综述·专论

钛合金表面等离子喷涂涂层材料的研究进展

王少鹏，李争显，杜继红
（西北有色金属研究院 腐蚀与防护研究所，西安 710016）

[摘 要] 介绍了钛及钛合金表面等离子喷涂涂层材料的研究进展，主要从钛合金表面等离子喷涂陶瓷材料耐磨涂层、固体润滑减摩涂层、生物活性涂层、功能涂层等几方面进行了简要的介绍。并对钛及钛合金表面等离子喷涂涂层材料的发展趋势进行了展望。

[关键词] 钛合金；等离子喷涂；涂层材料
[中图分类号]TG146.2+3；TG174.442 [文献标识码]A [文章编号]1001-3660(2013)05-0093-05

Research Progress in Plasma Spray Coating Materials on the Titanium Alloy Substrates

WANG Shao-peng, *LI Zheng-xian*, *DU Ji-hong*
(Corrosion and Protection Center, Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

[**Abstract**] The research progress in plasma spray coating materials on the titanium alloy substrates was reviewed. The plasma ceramic wear resistant coating, solid lubrication coating, biological activity coating and functional coating on the surface of titanium alloy were briefied. And the development trends of the plasma spray coating materials on the titanium alloys substrates was given.

[**Key words**] titanium alloy; plasma spray; coating material

由于钛合金具有密度小、比强度高、耐腐蚀性能优异及相对较好的高温力学性能等特点，是航空、航海、化工及生物等工业部门应用的重要材料之一[1—4]，但其硬度低、耐磨性差，当用作摩擦部件时，易产生磨损，造成部件失效。为提高钛合金的耐磨性，需要对钛合金进行表面改性处理。另外，为了使钛合金表面获得特殊功能，例如，获得生物活性，也需要在钛合金表面制备涂层[5]。钛合金的表面涂层技术研究一直都很活跃，绝大部分表面技术都有在钛合金方面的应用研究工作。等离子喷涂技术可喷涂的材料范围广，可喷涂陶瓷、金属、合金、非金属等，喷涂涂层厚度可控性好，可喷涂几十微米厚的涂层，也可制备超过 1mm，甚至几毫米厚的涂层[6]。由此，近年来在钛合金表面等离子喷涂涂层技术方面的研究十分活跃，在传统等离子喷涂技术及涂层材料的基础上，研究开发出了许多新工艺、新方法及涂层材料。文中就钛合金表面等离子喷涂涂层材料方面近几年的研究工作进行了简要的综述。

1 钛合金表面等离子喷涂耐磨减摩涂层

钛及钛合金作为结构材料已有几十年的历史，由于其密度小、比强度高、耐海洋腐蚀性能优异等特点，在航空、航天、航海等领域具有广泛的应用潜力。然而钛合金易氧化，含氧环境下在表面容易生成 TiO_2 膜，作为摩擦部件时，由于相互接触作用，可导致表面的氧化膜脱落，从而裸露出新鲜的表面再次发生氧化，造成表面损伤。另外，由于脱落的氧化膜颗粒存在于接触面之间，可加速钛及钛合金部件的表面损伤，从而导致零部件失效，因此，作为摩擦零部件时，需要对其进行表面处理，以改善其摩擦性能。摩擦性能的改善主要从改善表面的耐磨性和减摩性能方面考虑，因此在改善钛合金摩擦性能的等离子喷涂涂层技术方面也主要有等离子喷涂耐磨涂层和减摩涂层 2 方面。

在钛及钛合金表面等离子喷涂耐磨涂层方面，研

[收稿日期]2013-01-26
[作者简介]王少鹏(1977—)，男，陕西西安人，硕士，工程师，主要从事稀有金属表面技术方面的研究工作。

究较早和较成熟的工艺方法是等离子喷涂氧化物陶瓷涂层,其中以 Al_2O_3 基涂层的研究最多,工艺方法也较为成熟。在近几年也开展了等离子喷涂碳化物陶瓷涂层、氮化物陶瓷涂层以及一些硬度较高的合金涂层的研究工作。

由于纯 Al_2O_3 的物理性能和钛合金基材相差较大,及 Al_2O_3 的脆性较大,因此在钛及钛合金表面等离子喷涂 Al_2O_3 陶瓷涂层方面,主要是采用 $Al_2O_3+TiO_2$ 的复合陶瓷粉末。TiO_2 的加入可以降低涂层脆性,增加涂层与基体的结合力。近几年,在传统的等离子喷涂 $Al_2O_3+TiO_2$ 陶瓷涂层工艺基础上,研究开发了许多新的涂层工艺技术和方法,涂层性能相对于传统的 $Al_2O_3+TiO_2$ 陶瓷涂层性能有明显的改善。Tian W[7] 等采用等离子喷涂方法在钛合金表面制备了纳米结构的 Al_2O_3-13% TiO_2(质量分数,下同)涂层,并与传统的 Al_2O_3-13% TiO_2(Metco130)涂层进行了对比研究。传统的 Al_2O_3-13% TiO_2 涂层具有明显的层状结构,而在纳米 $Al2O_3$-13% TiO_2 涂层中未观察到明显的层状结构,可观察到非晶相、纳米晶及少量微晶。传统 Al_2O_3-13% TiO_2 涂层的裂纹主要沿层边界扩展,而纳米 Al_2O_3-13% TiO_2 涂层中裂纹扩展则没有规律性。2 种涂层都改善了钛合金的抗微动磨损能力,但由于纳米 Al_2O_3-13% TiO_2 涂层中非晶相、纳米晶及层界面的减少,其在改善钛合金微动磨损方面优于传统的 Al_2O_3-13% TiO_2 涂层。C Richard[8] 等也针对钛及钛合金表面等离子喷涂纳米 Al_2O_3-13% TiO_2 涂层开展了研究工作,并用 Al_2O_3 球作为对磨配副,对比研究了基材及涂层的耐磨性,等离子喷涂的纳米 Al_2O_3-13% TiO_2 涂层显著地提高了钛及钛合金的耐磨性。另外,纳米 Al_2O_3-13% TiO_2 涂层的平均摩擦系数明显低于工业纯钛,工业纯钛平均摩擦系数约为 0.5,纳米 Al_2O_3-13% TiO_2 涂层的约为 0.3。Al_2O_3-TiO_2 涂层体系是传统的耐磨涂层,其在改善耐磨性方面已有广泛的应用,并且涂层技术也较成熟。纳米 Al_2O_3-TiO_2 涂层体系是在传统 Al_2O_3-TiO_2 涂层材料的基础上发展起来的,相比传统涂层,由于纳米效应的存在,有效地改善了涂层的性能。例如,纳米晶、非晶相的存在可有效地改善涂层的抗微动磨损能力。

在等离子喷涂纳米 Al_2O_3-TiO_2 涂层方面已开展了较多的研究工作,喷涂粉末采用纳米粉末,但涂层中并不是 100% 的纳米晶,那么,喷涂过程对涂层中纳米晶的形成有什么影响,能否通过工艺控制在涂层中形成含量尽可能高的纳米晶,纳米晶含量的提高对涂层性能的改善有无帮助等,仍需深入的研究工作。通过深入认识,掌握喷涂工艺对纳米 Al_2O_3-TiO_2 涂层的影响,以期发挥纳米材料的最大性能,改善钛合金表面等离子喷涂 Al_2O_3-TiO_2 涂层的性能。

李兆峰[9] 等在传统等离子喷涂 Al_2O_3-TiO_2 涂层的基础上,开展了等离子喷涂 Al_2O_3-TiO_2/MoS_2 复合涂层的研究工作。其在钛合金表面首先采用等离子喷涂工艺制备了 Al_2O_3-TiO_2 涂层,然后用 MoS_2 填充涂层的表面孔隙,形成 Al_2O_3-TiO_2/MoS_2 复合涂层,并研究了涂层的摩擦性能。制备的 Al_2O_3-TiO_2/MoS_2 复合涂层的显微硬度为 1457HV,MoS_2 的加入未明显降低涂层硬度,但显著地降低了涂层的摩擦系数,从而使涂层耐磨性明显改善。经磨损试验表明,复合涂层的磨损失重是未制备涂层试样的 1.29%。S Sathish[10] 等研究了在钛合金表面采用大气等离子喷涂系统制备纳米 ZrO_2/Al_2O_3-13TiO_2 双层复合涂层,并且测试涂层的滑动磨损行为。相对于钛合金基体,喷涂纳米复合涂层后耐磨性有上百倍的增加,这主要是因为纳米结构的 ZrO_2/Al_2O_3-13TiO_2 复合涂层有更低的孔隙率和更高的结合强度。

随着研究的深入,单一涂层体系性能的改善已十分困难,而复合涂层体系有非常好的发展前景。采用氧化物基耐磨涂层+固体润滑减摩涂层有非常好的发展前景,但复合涂层体系相对单一涂层体系在工艺控制上相对要复杂一些,需要深入认识涂层工艺对复合体系中各组分的影响,合理地设计涂层体系和涂层工艺,发挥复合涂层的最佳性能。

对于等离子喷涂涂层,涂层与基体的结合强度对涂层的使用性能和寿命有明显的影响。氧化物陶瓷与钛合金基体的物理性能相差较大,涂层与基体的相容性较差,由于两者之间性能不匹配,因此会在涂层界面产生应力,导致涂层结合性能降低。在制备氧化物陶瓷涂层时采用合适的过渡层可明显改善涂层与基体的结合性能。Senol Yilmaz[11] 研究了在工业纯钛表面制备 Al_2O_3-13% TiO_2 涂层时的结合层对涂层性能的影响。选用的结合层材料为 Ni-5% Al,对比研究了有无结合层时制备的 Al_2O_3 和 Al_2O_3-13% TiO_2 涂层的性能。结果表明,制备的涂层均匀、无裂纹、分层等缺陷,但有少量的孔洞。无结合层时,涂层与基体的结合强度为 7.95 MPa;有结合层时,结合强度为 28.56 MPa,结合层的存在可明显改善涂层与基体的结合性能。由于等离子喷涂涂层与基体间主要是机械结合,因此涂层与基体的结合强度较低是目前存在的较大问题之一,在改善涂层与基体的结合强度方面也开展了很多的研究工作。结合强度较低一方面是因涂层技术固有的特性决定的,另一方面也与涂层材料和涂层方法有直接的关系。在钛合金表面喷涂氧化物陶瓷涂层方

面,主要是由于涂层与基体相容性较差,造成结合力差。在这一情况下,通过过渡层、梯度涂层等形成涂层到基体性能的梯度过渡,可有效降低界面应力,改善界面结合性能。

在钛及钛合金表面等离子喷涂除氧化物陶瓷之外,针对碳化物陶瓷、氮化物陶瓷等涂层材料也开展了相应的研究工作。杨伟华[12]等采用等离子喷涂方法在 TC4 表面喷涂 WC 基耐磨涂层,制备的涂层孔隙率小于 5%,显微硬度为 880HV。WC 颗粒含量大于 45%(质量分数),涂层与 TC4 基体的结合强度为 61.0 MPa,喷涂 WC 涂层显著地改善了钛合金的耐磨性能。F Casadei[13]等采用反应等离子喷涂技术在钛合金表面制备梯度 Ti_xN_y 涂层,具体工艺是:在 N_2 气氛下采用反应等离子喷涂技术在 Ti6Al4V 合金表面喷涂 Ti-4.5Al-3V-2Mo-2Fe 粉末,通过粉末与气氛中的氮反应生成由钛基体上弥散分布着 Ti_xN_y 相组成的涂层,然后在反应等离子涂层表面再采用 PVD 技术沉积 TiN 膜层。这种复合涂层有良好的力学性能和与基体的结合性能,由于硬度高,可明显改善钛合金的耐磨性。

另外,在钛及钛合金表面等离子喷涂涂层技术方面,也开展了一些新型的合金涂层的制备技术研究工作。Zhou Chun-gen[14]等在钛合金表面采用低压等离子喷涂方法制备 Al-Cu-Fe-Cr 准晶涂层,并测试了涂层的摩擦性能,制备的涂层具有典型的等离子喷涂的层状结构,其相组成主要为十角相和少量的立方相。由于 Al-Cu-Fe-Cr 准晶涂层的高硬度,在钛合金表面制备 Al-Cu-Fe-Cr 准晶涂层后,其在干滑动摩擦条件下的耐磨性得到明显改善。Cai Fei[15]等采用低压等离子喷涂技术在钛合金表面制备了 AlCuFe 准晶涂层,并采用环块滑动摩擦测试机构在干摩擦条件下测试了 AlCuFe 的耐磨性。制备的 AlCuFe 涂层具有典型的快速凝固层状组织,主要相组成为二十面体准晶相及少量的立方相。涂层硬度超过 1000HV,并且由于在摩擦过程中形成了固体自润滑薄膜,耐磨性得到了很大提升。

随着研究的深入,在钛合金等离子喷涂耐磨涂层材料方面,除了传统的氧化物、碳化物耐磨陶瓷涂层以外,新型材料的应用研究也会越来越广泛,但也会带来一系列新问题。例如,新材料改善耐磨性的机理,喷涂工艺对材料性能的影响,形成涂层后涂层结构及微观特性是否能够保持材料的原有性能等方面需要更深入的认识,以期设计合理的喷涂工艺,发挥新型材料的最佳性能。

改善钛及钛合金的耐磨性能,一方面是在其表面制备耐磨涂层,另一方面也可制备减摩涂层,通过降低摩擦系数,减少磨损而改善其耐磨性能。在钛合金表面等离子喷涂减摩涂层方面,研究较多的主要是喷涂固体润滑涂层,降低表面摩擦系数,改善耐磨性。V Fridrici[16]等采用等离子喷涂工艺在钛合金表面喷涂制备 CuNiIn 固体润滑涂层,通过减小摩擦提高钛合金的抗微动磨损性能。采用的粉末粒径为 45 ~ 90 μm,粉末成分为 58.5% Cu, 36.5% Ni 和 5% In。涂层厚度约为 150 ~ 200 μm。并用模拟飞机发动机钛合金叶片榫头和榫槽微动方式的测试装置,测试分析了等离子喷涂 CuNiIn 涂层的抗微动磨损性能。制备 CuNiIn 涂层后可降低微动裂纹的长度,并且明显改善钛合金的抗微动磨损性能。C H Hager Jr[17]等用等离子喷涂方法在 Ti6Al4V 表面制备镍石墨涂层,通过减小摩擦降低微动磨损。石墨含量为 5% ~20%,涂层的平均摩擦系数约为 0.3,而在相同测试条件下,钛合金的摩擦系数约为 0.8,摩擦系数的显著降低可改善 Ti6Al4V 的抗微动磨损性能。

固体润滑涂层目前研究最广泛的是 CuNiIn 涂层,其制备工艺已相对成熟,并已有实际应用。在涂层与基体的结合性能方面仍需开展较多的研究工作,提高涂层寿命。

2 钛合金表面等离子喷涂生物涂层

钛及钛合金是重要的生物用材料,可用于制造人体植入件,并且多种牌号的生物钛合金已经商用。由于金属与人体组织及骨骼等在性能上的差异,因此为了增加钛合金的生物相容性,利于人体组织在植入件上的生长,需要在钛合金植入件表面制备生物相容性涂层,而等离子喷涂技术在钛合金表面制备生物涂层方面也开展了大量的研究工作。

由于羟基磷灰石与人体有良好相容性,在等离子喷涂羟基磷灰石涂层研究方面多有报告,在传统等离子喷涂羟基磷灰石的技术上也涌现出了一些新的涂层体系及工艺方法。Li H[18]等采用等离子喷涂技术在钛合金 Ti6Al4V 表面制备了纳米结构的羟基磷灰石涂层,并分析测试了喷涂的纳米羟基磷灰石涂层的微观结构和力学性能。具体方法是:首先采用化学方法合成羟基磷灰石粉末,并对粉末在 950 ℃热处理 1.5 h,得到长约小于 500 nm、直径约 40 ~ 70 nm 的棒状羟基磷灰石粉末,然后喷涂制备羟基磷灰石涂层。结果表明,由于等离子喷涂焰流温度高,因此沉积的涂层存在熔化和重新形核-长大过程,在涂层中可明显观察到纳米结构的羟基磷灰石组织。在涂层表层和内部,晶粒尺寸约为 40 ~ 90 nm(球形),在近涂层与基体界面处约为 30 ~ 80 nm(球形)。喷涂的纳米羟基磷灰石涂层

的弹性模量为 50.39 GPa,涂层与基体的结合强度约为 15 MPa。K A Khor[19] 等研究了在钛合金表面等离子喷涂 HA/YSZ/Ti-6Al-4V 复合涂层,通过 Ti-6Al-4V 粉末的加入,在保证涂层生物相容性的前提下,增加涂层的稳定性及涂层与基体的结合强度。具体工艺方法是:首先化学合成羟基磷灰石粉末,然后在 900 ℃热处理 2 h,增加羟基磷灰石的结晶度,然后过筛选择粒径小于 20 μm 的粉末备用。YSZ(8% Y_2O_3 稳定 ZrO_2)的粉末粒径为 1 ~ 5 μm,Ti-6Al-4V 粉末粒径为 45 ~ 110 μm。将 Ti-6Al-4V 粉末混入 PVA 溶液中制成悬浮液,将提前混合的 HA/YSZ 粉末置入 PVA 悬浮液中并充分搅拌,混合比例为 35% HA/15% YSZ/50% Ti-6Al-4V。搅拌均匀后将 PVA 高温挥发,制成混合粉末,然后采用等离子喷涂方法制备复合涂层。通过 XRD 分析,涂层衍射图谱中除出现少量的 CaO 和 α-TCP 相外,同粉末的相结构基本一致。复合涂层中各组分分布均匀,并且在沉积涂层中形成了 HA/YSZ/Ti-6Al-4V 的固溶体,有助于改善涂层的力学性能。沉积的复合涂层的硬度约 400HV,弹性模量约 55 GPa,涂层的结合强度可以达到 30 MPa 以上。Kantesh Balani[20] 等采用等离子喷涂技术在 Ti6Al4V 合金表面制备了纳米碳管增强的羟基磷灰石涂层,打开了纳米碳管在生物涂层应用方面的大门。具体制备方法是将羟基磷灰石粉末(10 ~ 50 μm)与多壁碳纳米管(纯度为 95%,外径为 40 ~ 70 nm,长度为 0.5 ~ 2 mm)球磨混合,其中碳纳米管的质量分数为 4%。充分分散和混合后采用大气等离子喷涂技术制备涂层。分析测试结果表明,等离子喷涂后碳纳米管未损伤,并且其均匀分布在羟基磷灰石基体中。通过碳纳米管增强,涂层韧性增加约 56%,羟基磷灰石的结晶度从 53.7% 提高到 80.4%,使羟基磷灰石的力学性能和生物活性明显改善。

除了研究在钛合金表面等离子喷涂羟基磷灰石基生物活性涂层以外,针对其它的涂层材料和喷涂工艺也开展了研究工作。Liu Xuan-yong[21] 等采用大气等离子喷涂系统首先在钛合金表面喷涂制备纳米 TiO_2 涂层,然后采用离子注入方法在制备的 TiO_2 中注入氢离子,增加 TiO_2 涂层的生物活性。XRD 表明喷涂的涂层中既有金红石相,也有锐钛矿相,另外还有少量的非化学计量比的 TiO_{2-x} 相。喷涂的纳米 TiO_2 涂层的颗粒尺寸小于 50 nm。在氢离子注入,模拟体液浸泡后能够在涂层表面形成包含羟基磷灰石的碳酸盐,从而明显地提高了 TiO_2 涂层的生物活性(直接沉积的 TiO_2 是生物惰性的)。Xie You-tao[22] 等用大气等离子喷涂技术在 Ti6Al4V 合金表面制备了硅酸二钙/钛复合涂层,研究了不同复合比例对涂层性能的影响。当复合涂层中含钛量为 70% 时,涂层的结合强度最好,可达到 49 MPa;当含钛量为 50% 时,结合强度为 45 MPa,而不含钛的硅酸二钙涂层的结合强度为 30 MPa。模拟体液浸泡 14 天后,在含钛量 70% 的复合涂层中未观察到羟基磷灰石相,而在含钛量为 30% 和 50% 的复合涂层的表面衍射图谱中羟基磷灰石相均为主强峰。在模拟体液浸泡后未观察到硅酸二钙相在钛合金表面喷涂生物涂层方面,目前最有前景和研究最多的就是羟基磷灰石涂层。羟基磷灰石涂层的制备方法多种多样,有采用羟基磷灰石粉末,直接采用低压等离子喷涂工艺制备羟基磷灰石涂层,也有通过在钛合金表面喷涂其他涂层后,通过反应生成羟基磷灰石涂层的。在钛合金表面制备羟基磷灰石涂层的目的是提高其生物活性,增加与人体的相容性,同时也要保证涂层与基体的结合强度,增加植入件的使用寿命。在生物涂层方面,因羟基磷灰石优异的生物活性,在羟基磷灰石制备技术方面仍需开展更多的研究工作。

3 钛合金表面等离子喷涂功能涂层

等离子喷涂功能涂层主要是用于改善钛合金的隔热性能、抗氧化性能及表面光学性能。随着钛及钛合金在工业领域的应用深入,在其表面等离子喷涂功能涂层方面近几年也开展了相应的研究工作,取得了一定的研究进展。周海等[23] 利用超音速等离子喷涂技术在 TC4 合金表面制备 CoNiCrAlY 粘接层和 ZrO_2 面层组成的复合热障涂层。复合热障涂层与基体结合良好,并经过 800 ℃静态氧化试验表明,可明显提高钛合金的抗氧化性能。Zhou Hong[24] 等采用大气等离子喷涂技术在 Ti-6.6Al-3.61Mo-1.69Zr-0.28Si 合金表面制备了 YSZ(8% Y_2O_3 稳定 ZrO_2)热障涂层,用于改善该合金在 600 ℃的抗氧化性能,提高使用寿命。经过测试分析表明,在涂层与基体界面未发生扩散现象,但在界面处的基体下发现存在塑性变形区,并且厚度不均匀。喷涂涂层由不可转变的四角 ZrO_2 相组成。由于残余应力及热扩散系数的不匹配,因此涂层厚度增加,涂层结合强度下降。由于涂层具有层状结构,因此在硬度上具有各向异性。I Burlacov[25] 等采用感应等离子喷涂技术在纯钛表面制备了非掺杂 TiO_2,采用悬浮液等离子喷涂技术制备了少量掺杂 V,Nb 和 Ta 氧化物的 TiO_2 光催化涂层。结果表明,通过合理控制喷涂工艺参数,可以控制喷涂涂层的相结构,提高光催化性能。在钛合金表面等离子喷涂功能涂层方面,主要的一个研究方向就是制备热障涂层,以扩大钛合金的使用范围。因 YSZ 优异的隔热性能,在热障涂层方面主

要还是针对 YSZ 制备开展较多的研究工作。

4 结语

钛及钛合金是具有巨大发展潜力的结构材料,随着钛及钛合金在各个领域应用研究的深入,仍会面临许多需要解决的问题。等离子喷涂技术由于自身的特点及技术的发展,会涌现出许多的新工艺、新材料、新方法。

在钛合金表面等离子喷涂涂层材料方面,随着钛合金应用要求的提高及等离子喷涂工艺技术的发展,对喷涂材料的要求也越来越高,在喷涂材料方面会向着精细化发展。根据涂层的性能需求、喷涂技术特点、材料本身的性能特点等合理设计材料的配比、粉末的粒度、粉末的粒形、合金粉末的合成方式、复合粉末的复合方式等,以最大程度发挥喷涂粉末和喷涂工艺的优势,改善涂层性能。

在喷涂材料上,一些新的材料技术也会应用到喷涂材料方面,例如,纳米粉末、纳米碳管增强的粉末材料等。在钛合金表面等离子喷涂耐磨涂层方面,仍以氧化物陶瓷涂层材料为主,例如氧化铝陶瓷基涂层材料、氧化锆涂层材料等,但在纳米氧化物陶瓷粉末、氧化物基复合粉末方面应会开展更多的研究工作,达到单一涂层体系无法满足的性能。另外,针对碳化物陶瓷、氮化物陶瓷涂层在钛合金方面的应用也会开展更多的研究工作。

在减摩涂层方面,传统的减摩涂层,例如 CuNiIn,镍石墨等固体润滑涂层仍占主要地位,但针对新型减摩涂层材料也会开展相应的研究工作,例如 BN 等一些层状固体润滑材料。由耐磨涂层材料和固体润滑材料组成的既有耐磨性能,也有减摩作用的复合涂层材料也是摩擦涂层材料发展的一个方向。

在生物活性涂层方面,因为羟基磷灰石在生物活性方面的优势,其仍是研究重点,针对羟基磷灰石的喷涂工艺和性能改进会投入较多的研究工作。在功能涂层方面,随着新型的抗氧化和热障涂层材料的发展,在钛合金表面等离子喷涂涂层方面会开展新型抗氧化和热障涂层的研究工作,例如一些镧系的新型热障涂层。

[参 考 文 献]

[1] LUTJERING Gerd, WILLIAMS James C. Titanium[M]. Springer Press, 2007. (余不详)

[2] 张利军,薛祥义,常辉. 我国航空用变形钛合金材料[J]. 中国材料进展,2012,31(8):40—46.

[3] 彭昂,毛振东. 钛合金的研究进展与应用现状[J]. 船电技术,2012,32 (10):57—60.

[4] 杨英丽,罗媛媛,赵恒章,等. 我国舰船用钛合金研究应用现状[J]. 稀有金属材料与工程,2011,40 (S2):538—544.

[5] PANG W, MAN H C, YUE TM. Laser Surface Coating of Mo-WC Metal Matrix Composite on Ti6Al4V Alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2005, 390: 144—153.

[6] 钱苗根. 材料表面技术及其应用手册[M]. 北京:机械工业出版社,1998:393.

[7] TIAN W, WANG Y, YANG Y. Fretting Wear Behavior of Conventional and Nanostructured Al_2O_3-13% TiO_2 Coatings Fabricated by Plasma Spray[J]. Wear, 2008, 265 (11/12): 1700—1707.

[8] RICHARD C, KOWANDY C, LANDOULSI J, et al. Corrosion and Wear Behavior of Thermally Sprayed Nano Ceramic Coatings on Commercially Pure Titanium and Ti-13Nb-13Zr Substrates[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2010, 28(1): 115—123.

[9] 李兆峰,程德彬,蒋鹏,等. 等离子喷涂 Al_2O_3-TiO_2/MoS_2 陶瓷减摩耐磨涂层的结构与性能研究[J]. 润滑与密封,2011(11):99—102.

[10] SATHISH S, GEETHA M, ARUNA S T, et al. Sliding Wear Behavior of Plasma Sprayed Nanoceramic Coatings for Biomedical Applications[J]. Wear, 2011, 271(5/6): 934—941.

[11] SENOL Yilmaz. An Evaluation of Plasma-sprayed Coatings based on Al_2O_3 and Al_2O_3-13wt. % TiO_2 with Bond Coat on Pure Titanium Substrate[J]. Ceramics International, 2009, 35: 2017—2022.

[12] 杨伟华,周海滨,王纯. TC4 钛合金表面 WC 基耐磨涂层制备[J]. 中国有色金属学报,2010,20(s1):997—1001.

[13] CASADEI F, PILEGGI R, VALLE R, et al. Studies on a Combined Reactive Plasma Sprayed/Arc Deposited Duplex Coating for Titanium Alloys[J]. Surface and Coatings Technology, 2006, 201(3/4): 1200—1206.

[14] ZHOU Chun-gen, CAI Fei, KONG Juan, et al. A study on the Tribological Properties of Low-pressure Plasma-sprayed Al-Cu-Fe-Cr Quasicrystalline Coating on Titanium Alloy[J]. Surface and Coatings Technology, 2004, 187 (2/3): 225—229.

[15] CAI Fei, ZHOU Chun-gen, WANG Na. Wear Behavior of Low-pressure Plasma-sprayed AlCuFe Quasicrystalline Coating on Titanium Alloy[J]. Vacuum, 2006, 81(1): 85—90.

[16] FRIDRICI V, FOUVRY S, KAPSA Ph. Fretting Wear Behavior of a Cu-Ni-In Plasma Coating[J]. Surface and Coatings Technology, 2003, 163—164: 429—434.

[17] HAGER JR C H, SANDERS J, SHARMA S, et al. The Use of Nickel Graphite Composite Coatings for the Mitigation of Gross Slip Fretting Wear on Ti6Al4V Interfaces[J]. Wear, 2009, 267(9/10): 1470—1481.

(下转第 111 页)

[6] 朱晓东,米彦郁,胡奈赛,等. 膜基结合强度评定方法的探讨——划痕法、压入法、接触疲劳法测定的比较[J]. 中国表面工程,2002,57(4):28—31.
[7] 马峰,蔡珣. 膜基界面结合强度表征和评价[J]. 表面技术,2001,30(5):15—19.
[8] 倪晟,孙卓,赵强. 磁控共溅射制备氮化钛铝薄膜及其机械性能的研究[J]. 功能材料,2005,36(12):1842—1848.
[9] PALDEY S, DEEVI S C. Single Layer and Multilayer Wear Resistant Coatings of (Ti, Al) N: A Review[J]. Materials Science and Engineering, 2003, A342: 58—79.
[10] XIE Y, HAWTHORNE H M. A Model for Compressive Coating Stresses in the Scratchadhesion Test[J]. Surface and Coating Technology, 2001, 141(1): 15—25.
[11] 江范清. 划痕法评价氮化钛结合力的研究[D]. 成都:西南交通大学,2012:29—37.
[12] STALLARD J, POULAT S, TEER D G. The Study of the Adhesion of a TiN Coating on Steel Andtitanium Alloy Substrates Using a Multi-mode Scratch Tester[J]. Tribology International, 2006, 39: 159—166.
[13] 李明升,陈柯伟,王福会,等. 空心阴极离子镀 TiAlN 复合薄膜结构及抗氧化性能的研究[J]. 腐蚀科学与技术,2001,13(s1):11—15.

(上接第 97 页)

[18] LI H, KHOR K A. Characteristics of the Nanostructures in Thermal Sprayed Hydroxyapatite Coatings and Their Influence on Coating Properties[J]. Surface & Coatings Technology, 2006, 201(6): 2147—2154.
[19] KHOR K A, GU Y W, PAN D, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Plasma Sprayed HA/YSZ/Ti-6Al-4V Composite Coatings[J]. Biomaterials, 2004, 25(18): 4009—4017.
[20] KANTESH Balania, REBECCA Andersonb, TAPAS Laha, et al. Plasma-sprayed Carbon Nanotube Reinforced Hydroxyapatite Coatings and Their Interaction with Human Osteoblasts in Vitro[J]. Biomaterials, 2007, 28: 618—624.
[21] LIU Xuan-yong, ZHAO Xiao-bing, RICKY K Y Fu, et al. Plasma-treated Nanostructured TiO_2 Surface Supporting Biomimetic Growth of Apatite[J]. Biomaterials, 2005, 26(31): 6143—6150.
[22] XIE You-tao, LIU Xuan-yong, ZHENG Xue-bin, et al. Bioconductivity of Plasma Sprayed Dicalcium Silicate/Titanium Composite Coatings on Ti-6Al-4V Alloy[J]. Surface & Coatings Technology, 2005, 199 (1): 105—111.
[23] 周海,陈飞,张建军. TC4 表面超音速等离子喷涂热障涂层的研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37(S1): 771—773.
[24] ZHOU Hong, LI Fei, HE Bo, et al. Air Plasma Sprayed Thermal Barrier Coatings on Titanium Alloy Substrates[J]. Surface & Coatings Technology, 2007, 201 (16/17): 7360—7367.
[25] BURLACOV I, JIRKOVSKÝ J, MÜLLER M, et al. Induction Plasma-sprayed Photocatalytically Active Titania Coatings and Their Characterisation by Micro-Raman Spectroscopy [J]. Surface and Coatings Technology, 2006, 201 (1/2): 255—264.

(上接第 102 页)

[30] CHANGWEI CHEN, YONHUA Tzen, Erhard Kohn, et al. RF MEMS Capacitive Switch with Leaky Nanodiamond Dielectric Film[J]. Diamond and Related Materials, 2011, 20 (4): 546—550.
[31] TZENG Yu-fen, LEE Chi-yong, CHIU Hsin-tien, et al. Electron Field Emission Properties on Ultra-nano-crystalline Diamond Coated Silicon Nanowires[J]. Diamond and Related Materials, 2008, 17(7—10): 1817—1820.
[32] 何学好,马会中,王峰,等. 纳米金刚石薄膜的制备及场发射研究进展[J]. 光盘技术,2008(4):50—51.
[33] 刘素田,唐伟忠,耿春雷,等. 纳米金刚石薄膜的制备与应用[J]. 金刚石与磨料磨具工程,2006,151(1):75—79.
[34] KRAUSS A R, AUCIELLO O, DING M Q, et al. Electron Field Emission for Ultrananocrystalline Diamond Films[J]. Journal of Applied Physics, 2001, 89(5): 2958—2967.
[35] 韩毅松,玄真武,刘尔凯,等. 纳米金刚石膜——一种新的具有广阔应用前景的 CVD 金刚石[J]. 人工晶体学报,2002,31(2):158—163.
[36] RAINA S, KANG W P, DAVIDSON J K, et al. Nanodiamond Film with 'Ridge' Surface Profile for Chemical Sensing[J]. Diamond and Related Materials, 2008, 17(4/5): 896—899.
[37] PIETZKA, DENISENKO, DIPALO, et al. Nano-crystalline Diamond Electrodes with Cap Layer Decorated by Gold Particles[J]. Diamond and Related Materials, 2010, 19(1): 56—61.