引用格式：刘建武，裴云震，刘伟杰，等.纯铝基体表面原位微锻冷喷涂制备Ti6Al4V抗空蚀涂层[J].材料工程，2025，53(12)：24-31.
LIU Jianwu，PEI Yunzhen，LIU Weijie，et al.Ti6Al4V anti-cavitation coating prepared by *in-situ* micro-forging cold spraying on aluminum substrate[J].Journal of Materials Engineering，2025，53(12)：24-31.

纯铝基体表面原位微锻冷喷涂制备Ti6Al4V抗空蚀涂层

Ti6Al4V anti-cavitation coating prepared by *in-situ* micro-forging cold spraying on aluminum substrate

刘建武[1]，裴云震[2,3]，刘伟杰[2]，邓春明[2]，褚 欣[2]，谢迎春[2*]
（1 中国航发湖南动力机械研究所，湖南 株洲 412002；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，广州 510651；3 广西大学 机械工程学院 激光智能制造与精密加工研究所，南宁 530004）
LIU Jianwu[1]，PEI Yunzhen[2,3]，LIU Weijie[2]，DENG Chunming[2]，CHU Xin[2]，XIE Yingchun[2*]
（1 AECC Hunan Aviation Powerplant Research Institute，Zhuzhou 412002，Hunan，China；2 National Engineering Laboratory for Modern Materials Surface Engineering Technology，Institute of New Materials，Guangdong Academy of Sciences，Guangzhou 510651，China；3 Institute of Laser Intelligent Manufacturing and Precision Machining，School of Mechanical Engineering，Guangxi University，Nanning 530004，China）

摘要：为解决铝合金过流器械表面的空蚀防护问题，采用原位微锻冷喷涂技术制备Ti6Al4V涂层。在喷涂过程中将大尺寸202不锈钢喷丸颗粒混入Ti6Al4V粉末中，促进Ti6Al4V粉末的塑性变形，形成致密的涂层。利用光学显微镜、扫描电镜、显微硬度计、超声波空蚀试验机、三维轮廓仪研究冷喷涂工艺参数对Ti6Al4V涂层质量的影响，得出最佳工艺参数。结果表明：随着喷丸颗粒含量的增加，Ti6Al4V涂层的孔隙率降低。当喷丸含量为70%（体积分数）时，Ti6Al4V涂层组织致密，孔隙率仅为0.46%；涂层显微硬度逐渐提升，最高为394$HV_{0.3}$，高于锻造Ti6Al4V合金硬度（370$HV_{0.3}$）。空蚀实验表明，经2 h空蚀后，Ti6Al4V涂层的空蚀深度最低仅为4.742 μm，抗空蚀性能是Al基体（365.199 μm）的77倍。采用原位微锻冷喷涂制备的Ti6Al4V涂层致密、硬度高、颗粒间结合良好，可以有效抑制空蚀过程中裂纹的萌生、扩展导致的颗粒脱落，因此具有良好的抗空蚀性能。

关键词：冷喷涂；原位微锻；Ti6Al4V；涂层；抗空蚀性能
doi：10.11868/j.issn.1001-4381.2025.000175 **CSTR**：32421.14.j.issn.1001-4381.2025.000175
中图分类号：TG174.44 **文献标识码**：A **文章编号**：1001-4381(2025)12-0024-08

Abstract: To solve the problem of cavitation protection on the surface of aluminum alloy flow-handling components, Ti6Al4V coatings are prepared by *in-situ* micro-forging assisted cold spraying. Large-size 202 stainless steel particles are mixed into Ti6Al4V powder during the spraying process to promote the plastic deformation of Ti6Al4V powder and form dense coatings. The effects of cold spraying process parameters on the quality of Ti6Al4V coating are investigated using optical microscopy, scanning electron microscopy, microhardness tester, ultrasonic cavitation testing machine, and 3D profilometers, leading to

the determination of the optimal process parameters. The results show that the porosity of Ti6Al4V coating decreases with the increase of shot peening particle content. When the shot peening content is 70%(volume fraction), the Ti6Al4V coating is compact and the porosity is only 0.46%. The microhardness of the coating gradually increases to 394$HV_{0.3}$, which is higher than the microhardness of forged Ti6Al4V alloy (370$HV_{0.3}$). The cavitation erosion test results show that the cavitation erosion depth of Ti6Al4V coating is only 4.742 μm after 2 h cavitation erosion, and the cavitation erosion resistance of Ti6Al4V coating is 77 times that of Al substrate (365.199 μm). The Ti6Al4V coating prepared by *in-situ* micro-forging cold spray is dense, has high hardness, and exhibits good interparticle bonding, effectively inhibiting the initiation and propagation of cracks during cavitation, which leads to particle detachment. Therefore, it possesses excellent cavitation erosion resistance.

Key words: cold spraying; *in-situ* micro-forging; Ti6Al4V; coating; cavitation erosion resistance

空蚀是流体动力学、材料学的复杂现象。空蚀一般发生在固体与液体产生相对运动的表面，广泛存在于水泵零件、水轮机叶片和船舶螺旋桨等表面[1-2]。空蚀后的材料表面易产生疲劳脱落，出现小空蚀坑，进一步空蚀后发展成海绵状，从而严重影响材料的力学性能，降低零件的工作效率和使用寿命，造成重大的安全事故[3-4]。铝合金因其优良的力学性能、轻便性、耐腐蚀性和良好的加工性能，被广泛应用于船舶制造中。而在高速水流环境中，铝合金会发生空蚀现象，因此对于推进器、螺旋桨等部件，需要通过合理设计和科学维护来延长船舶使用寿命[5-6]。目前提高材料抗空蚀性能的方法主要集中在表面涂层处理、表面改性和设计合理的结构等方面[7-10]。钛合金具有高比强度、韧性好、耐腐蚀、低密度等优点，适合需要兼顾质量与强度的防护层材料，高强度的特性可有效抵抗空蚀等动态载荷的冲击[11-12]，在耐腐蚀性以及表面改性等方面，通过结合自身抗机械冲击的能力，可显著提升合金的综合性能。Amirnejad 等[13]研究了不同组织对磷酸盐缓冲盐溶液中腐蚀性能的影响，结果表明由于形成钝化膜的能力不同，Ti6Al4V 合金 RD-TD 表面的耐腐蚀性优于 TD-ND 表面。因此，钝化能力与 Ti6Al4V 合金的显微组织密切相关。此外，微观组织和力学性能也是影响抗空蚀性能的关键因素。Hao 等[14]研究了热处理对涂层空蚀行为的影响，结果发现经过退火工艺后，晶粒的生长导致存在的缺陷数量减少，生成的氧化物提高涂层的显微硬度等力学性能，进而提高涂层的抗空蚀性能。近年来冷喷涂技术发展迅速，特别是在金属表面修复、磨损和腐蚀防护等领域，获得海洋工程、水力机械、航空航天等诸多行业的关注[15-16]。与传统的热喷涂工艺相比，冷喷涂工艺显著的特点是工艺温度低、对原料/基材的热冲击小，能够减轻与材料高温加工相关的问题，例如氧化和不利的结构变化[17-18]。原位微锻冷喷涂是一种结合原位微锻造和冷喷涂的技术，在冷喷涂沉积过程中引入大粒径颗粒，可以充分发挥二者各自的技术优势。借助喷涂过程中大粒径颗粒的夯实效应，显著提升颗粒的变形程度，大幅度降低涂层的孔隙率，提高粒子间的结合强度，获得致密的金属涂层[19-20]。相较而言，采用提高工艺参数或混合异质粉末的方法制备的复合涂层孔隙率仍较高，在 1%～4% 之间[21]。

本工作采用原位微锻冷喷涂技术制备 Ti6Al4V 抗空蚀涂层，研究涂层微观结构、硬度、抗空蚀性能等，获得制备 Ti6Al4V 抗空蚀涂层最佳参数，分析涂层空蚀破坏行为和机理，并与纯铝基体进行对比，以期为过流器械表面抗空蚀涂层的制备及性能提升提供参考。

1　实验材料与方法

1.1　实验材料

本工作选用的冷喷涂原材料为 Ti6Al4V 粉末（Advanced Powder Coatings 公司），气雾化制备的 202 不锈钢粉末（无锡伟光抛丸材料有限公司）为喷丸颗粒。图 1 为 Ti6Al4V 和 202 不锈钢粉末的 SEM 形貌。可知，粉末颗粒均呈球形或者近球形，表面较光滑，其中 Ti6Al4V 粉末颗粒表面出现卫星球，202 不锈钢粉末颗粒形貌为近球形，表面较为光滑且无明显尖锐凸起。表 1 为 Ti6Al4V 粉末的化学成分。

1.2　涂层制备

采用广东省科学院新材料研究所自主研发的高压冷喷涂系统 CX-580，WC 喷嘴，喉道直径约 3.0 mm，外径 6.3 mm，膨胀段长度 385 mm。将 Ti6Al4V 粉末和 202 不锈钢粉末按不同的体积比混合，喷丸的体积分数分别为 0%、30%、50% 和 70%，混合物密闭于瓶中，通过机械混合法在鼓式混料机中充分混合 2 h。基体为 100 mm×100 mm×5 mm 铝板，在涂层制备前对

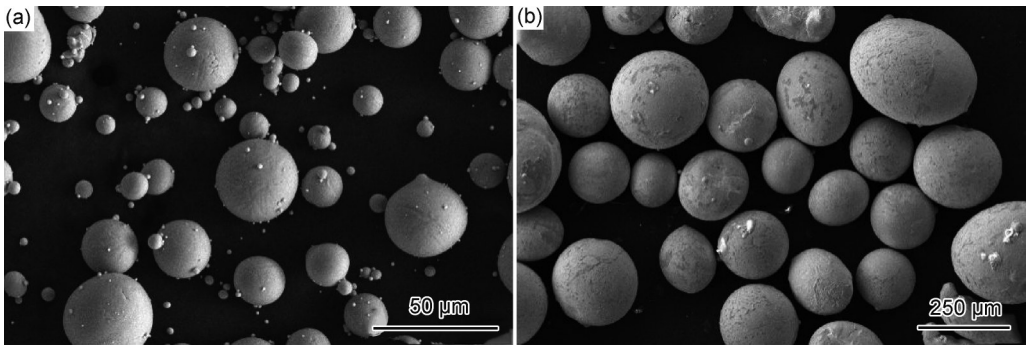


图1 Ti6Al4V(a)和202不锈钢粉末(b)SEM形貌

Fig.1 SEM morphologies of Ti6Al4V(a) and 202 stainless steel powders(b)

表1 Ti6Al4V粉末的化学成分(质量分数/%)

Table 1 Chemical compositions of Ti6Al4V powder (mass fraction/%)

C	N	O	Al	V	Fe	Ti
2.02	3.51	5.62	5.65	3.97	0.38	Bal.

基体进行预处理,用砂轮机和120目碳化硅砂纸打磨基体表面,去除表面杂质,增加粗糙度,并使用超声波和酒精清洗。喷涂用的工作气体为氮气,冷喷涂工艺参数如表2所示。

表2 冷喷涂工艺参数

Table 2 Cold spraying process parameters

Gas type	Gas pressure/MPa	Gas temperature/℃	Gun speed/(mm·s^{-1})	Powder feed rate/(r·min^{-1})
N_2	3	550	40	8

1.3 表征方法

冷喷涂后,将涂层线切割为10 mm×5 mm×5 mm的样品,进行显微硬度和显微组织的表征。利用光学显微镜(OM, DMI5000M)和场发射扫描电镜(SEM, GeminiSEM300)观察涂层的截面,随机选取10个涂层截面显微照片,采用ImageJ软件测量涂层孔隙率,取平均值作为涂层的孔隙率。涂层硬度由显微硬度计(Dura Scan 70G5)测量,压头负载2.94 N,加载时间15 s。测量涂层表面随机的5个位置,取其平均值作为涂层的显微硬度。

采用超声波空蚀试验机(XOQ5-1000),参照ASTM G32-16(2021)标准进行空蚀实验,设备示意图如图2所示。实验使用的振动频率为20 kHz,峰间振幅为25 μm,超声波探头深入水中深度10 mm,与空蚀样品表面距离0.5 mm,并通过固定样品法进行测试[15]。测量前,将样品表面抛光至R_a<0.5 μm,在(25±2)℃水温下进行2 h的空蚀实验,在一定时间间隔内对空蚀后的样品进行烘干处理。使用0.01 mg精密分析天平测量涂层空蚀后的质量损失,并通过扫描电镜观察涂层的空蚀形貌。采用三维表面轮廓仪(Dektak XT)记录涂层的表面形貌,并对涂层表面的空蚀坑深度进行测量。对空蚀后试样的表面形貌和轮廓进行研究,可以更好地了解涂层的空蚀行为。空蚀深度(H)由式(1)计算得出。

$$H=\frac{10\Delta W}{\rho A} \tag{1}$$

式中:ΔW为涂层空蚀前后质量差,mg;ρ为涂层密度,g·cm^{-3};A为空蚀面积,cm^2。

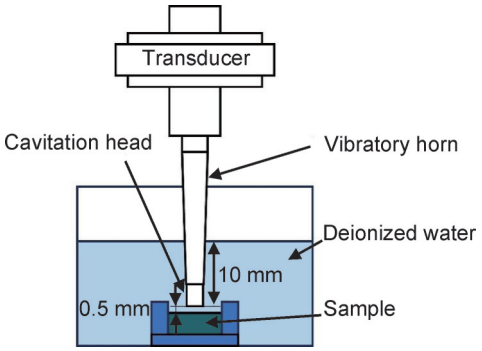


图2 空蚀实验装置示意图

Fig.2 Schematic diagram of cavitation experiment setup

2 结果与分析

2.1 显微组织

图3为不同喷丸颗粒含量制备的Ti6Al4V涂层截面图。从图3(a)可以看出,未添加喷丸颗粒时,涂层颗粒间存在大量不规则孔隙,颗粒边界清晰可见。机理分析表明,该现象源于在冷喷涂沉积过程中Ti6Al4V颗粒的塑性变形不足,从而导致颗粒-颗粒以及颗粒-基体界面之间均难以形成有效的结合[22]。从图3(b),(c)可以看出,当喷丸颗粒含量提升至30%和50%时,在大尺寸喷丸的夯实作用下,

Ti6Al4V 颗粒发生剧烈塑性变形，致使涂层内孔隙的数量和尺寸明显减小。喷丸颗粒含量为 70% 时（图 3(d)），Ti6Al4V 颗粒的塑性变形程度进一步增加，颗粒间的孔隙和不良结合边界基本消失，涂层实现完全致密化。涂层与基体界面间结合紧密，结合面轮廓呈现波浪状，这种结构增加了涂层与基体之间的结合面积，使涂层与基体间的结合强度有所提高[23]。

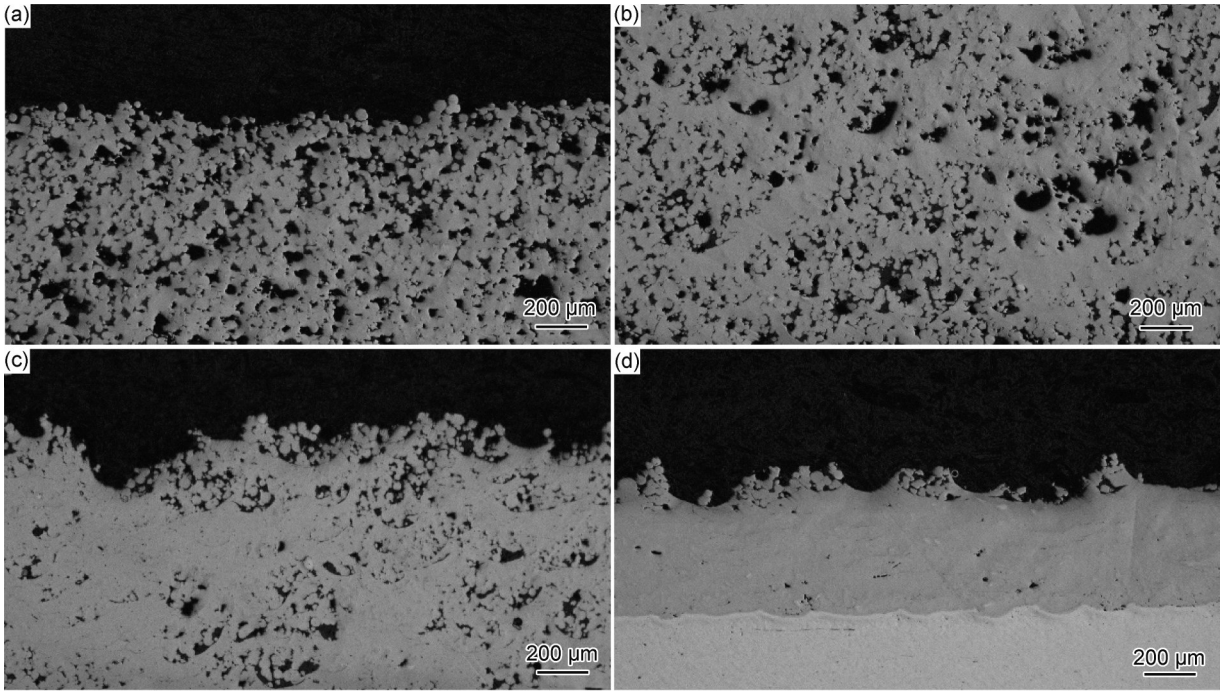


图 3　不同喷丸含量制备的 Ti6Al4V 涂层截面显微组织
(a)0%；(b)30%；(c)50%；(d)70%

Fig.3　Microstructures of cross-section of Ti6Al4V coating prepared with different shot peening contents
(a)0%；(b)30%；(c)50%；(d)70%

通过以上分析可知，喷丸的夯实效应是冷喷涂 Ti6Al4V 涂层致密化的主要原因，通过 ImageJ 软件对涂层的孔隙率进行定量分析，结果如图 4 所示。可知，涂层孔隙率随着喷丸含量的增加而降低，由初始的 19.97% 显著降低至 0.46%。值得注意的是，喷丸含量为 30% 时，孔隙率仅降低 0.73%，这是由于喷丸冲击能量未达到临界值，难以有效压缩粉末颗粒。

2.2　显微硬度

图 5 为 Ti6Al4V 涂层的显微硬度。常规冷喷涂涂层硬度仅为 138$HV_{0.3}$，而引入喷丸颗粒后，硬度呈梯度强化特征。30% 喷丸颗粒含量时涂层硬度提升至 314$HV_{0.3}$，50% 和 70% 喷丸颗粒含量时涂层硬度分别达到 373$HV_{0.3}$ 和 394$HV_{0.3}$，略高于锻造 Ti6Al4V 合金硬度（370$HV_{0.3}$）。结果表明，随着喷丸颗粒含量的增

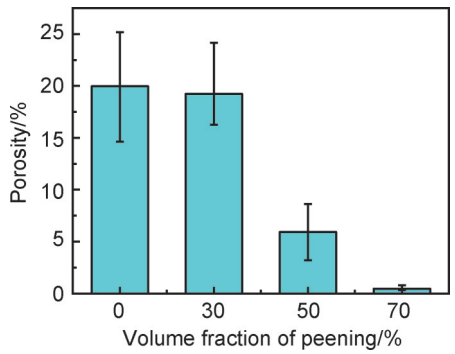


图 4　不同喷丸含量制备的 Ti6Al4V 涂层孔隙率

Fig.4　Porosity of Ti6Al4V coating prepared with different shot peening contents

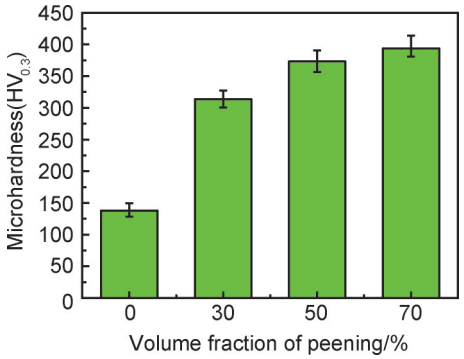


图 5　不同喷丸含量制备的 Ti6Al4V 涂层显微硬度

Fig.5　Microhardness of Ti6Al4V coating prepared with different shot peening contents

加，冷喷涂涂层沉积时喷丸冲击诱导的剧烈塑性变形使位错密度提升，动态再结晶过程中形成亚微米级晶粒，提高了Ti6Al4V涂层的硬度[24]。

2.3 抗空蚀性能

2.3.1 质量损失、质量损失率、空蚀深度和空蚀速率

图6为不同喷丸颗粒含量制备的Ti6Al4V涂层及Al基体的空蚀行为演变规律，包括质量损失、质量损失率、空蚀深度和空蚀速率随空蚀时间的变化曲线。由图6(a)可知，70%喷丸颗粒含量制备的涂层质量损失在空蚀过程中基本保持稳定，2 h后仅损失3.9 mg，而其余空蚀试样的质量损失明显增加，表明70%喷丸颗粒含量制备的涂层抗空蚀性能最优。值得注意的是，0%喷丸颗粒含量制备的涂层由于孔隙率较高以及硬度较低，导致在空蚀初期质量损失迅速增加，涂层整体脱落，因此后续不再对其进行分析。由图6(b)可知，涂层质量损失率随时间的增加呈递减趋势，这种衰减特征与涂层致密化程度和加工硬化效应密切相关。由图6(c)可知，空蚀2 h后，30%、50%、70%喷丸颗粒含量制备的涂层空蚀深度分别为51.276、21.473、4.742 μm，较Al基体的365.199 μm有显著降低，最优参数下涂层的抗空蚀性能是Al基体的77倍。从图6(d)空蚀速率可以看出，随着喷丸颗粒含量由30%提升至70%，涂层的抗空蚀性能呈显著增强趋势，特别是70%含量制备的涂层空蚀速率仅为2.37 μm/h，较Al基体空蚀速率(182.60 μm/h)降低了2个数量级，与经热处理后的炉冷法制备的TC4合金空蚀速率接近，且明显低于热轧制备的TC4合金[3,25]。

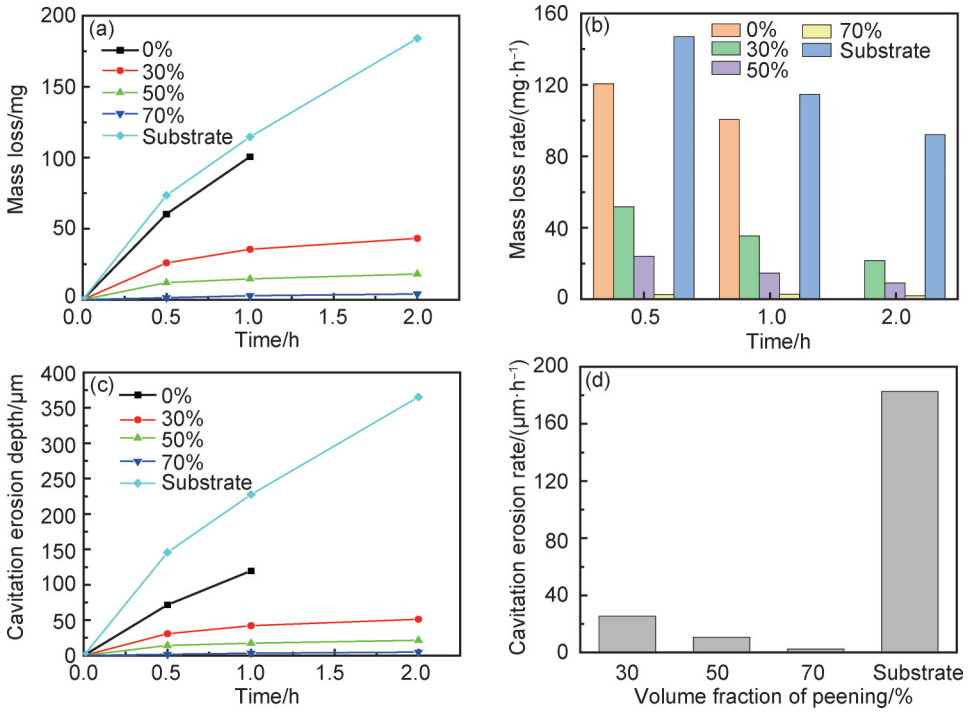


图6 不同喷丸含量制备的Ti6Al4V涂层的抗空蚀性能

(a)质量损失；(b)质量损失率；(c)空蚀深度；(d)空蚀速率

Fig.6 Cavitation erosion resistance of Ti6Al4V coating prepared with different shot peening contents

(a)mass loss; (b)mass loss rate; (c)cavitation erosion depth; (d)cavitation erosion rate

图7为不同喷丸含量制备的Ti6Al4V涂层及Al基体在空蚀2 h后的表面形貌。由图7(a)可知，30%喷丸含量制备的Ti6Al4V涂层表面空蚀损伤呈典型的脆性剥落特征，表面分布着直径约150～200 μm的空蚀坑，且可以观察到大量Ti6Al4V粉末裸露，粉末仍呈球状，有限的塑性变形导致颗粒间结合不良，未形成冶金结合。当喷丸颗粒含量提高至50%时，涂层表面空蚀坑的尺寸显著缩小，表现为不规则形状，且空蚀坑分布呈现空间离散特性。由图7(c)可知，70%喷丸含量制备的Ti6Al4V涂层展现出优异的抗空蚀损伤能力，涂层表面光滑平整，大部分区域仍保持完整，仅局部出现少量微裂纹和空蚀坑。作为对照的Al基体表面有严重的空蚀损伤特性，基体出现严重破坏，表面大面积脱落，整体呈现为海绵状，力学性能受到严重影响。

图8为不同喷丸含量制备的Ti6Al4V涂层空蚀

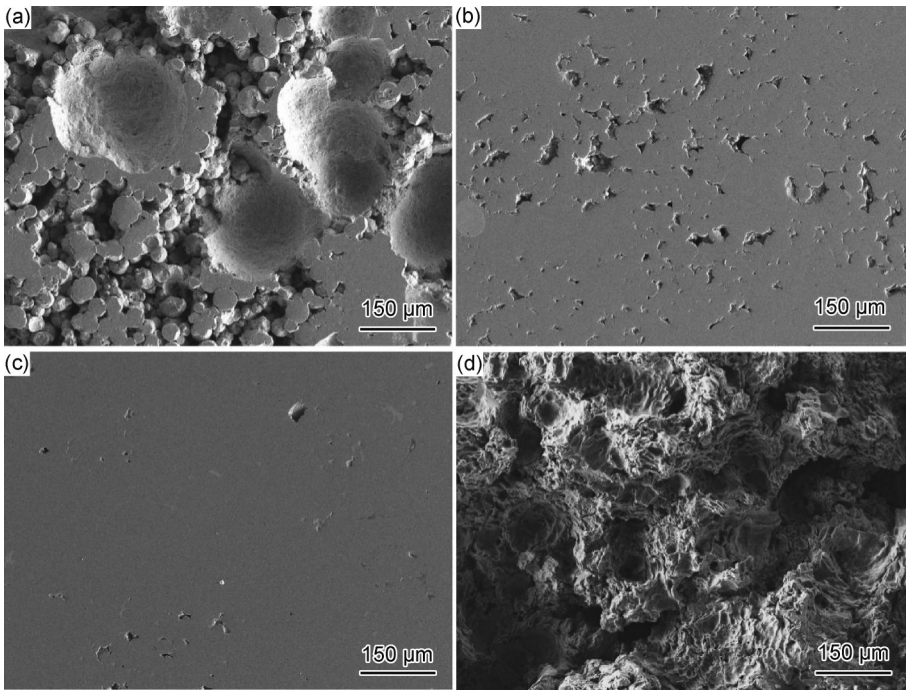


图 7　不同喷涂含量制备的 Ti6Al4V 涂层空蚀 2 h 后的表面形貌

(a)30%;(b)50%;(c)70%;(d)基体

Fig.7　Surface morphologies of Ti6Al4V coating prepared with different shot peening contents after 2 h of cavitation erosion

(a)30%;(b)50%;(c)70%;(d)substrate

2 h 后的 2D/3D 形貌。三维定量分析显示,在空蚀 2 h 后,30% 喷丸颗粒制备的涂层空蚀坑最大深度可达 250 μm,其底部呈现典型的脆性断裂台阶特征,损伤深入涂层内部,使涂层内部结构受到较为严重的空蚀破坏,导致涂层的承载能力下降。当喷丸颗粒含量增加到 50% 时,空蚀坑深度显著降低至 100 μm,表明喷丸冲击导致的加工硬化有效提升涂层的抗空蚀能力。70% 喷丸颗粒制备的 Ti6Al4V 涂层空蚀表面相对光滑平整,其空蚀坑深度最大仅为 40 μm,三维轮廓图表明涂层整体仍保持完整。这一结果与空蚀速率的结果相对应,证明随着喷丸含量增加,喷丸撞击提升了涂层致密度,与材料内部位错密度提升的协同作用共同实现了涂层的抗空蚀性能的提高。

2.3.2　空蚀破坏机理分析

在空蚀初期阶段,涂层表面固有的裂纹、孔隙等结构缺陷会作为初始空蚀形核位点引发破坏[26]。随着空蚀时间的增加,空泡溃灭产生的反复高压冲击应力在微观缺陷区域形成应力集中效应,导致孔隙和微裂纹周围结合较弱的粉末颗粒率先从涂层中脱离[27]。在持续的空蚀破坏下,微观尺度的空蚀坑通过扩展合并机制形成宏观破坏区域。并且当涂层硬度不足时,裂纹倾向于沿平行表面方向扩展,进而诱发涂层的层状剥落失效[28]。因此提升材料致密化程度以及增强显微硬度可以阻碍空蚀微射流对材料的侵蚀,有助于提高涂层的抗空蚀能力。本工作通过调控喷丸颗粒含量显著增强了涂层性能。随着喷丸颗粒含量的增加,大尺寸喷丸的夯实锤击效应增强,喷丸撞击迫使 Ti6Al4V 粉末发生严重塑性变形,增加了材料内部的位错密度,显著提高 Ti6Al4V 涂层的致密度和显微硬度[29-30]。这种强化效应使涂层表面空蚀破坏区域明显减少,空蚀破坏产生的孔洞和裂纹缺陷显著降低,涂层的抗空蚀能力明显增强。

3　结论

(1)当喷丸颗粒含量为 70% 时,原位微锻冷喷涂 Ti6Al4V 涂层组织致密,孔隙率仅为 0.46%,显微硬度显著提高,最高可达 394$HV_{0.3}$。

(2)2 h 空蚀后,Ti6Al4V 涂层的空蚀深度最低为 4.742 μm,涂层的抗空蚀性能是 Al 基体(365.199 μm)的 77 倍。

(3)喷丸颗粒含量为 70% 时,Ti6Al4V 涂层的颗粒间结合良好,粉末发生严重塑性变形,有效抑制颗粒结合界面间的裂纹萌生、扩展,阻碍空蚀颗粒脱落,具有良好的抗空蚀性能。

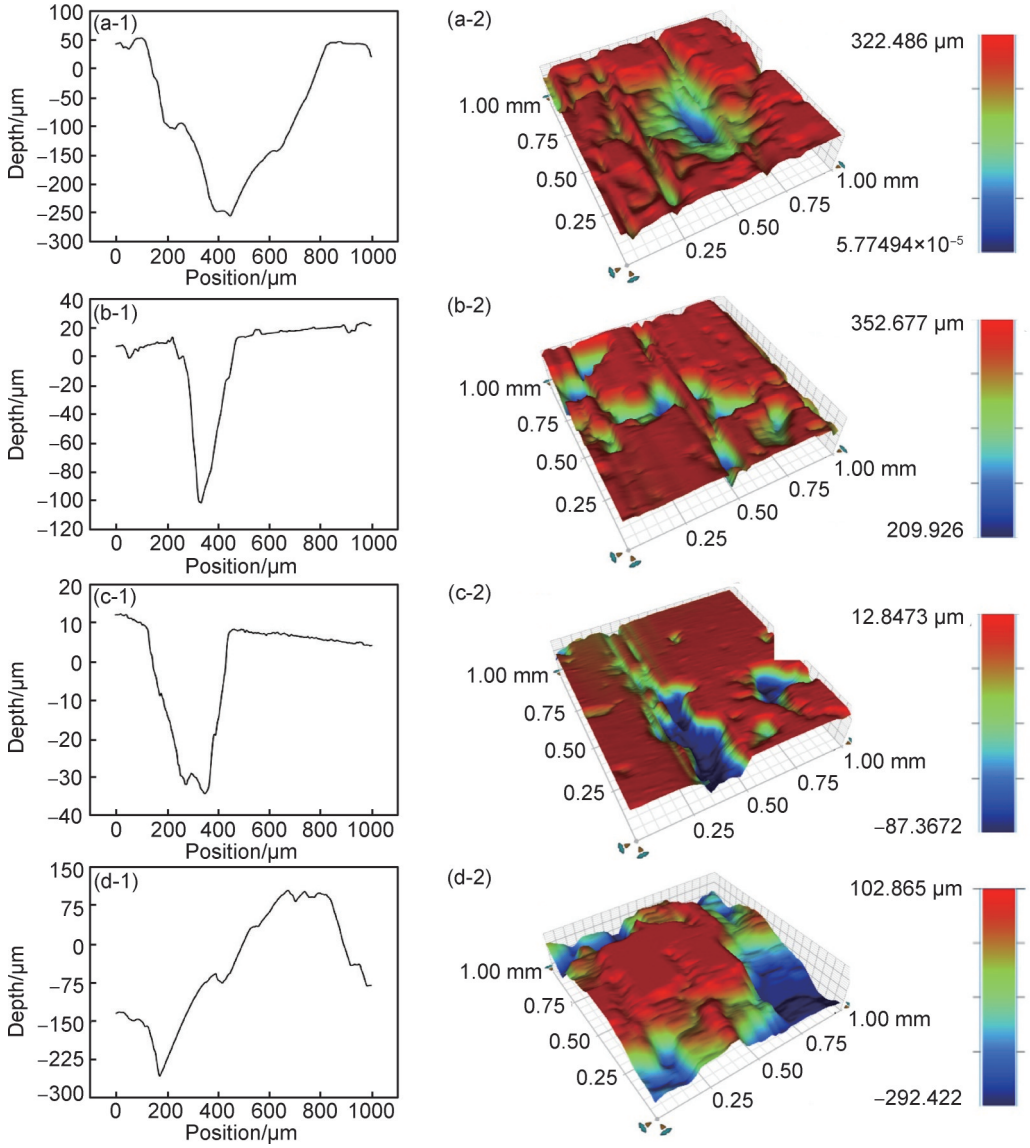


图8 不同喷丸含量制备的Ti6Al4V涂层空蚀2 h后的2D(1)/3D(2)形貌 (a)30%;(b)50%;(c)70%;(d)基体

Fig.8 2D(1)/3D(2) profiles of Ti6Al4V coating prepared with different shot peening contents after 2 h of cavitation erosion (a)30%;(b)50%;(c)70%;(d)substrate

参考文献

[1] 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: 126-135.

[2] KAZASIDIS M, YIN S, CASSIDY J, et al. Microstructure and cavitation erosion performance of nickel-Inconel 718 composite coatings produced with cold spray [J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 382: 125195.

[3] WANG Y, HAO E, ZHAO X, et al. Effect of microstructure evolution of Ti6Al4V alloy on its cavitation erosion and corrosion resistance in artificial seawater [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2022, 100: 169-181.

[4] WANG Y, WU Y, HONG S, et al. Cavitation erosion behavior of HVAF-sprayed Cu-based glassy composite coatings in NaCl solution[J]. Intermetallics, 2024, 168: 108266.

[5] 董建帅, 李子如, 贺伟, 等. 常见螺旋桨材料空蚀特性分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2023, 44(8): 1319-1327.
DONG J S, LI Z R, HE W, et al. Analysis of the cavitation characteristics of common propeller materials [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2023, 44(8): 1319-1327.

[6] SI C, SUN W, TIAN Y, et al. Cavitation erosion resistance enhancement of the surface modified 2024T351 Al alloy by ultrasonic shot peening [J]. Surface and Coatings Technology, 2023, 452: 129122.

[7] 刘成龙, 林英英, 王玥霁, 等. 金属材料表面抗空蚀涂层的研究进展[J]. 材料导报, 2011, 25(1): 127-131.
LIU C L, LIN Y Y, WANG Y J, et al. Progress in coatings on the surface of metals for anti-cavitation corrosion[J]. Materials Review, 2011, 25(1): 127-131.

[8] 张志萍, 周勇, 张健. 抗空蚀金属材料的研究进展[J]. 热处理技术与装备, 2011, 32(6): 1-3.

ZHANG Z P, ZHOU Y, ZHANG J. Research and development on metallic material of cavitation erosion resistant[J]. Heat Treatment Technology and Equipment, 2011, 32(6): 1-3.

[9] DULAR M, BACHERT B, STOFFEL B, et al. Relationship between cavitation structures and cavitation damage [J]. Wear, 2004, 257(11): 1176-1184.

[10] ABEDINI M, LOZANO C L A, KOSTKA A, et al. Influence of surface finishing by grinding on the cavitation erosion resistance of 316L and NiAl-bronze[J]. Wear, 2024, 554/555: 205432.

[11] 雷晨庆, 袁烁, 林乃明, 等. 钛合金空蚀损伤及防护的研究进展[J]. 表面技术, 2022, 51(10): 128-142.
LEI C Q, YUAN S, LIN N M, et al. Research and development on metallic material of cavitation erosion resistant [J]. Surface Technology, 2022, 51(10): 128-142.

[12] 李聪, 聂冰悦, 任延杰, 等. 汽轮机钛合金末级叶片抗水蚀涂层的研究进展[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2022, 19(4): 32-46.
LI C, NIE B Y, REN Y J, et al. Research status of anti-water erosion coatings for the final stage titanium blade in steam turbines [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2022, 19(4): 32-46.

[13] AMIRNEJAD M, RAJABI M, JAMAATI R. The effect of crystallographic texture as a distinct effective parameter on the biocorrosion performance of Ti6Al4V alloy in PBS solution[J]. Corrosion Science, 2021, 179: 109100.

[14] HAO E, AN Y, LIU X, et al. Effect of annealing treatment on microstructures, mechanical properties and cavitation erosion performance of high velocity oxy-fuel sprayed NiCoCrAlYTa coating [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2020, 53: 19-31.

[15] 刘伟杰, 武三栓, 何春艳, 等. 热/冷喷涂典型抗空蚀涂层结构与性能研究[J]. 中国材料进展, 2024, 43(4): 281-289.
LIU W J, WU S S, HE C Y, et al. Microstructure and performance of typical anti-cavitation coatings prepared by thermal and cold spraying[J]. Materials China, 2024, 43(4): 281-289.

[16] DIAO P, WANG F, CHU X, et al. Microstructure, mechanical properties, and cavitation erosion performances of cold sprayed CuZn35 coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2022, 451: 129074.

[17] DAROONPARVAR M, BAKHSHESHI-RAD H R, SABERI A, et al. Surface modification of magnesium alloys using thermal and solid-state cold spray processes: challenges and latest progresses[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2022, 10(8): 2025-2061.

[18] ASSADI H, GÄRTNER F, STOLTENHOFF T, et al. Bonding mechanism in cold gas spraying[J]. Acta Materialia, 2003, 51(15): 4379-4394.

[19] LUO X T, YAO M L, MA N, et al. Deposition behavior, microstructure and mechanical properties of an *in-situ* micro-forging assisted cold spray enabled additively manufactured Inconel 718 alloy[J]. Materials & Design, 2018, 155: 384-395.

[20] 张文正, 雒晓涛, 刘桥, 等. 基于原位微锻造冷喷涂技术的金属涂层研究进展[J]. 材料保护, 2022, 55(1): 34-43.
ZHANG W Z, LUO X T, LIU Q, et al. Research progress in metallic coatings prepared with the *in-situ* micro-forging assisted cold spraying[J]. Materials Protection, 2022, 55(1): 34-43.

[21] XU Y, GE J, LI W. Microstructure and tribological properties of cold sprayed WC_p/Ti composite coatings on Ti6Al4V titanium alloy[J]. Tribology International, 2024, 192: 109218.

[22] POZA P, GARRIDO-MANEIRO M Á. Cold-sprayed coatings: microstructure, mechanical properties, and wear behaviour[J]. Progress in Materials Science, 2022, 123: 100839.

[23] LUO X T, LIU X, WEI Y, et al. Improving the adhesion of cold sprayed Al deposits through *in-situ* micro-forging[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2024, 325: 118302.

[24] WEN Y, WU Y, HUA L, et al. Effects of shot peening on microstructure evolution and mechanical properties of surface nanocrystal layer on titanium matrix composite[J]. Materials & Design, 2021, 206: 109760.

[25] YANG Z, LI L, QIAO Y, et al. Cavitation erosion-corrosion properties of as-cast TC4 and LPBF TC4 in 0.6 mol/L NaCl solution: a comparison investigation[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2024, 108: 106947.

[26] LUO X T, LI C X, SHANG F L, et al. High velocity impact induced microstructure evolution during deposition of cold spray coatings: a review[J]. Surface and Coatings Technology, 2014, 254: 11-20.

[27] 黄建娜, 王璇, 刘松林. 材料表面空蚀机理及实验设备研究现状[J]. 精密制造与自动化, 2019(1): 9-14.
HUANG J N, WANG X, LIU S L. Review on research of material surface cavitation erosion mechanism and its experimental equipment [J]. Precision Manufacturing and Automation, 2019(1): 9-14.

[28] 杨长春, 丁翔, 田英豪, 等. CeO_2改性多尺度WC-CoCr涂层组织结构及空蚀性能研究[J]. 功能材料, 2023, 54(4): 4027-4033.
YANG C C, DING X, TIAN Y H, et al. Microstructure and cavitation corrosion properties of CeO_2 modified multiscale WC-CoCr coatings[J]. Journal of Functional Materials, 2023, 54(4): 4027-4033.

[29] WEI Y K, LUO X T, CHU X, et al. Ni coatings for corrosion protection of Mg alloys prepared by an *in-situ* micro-forging assisted cold spray: effect of powder feedstock characteristics[J]. Corrosion Science, 2021, 184: 109397.

[30] VINAY G, HALDER S, KANT R, et al. Examining the contribution of tamping effect on inter-splat bonding during cold spray [J]. Materials Science and Engineering:A, 2024, 893: 146112.

基金项目：国家重点科技发展计划资助项目(2024YFB4609600, 2023YFE010800,2022YFB4601601)；广东省科学院打造综合产业技术创新中心专项资助(2022GDASZH-2022010107)；广东省科技计划项目资助(2023B1212120008, 2023B1212060045)；广州市科技项目(2023A04J1626)

收稿日期：2025-04-01；**录用日期**：2025-05-07

通讯作者：谢迎春(1987—)，男，正高级工程师，博士，研究方向为冷喷涂技术与应用，联系地址：广东省广州市天河区长兴街道363号广东省科学院新材料研究所(510651)，E-mail：xieyingchun@gdinm.com

(本文责编：王　晶)