空体系。氢能源在航空领域的应用十分广泛, 但其最重要的1个研究方向—氢燃料航空发动机, 仍处于大力发展和技术创新阶段。总结了近期氢燃料发动机在航空领域的新发展, 综述了氢燃料发动机在材料应用方面的短板和现实阻碍, 具体从氢能航空发展现状、氢能航空发动机关键技术、氢能航空发动机发展的主要制约因素3大方面进行介绍。氢燃料一直备受关注和青睐, 国外早已启动开发氢能飞机的研究项目, 并在研发氢能飞机、推动氢能航空相关产业方面已取得一定实质性进展, 而我国相关研究主要集中在制氢(风能、光能等电解制氢)、储氢、供氢(氢燃料加注站)及氢燃料电池和汽车领域。为推动氢能航空发动机的大力发展, 未来必须突破氢动力推进技术、机载氢燃料存储技术及氢燃料生产制备技术等壁垒, 而提供飞行动力的航空发动机是其中首要核心点。尽管氢能航空的发展前景备受瞩目, 但如要大规模推行, 仍面临诸多挑战。若要实现氢能航空飞机大范围应用推广, 还需在核心动力、交叉技术等方面开展更加深入的研究与开发。

关键词: 氢能航空; 氢能源; 氢燃料发动机; 研究现状; 制约因素; 氢涡轮发动机; E-TBCs; TGO

中图分类号: TG174.4

文献标志码: A

文章编号: 1673-9981(2024)02-0299-10

引文格式: 刘佳育, 罗纳, 李俊辰, 等. 氢能航空发动机研究现状及发展制约因素[J]. 材料研究与应用, 2024, 18(2): 299-308.
LIU Jiayu, LUO Na, LI Junchen, et al. Research Status and Development Constraints of Hydrogen Aero Engines[J]. Materials Research and Application, 2024, 18(2): 299-308.

0 引言

氢气是最轻的气体, 是一种不含碳元素和其他杂质的燃料, 其燃烧后的产物为水, 具有绿色、低碳等特点, 因此氢气又被称为零碳清洁能源。同时, 氢气具有能量密度高(相当于航空燃油的3倍)、元素储量丰富等优势, 是比较理想的能够减少航空碳排放的可再生能源, 氢燃料一直备受各国家组织、相关机构和航空企业的关注和青睐。近几年, 各国纷纷提出碳中和相关发展战略, 各大航空公司大力发展氢能航空产业, 研究相关创新技术, 欲在将来能够大范围推行氢能航空飞行器。发展氢能航空技术, 是实现碳中和的主要途径, 将成为航空技术的重要发

展趋势。

本文从氢能航空的发展现状方面进行阐述, 首先介绍近期的氢能航空相关政策、战略计划和研究成果, 其次介绍氢能航空发动机现有的关键技术及尚待突破与解决的技术壁垒, 最后分析氢能航空发展的主要制约因素。

1 氢能航空发展现状

为大力推动氢能航空发展, 全球各大航空公司纷纷启动开发氢能飞机的研究项目, 提出了大量的战略计划和发展方向。目前, 在研发氢能飞机、推动氢能航空相关产业方面, 欧洲、美国等发达国家和地区已有一定实质性的进展。氢能飞机与传统燃料飞

收稿日期: 2023-12-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(5232105217206792160202); 广东省自然科学基金项目(2021B1515020038); 广东专项支持计划(2019BT02C629); 广东省科技计划(2023A0505010017); 航空发动机及燃气轮机基础科学中心项目(P2023-C-IV-002-001)

作者简介: 刘佳育, 本科生, 研究方向为新能源科学与工程。E-mail: 1840622520@qq.com。

通信作者: 张小锋, 博士, 正高级工程师, 主要从事航空发动机热障/环境障涂层研究。E-mail: zxf200808@126.com。

机相比具有较好的应用前景,其是以液体氢或高度压缩的氢气为燃料驱动发动机,而传统燃料飞机是以石化燃料驱动发动机。图1为氢能飞机大致的燃料搭载分布情况。

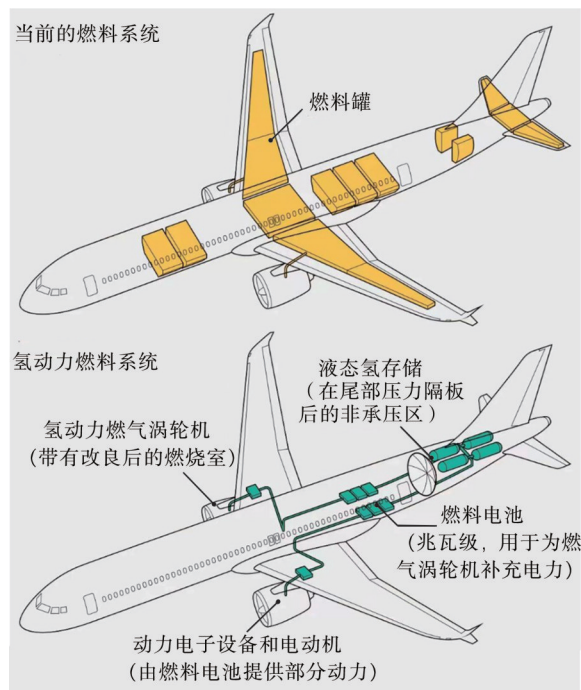


图1 电动及混动飞机燃料搭载分布图(本图来自悦智网)

Figure 1 Electric and hybrid aircraft fuel distribution map (this figure from Yue Zhi network)

1.1 国内外相关发展计划

国内外相关氢能的政策和产业发展计划。清洁航空是欧盟清洁天空2(Clean Sky 2)的后续计划,该计划获得总投资额41亿欧元,其中欧洲航空业提供24亿欧元、地平线计划拨款17亿欧元,该项目研发方向包括混合动力飞机、氢动力飞机,以及超高效中短程飞机交叉领域和发展欧洲清洁航空区域生态系统,其中前3个重点方向的16个项目中有8个为动力项目^[1]。由此可知,氢动力技术的创新和发展,对于减少碳排放、实现清洁目标的重要性。2021年,英国开展了一项名为“零碳飞行”(FlyZero)的系统性研究,并于2022年3月17日发布了“零碳飞行”(FlyZero)项目研究报告,给出了氢能航空的可行性报告,发布了2050年前实现中型宽体飞机、氢动力支线飞机和窄体飞机的设计概念,明确了包括氢燃料电池、电推进系统、氢燃料涡轮发动机、低温氢燃料存储系统、热管理系统、空气动力学结构设计等6项关键技术,以及机载系统、机体设计、基础设施、全生命周期影响、加快设计策略与验证速度、相关材料技术和制造工艺等7个横向交叉技术^[2-3]。

目前,我国氢能相关政策和产业主要集中在制氢(风能、光能等电解制氢)、储氢、供氢(氢燃料加注站),以及研究氢燃料电池和氢燃料电池汽车。氢涡轮动力由于技术门槛较高,虽有部分企业与高校进行相关研究,并有一定程度上的技术突破,但仍未有大规模投入和系统性的规划。

1.2 近期国外氢能航空发展现状

2022年初,英国航空航天技术研究院(ATI)公布了FlyZero液氢动力远程中型飞机概念的方案细节,其中包括储氢罐、氢燃料发动机和低温燃料系统等,该飞机搭载两台氢燃料涡轮发动机,由于储氢罐放置位置的特殊设计,飞机飞行时能通过消耗液氢调整飞机平衡。2022年2月,普惠公司启动了氢气-蒸汽喷射、间冷涡轮发动机(HySIITE)项目,该项目获得美国能源部高级研究计划局(ARPA-E)的380万美元资金支持,其利用回收液氢燃料和水蒸汽来实现飞行中的零排放,可使下一代单通道飞机减少80%的氮氧化物排放量和减少35%的燃料消耗,并且该项目独特的半封闭式系统构架会使燃料电池更高效,能够降低运营成本^[4]。图2为普惠公司的氢蒸汽喷射间冷涡轮发动机方案^[5]。

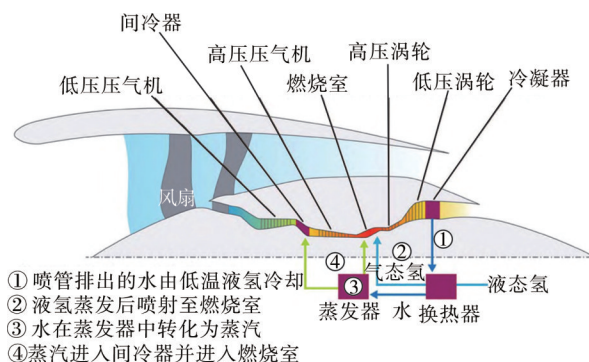


图2 普惠公司的氢蒸汽喷射间冷涡轮发动机方案^[5]

Figure 2 Hydrogen steam jet intercooled turbine engine program of Pratt & Whitney

2023年1月,ZeroAvia公司改装的一架19座Dornier 228试验平台飞机在机场成功起飞,并进行了10 min的飞行,该飞机左侧机翼改装了氢(电)动力系统,右侧机翼则是霍尼韦尔TPE-331备用发动机,这预示着该公司已完成应用氢燃料电池发动机的阶段飞行测试。2023年5月,空客公司与阿丽亚娜集团合作完成了向航空燃气涡轮发动机输送氢气的完整系统的测试,在该系统中氢气以超冷液体的形式存储于低温存储罐中,当液氢被传送到燃烧系统时燃烧系统将会对其进行加热,最后燃料以气体的状态被送入发动机燃烧。2023年7月,空客公司

发布了一款可搭载100名乘客的商用氢动力飞机的概念设计,这款飞机的驱动系统将由螺旋桨、液态氢储罐、电动机、电力电子学、液态氢储罐、燃料电池、冷却系统及一套辅助设备组成,并且配置可拆卸的燃料电池发动机舱,实现了电池发动机舱的快速替换,增大运转效率及减小运转周期。2023年7月,德国航空航天实验室DLR与美国发动机制造商通用电气(GE)合作,首次研究了在真实的发动机运行状态下进行100%氢气燃烧,并使用了GE航空开发的新型燃烧系统,该系统采用最新的激光光学测量技术分析燃烧过程,发现光学测量能够立即检测到化学反应和热释放区域,而不会影响燃烧室内的气体流动,同时还通过流场测量来跟踪空气-氢气混合物和反应产物在燃烧室内的运动情况。2023年7月,NASA与伊利诺伊大学厄巴纳-香槟分校(UIUC)签署有关继续推进低温氢燃料客机开发工作的协议,合作进行高效电气技术飞机中心(CHEETA)项目,该项目提出了另一种单通道概念客机,该机可载客180人,此概念客机采用包括氢燃料电池、电动机和超导电缆的零排放推进系统。GKN航宇公司研究燃氢中程民用飞机推进技术,包括直接通过氢燃烧产生动力(H2JET)和通过氢燃料电池发电产生动力(H2GEA)两个方向。2023年9月,H2Fly的测试飞机从斯洛文尼亚东北部的马里博尔起飞,搭载了法国公司Air Liquide制造的氢燃料箱,发动机将液态氢转化为电能提供飞行动力,实现了液氢飞机的首次载人飞行。2023年10月,罗罗公司开发的小型燃气涡轮机(为混合动力飞行提供动力)完成了首次燃料燃烧。

2 氢能航空发动机关键技术

近几年,虽然欧洲、美国、日本等发达国家和地区都加大了发展氢能航空技术,但未来的氢能航空要大范围推行甚至取代现有的使用传统能源的航空体系,必须要突破氢动力推进技术、机载氢燃料存储技术、氢燃料生产制备等技术壁垒,而提供飞行动力的航空发动机则是首要的核心点。

2.1 氢涡轮发动机技术

现有的氢燃料航空发动机,大致分为氢燃料涡轮发动机和氢燃料电池发动机。一类,氢燃料涡轮发动机工作原理是氢燃料直接在燃烧室内燃烧产生动力,推动涡轮并带动风扇产生推力(氢涡轮风扇发动机),或者是带动发电机发电带动风扇产生推力(氢涡轮电动风扇发电机);另一类,由氢燃料电池发电驱动风扇产生推力。

2.1.1 氢涡轮发动机热力循环

氢涡轮发动机的热力循环分为常规热力循环和非常规热力循环,常规热力循环是指将发动机燃料替换为液氢,热力循环系统与现有的大范围应用的热力循环系统结构基本相同,只是相关燃烧室、控制系统和换热器部分的部件有所不同。非常规热力循环是指液氢同时作为燃料和换热工质,利用低温液氢冷却发动机的进气口,降低进气口温度,减少压气机工作所需能量,并将热量传递给涡轮处的冷空气,提高涡轮处进入的空气质量^[6]。但是,在同样的热力循环条件下氢涡轮发动机的转速要大于传统燃料发动机,出于安全考虑,在飞机飞行时往往会限制燃料发动机的转速。由此可见,如何提高安全转速的最高限度及降低必要的平稳飞行的转速,是推动氢燃料涡轮发动机发展的重要一环。

2.1.2 氢涡轮发动机热管理技术

氢涡轮发动机热管理,是指在氢燃料涡轮发动机机中低温液氢在换热器的加热作用下升高到适宜的燃烧温度,提高涡轮发动机的燃烧效率、燃料的使用效率、及发动机整体燃烧性能。氢涡轮发动机热管理技术,主要包括滑油/氢换热器技术、回热器技术、冷气冷却换热器技术。滑油/氢换热器技术是满足基础燃料加热和滑油冷却的需求,回热器技术是利用涡轮排出的燃气加热燃料,冷气冷却换热器技术是利用低温液氢冷却涡轮处的保护叶片^[7]。氢燃料控制系统的研究包括:开发加热氢燃料的换热器,以及以氢燃料为工作介质的控制系统;开发检测氢燃料的仪器,构建氢燃料泄露检测体系,以及氢燃料灭火体系;开发流量小、耐用的适用于航空业的低温燃料泵,以及密封效果好、绝缘、能够抵抗氢腐蚀等问题的输送系统^[3]。

2.1.3 氢燃料燃烧

氢燃料虽然能量密度高、燃烧排放无碳化,但燃烧温度高、火焰传播速度快且燃烧易回火,难以稳定燃烧一直是制约其相关发展的重要因素。如今,燃机燃氢技术已经得到突破,西门子航空公司研发出了具有燃烧纯氢燃料能力的燃机,该燃机采用了非DLE燃烧技术,即扩散火焰或部分预混火焰。由于燃机技术与航空发动机技术在某些部分高度重合,其燃氢技术对航空发动机的设计有一定的借鉴意义^[8]。预混火焰相关技术中的微混燃料技术是将大直径的喷嘴换成结构简单的微型喷嘴,形成氢气微喷射而使空气和氧气快速混合,由此提高预混气体的混合均匀度,使得氢燃料能够更加平稳的在发动机中燃烧^[9-10]。

2.2 氢燃料电池发动机技术

氢燃料电池发动机依靠氢在燃料电池中发生反应产生电能,由电动系统带动风扇转动产生推进的动力。相比于氢涡轮增压发动机内部复杂的气体环境,氢燃料电池的反应产物只有水且内部的反应环境简单,极少产生水蒸汽凝结现象,能够削弱尾迹云的形成,降低75%—90%航空飞行对气候的影响。目前,氢燃料电池能量密度较低,仅有现今航空发动机能量密度的一半左右,并且使用寿命有限、输出功率低^[11]。氢燃料电池要实现在航空飞机上的有效运用,还需要再开发新型材料、新型系统,以及新型的设计方案。

目前,ZeroAvia公司已经推出了一款能够应用于氢燃料电池系统的高功能密度的新型空气压缩机,该发动机能够支持900 kW功率的燃料电池系统的运行,是当前燃料电池空气压缩机中支持功率最大的全球第一个为航空氢燃料电池电推进系统设计的空气压缩机。由于航空飞机飞行时所处的高海拔,使得氧气含量更加稀薄且摄取更加困难,所以拥有一个能够为燃料电池提供更高的氧气含量、在一定程度上弥补氢燃料电池能量密度和输出功率低等缺陷的高性能空气压缩机显得尤为重要。

3 氢能航空发动机发展的主要制约因素

3.1 相关运行体系不完善

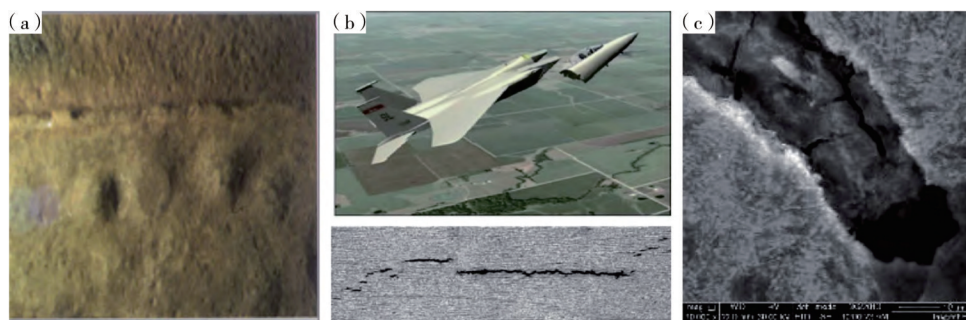
随着氢能航空相关技术的高速发展,氢能航空器已经不仅是一种概念和构思,他正从想象逐渐变为现实,并且拥有了一定的具体实物,将来在引进氢

能航空器的同时,也需要有一套更新、更适配于氢能航空器的运行体系。

氢能航空配套产业可分为氢燃料制备、氢燃料储运及氢燃料加注3个方面,其中氢燃料制备需要消耗大量的电力,加之航空产业本身由电能转化为氢能的损失、大量的长距离、大荷载运输任务,以及伴随氢能航空市场运营对电力的需求,单纯的电动航空器已无法满足要求。氢燃料储运大概有以下几种方式:(1)通过公路槽罐车将液氢运输到机场,该方法成本负担小,但对相关容器材料要求较高,并且供应能力不强;(2)利用管道输送氢气,在机场液化设施中液化后转移到储罐中,但需要铺设管道;(3)在机场附近实现液氢制备和运输的一体化,但该方法受资源限制较大。在氢能航空发展初期,氢燃料加注方式可能多为移动加氢车,但当航空规模达到一定程度后部分机场就需要建设固定加氢设施,如仍沿用传统航空燃料加注的管网布局,加注系统压力差就会很难控制,并且液氢密度比传统燃料低,在使用相同规格软管的条件加氢比加油需要更长时间^[12]。

3.2 氢损伤

航空发动机材料在高温高压且含氢的环境下,极易在材料表面出现降低材料性能的氢损伤现象,如导致材料塑性降低、金属材料脆化,氢气与合金发生反应的产生氢化物会使金属材料出现裂纹。氢与钢中碳反应产生的甲烷气体不仅会导致材料脆化,还会使材料出现氢鼓包、氢腐蚀、白点^[13]。图3为典型的几种氢损伤。



(a)—氢罐的鼓包;(b)—飞机高强钢的氢致裂纹;(c)—高铁螺栓的氢致开裂。

(a)—the bulge of the hydrogen tank; (b)—cracking caused by hydrogen in the aircraft's high-strength steel; (c)—hydrogen cracking of bolt.

图3 几种典型氢损伤^[6]

Figure 3 Several typical hydrogen damage

高温氢损伤分为表面脱碳、内部脱碳和微裂纹2种形式。在低氢高温分压条件下,易发生外部脱碳,基本不会发生内部脱碳和微裂纹;高氢较低温

(高于211℃)分压条件下,基本不会发生外部脱碳情况,但易发生内部脱碳和微裂纹;高氢高温分压条件下,外部脱碳、内部脱碳和微裂纹两种损失并

行^[14]。通过对美国华盛顿州阿纳科特斯炼油厂催化重整/石脑油加氢装置高温氢换热器爆炸的分析发现,在该炼油厂催化重整/石脑油预加氢装置中,1台高温氢换热器的壁温低于221℃时发生了高温氢损伤,并且引起了石油泄露燃烧爆炸。陈炜等^[14]提出,由于加氢装置所处环境的复杂,造成的损伤不是单纯的高温氢损伤,因此发生高温氢损伤预估最低温度可能需降低20—30℃。由此可见,材料在复杂的多物质混合环境下可能会加快腐蚀,从而增大氢损伤发生的概率。目前,临氢设备和管材大多依据Nelson曲线进行选择,但由于实际的应用环境可能同时含有其他物质的腐蚀作用,且该曲线是由试验得出的,本身就含有一定误差,所以在实际选材时应相应曲线温度下调一个温度区间^[15]。

3.3 水蒸汽对合金及粘粘层的影响

3.3.1 水蒸汽对合金的影响

镍基高温合金因良好的高温力学性能,被广泛的运用于燃气轮机中^[16]。同样,现有的氢燃料发动机中也少不了他的身影。由于在潮湿的运行服务条件下,水蒸汽会加速热腐蚀和氧化过程,因此金属结合涂层被用于保护基板叶片免受热腐蚀和氧化的侵袭。Saunders等^[17]回顾了水蒸汽对基体合金和涂层的氧化物形成和生长动力学(氧化铝、铬、二氧化硅和二氧化钛)的影响,指出水蒸汽促进了氧化垢的多孔结构形成,这是由于氧化垢中阳离子扩散的增加,以及随之而来的空位冷凝,在氢氧化物或氧化氢氧化物形成的情况下,通常可观察到氢氧化物比相应的氧化物具有更高的挥发性,导致涂层失去保护作用。与干燥条件相比,在水蒸汽存在的情况下与氧化物生长有关的任何方面(如吸附、解离和反应物的扩散)都会受到影响。Marisida等^[18]对合金RENE N5、PWA 1484、RENE N5的扩散铝化物涂层(无论是否Pt改性)进行了一系列高温氧化试验,探究了水蒸汽对合金氧化的影响并发现,合金在水蒸汽含量较高的空气中循环氧化时,所生成的氧化层多于在干燥空气中产生的氧化层,并且氧化形成的氧化物也比干燥空气中的更厚。由此可以看出,水蒸汽会加速合金的氧化。

3.3.2 水蒸汽对粘结层的影响

Sullivan等^[19]通过观察预制NiAl₂O₄尖晶石球团中镍的挥发随湿度变化的情况,发现:在高水蒸汽环境下,TGO表面瞬态尖晶石的挥发量与燃烧环境有关;在某些情况下,瞬态尖晶石挥发后,水蒸汽促进了尖晶石在邻近试样表面的气相再沉积。与传统燃料相比,替代燃料燃烧时NiCoCrAlY键合涂层在

TGO层中形成的非理想氧化物增加,表明金属结合涂层和氧化钇-稳定氧化锆(YSZ)面层之间,可能不会形成连续的(厚度小于5 μm)具有热化学保护的 α -Al₂O₃结构,而是形成尖晶石-氧化铝双分子层,形成的尖晶石(AB₂O₄)容易开裂和分层,在TGO和YSZ之间出现体积膨胀,导致陶瓷面层的界面较弱,连续尖晶石会对TBCs的长期耐久性和寿命构成重大威胁^[20]。

Shillington等^[21]提出了一种长时间使用的稳态机制,解释了在512 h长时间暴露的条件下产生厚达100 μm的大块TGO尖晶石畴的原因,是由于氧化时粘结层中的Al含量减少,使氧化铝层变厚。文献[22]指出:将NiCoCrAlY涂层置于含0%—8%水蒸汽的空气中,在1 000℃下氧化24 h后,所形成的氧化物主要为氧化铝,其次是由钴铝氧化物组成的尖晶石相;同时,对NiCoCrAlY氧化后形成的氧化皮厚度进行检测,结果表明随着水蒸汽含量的增加,整体氧化皮厚度有明显的增加趋势。这是因为在 θ -氧化铝的第一阶段形成过程中,水蒸汽的加入增加了氧化速率,然后 θ -氧化铝转化为第二稳定阶段的 α -氧化铝相,当体积分数为4%的水蒸汽样品的第一阶段氧化速率增加时, θ -氧化铝的密度比稳定的 α -氧化铝的密度低13%,使得更多的Ni和O通过氧化层薄膜扩展。由此可知,水蒸汽的存在将导致材料内部氧化的增加,这是因为氧气通过界面的运输量增加了。

3.4 水蒸汽对环境屏障涂层(EBCs)的影响

当前,燃气涡轮发动机热截面部件的高温性能已趋于极限,无法稳妥的适应更高温度的工作环境,然而陶瓷热障涂层(TBCs)与叶片内部空气冷却系统的应用有助于燃气涡轮发动机的进口温度提高^[23-24]。为了确保发动机在高温环境下安全运行,有必要采用高温性能更优异的材料。

硅基陶瓷(如陶瓷基复合材料(CMCs))在承受较高入口温度的过程中,能够让部件拥有更强的高温性能,是涡轮发动机热部件较理想的材料。该类材料能够承受更高的温度,同时具有优异机械和物理性能,以及具有比其他替代金属/合金更低的密度。硅基陶瓷的使用减轻了发动机部件的重量,并提高了旋转发动机的效能,如为减少或消除旋转发动机区域的冷却而产生的功输出率增加和排放降低^[16]。碳化硅基CMCs在燃气涡轮发动机的高温、高压、高速气流及含氧,含氢,含水蒸汽的条件下易产生腐蚀,尤其是水蒸汽会与SiCf/SiC表面氧化形成的二氧化硅保护层反应而形成气态反应物,导致

材料性能下降^[25],因此需要在CMCs表面制备EBCs以保护CMCs,从而减少材料腐蚀、延长材料使用寿命。

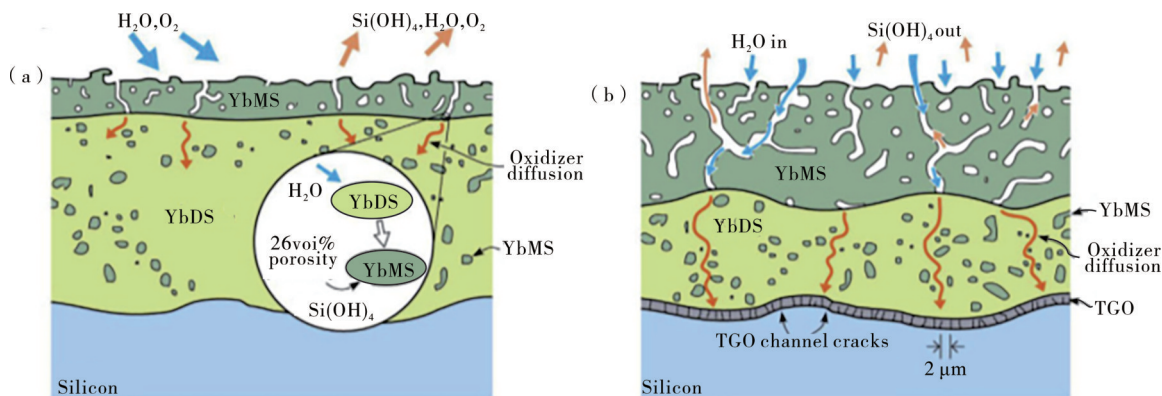
3.4.1 水蒸汽导致的开裂

由于高温防护涂层的表面经常开裂,因此引起了研究人员的广泛关注。B. Lv等^[26]对高温水蒸汽侵袭导致涂层表面出现开裂、面层变化和TGO氧化层生长进行了研究并发现,在以纯二硅酸镱(YbDS)为面层、Si为粘结层的EBCs体系中,在热蒸汽循环最初涂层没有出现裂纹,随着热蒸汽循环的继续,YbDS上部转化为单硅酸镱层(YbMS),在随后的冷却阶段,由于热应力而导致涂层表面开裂。这是因为在蒸汽循环过程中,涂层表面裂纹沿YbMS层扩展,表明裂纹是由YbMS的CTE失配引起的应力驱动的。C. Pengju等^[27]在Cf/SiC复合材料表面设计并制备了双层 $\text{Yb}_2\text{Si}_2\text{O}_7/\text{SiC}$ 和三层 $\text{Yb}_2\text{Si}_2\text{O}_7/(\text{SiCw-Mullite, SM})/\text{SiC}$ 环境障涂层,结果表明:双层 $\text{Yb}_2\text{Si}_2\text{O}_7/\text{SiC}$ 涂层试样在1673 K下氧化200 h后的质量损失高于相同条件下的三层 $\text{Yb}_2\text{Si}_2\text{O}_7/(\text{SiCw-Mullite, SM})/\text{SiC}$ 的质量损失,并形成了较宽的贯穿裂纹;三层 $\text{Yb}_2\text{Si}_2\text{O}_7/(\text{SiCw-Mullite, SM})/\text{SiC}$ 涂层试样在1673 K下氧化200 h后的质量损失低于相同条件下的三层 $\text{Yb}_2\text{Si}_2\text{O}_7/(\text{SiCw-Mullite, SM})/\text{SiC}$ 的质量损失,并形成了较窄的贯穿裂纹。

Mullite, SM)/SiC涂层的SM中间涂层中的SiC晶须,不仅可以提高莫来石中间涂层的抗裂纹扩展能力,而且可以缓解 $\text{Yb}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ 外涂层与莫来石中间涂层热膨胀系数的差异。因此,可以尝试添加类似的中间涂层,抑制涂层裂纹的扩展。

3.4.2 水蒸汽与热生长氧化物(TGO)的反应

SiC CMCs在更高的温度和干燥的氧环境中,具有优异的抗氧化性,这归功于其强而适中的氧化层。在干燥的氧条件下,碳化硅与氧反应形成保护性的二氧化硅氧化层^[28],而二氧化硅氧化层会与燃烧反应的副产物水蒸汽反应而形成气态的氢氧化硅。为了使涡轮发动机安全高效地运行,要求环境屏障涂层(EBCs)致密且无裂纹,以保护SiC CMCs免受氧气/蒸汽扩散/侵入的攻击^[29-31]。同样,SiC也可以与水蒸汽反应生成二氧化硅,形成的二氧化硅垢又可与水蒸汽进一步反应,形成自然界易挥发的氧化硅或氢氧化硅,从而造成环保损失^[32]。该现象被称为表面衰退,随后的氧化和表面衰退可以产生多孔二氧化硅,这些多孔鳞片为氧化剂扩散到SiC/SiC-CMC基板提供了方便的途径。图4为SiC/SiC-CMC基板与高温燃烧气体接触时表面EBCs的腐蚀机理及SiC的氧化和表面衰退的示意图^[33]。



(a)—早期挥发阶段;(b)—后期暴露过程。

(a)—early volatilization stage;(b)—late exposure process.

图4 SiC/SiC-CMC基板与高温燃烧气体接触时表面EBCs的腐蚀机理及SiC的氧化和表面衰退的示意图^[33]

Figure 4 When SiC/ SiC-CMC substrate in contact with high temperature combustion gas, Schematic diagram of corrosion mechanism of surface EBCs and oxidation and surface decay of SiC

由于二氧化硅挥发的高衰退率,导致SiC CMCs的显著降解。因此,需要使用一种比 SiO_2 更耐热化学稳定的氧化物作为环境屏障涂层(EBCs),以保护SiC CMCs免受高温水蒸汽的侵蚀^[34]。由于EBCs可以有效地抑制TGO SiO_2 氧化层的水蒸汽挥发^[35],因此已被应用于减少/最小化SiC/SiC-CMCs基板的表面衰退。

3.5 水蒸汽对热障涂层(TBCs)的影响

3.5.1 水蒸汽对面涂层的影响

在喷气发动机中使用高氢/碳比替代燃料增加了燃烧过程中的水蒸汽产生,这种增加的水蒸汽会与部件表面的保护性氧化层发生反应,从而对燃气轮机热端部件造成损坏。此外,水蒸汽还会导致粘结层上的保护性氧化铝薄膜挥发,从而导致涂层更

快地降解^[16]。

Haynes等^[36]在1 100℃的干氧和空气中加入10%—50%的水蒸汽进行炉循环实验,探究在该条件下水蒸汽对热障涂层的影响,研究表明:加入了体积分数为10%的水蒸汽进行实验的涂层寿命至少下降了20%,由此可见水蒸汽会降低热障涂层的性能;但当持续注入水蒸汽至体积分数为50%时,涂层寿命并未呈现逐渐减少的趋势。还有其他试验表明^[37],TBCs从干炉中取出后暴露在水蒸汽中会迅速剥落,表明在高温下引入水蒸汽会对TBCs有影响。虽然工作环境中的高温水蒸汽会缩短TBCs涂层的寿命,但很少有研究关注这种早期失效的确切机制。

3.5.2 水蒸汽对裂纹形核与扩大的影响

TBCs中的裂纹形核是一个渐进的过程,从面层和粘结层界面的双轴压应力状态的建立开始。由于面层和粘结涂层之间的热膨胀不匹配,在高温冷却期间产生裂纹^[38-39]。在热循环过程中,压应力会逐渐增加,这是粘结层的可变形性降低造成的^[38,40]。

Yanar等^[41]对涂有B-PVD的YSZ面漆的Pt改性铝质粘结层进行测试并发现,在TBCs耐久性和寿命方面,湿风炉测试结果与干风炉测试结果存在显著差异,除了湿空气测试中包含水蒸汽外,两种测试之间的所有因素保持不变,当水蒸汽温度高于1 000℃时在TGO键合层界面之间形成尖晶石(NiAl_2O_4),其为成核裂纹穿过该层而失效创造了一条弱路径。人们普遍认为^[38,42-43],TBCs劣化和最终失效通常与高温下金属粘结层的氧化有关,因为TGO层的形成导致粘结层的合金元素(如铝)耗尽。Rudolphi等^[44]分别在1 100℃、干燥空气、空气+10% H_2O 和空气+50% H_2O 环境下,对TBCs试样进行200、800和1 200 h等温炉试验,同时对微裂纹进行了鉴定,旨在捕获微裂纹发生时TBCs内部产生的声信号,声发射强度反映了微裂纹的强度,结果发现暴露在水蒸汽环境中样品产生的声发射强度是干燥环境中的100倍,这表明暴露在水蒸汽中时TBCs内部会发生更多的开裂。

3.5.3 水蒸汽对TGO的影响

研究发现^[16]:TGO在潮湿空气条件下比在干燥空气条件下氧化更快,导致其层更厚;此外,TGO在干燥空气中生长时会形成均匀的 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$,而在潮湿的空气条件下形成氧化物的 γ 、 δ 和 θ 相,这些相的暂时稳定促进了不需要的氧化物的生长而形成尖晶石,促进了裂纹的形核和扩展。

水蒸汽的存在降低了TGO的晶粒尺寸,提高

了其塑性,缓解了应力。在相同测试条件下,TGO与氧化铝薄膜相比,其似乎与合金具有更好的附着力而延迟了剥落,但当TGO暴露在潮湿的空气环境中时,其更具多孔性,对底层基材的保护作用也更弱,在干、湿空气中经长时间循环氧化后,TGO残余应力变化极小。文献[45]对以Pt修饰 $\beta\text{-NiAl}$ 为粘结层的TBC-YSZ样品进行了检测,该试样取自1 150℃下1 h循环试验失效后的样品,结果表明:该样品截面切片底部为无YSZ层,顶部的YSZ层下有粘结层的相反面,顶部YSZ层的收缩似乎减少了粘结层的皱褶;在90%水蒸汽条件下,涂层/衬底界面内及气体界面处都存在 γ' 相层,在这些区域内相互扩散引起的转变导致从高铝 $\beta\text{-NiAl}$ 相到低铝 γ' 相。在Pt改性NiAl结合层中发现的皱褶,是由 β 相转变为 γ' 相变引起的,内部氧化的结论也得到了其他研究的支持^[46]。

3.6 氢混环境热障涂层(E-TBCs)研究现状与设计思路

3.6.1 氢混环境热障涂层(E-TBCs)研究现状

目前,有关氢混燃烧先进航空发动机的研制、氢混燃烧环境中高温氢/高水蒸汽载荷对发动机热端部件热障涂层的影响、服役环境下渗透的氢原子对涂层-基体界面的破坏,以及相应热障涂层材料的设计合成、涂层制备及损伤破坏、腐蚀降解机制的研究,几乎处于空白状态,显著滞后于氢混地面燃气轮机及其热障涂层的发展。为了加强航空发动机氢混环境下热障涂层的研究,大致可有以下几个研究方向:(1)高温氢混环境热障涂层(E-TBCs)氢/水蒸汽环境屏蔽材料,高热稳定性、高断裂韧性、低热导率热障陶瓷材料及抗高温氧化和水蒸汽腐蚀金属粘接层材料的高通量筛选及研制;(2)高温氢混环境表面封严层、热障陶瓷层和金属粘接层的结构设计、制备及显微有序缺陷调控的研究,以及形成低热导率、低应力、高韧性、强界面结合长寿命高温氢混燃烧E-TBCs的设计和制备方法;(3)E-TBCs在高温氢/水蒸汽中的损伤破坏、腐蚀降解和疲劳性能测试研究,利用环境原位电镜等先进表征技术揭示热障涂层与相关界面在化学/力/热耦合状态下的结构动态变化机制与损伤失效机制,形成氢混环境中E-TBCs热机械性能及热循环性能测试评价标准体系;(4)开展高温氢混燃烧E-TBCs寿命评定方法,建立高温氢/高水蒸汽载荷条件下涂层显微结构演变机制、热机械性能与涂层热循环服役寿命的关联机制。最终目标是能够开发出适应于氢混燃烧的新型高温/超高温热障涂层陶瓷层和金属粘接层材料

体系,建立高断裂韧性、低热导率、高应变容限长寿命氢混燃烧环境热障涂层体系的设计方法和制备技术,构建氢混燃烧环境高温/超高温热障涂层测试评价及寿命评定的标准方法体系,为研制新一代高性能氢混燃烧航空发动机提供理论和技术支撑。

3.6.2 氢混环境热障涂层(E-TBCs)设计思路

考虑氢混环境,E-TBCs应满足抗CMAS腐蚀、抗水氧/熔盐腐蚀、阻氢渗透、抗烧结、耐高温氧化、热循环寿命高、高韧性及结合强度高要求。以镍基高温合金作为重点研究基材,结合吸取CMC表面用EBC环境障涂层设计策略,在镍基高温合金/耐高温氧化合金粘结层/TBCs体系基础上沉积新设计的EBC涂层,该涂层能满足抗CMAS腐蚀、抗水氧/熔盐腐蚀、阻氢渗透功能,并且能与TBCs进行良好的热膨胀系数匹配。但是,单独TBCs在面临高温水蒸汽环境及CMAS腐蚀情况下,容易发生T相到M相的转变,尤其对于YSZ涂层,由于水分子会破坏Zr—O—Zr键,生成的Zr—OH:Y₂O₃与水分子会反应生成Y(OH)₃,因而YSZ的性能易发生明显下降。V. Déneux等^[37]研究了水和水蒸汽对氧化钇稳定氧化锆(YSZ)涂层镍基高温合金样品寿命的影响,将样品热循环至1150℃后进行水滴测试,结果表明在1150℃下经过给定次数的循环后,水的添加促进了TBC样品的剥落,并且发现该系统循环阈值等于170次循环。为提高TBCs耐腐蚀性能,CeO₂是一种较为常见的用于YSZ掺杂改性的稀土氧化物,相较于其他金属化合物,CeO₂掺杂能提高YSZ基热障涂层的热膨胀系数,但单一的CeO₂掺杂有一定的弊端,可考虑寻找能够与CeO₂掺杂性能互补的元素进行多元掺杂^[47];为提高涂层的热循环寿命,则可以通过利用等隔热功能层级结构设计双陶瓷层结构涂层,将粘结层预氧化处理提高粘结层的抗氧化性能的方法来实现^[48]。

在CMC用EBC涂层体系中,研究比较热点的是稀土单硅酸盐(RE₂SiO₅)和稀土双硅酸盐(RE₂Si₂O₇)(RE=Yb、Y、Gd、Er),他们具有良好的抗CMAS腐蚀和抗水氧腐蚀性能、耐高温、抗烧结,但存在阻氢渗透效果不足和热膨胀系数相对较低的问题,与TBCs直接结合易产生热失配问题,需要加入过渡层。陶瓷涂层是阻氢渗透首选材料,已开展研究的陶瓷阻氢渗透材料主要有TiN、TiN/TiC、SiC、Er₂O₃、Y₂O₃、Cr₂O₃、ZrO₂和 α -Al₂O₃等,其中氧化物陶瓷的阻氢效果较好,特别是 α -Al₂O₃。莫丽娟等^[49]研究了 α -Al₂O₃在高温氢环境条件下的稳定性,发现在高温氢环境中 α -Al₂O₃并未产生新相,其电学性能保有较好、力学性能稍有下降,但整体稳定

性较好,并且其氢渗透降低因子PRF高达10³。对于阻氢渗透涂层而言,其厚度为2—20 μm时就能达到较好的阻氢效果,因此建议过渡层设计为非晶/共晶Al₂O₃-YAG涂层,原因如下:(1)从阻氢渗透效果看,非晶涂层无晶界、结构致密,且含有大量捕捉H原子能力较强的悬键;共晶相中氧化铝均为 α -Al₂O₃相, α -Al₂O₃和YAG形成相互交错三维互穿网络结构,该结构具有优良的阻氢渗透性能;(2)从热膨胀系数看,高温下非晶/共晶Al₂O₃-YAG涂层的热膨胀系数为(8—10)×10⁻⁶ K⁻¹,介于稀土硅酸盐涂层与TBCs之间;(3)非晶/共晶Al₂O₃-YAG涂层耐高温、抗氧化、热稳定性好、抗高温熔盐腐蚀及一定的抗水氧腐蚀能力;(4)从应力转变看,喷涂态的应力为拉应力,经高温服役后可转变为压应力。针对镍基高温合金基材,氢混环境热障涂层(E-TBCs)体系应由耐高温氧化合金粘结层(最内层)/TBCs热障涂层/Al₂O₃-YAG阻氢过渡层/稀土硅酸盐层(最外层-抗水氧/CMAS腐蚀)组成,其厚度匹配可根据功能要求,并结合有限元模拟进行优化设计。

4 结语

尽管氢能航空的发展前景备受瞩目,但是如果大规模推行,仍面临诸多挑战,如基础设施匮乏、建设成本与维护成本高昂,以及部分相关技术不成熟等问题。若要实现氢能航空飞机大范围应用推广,核心动力领域、交叉技术领域、地面运营等方面,还需要进行更加深入的研究与开发。

参考文献:

- [1] 韩玉琪,王则皓,付玉. 欧盟清洁航空计划分析[J]. 航空动力,2023(2):28-30.
- [2] 王翔宇. 英国零碳飞行发展愿景分析[J]. 航空动力,2022(3):24-27.
- [3] 李明,刘金超. 英国零碳飞行氢动力技术发展路线图[J]. 航空动力,2022(3):28-32.
- [4] 曹冠杰,王业辉,孙小金. 氢能航空发展现状分析[J]. 航空动力,2022(2):29-33.
- [5] 韩玉琪,王则皓,谭米. 2022航空氢动力研发进展[J]. 航空动力,2023(2):13-16.
- [6] 李维,曹俊,肖禹. 氢燃料发动机技术及发展趋势[J]. 航空动力,2022(2):39-42.
- [7] 李明,陈健. 英国零碳飞行氢涡轮发动机热管理技术[J]. 航空动力,2022(4):29-32.
- [8] 赖耀胜,李龙. 氢能飞机发展现状分析[J]. 航空动力,2021(6):37-40.
- [9] 莫姐,林宇震,韩啸,等. 氢气微混燃烧技术进展现状和未来展望[J/OL]. 航空学报,2023:1-24. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20230721.1357.010.html>.

- [10] 邱朋华,卢成,张林瑶,等.氢燃料微混燃烧技术研究进展[J].热能动力工程,2023,38(5):14-23.
- [11] 张扬军,彭杰,钱煜平,等.氢能航空的关键技术与挑战[J].航空动力,2021(1):20-23.
- [12] 王翔宇,刘向雷,韩枫.氢能航空产业配套分析[J].航空动力,2023(3):50-53.
- [13] 李远,赵云松,张迈,等.航空发动机材料氢环境性能研究进展[J].航空动力,2022(5):36-38.
- [14] 陈炜,陈学东,顾望平,等.加氢装置高温氢损伤机理与风险分析[J].腐蚀与防护,2019,40(8):623-626.
- [15] 张军.工业加氢装置的6种腐蚀与选材基准[J].材料保护,2012,45(12):60-62.
- [16] KUILING C , DONGYI S , PERVEZ C .The effect of high-temperature water vapour on degradation and failure of hot section components of gas turbine engines [J].Coatings, 2021, 11 (9): 1061-1061.
- [17] SAUNDERS S R J, MONTEIRO F R , RIZZO F . The oxidation behaviour of metals and alloys at high temperatures in atmospheres containing water vapour: A review [J].Progress in Materials Science, 2008, 53 (5):775-837.
- [18] MARIS-SIDA M C , MEIER G H , PETTIT F S . Some water vapor effects during the oxidation of alloys that are α -Al₂O₃ formers [J].Metallurgical & Materials Transactions A, 2003, 34(11):2609-2619.
- [19] SULLIVAN M H , MUMM D R . Vapor-phase-mediated phenomena associated with high temperature, high water content oxidation of MCrAlX bond coats [J].Oxidation of Metals, 2014, 82(1-2): 1-20.
- [20] SULLIVAN M H, MUMM D R . Transient stage oxidation of MCrAlY bond coat alloys in high temperature, high water vapor content environments [J]. Surface & Coatings Technology, 2014, 258: 963-972.
- [21] SHILLINGTON E A G , CLARKE D R .Spalling failure of a thermal barrier coating associated with aluminum depletion in the bond-coat [J]. Acta Materialia, 1999, 47(4):1297-1305.
- [22] KAPLIN C , BROCHU M .Effects of water vapor on high temperature oxidation of cryomilled NiCoCrAlY coatings in air and low-SO₂ environments [J]. Surface & Coatings Technology, 2011, 205 (17-18) : 4221-4227.
- [23] CLARKE D R , OECHSNER M , PADTURE N P . Thermal-barrier coatings for more efficient gas-turbine engines [J]. Cambridge University Press, 2012, 37 (10): 891-898. .
- [24] PADTURE N P . Advanced structural ceramics in aerospace propulsion [J].Nature Materials, 2016, 15 (8):804.
- [25] 丛凯,高贤志,张宝鹏.航空发动机用环境障涂层的发
- 展[J].推进技术,2021,42(10):2161-2168.
- [26] BOWEN L , ZHAOLIANG Q , BAOSHENG X , et al. Water vapor volatilization and oxidation induced surface cracking of environmental barrier coating systems: A numerical approach [J]. Ceramics International, 2021, 47 (12): 16547-16554..
- [27] PENGJU C , PENG X , ZHUAN L , et al. Water vapor corrosion behavior and failure mechanism of air sprayed bi-layer Yb₂Si₂O₇/SiC and tri-layer Yb₂Si₂O₇/(SiC/Mullite)/SiC environmental barrier coating [J]. Advanced Powder Materials, 2023, 2(1):100064.
- [28] JACOBSON N S .Corrosion of silicon-based ceramics in combustion environments [J]. Journal of the American Ceramic Society, 1993,76(1):3-28.
- [29] CLARKE D R , OECHSNER M , PADTURE N P . Thermal-barrier coatings for more efficient gas-turbine engines [J].MRS Bulletin, 2012, 37 (10): 891-898.
- [30] PADTURE N P . Advanced structural ceramics in aerospace propulsion [J].Nature Materials, 2016, 15 (8):804.
- [31] LANGSTON L S . Anticipated but unwelcome [J]. Mechanical Engineering, 2018, 140(6):36-41.
- [32] ELIZABETH J O , RAIFORD E H J. Paralineer oxidation of CVD SiC in water vapor [J].Journal of the American Ceramic Society, 1997,80(1):197-205.
- [33] RICHARDS T B , YOUNG A K , FRANCQUEVILLE D F , et al. Response of ytterbium disilicate-silicon environmental barrier coatings to thermal cycling in water vapor [J]. Acta Materialia, 2016, 106:1-14.
- [34] GOLDEN R A , MUELLER K , OPILA E J . Thermochemical stability of Y₂Si₂O₇ in high-temperature water vapor [J]. Journal of the American Ceramic Society, 2020,103 (8): 4517-4535.
- [35] ZHU D , LEE K N , MILLER R A .Cyclic failure mechanisms of thermal and environmental barrier coating systems under thermal gradient test conditions [M].Cleveland:John Wiley & Sons Inc,2002.
- [36] HAYNES J A , UNOCIC K A , PINT B A. Effect of water vapor on the 1 100 °C oxidation behavior of plasma-sprayed TBCs with HVOF NiCoCrAlX bond coatings [J].Surface and Coatings Technology, 2013, 215:39-45.
- [37] DÉNEUX V, CADORET Y , HERVIER S , et al. Effect of water vapor on the spallation of thermal barrier coating systems during laboratory cyclic oxidation testing [J].Oxidation of Metals, 2010, 73(s1-2):83-93.
- [38] CHEN W R , WU X , MARPLE B R , et al. Oxidation and crack nucleation/growth in an air-plasma-sprayed thermal barrier coating with NiCrAlY bond coat [J].Surface & Coatings Technology, 2005,

- 197(1):109-115.
- [39] TAMURA M, TAKAHASHI M, ISHII J, et al. Multilayered thermal barrier coating for land-based gas turbines [J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 1999, 8(1):68-72.
- [40] BENNETT A. Properties of thermal barrier coatings [J]. *Materials Science and Technology*, 1986, 2(3): 257-261.
- [41] YANAR N M, STIGER M J, MARIS-SIDA M, et al. The effects of high temperature exposure on the durability of thermal barrier coatings [J]. *Key Engineering Materials*, 2001, 197:145-164.
- [42] SALAZAR A, GOMEZ-GARCIA J, POZA P, et al. Microstructural evolution of thermal barrier coatings during isothermal oxidation [J]. *Key Engineering Materials*, 2007, 333:269-272.
- [43] GOWARD G W. Progress in coatings for gas turbine airfoils [J]. *Surface & Coatings Technology*, 1998, s108-109:73-79.
- [44] Rudolphi M, RENUSCH D, ZSCHAU H E, et al. The effect of moisture on the delayed spallation of thermal barrier coatings: VPS NiCoCrAlY bond coat+APS YSZ top coat [J]. *High Temperature Technology*, 2009, 26(3):325-329.
- [45] PINT B A, HAYNES J A. Effect of water vapour content on thermal barrier coating lifetime [J]. *Materials Science and Technology*, 2013, 29(7):828-834.
- [46] PINT B A, GARNER G W, LOWE T M, et al. Effect of increased water vapor levels on TBC lifetime with Pt-containing bond coatings [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2011, 206(7):1566-1570.
- [47] 侯振宁, 杨文超, 湛永钟, 等. $\text{CeO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ 热障涂层研究进展 [J]. *材料研究与应用*, 2023, 17(5):953-966. DOI:10.20038/j.cnki.mra.2023.000514
- [48] 王斯佳, 徐彤, 刘梅军, 等. 热障涂层失效行为及长寿命设计研究现状 [J]. *材料研究与应用*, 2022, 16(1):1-18.
- [49] 莫丽珍, 李群, 向青云, 等. $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 在高温氢中的稳定性研究 [J]. *陶瓷学报*, 2014, 35(6):567-572.

Research Status and Development Constraints of Hydrogen Aero Engines

LIU Jiayu¹, LUO Na², LI Junchen³, LUO Kuilin³, ZHANG Xiaofeng^{2*}

(1. School of New Energy Science and Engineering, Xinyu University, Xinyu 338000, China; 2. Institute of New Materials, Guangdong Academy of Sciences/National Engineering Laboratory of Modern Materials Surface Engineering Technology/Guangdong Provincial Key Laboratory of Modern Surface Engineering Technology, Guangzhou 510650, China; 3. State-owned Sichuan Machine Factory, Remanufacturing and Blade Repair Center, Chengdu 611937, China)

Abstract: With the intensification of global warming and greenhouse effect, many countries have responded to carbon-neutral plans by launching a large number of new energy programs, covering aerospace, transportation and other fields. Hydrogen energy is the ideal energy source to replace traditional fossil fuels in the aviation industry. At present, major airlines in the world are beginning to layout hydrogen aviation systems. The application of hydrogen energy in the aviation field is widely used, but one of the most important research direction- hydrogen fuel aero-engine is still in the stage of vigorously development and technological innovation. This paper summarizes the new development of hydrogen fuel engine in the field of aviation, and expounds the shortcomings and practical obstacles of hydrogen fuel engine in material application. In this paper, the development status of hydrogen aviation, key technologies of hydrogen aero engine and main constraints of hydrogen aero engine development are introduced. As hydrogen fuel has been concerned and favored, countries around the world have launched research projects to develop hydrogen aircraft, and foreign countries have made some substantial progress in the development of hydrogen aircraft and the promotion of hydrogen aviation related industries. China mainly focuses on hydrogen production (wind energy, light energy and other electrolytic hydrogen production), hydrogen storage, hydrogen supply (hydrogen fuel filling station) and hydrogen fuel cell and automobile research. In order to promote the development of hydrogen aero engine, it is necessary to break through the technical barriers of hydrogen propulsion technology, on-board hydrogen fuel storage technology and hydrogen fuel production and preparation technology in the future, and the aero engine that provides flight power is the primary core point. Although the development prospect of hydrogen aviation has attracted much attention, it still faces many challenges if it is to be implemented on a large scale. In order to realize the large-scale application and promotion of hydrogen aviation aircraft, more in-depth research and development is needed in the core power field and cross-technology field.

Keywords: hydrogen energy aviation; hydrogen energy; hydrogen fuel engine; research status; restrictive factors; hydrogen turbine engine; E-TBCs; TGO

(学术编辑:黎小辉)