

# CoCrAlYTaNCSi 涂层和 ZL101 铸铝合金 的气蚀性能研究

任奕<sup>1,2</sup>, 侯国梁<sup>2</sup>, 张晓亮<sup>1</sup>, 周惠娣<sup>2</sup>, 陈建敏<sup>2</sup>

(1.河北工程大学 材料科学与工程学院, 河北 邯郸 056038;

2.中国科学院兰州化学物理研究所 固体润滑重点实验室, 兰州 730000)

**摘 要:** **目的** 对比研究两种材料在 RP-3 航空煤油和去离子水中的耐气蚀性能, 分析材料的气蚀机理以及介质的理化性质对其的影响机制, 探讨用去离子水代替航空煤油以便快速筛选航空用耐气蚀材料的可行性。**方法** 采用超音速火焰喷涂技术在铸铝合金 (ZL101) 表面均匀喷涂 CoCrAlYTaNCSi 涂层。使用 X 射线衍射仪分析喷涂粉末、涂层和基体材料的物相组成。使用扫描电镜及其自带能谱仪分析材料气蚀前后的形貌以及元素分布。采用纳米压痕仪检测材料的力学性能。使用超声波振动气蚀试验机表征涂层及铸铝合金在航空煤油和去离子水中的气蚀性能。综合考虑两种材料气蚀后的平均侵蚀深度、形貌以及两种液体介质的理化性能, 分析相应气蚀机理。**结果** CoCrAlYTaNCSi 涂层主要由 AlCo、Al<sub>80</sub>Cr<sub>20</sub>、Al<sub>45</sub>Cr<sub>7</sub> 等物相组成, 且分布均匀; 铸铝合金主要由 Al 和 Al<sub>9</sub>Si 相组成, 增强相主要沿晶界分布。涂层的纳米硬度和弹性模量分别约是铸铝的 6 倍和 2 倍。气蚀中, 铸铝合金晶粒内部的 Al 最先被损坏, 加剧了气蚀进程; 而 CoCrAlYTaNCSi 涂层由于物相分布均匀、力学性能优异, 所以损坏程度远轻于铸铝合金, 在水和航空煤油中的平均侵蚀深度分别仅约为铸铝合金的 2% 和 1%。两种材料在航空煤油中的平均侵蚀深度都比在水中的小。**结论** CoCrAlYTaNCSi 涂层的物相分布均匀, 具有较高的致密度、硬度和弹性模量, 其在两种介质中均显示出更高的气蚀抵抗力。但材料在两种液体中的气蚀机理并不相同, 导致在航空煤油介质中, CoCrAlYTaNCSi 涂层显示出更加优异的抗气蚀性能。

**关键词:** 超音速火焰喷涂; CoCrAlYTaNCSi 涂层; 航空煤油; 去离子水; 气蚀

**中图分类号:** TG174.44 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)09-0141-08

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.09.019

## Cavitation Erosion Performances of CoCrAlYTaNCSi Coating and ZL101 Cast Aluminum Alloy

REN Yi<sup>1,2</sup>, HOU Guo-liang<sup>2</sup>, ZHANG Xiao-liang<sup>1</sup>, ZHOU Hui-di<sup>2</sup>, CHEN Jian-min<sup>2</sup>

(1.School of Materials Science and Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 2.Key Laboratory of Solid Lubrication of Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

收稿日期: 2018-04-23; 修订日期: 2018-06-25

**Received:** 2018-04-23; **Revised:** 2018-06-25

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (51601203); 河北省高等学校自然科学青年拔尖人才项目 (BJ2016009)

**Fund:** Supported by the National Natural Science Foundation of China (51601203) and The Young Talents of Colleges and Universities of Hebei Province (BJ2016009)

**作者简介:** 任奕 (1991—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为热喷涂耐气蚀涂层的制备及性能评价。

**Biography:** REN Yi (1991—), Male, Master, Research focus: preparation and properties evaluation of thermally sprayed cavitation erosion resistant coatings.

**通讯作者:** 张晓亮 (1986—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为表面涂层。

**Corresponding author:** ZHANG Xiao-liang (1986—), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: surface coatings.

**ABSTRACT:** The work aims to comparatively study the cavitation erosion performance of two materials in RP-3 aviation kerosene and deionized water, analyze the cavitation erosion mechanism and the influence of physical and chemical properties of medium and discuss the feasibility to replace aviation kerosene with deionized water so as to quickly select the anti-cavitation erosion materials used in aviation system. CoCrAlYTaCSi coating was prepared on the surface of cast aluminum alloy (ZL101) by high velocity oxy-fuel spraying (HVOF). Phase compositions of spraying powder, coating and substrate were analyzed by X-ray diffraction (XRD), and morphology and distribution of elements on the surface of materials before and after the cavitation erosion tests were detected by scanning electron microscope (SEM) and the built-in energy dispersive X-ray analyzer. A nano-indentation tester was used to measure the mechanical properties of materials. Avibration-induced laboratory cavitation tester was adopted to characterize the cavitation erosion of CoCrAlYTaCSi coating and cast aluminum respectively in aviation kerosene and deionized water. The corresponding cavitation erosion mechanism was analyzed by overall considering the mean depth of erosion and morphology of two materials after cavitation as well as the physical and chemical properties of two liquid medium. CoCrAlYTaCSi coating was mainly composed of AlCo, Al<sub>80</sub>Cr<sub>20</sub> and Al<sub>45</sub>Cr<sub>7</sub> phases, and all the phases were evenly distributed. Cast aluminum was mainly composed of Al and Al<sub>6</sub>Si phases, and the enhancement phases were mainly distributed along the grain boundaries. The nanohardness and elastic modulus of Co based coating were about 6 and 2 times higher than those of cast aluminum, respectively. The Al phase inside grains of cast aluminum was firstly damaged, thus aggravating its cavitation erosion process. The damage degree of Co based coating was far slighter than that of cast aluminum because of even distribution of phase and excellent mechanical properties. Its mean depth of erosion in water and aviation kerosene were only about 2% and 1% of those in cast aluminum. The mean erosion depth of two materials in aviation kerosene was less than that in water. The CoCrAlYTaCSi coating shows excellent cavitation erosion resistance in two mediums due to even distribution of phase, higher density, hardness and elastic modulus. Furthermore, this coating exhibits far better anti-cavitation erosion performance in aviation kerosene owing to the different cavitation erosion mechanisms in two liquids.

**KEY WORDS:** HVOF; CoCrAlYTaCSi coating; aviation kerosene; deionized water; cavitation erosion

液体在快速流动过程中,因内部压强发生剧烈变化,大量气泡生成并瞬间溃灭产生高速、高压的冲击波和微射流,若空泡溃灭发生在固体表面附近,固体表面将受到反复冲击而发生疲劳断裂,即气蚀<sup>[1,2]</sup>。气蚀在众多过流部件中普遍存在,比如水轮机叶片、阀门、螺旋桨和船舵等<sup>[3-6]</sup>。作为航空发动机的核心部件,铸铝燃油泵和加力泵等也存在着严重的气蚀问题,并且随着航空发动机向大功率、高转速、高温和高可靠性的方向发展,对这些泵的耐气蚀性能提出了更高的要求<sup>[7-9]</sup>。

目前,延长过流部件服役寿命的方法主要有两种。一种是通过优化过流部件的剖面几何参数来抑制空泡的形成,比如 Thai Q 等<sup>[10]</sup>和郭晓梅等<sup>[11]</sup>分别提出了长短叶片结合使用以及加放前置诱导轮的设计理念,从而优化燃油泵和离心泵的抗气蚀特性。尽管这些方法在一定程度上减轻了泵的气蚀损坏,但是仍无法从根本上消除气蚀问题。泵的壳体、叶轮和齿轮等仍然存在较为严重的气蚀,甚至存在击穿和断裂的危险,严重影响发动机的长期安全运行。因此,研发抗气蚀性能更好的材料成为提高相关部件使役性能的另一种重要方法。

相比于研发新型整体合金材料,利用表面技术在现有的零部件表面制备抗气蚀性能更好的涂层材料

无疑具有明显优势。一方面可以有效节约研制零部件的经济成本,另一方面基体材料能够继续使用原有的材料,这对减轻飞机质量,进而提高其推重比等性能具有十分重要的意义<sup>[12]</sup>。在多种表面技术中,热喷涂具有喷涂材料种类多、不受基体尺寸限制、涂层成分和厚度可控等众多优点,成为制备抗气蚀涂层的主要途径之一<sup>[13]</sup>。至今,研究人员已研发出多种具有优异抗气蚀性的热喷涂涂层材料。例如, Martin B 等<sup>[14]</sup>对比研究了低压等离子喷涂制备的 NiTi 合金涂层和 UTP730 块体合金在去离子水中的气蚀性能,发现尽管表面粗糙度和孔隙等缺陷影响 NiTi 涂层的抗气蚀性能,但其仍表现出比 UTP730 合金更好的抗气蚀特性,并且提高喷涂功率和增加涂层厚度都有利于进一步提高涂层的气蚀抵抗力。Hou G L 等<sup>[15]</sup>研究发现, Fe 基非晶涂层因兼具高硬度和高致密度,在去离子水环境中显示出非常优异的抗气蚀性;而 WC-17Co 和 CoMoCrSi 涂层表面因可以在海水中生成一层致密的反应膜,不仅可以填充涂层中的固有空隙,而且能够在一定程度上增强扁平粒子间的内聚强度,从而显示出非常好的抗气蚀特性。

尽管目前已研发出多种具有优异抗气蚀性能的涂层材料,并且部分产品已经应用于水轮机叶片等部件表面,但目前关于材料抗气蚀性能的评价以及相关

机理的分析大部分都是针对水介质环境<sup>[16,17]</sup>, 针对航空发动机部件实际运行的液体介质——航空煤油的研究并不多, 相关机理缺乏。航空煤油的理化性能与水差异明显<sup>[9,18]</sup>, 比如前者具有更小的饱和蒸气压、气相密度、气相动力粘度和表面张力等, 这些理化参数对于气泡的形成、破灭及其对附近材料表面造成的冲击力等都有显著影响, 进而影响材料的抗气蚀机理及其使役性能。

综上所述, 本文对 ZL101 铸铝合金和铸铝合金表面的超音速火焰喷涂 CoCrAlYTaNi 涂层在 RP-3 航空煤油和去离子水中的气蚀性能进行了对比研究, 通过分析表征两种材料的物相组成和力学性能, 研究两种材料在不同介质中的气蚀机理。明确两种材料在不同液体中的气蚀机理, 进而探讨使用去离子水代替航空煤油进行燃油系统用材料的气蚀加速试验的可行性。希望通过本文的研究, 能为航空系统耐气蚀材料的选择以及实际应用提供理论依据。

# 1 实验部分

## 1.1 涂层的制备

气蚀试样是 ZL101 铸铝合金和在该基体上制备的 CoCrAlYTaNi 涂层。ZL101 砂型铸铝合金尺寸为 30 mm×24 mm×10 mm, 表 1 为该材料的化学组成<sup>[19]</sup>。喷涂粉末选用雾化法制得的 CoCrAlYTaNi 粉末, 其粒径分布为 15~45 μm, 具体化学组成见表 2。使用 DJ-2700 型超音速火焰喷涂设备在铸铝合金基材表面 (30 mm×24 mm) 均匀喷涂制备一层厚度约为 400 μm 的 CoCrAlYTaNi 涂层。为保证喷涂过程的均匀性和可重复性, 使用 IRB2400 型六轴联动机械臂进行喷涂作业, 采用的优化喷涂参数见表 3。喷涂前, 用粒度约为 80~120 μm 的石英砂对基材表面进行喷砂粗化处理, 喷砂后采用丙酮溶液进行超声波清洗, 以加强涂层与基体之间的结合强度。

表 1 ZL101 铸铝合金化学成分  
Tab.1 Chemical composition of ZL101aluminum alloy

Element	Si	Mg	Fe	Cu	Zn	Mn	Ti+Zr	Be	Sn	Pb	Al
wt%	7.5	0.28	0.16	0.2	0.3	0.4	0.15	0.1	0.01	0.05	Bal.

表 2 CoCrAlYTaNi 粉末和涂层的化学组成  
Tab.2 Chemical composition of CoCrAlYTaNi powder and coating

Materials	Composition/wt%							
	Co	Cr	Al	Y	Ta	C	Si	O
Powders	55.30	26.55	5.33	0.85	10.07	0.82	1.08	—
Coating	55.27	26.21	5.04	0.90	10.74	0.87	0.97	—

表 3 CoCrAlYTaNi 涂层喷涂参数  
Tab.3 CoCrAlYTaNi coating spraying parameters

Parameters	Value
Oxygen flow rate/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	20
Natural gas flow rate/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	13
Air flow rate/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	19
Feed rate/(g·min <sup>-1</sup> )	20
Movement speed/(m·s <sup>-1</sup> )	1
Spacing/mm	3
Spraying distance/cm	27

## 1.2 气蚀实验

利用超声波振动气蚀试验机对 ZL101 铸铝合金和在其表面制备的 CoCrAlYTaNi 涂层的抗气蚀性能进行评价, 图 1 为该气蚀试验机装置的示意图。气蚀实验前, 铸铝合金和涂层样块表面分别用水砂纸和金刚石研磨膏抛磨至镜面 ( $Ra \leq 0.1 \mu m$ )。气蚀实验的具体参数是: 样品表面距离振动顶端的间距为 0.5 mm, 振动顶端的上试样直径为  $(16 \pm 0.02)$  mm, 样品表面浸入介质的深度为  $(12 \pm 4)$  mm, 设备水循环系

统将流体介质的温度控制在  $(25 \pm 2)$  °C 范围内, 频率为 20 kHz, 振幅为 25 μm, 试验时间为 10 h。液体介质为去离子水和 RP-3 航空煤油, 两种液体介质的基本理化性质见表 4。试验过程中, 用精度为 0.0001 g 的天平称量样品在经过不同气蚀时间后的质量损失。用 AccuPyc 1330 型全自动真密度分析仪测试铸铝合金

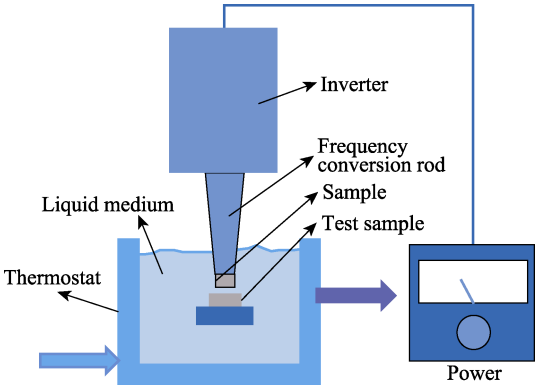


图 1 超声波振动气蚀装置示意图  
Fig.1 Illustration of ultrasonic vibrationcavitation erosion test rig

表 4 RP-3 航空煤油和去离子水的理化参数<sup>[9,18]</sup>  
Tab.4 Physical and chemical properties of RP-3 aviation kerosene and deionized water<sup>[9,18]</sup>

Physical and chemical properties	RP-3 Aviation kerosene (25 °C)	Deionized water (25 °C)
Saturated vapor pressure/Pa	1781	3169
Liquid density/(kg·m <sup>-3</sup> )	744.9	997.0
Vapor density/(kg·m <sup>-3</sup> )	0.002 11	0.022 88
Liquid phase viscosity/(×10 <sup>-6</sup> Pa·s)	927	893
Steam viscosity/(×10 <sup>-6</sup> Pa·s)	5.12	9.7
Surface tension/(mN·m <sup>-1</sup> )	24.1	72

和涂层密度,并计算出样品的体积损失,然后根据气蚀斑的尺寸,最终得出样品的平均侵蚀深度。

### 1.3 涂层及样块表征

使用 JSM-5600LV 扫描电子显微镜 (SEM) 表征喷涂粉末、涂层和铸铝合金的形貌,用能谱仪分析元素含量及分布。利用 X 射线衍射仪 (Philips X'Pert MPD) 分析物相组成。采用 NHT02-05987 纳米压痕仪检测材料表面的力学性能,具体测试条件为:载荷 10 mN,加载和卸载速率 20 mN/min,持续时间 10 s。所有数值均为 15 次测量结果的平均值。

## 2 结果与讨论

### 2.1 材料的物相组成和组织结构

图 2 是 CoCrAlYTaCSi 喷涂粉末的 SEM 照片,可以看出,它们大都是 15~45 μm 的球形粉末颗粒,说明其具有良好的流动性,有利于喷涂时粉末的均匀输送,以便制备出高质量的涂层。从粉末的 XRD 图谱 (图 3a) 中可以看出,该喷涂粉末主要由 AlCo、Al<sub>80</sub>Cr<sub>20</sub>、Al<sub>45</sub>Cr<sub>7</sub>、TaC 和 SiC 等物相组成,也就是说粉末中除合金相以外,还有少量碳化物硬质相。所制备涂层的元素含量 (见表 2) 和物相组成 (见图 3a) 与其粉末基本一致,没有氧化物生成,说明在喷涂沉积过程中, HVOF 焰流的高温并未对粉末造成明显的氧化,这主要是因为 HVOF 的焰流温度较低,且速度快 (约 5~7 Ma),致使粉末在焰流中的驻留时间非常短。

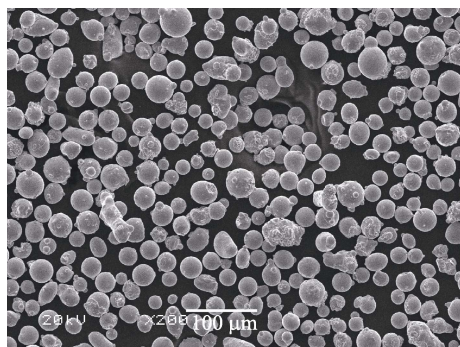
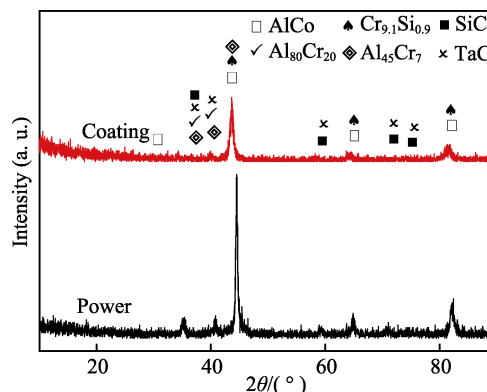
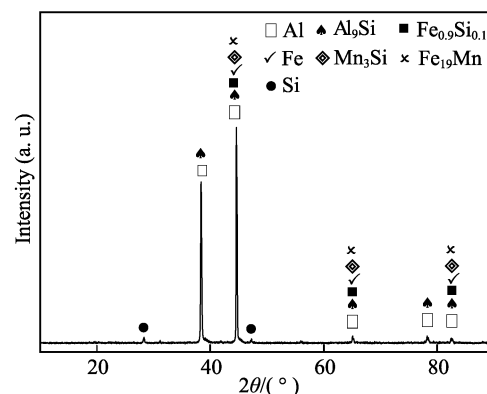


图 2 CoCrAlYTaCSi 粉末的 SEM 形貌  
Fig.2 SEM morphology of the CoCrAlYTaCSi powder



a CoCrAlYTaCSi 粉末和其涂层



b ZL101 铸铝合金

图 3 材料的 XRD 图谱

Fig.3 XRD patterns of materials: a) CoCrAlYTaCSi powder and coating, b) ZL101 cast aluminum alloy

图 4 为 CoCrAlYTaCSi 涂层的表面形貌以及相应的元素面分布图。显然,涂层中各元素的分布较为均匀,说明涂层中各物相均匀分布,即涂层不同区域的物相成分一致。图 5 是涂层截面的 SEM 形貌图,可以看出,涂层内部存在少量尺寸较小的孔隙,但没有厚度方向的贯穿孔或内部裂纹存在。该组织结构的形成与喷涂粉末在 HVOF 较高的焰流速度加速下撞击基材表面,以及层与层之间不断沉积时粉末发生的塑性变形和继而的铺展程度密切相关,而涂层中存在的少量孔隙是热喷涂涂层内部组织具有的共同特征。

从图 3b 给出的 ZL101 铸铝合金的 XRD 图谱中可以看出,该合金主要由 Al、Al<sub>3</sub>Si 相以及少量的 Fe<sub>0.9</sub>Si<sub>0.1</sub>、Mn<sub>3</sub>Si、Fe 和 Fe<sub>19</sub>Mn 相组成。通过分析铸



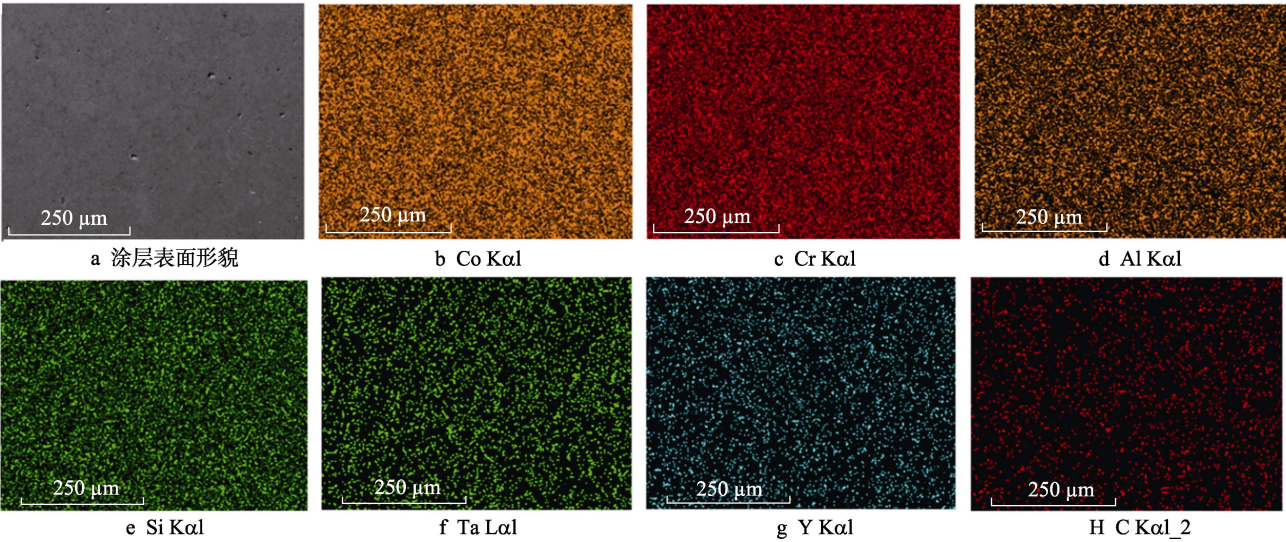


图 4 CoCrAlYTaNCSi 涂层表面形貌以及元素面分布图  
Fig.4 BSE image and corresponding elemental mapping of the surface of CoCrAlYTaNCSi coating

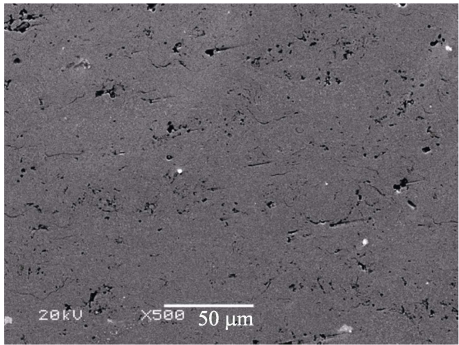


图 5 CoCrAlYTaNCSi 涂层截面的 SEM 形貌图  
Fig.5 SEM image of the cross section of CoCrAlYTaNCSi coating

铝合金表面的 BSE 形貌和面分布 (见图 6) 结果可以看出, Si、Fe 和 Mn 元素主要沿晶界分布。另外, Fe 和 Mn 元素在一定程度上存在偏析现象, 说明该 ZL101 铸铝合金中各元素的分布不均匀, 即含有 Si、Fe、Mn 元素的增强相主要存在于晶界处, 而硬度较低的 Al 相主要分布在晶粒内部。

2.2 材料的力学性能

使用纳米压痕仪对 CoCrAlYTaNCSi 涂层和 ZL101 铸铝合金表面的力学性能进行了测试, 其结果见图 7。铸铝合金的纳米硬度仅为(1.86±0.60) GPa, 其弹性模量也仅为(95.14±7.10) GPa, 而涂层的纳米硬度和弹性

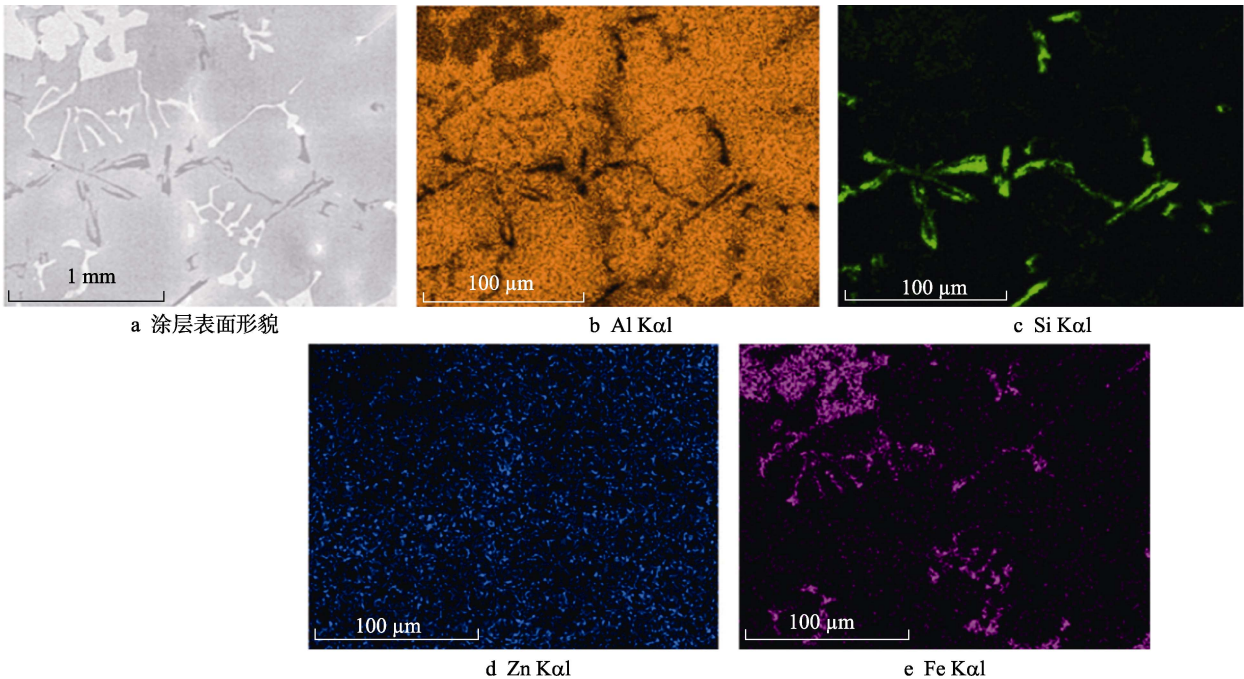


图 6 ZL101 铸铝合金表面的 BSE 形貌以及主要组成元素的面分布图  
Fig.6 BSE image and major constituent elements mapping of the surface of ZL101 cast aluminum alloy

模量分别高达 $(11.36 \pm 1.76)$  GPa 和 $(187.89 \pm 21.95)$  GPa, 分别约是铸铝合金的 6 倍和 2 倍。这是由于 CoCrAlYTCSi 涂层中的 AlCo、 $\text{Al}_{80}\text{Cr}_{20}$ 、 $\text{Al}_{45}\text{Cr}_7$  等合金相具有比 Al 和  $\text{Al}_3\text{Si}$  等相更高的硬度和强度,同

时相比于铸铝合金,涂层中均匀分布的 TaC 和 SiC 相也起到了明显的增强作用<sup>[20]</sup>。因此, CoCrAlYTCSi 涂层比 ZL101 铸铝合金表现出更为优异的力学性能。

## 2.3 材料的气蚀性能

图 8 给出了涂层和铸铝两种材料分别在航空煤油和去离子水中,经不同气蚀测试时间后的平均侵蚀深度变化曲线图。很显然,两种材料在 RP-3 中的平均侵蚀深度远远低于其在去离子水中的。具体来说,铸铝合金在水中几乎没有孕育期,从起始阶段,该材料就显示出明显的材料损失,随测试时间的变化曲线近乎于斜线,气蚀 10 h 后的平均侵蚀深度高达  $276.82 \mu\text{m}$ 。但是铸铝合金在航空煤油中却表现出明显的孕育期,气蚀 0.5 h 后的平均侵蚀深度不足  $0.18 \mu\text{m}$ ,气蚀 10 h 后的平均侵蚀深度为  $13.82 \mu\text{m}$ ,仅为其在去离子水中的 5%。与 ZL101 合金不同, CoCrAlYTCSi 涂层在去离子水中显示出较长的孕育期,气蚀 1 h 后的平均侵蚀深度仅为  $0.07 \mu\text{m}$ ;从 2 h 到 5 h,涂层的平均侵蚀深度缓慢增加,6 h 后该材料的损失速度加快,气蚀 10 h 后的平均侵蚀深度为  $5.76 \mu\text{m}$ 。当液体介质换为 RP-3 后, CoCrAlYTCSi 涂层的孕育期更长,气蚀 7 h 后的平均侵蚀深度仅为  $0.07 \mu\text{m}$ ,气蚀 10 h 后的平均侵蚀深度也仅为  $0.14 \mu\text{m}$ ,仅为其在去离子水中的 2.4%。进一步对比两种材料在同一种液体介质中的气蚀性能,不难看出,涂层在水中的气蚀抵抗力是铸铝合金的 48 倍,在航空煤油中则是铸铝合金的 100.7 倍。上述结果说明,两种材料在航空煤油中均具有好的抗气蚀性能,其中 CoCrAlYTCSi 涂层在航空煤油中显现出更加优异的耐气蚀性能。

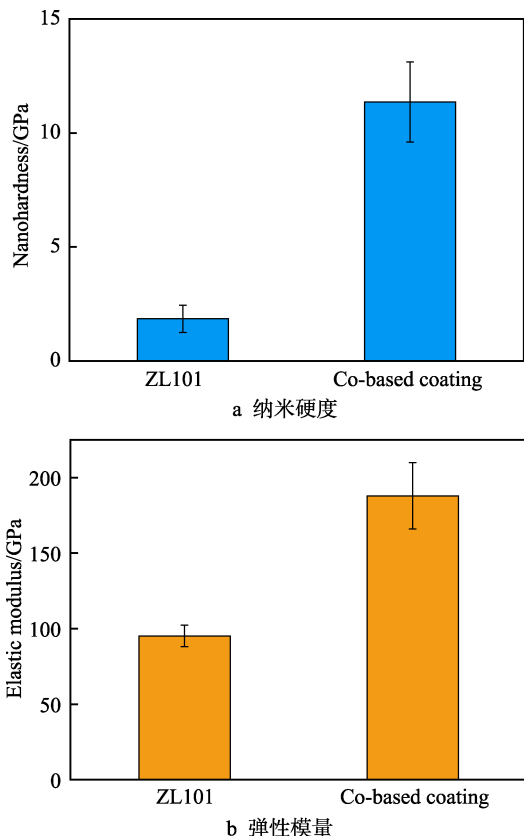


图 7 两种材料的力学性能

Fig.7 Mechanical properties of two kinds of materials:  
a) nanohardness, b) elastic modulus

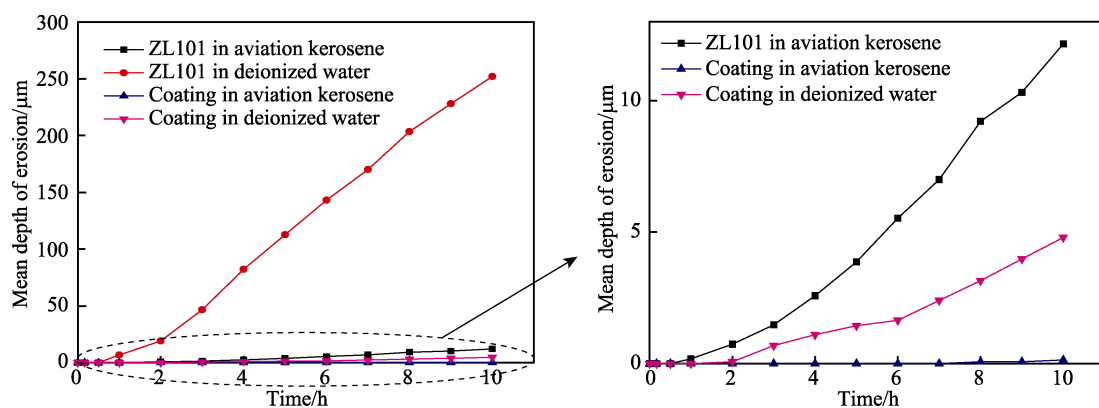


图 8 两种材料的平均侵蚀深度曲线

Fig.8 Curves of mean erosion depth of two materials

为了更好地分析上述材料在不同介质中的气蚀机理,对气蚀 10 h 后两种材料的表面气蚀形貌分别进行了 SEM 表征,结果见图 9。铸铝合金在去离子水中气蚀 10 h 后,表面损坏程度十分严重,出现尺寸非常大的坑洞,有些甚至高达几百微米(见图 9a),

从给出的宏观照片中就能很明显地看到铸铝合金气蚀后表面形成了严重的气蚀坑。导致该气蚀结果的原因是由于铸铝内部物相分布不均匀,当气蚀开始后,空泡溃灭产生的高速、高压冲击波优先选择损伤晶粒内部较软的 Al 相,即晶粒内部率先被“掏空”,当相



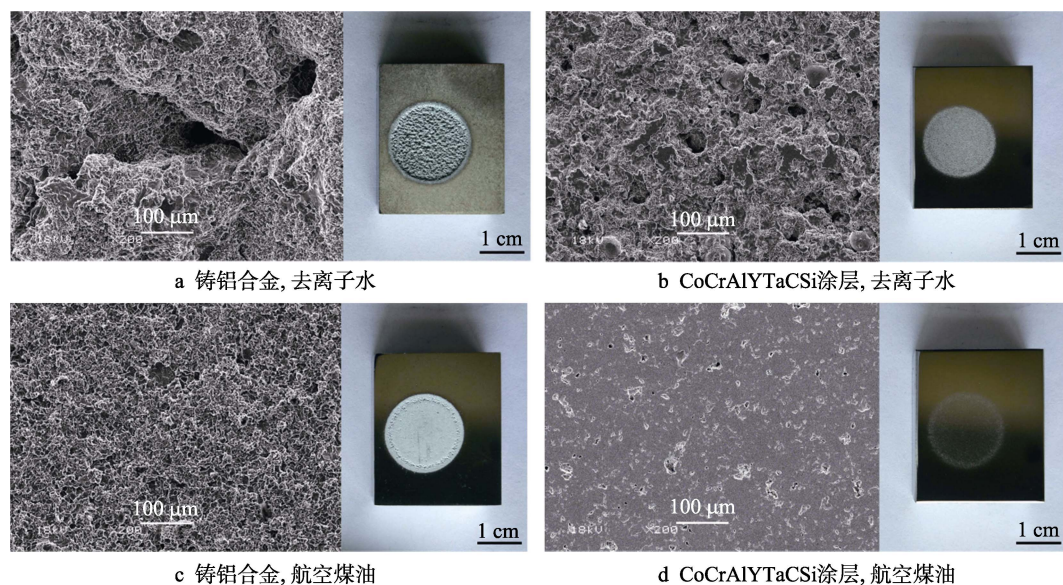


图 9 两种材料在不同液体介质中气蚀 10 h 后的表面形貌和宏观数码照片

Fig.9 SEM images and macro digital photos of two materials after 10 h cavitation erosion tests in different liquid mediums: a) morphology of ZL101 cast aluminum alloy after cavitation erosion in deionized water, b) morphology of CoCrAlYTaCSi coating after cavitation erosion in deionized water, c) morphology of ZL101 cast aluminum alloy after cavitation erosion in aviation kerosene, d) morphology of CoCrAlYTaCSi coating after cavitation erosion in aviation kerosene

邻晶粒的内部都被损伤后,将诱导更多的空泡在气蚀坑中形成<sup>[21]</sup>,形成更强的破坏作用,随即晶粒的边界也被损失掉,导致相邻的小气蚀坑连接在一起,进而形成尺寸更大的坑洞,最终显著恶化了这种材料的耐气蚀性能。

对于 CoCrAlYTaCSi 涂层而言,可以发现,在去离子水中气蚀 10 h 后的表面损坏程度明显比铸铝合金的轻微,表面仅有一些尺寸为几十微米的小孔洞,并且仍有一些抛光状态的区域保留在涂层表面上(图 9b)。这表明力学性能以及组织均匀性更好的该涂层,能够更好地抵抗空泡溃灭产生的机械冲击。涂层表面上几十微米的孔洞产生的原因应该是在机械冲击力的反复作用下,裂纹优先在内聚力相对弱一些的扁平粒子间的界面处萌生,随着裂纹继续沿界面扩展,最终导致了扁平粒子的片状剥落<sup>[15,21]</sup>。

观察分析两种材料在航空煤油中气蚀 10 h 后的表面形貌可知,两种材料的气蚀损坏程度都比在去离子水中显著减轻,从图 9c 和 9d 给出宏观照片很好地验证了该现象。虽然铸铝合金表面在机械冲击力的作用下产生了明显损伤,但气蚀坑的尺寸远小于在去离子水中的尺寸;而 CoCrAlYTaCSi 涂层的损伤程度则更加轻微,气蚀表面仍存在较为完好的抛光区,仅有少量小尺寸剥落坑和针孔存在。

对比两种液体介质的理化性能可知,两种流体介质的液相密度和液相动力粘度相差并不大,显然这不是导致同一种材料在两种液体中的平均侵蚀深度相差几十倍(见图 8)的主要原因。而航空煤油的饱和蒸气压、气相密度、气相动力粘度以及表面张力都远低于去离子水,分别仅为后者的 56%、9%、53%和

33.5%,这些因素显著影响着气泡在液体中的形成和溃灭,而气泡形成和溃灭的难易程度和强度则直接影响材料表面在该液体介质中因气蚀损坏的程度。具体来说,相同超声波振动条件下,饱和蒸气压更小的航空煤油更难气化,气泡更难形成,也就是说在航空煤油中形成的气泡总量远小于在水中的。但是,由于航空煤油的气相密度和气相动力粘度远小于水,因此气泡在航空煤油中一旦形成,它们就会迅速长大;加之航空煤油的表面张力小,所以形成的气泡不易破裂且更容易相互结合,继而形成更大的气泡。在实验过程中,也可以明显观察到在航空煤油中,有部分大气泡会背离待测样品表面运动,并最终浮出介质表面,也就是说在航空煤油中气泡破裂产生的冲击强度也远小于在水中的。由于在航空煤油中形成气泡的数量以及气泡溃灭产生的冲击强度都远小于在水中的,最终导致两种材料在航空煤油中的气蚀损坏程度都更加轻微。

由于 CoCrAlYTaCSi 涂层具有比 ZL101 铸铝合金更好的组织均匀性和力学性能,因此在航空煤油中空泡溃灭产生的机械冲击强度更难对涂层造成损害,致使涂层在航空煤油中显示出比铸铝合金更加优异的气蚀抵抗力,也就是说,相对于在水环境中运行的过流部件,制备的 CoCrAlYTaCSi 涂层有望更好地保护在航空煤油中运行的零件,可显著改善其抗气蚀性能,并延长其服役寿命。另外,尽管由于气泡在不同液体介质中形成和溃灭的机制不同,造成材料在去离子水中的气蚀损失程度远大于在航空煤油中的,但是鉴于材料在航空煤油中气蚀损失速率太慢且程度太小,无法快速评价不同材料抗气蚀性能的优劣,尤其

是对于抗气蚀性能差别不大的材料,因此在未来的研究中,使用去离子水代替航空煤油对拟用于航空发动机系统的耐气蚀涂层材料进行气蚀加速试验,是一种较为便捷和可靠的方式。

### 3 结论

1) HVOF 制备的 CoCrAlYTaCSi 涂层的物相分布均匀,具有较高的致密度、硬度和弹性模量。ZL101 铸铝合金中的增强相主要沿晶界分布,其力学性能远低于所制备的涂层。

2) 航空煤油和去离子水两种液体介质的理化性能差异明显,导致材料在航空煤油中受到的机械冲击强度弱于在去离子水中的,因此两种材料在 RP-3 航空煤油中都表现出更好的耐气蚀性能。

3) CoCrAlYTaCSi 涂层的组织均匀性和力学性能都优于 ZL101 铸铝合金,因此涂层在两种介质中均显示出更高的气蚀抵抗力,特别是在 RP-3 航空煤油介质中,该涂层的耐气蚀性能仍优于铸铝合金。

#### 参考文献:

- [1] NAIR R B, ARORA H S, MUKHERJEE S, et al. Exceptionally high cavitation erosion and corrosion resistance of a high entropy alloy[J]. *Ultrasonics sonochemistry*, 2018, 41: 252-260.
- [2] LIAN Ji-jian, GOU Wen-juan, LI Hui-ping, et al. Effect of sediment size on damage caused by cavitation erosion and abrasive wear in sediment-water mixture[J]. *Wear*, 2018, 398-399: 201-208.
- [3] KREBS S, GÄRTNER F, KLASSEN T. Cold spraying of Cu-Al-bronze for cavitation protection in marine environments[J]. *Journal of thermal spray technology*, 2015, 24(1-2): 126-135.
- [4] LIU H, ZHANG T, KANG C. Evaluation of cavitation erosion resistance of copper alloy in different liquid media[J]. *Materials & corrosion*, 2018, 69: 917-925.
- [5] GOTTARDI G, TOCCI M, MONTESANA L, et al. Cavitation erosion behaviour of an innovative aluminium alloy for hybrid aluminium forging[J]. *Wear*, 2018, 394-395: 1-10.
- [6] DENG Wen, HOU Guo-liang, LI Shuang-jian, et al. A new methodology to prepare ceramic-organic composite coatings with good cavitation erosion resistance[J]. *Ultrasonics sonochemistry*, 2018, 44: 115-119.
- [7] 王维夫, 王茂才, 孙凤久, 等. 三种航空发动机供油系统典型部件的气蚀[J]. *金属热处理*, 2007(S1): 66-70.  
WANG Wei-fu, WANG Mao-cai, SUN Feng-jiu, et al. Cavitation erosion of three typical components in aero-engine fuel system[J]. *Heat treatment of metals*, 2007(S1): 66-70.
- [8] 崔永静, 陆峰, 高俊国, 等. 等离子喷涂 YSZ 涂层瞬态超高温冲蚀性能研究[J]. *装备环境工程*, 2016, 13(3): 31-36.  
CUI Yong-jing, LU Feng, GAO Jun-guo, et al. Transient ultra-high temperature erosion resistance of plasma spray YSZ coatings[J]. *Equipment environmental engineering*, 2016, 13(3): 31-36.
- [9] 顾玲燕, 陈泰然, 王国玉, 等. RP-3 航空燃油非定常空化流动特性研究[J]. *航空科学技术*, 2016, 27(11): 52-60.  
GU Ling-yan, CHEN Tai-ran, WANG Guo-yu, et al. Study on unsteady cavitating flow characteristics of RP-3 aviation-fuel[J]. *Aeronautical science & technology*, 2016, 27(11): 52-60.
- [10] THAI Q, LEE C. The cavitation behavior with short length blades in centrifugal pump[J]. *Journal of mechanical science & technology*, 2010, 24(10): 2007-2016.
- [11] 郭晓梅, 李昶, 崔宝玲, 等. 前置不同诱导轮高速离心泵旋转空化特性研究[J]. *航空学报*, 2013, 34(7): 1572-1581.  
GUO Xiao-mei, LI Yi, CUI Bao-ling, et al. Research on the rotation cavitation performance of high-speed rotation centrifugal pump with different pre-positioned inducers[J]. *Acta aeronautica et astronautica sinica*, 2013, 34(7): 1572-1581.
- [12] GARCÍA-GARCÍA D M, GARCÍA-ANTÓN J, IGUAL-MUÑOZ A, et al. Effect of cavitation on the corrosion behaviour of welded and non-welded duplex stainless steel in aqueous LiBr solutions[J]. *Corrosion science*, 2006, 48(9): 2380-2405.
- [13] LAMANA M S, PUKASIEWICZ A G M, SAMPATH S. Influence of cobalt content and HVOF deposition process on the cavitation erosion resistance of WC-Co coatings[J]. *Wear*, 2018, s398-399: 209-219.
- [14] BITZER M, RAUHUT N, MAUER G, et al. Cavitation-resistant NiTi coatings produced by low-pressure plasma spraying (LPPS)[J]. *Wear*, 2015, 328-329: 369-377.
- [15] HOU Guo-liang, ZHAO Xiao-qin, ZHOU Hui-di, et al. Cavitation erosion of several oxy-fuel sprayed coatings tested in deionized water and artificial seawater[J]. *Wear*, 2014, 311: 81-92.
- [16] QIAO Lei, WU Yu-ping, HONG Sheng, et al. Relationships between spray parameters, microstructures and ultrasonic cavitation erosion behavior of HVOF sprayed Fe-based amorphous/nanocrystalline coatings[J]. *Ultrasonics sonochemistry*, 2017, 39: 39-46.
- [17] LAIGNE S, POUGOU M, SAVOIE S, et al. Cavitation erosion behavior of HVOF Cavi Tec coatings[J]. *Wear*, 2017, 386-387: 90-98.
- [18] LIN Yang, LIN Yu-zhen, ZHANG Chi, et al. Evaluation of combustion performance of a coal-derived synthetic jet fuel[C]//ASME Turbo Expo 2012. Copenhagen, Denmark: [s. n.], 2012: 569.
- [19] 张峰浩. AlCuFe 准晶的制备及其与 SiC 分别增强 ZL101 的研究[D]. 太原: 中北大学, 2016.  
ZHANG Feng-hao. Preparation of AlCuFe quasicrystals and their enhancement with SiC to enhance ZL101[D]. TaiYuan: North University of China, 2016.
- [20] HOU Guo-liang, AN Yu-long, ZHAO Xiao-qin, et al. Effect of alumina dispersion on oxidation behavior as well as friction and wear behavior of HVOF-sprayed CoCrAlY-TaCSi coating at elevated temperature up to 1000 °C[J]. *Acta materialia*, 2015, 95: 164-175.
- [21] WU Yu-ping, LIN Ping-hua, CHU Cheng-lin, et al. Cavitation erosion characteristics of a Fe-Cr-Si-B-Mn coating fabricated by high velocity oxy-fuel (HVOF) thermal spray[J]. *Materials letters*, 2007, 61: 1867-1872.