

镍基自润滑涂层的制备及拉伸结合强度研究

段文博, 孙岩桦, 丁春华, 耿海鹏, 戚社苗, 虞烈

(西安交通大学 机械结构强度与振动国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘要: 采用等离子喷涂与粉末冶金方法分别制备了 PS304、PM304 镍基自润滑涂层, 并对涂层的组织、拉伸结合强度进行了研究。结果表明: 采用等离子喷涂制备的 PS304 涂层组织粗大、孔隙率高、润滑相与强化相分布不均匀。而采用高能球磨与真空烧结技术制备的 PM304 涂层组织均匀、致密、粒子明显细化。拉伸试验表明: PS304 的拉伸结合强度较低, 拉伸断口不仅出现在涂层与基底的结合处、也出现在涂层内部; 而 PM304 的拉伸结合强度较高, 涂层与基底之间结合良好、结合方式为冶金结合, 拉伸断口主要出现在涂层内部。PM304 涂层拉伸强度增大的原因主要为: (1) 致密度提高; (2) 尖锐孔隙数量降低; (3) Ag 与 NiCr 之间形成冶金结合; (4) NiCr 基体中析出粒子的弥散强化作用使得 NiCr 基体强度提高。

关键词: 自润滑涂层; 拉伸结合强度; 粉末冶金

中图分类号: TG146.1+5

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2015)01-0079-06

目前, 自润滑涂层 PS304 (PS: plasma spray) 已广泛应用于高温、高速旋转机械中, 并已成为气体动压轴承的专用涂层之一。PS304 涂层主要由以下成分构成: 基体 Ni80Cr20 (60%), 强化相 Cr₂O₃ (20%), 润滑相 Ag (10%) 与共晶 BaF₂/CaF₂ (10%)^[1]。涂层的拉伸结合强度是涂层的重要性能指标之一。研究表明, PS304 涂层拉伸结合强度仅为 17 MPa 左右, 拉伸断口不仅出现在涂层内部也出现在涂层与基底结合处^[2,3]。如此低的拉伸结合强度很容易导致涂层在服役过程中剥离脱落, 从而使得涂层润滑性能失效; 大块涂层的脱落甚至会导致高速旋转的轴承突然“抱死”。为了提高涂层的拉伸结合强度, 研究人员采取了很多措施, 例如对 PS304 涂层进行 650 °C 退火处理^[3], 使涂层的拉伸结合强度提高至 30 MPa。然而由于涂层的恶劣服役条件(环境温度可达到 800 °C、轴颈转速甚至可达 1×10⁵ r/min 以上), 涂层 30 MPa 的拉伸结合强度仍不能保证轴承长期安全地使用。有研究表明, 采用超高速火焰喷涂(HVOF)^[4]或爆炸喷涂(DS)^[5]可制备致密性好、强度高、强度高的涂层, 但至今未见采用超高速火焰喷涂或爆炸喷涂制备 304 涂层拉伸结合强度的报道。另外, 不论是采用等离子喷涂、超高速火焰喷涂还是爆炸喷涂都无法在复杂零件的内表面制备涂层^[6]。粉末冶金法不仅可制备致密的高强度涂层, 而且可在复杂零件内表面制备涂

层。因此本研究采用高能球磨与粉末冶金技术制备高强度 PM304 (powder metallurgy) 涂层, 研究高能球磨与真空烧结对涂层组织、拉伸结合强度的影响。

1 实验

原始粉末分别为 Ni80Cr20(质量分数, 60%, 下同), Cr₂O₃ (20%), Ag (10%) 和共晶 BaF₂/CaF₂ (62/38, 10%)。原始粉末颗粒的大小为 30~70 μm。首先将 Cr₂O₃ 和 BaF₂/CaF₂ 共晶粉放入球磨机中球磨 5 h, 然后加入 NiCr 和 Ag 粉继续球磨 5 h。球与粉末的质量比为 10:1。球磨气氛为氩气, 球磨机转速为 1000 r/min, 不锈钢球直径为 6 mm。在镍基合金棒料(Φ20 mm×24 mm)圆柱面切深度 0.5 mm、宽 15 mm 的环形槽。采用冷等静压将球磨好的粉末压制在圆柱表面环形槽内, 施加的压应力为 80 MPa。然后将试样放到真空炉中进行烧结, 真空度 0.1 Pa、烧结时间 2 h、烧结温度 1200 °C, 升温速度 15 °C/s。制备 PS304 涂层采用的是 METCO-9M 喷涂系统, 喷涂粉末为上述原始粉末。先将不锈钢圆棒切割成 Φ10 mm×6 mm 的小圆片, 然后用丙酮清洗表面, 再经过喷沙处理粗化表面, 然后采用表 1 的参数进行喷涂。

利用下式计算涂层的裂纹扩展力(G_c)^[7]:

$$G_c = 6.115 \times 10^{-4} a^2 P / c^3$$

收稿日期: 2014-01-27

基金项目: 国家自然科学基金(51171143, 51275386); 中央高校基础研究基金以及新世纪优秀人才计划(NCET-11-0418); 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)(2013CB035705)

作者简介: 段文博, 男, 1986年生, 博士生, 西安交通大学机械结构强度与振动国家重点实验室, 陕西 西安 710049, 电话: 029-83395085, E-mail: wb.duan@stu.xjtu.edu.cn

(1)

表 1 PS304 涂层的喷涂参数

Table 1 Spraying parameters of PS304 coatings

Parameter	Value
Current/A	600
Voltage/V	30~32
Standoff distance/cm	8~10
Ar gas flow rate/L min ⁻¹	35
Powder flow rate/kg h ⁻¹	≈1
Powder gas flow rate/ m ³ h ⁻¹	0.4

其中, a 为压痕对角线半长, c 为从压痕中心测量的裂纹长度, P 为负载。为了测试涂层拉伸结合强度, 在镍基合金圆饼 ($\Phi 20\text{ mm} \times 5\text{ mm}$) 试样端面切一个圆槽 ($\Phi 15\text{ mm} \times 1\text{ mm}$), 再将球磨粉末在 80 MPa 下单向压入圆槽中。试样经上述条件烧结后把涂层四周的镍基合金切削掉。然后用 P120 砂纸打磨涂层表面, 之后将环氧胶涂覆在涂层表面与拉杆粘接。拉伸试样室温固化 8 h, 然后 75 °C 固化 24 h。理想条件下环氧胶的结合强度约为 50 MPa。涂层的拉伸试验在拉伸试验机上进行, 测试时拉杆移动速度为 2 mm/min。得到的实验数据 (裂纹扩展力、拉伸强度) 均为 5 个试样的平均值。采用 SEM (JSM-7000F)、XRD 和能谱 (EDXS) 对试样的组织、相结构与拉伸断面成分进行分析。通过图像法测定涂层的孔隙率。

2 结果与讨论

2.1 相结构和成分分析

图 1 为 PS304、PM304 涂层的 XRD 图谱。从图中可以看出, 不同涂层的 XRD 图谱差异不大, 都基本上包含了原始粉末的衍射峰, 而且二者都没有新的衍射峰出现。这说明采用等离子喷涂制备的 PS304 涂层与采用高能球磨、真空烧结制备的 PM304 涂层, 在制备过程中涂层的物相组成没有发生变化。

图 2a 为 PS304 涂层横截面的 SEM 照片。图中显示, 涂层主要为层状组织, 在涂层与基底结合处存在

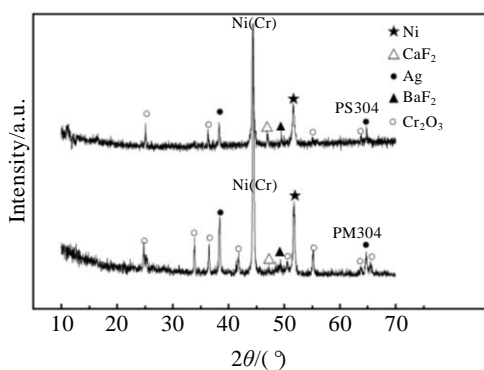


图 1 PS304、PM304 涂层的 XRD 图谱

Fig.1 XRD patterns of PS304 and PM304 coatings

一些尺寸较大的孔隙 (箭头所示)。这可能是由于在喷涂之前对基底表面进行的喷砂处理造成^[8]。孔隙的存在不仅削弱了涂层与基底的结合强度, 而且尖锐的孔隙可能会成为裂纹源^[9], 在涂层的服役过程中裂纹会不断地扩展、合并, 最终导致涂层的大块剥落。而 PM304 涂层 (图 2b) 组织致密、细小, 并且 PM304 涂层与基底结合较好, 从图中可看到明显的过渡区域 (箭头所示)。其 EDXS 能谱分析 (右上插图) 表明, 在过渡区域存在明显的 Ag、Ba 和 Ca。这说明烧结过程中涂层中的 Ag、Ba、Ca 元素扩散到过渡区域中, 从而使得涂层和基体之间的结合形式为冶金结合。

图 3a 为 PS304 的高倍 SEM 照片。EDXS 分析表明白色相为 Ag、灰色相为 NiCr、深色相主要为氟化物与 Cr₂O₃、黑色区域为孔隙。图中显示 PS304 涂层组织粗大, Ag、氟化物与 Cr₂O₃ 的尺寸在 10~30 μm 之间、有些 Ag 粒子的尺寸甚至超过 30 μm。而且层状组织之间存在明显的长条状孔隙。产生这些孔隙的原因主要有 2 个: (1) 粒子融化后被高速喷涂到基底表面上形成薄层状组织, 随后的粒子融化后又被高速喷射到先前粒子形成的薄层上。由于涂层是在大气环境下制备, 因此在层与层之间可能会有由于残余空气的存在而产生孔隙^[10]; (2) 粒子由高温冷却到室温时, 不同材料粒子之间会由于热膨胀系数差异而产生残余热应力。热膨胀系数差异越大, 残余热应力越大。由于喷涂层与层之间主要为类似平面接触, 因此当涂层冷却后, 层与层之间的残余热应力主要为残余拉应力。当层之间的残余拉应力大于层与层之间由于冶金结合与机械互锁所形成的结合强度时, 层与层之间将会发生断裂、产生孔隙。从图 3a 可以看出, 在白色相 Ag 与灰色相 NiCr 之间存在明显的裂纹 (白色箭头所示), 以及在深色相与灰色相 NiCr 之间存在孔隙 (黑色箭头所示), 这可能就是由于 PS304 涂层中基体 NiCr、强化相 Cr₂O₃ 的热膨胀系数较小 (分别为 13×10^{-6} 、 $9.6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), 而润滑相 Ag、BaF₂/CaF₂ 的热膨胀系数较大 (分别为 22×10^{-6} 、 $18 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$)。当涂层冷却后在润滑相与基体之间会产生残余热应力 (即残余拉应力)。并且由于残余热应力大于层与层之间的结合强度, 导致在层状组织之间产生了裂纹。另外, 相同条件下, 不同材料粒子尺寸越大, 粒子间的热变形就越大^[11], 即粒子之间的裂纹就越大。因此从图 3a 中可以看出 PS304 涂层中层状组织越粗大, 不同层状组织之间的裂纹就越明显。

图 3b 为 PM304 的高倍 SEM 照片。EDXS 分析表明白色相为 Ag、灰色相为 NiCr、深色相主要为氟化

物与 Cr₂O₃。图中显示 PM304 涂层组织明显细化，其

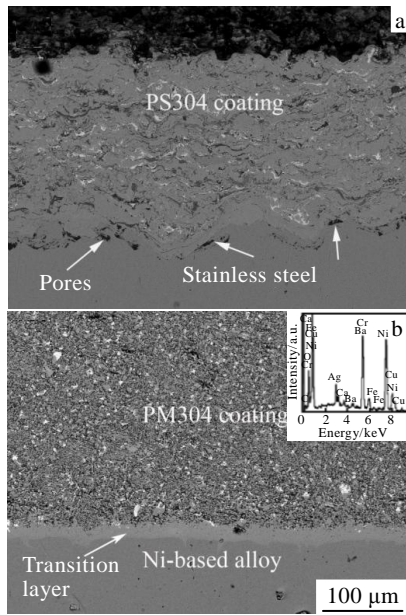


图 2 PS304 与 PM304 涂层横截面的 SEM 照片及过渡层的 EDX 能谱

Fig.2 SEM images of cross section of PS304 (a) and PM304 (b) coatings as well as EDXS result of transition layer (inset)

PM304 (b, c) coatings

中 Ag、氟化物与 Cr₂O₃ 的尺寸明显小于 10 μm。图 3c 为图 3b 的放大 SEM 照片。图中清晰显示深色相主要由一些尺寸为 1~2 μm 的粒子组成。EDXS 分析表明，尺寸较大的粒子主要为氟化物（如白色箭头所示）、而尺寸较小的粒子主要为 Cr₂O₃（如黑色箭头所示）。氟化物与 Cr₂O₃ 粒子尺寸上的差异可能与其硬度与熔点的高低有关。Cr₂O₃ 是工业中常用的研磨剂，其莫氏硬度 8.5，明显高于 BaF₂/CaF₂ 的莫氏硬度 4，在高能球磨过程中，Cr₂O₃ 更容易在钢球的撞击下粉碎形成细小的粒子。而且 Cr₂O₃ 的熔点高达 2435 °C，而 BaF₂/CaF₂ 的熔点只有 1024 °C，在烧结过程中，尺寸较大、熔点较低的 BaF₂/CaF₂ 相比 Cr₂O₃ 更容易长大形成尺寸较大的粒子。

对比 PS304 与 PM304 组织照片，可以看出 PM304 涂层的孔隙率较低。这是由于与粗大粒子相比，细小粒子具有较大的比表面积和较高的表面自由能，而粉体的过剩表面能就是烧结过程的驱动力^[12]。在球磨过程中，粉体变细，粉体的比表面积增大、表面能也增加，这不仅提高了烧结驱动力，同时球磨产生大量的晶格畸变^[13]，使系统的自由能、原子扩散活性大大提高，从而进一步促进烧结致密化；而且高能球磨使粉末之间的混合达到纳米级水平，这也缩短了粒子之间的扩散距离，促进了粒子之间的原子扩散，最终使得 PM304 涂层的孔隙率明显降低。

另外，从图 3c 中还可观察到，PM304 涂层中 Ag 粒子与基体 NiCr 紧密结合，结合处几乎看不到裂纹存在。而且由于热膨胀系数较大的 Ag 是掺杂在热膨胀系数较小的基体 NiCr 之间，当涂层烧结冷却后，在 Ag 粒子与基体 NiCr 之间的残余热应力主要为残余拉应力。因此这说明 Ag 粒子与基体 NiCr 之间的残余拉应力小于 Ag 粒子与基体 NiCr 之间结合强度。残余热应力不仅与热膨胀系数差异有关，而且与温度差有关。喷涂时粒子在等离子焰中快速熔化（最高温度可达 10000 °C 以上），而真空烧结 PM304 涂层时最高温度仅为 1200 °C。相比可知温度差明显降低，使得 PM304 涂层中不同成分之间的残余热应力降低。不仅如此，在制备 PM304 涂层之前，涂层的成分粒子进行过高能球磨。粒子在钢球的高速撞击下不断地重复着断裂、冷焊、再断裂、再冷焊的过程，最终形成的粒子不仅细小，而且是复合粒子。这些细小的复合粒子在烧结过程中很容易通过原子的相互扩散形成强度较高的冶金结合。因此采用高能球磨与粉末冶金工艺制备的 PM304 涂层，不仅组织细小、致密，而且 Ag 粒子与基体 NiCr 之间形成了强度较高的冶金结合。

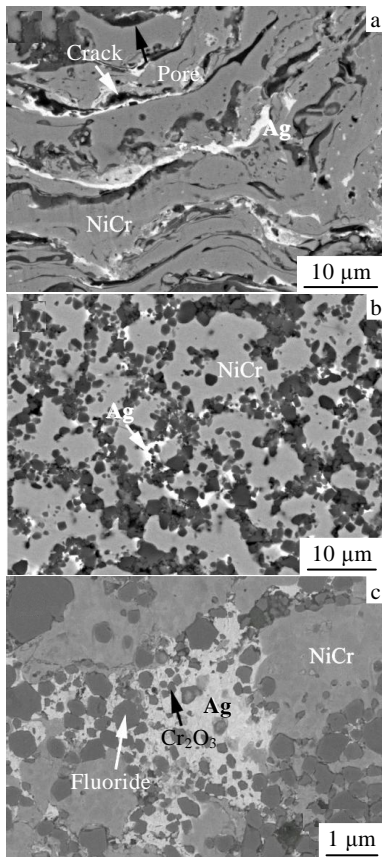


图 3 PS304 与 PM304 涂层的高倍 SEM 照片

Fig.3 High magnification SEM images of PS304 (a) and

2.2 力学性能

表 2 显示了 PM304 和 PS304 的力学性能。从表中可以看出, PM304 具有较高的拉伸结合强度与裂纹扩展力。材料的拉伸断裂实际上是裂纹的产生、扩展、断裂的过程。材料的裂纹扩展力越高, 说明材料断裂消耗的能量越多, 材料的强度越高^[14]。PM304 拉伸结合强度的提高主要归结于以下几个原因: (1) 致密度的提高。从表中可看出, PM304 的致密度明显提高。研究表明, 较高的致密度有利于提高涂层的承载实体, 从而提高涂层的整体机械强度和承载能力^[15]。(2) 尖锐孔隙数量的减少。比较 PS304 与 PM304 的 SEM 照片可看出 (图 3a, 3b), PM304 涂层中尖锐孔隙的数量明显减少。尖锐的孔隙不仅是裂纹产生的起源, 而且会加快裂纹的扩展、合并^[16]。因此尖锐孔隙数量的减少也将提高 PM304 的拉伸结合强度。(3) 粒子之间形成冶金结合。从图 3c 可以看到, PM304 涂层中 Ag 与基体 NiCr 之间形成了明显的冶金结合, 强度较高的冶金结合将明显提高涂层的强度。而对于喷涂涂层来说, 层状组织之间的结合主要为机械互锁^[17], 这主要是由于喷涂制备涂层时, 涂层的冷却速度极快甚至超过 10^4 K/s, 在如此短的时间内, 层状组织之间很难发生原子扩散而形成冶金结合。虽然后续的热处理可以使得部分层状组织之间形成冶金结合, 但对于层与层之间已经形成裂纹的层状组织却无能为力。

为了进一步研究粉末冶金对涂层拉伸结合强度的影响, 本研究对涂层的拉伸断口进行了分析。图 4a、4b 分别为 PS304、PM304 涂层拉伸断裂面的 SEM 照片。PS304 涂层的拉伸断裂不仅出现在涂层本身, 也出现在涂层与基底结合处, 这说明 PS304 涂层自身的粘结强度与涂层与基底之间的结合强度相差不大。而 PM304 涂层拉伸断裂主要出现在涂层本身, 这说明由于涂层与基底之间形成冶金结合, 其结合强度高于涂层自身的粘结强度。从 PS304 拉伸断裂面 (图 4a) 可以看出, 断面比较粗糙, 而且断面上存在尺寸超过 $10\ \mu\text{m}$ 的平滑区域 (记为 A)。在平滑区上几乎看不到任何断裂痕迹。平滑区域的产生可能是由于层状组织之间的孔隙造成的。从图 3a 可以看出, 层与层之间存在明显的孔隙, 有的孔隙的尺寸超过 $10\ \mu\text{m}$, 尺寸较大的孔隙将明显减少层与层之间的有效结合面积, 从而降低涂层的粘结强度, 导致涂层的拉伸断面往往出现在孔隙处。除了平滑区域, 在 PS304 断面上还可看到一些尺寸为 $10\sim 30\ \mu\text{m}$ 的粒子 (箭头所示), EDXS 显示这些粒子主要为氟化物与 Cr_2O_3 。相比可知, 这些粒子与图 3a 中的陶瓷相粒子尺寸相似, 这表明 PS304 涂层在拉伸过程中, 裂纹是沿着陶瓷相氟化物与 Cr_2O_3

粒子边界扩展。相似的研究结果也出现在 WC-Co 复

表 2 PM304 和 PS304 的力学性能
Table 2 Characteristics of PM304 and PS304

Property	PS304	PM304	Error/%
Relative density/%	91	95	± 1
Crack extension force/ J m^{-2}	6.1	8.7	± 4
Tensile binding strength/MPa	30	45	± 5

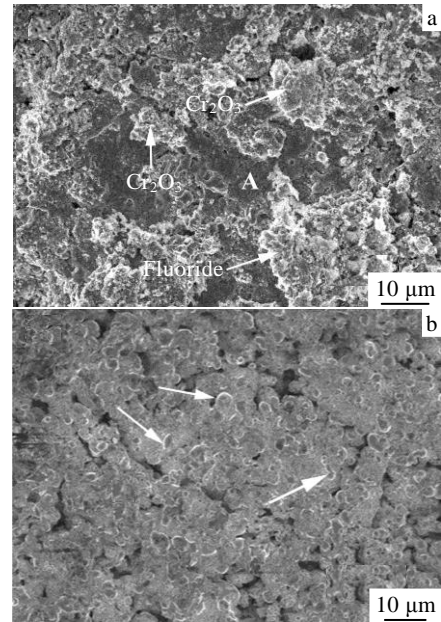


图 4 PS304、PM304 涂层拉伸断裂面的 SEM 照片
Fig.4 SEM images of tensile fracture of PS304 (a) and PM304 (b) coatings

合涂层中^[18], karimi 认为由于不同类型粒子界面间存在的残余热应力减弱了界面结合强度, 导致裂纹主要是沿着粒子的边界扩展。而在 PM304 涂层的拉伸断裂面上 (图 4b), 不仅没有明显的光滑区域存在, 而且可以看出断面上的粒子明显细化 (箭头所示)。

图 5a 为 PM304 断裂面的高倍 SEM 照片。图中显示, 断面上存在很多尺寸为 $1\sim 2\ \mu\text{m}$ 的等轴粒子, 有些粒子呈团聚状, EDXS 分析显示这些粒子主要为氟化物和 Cr_2O_3 。可以看出, 这些粒子的尺寸与形态和图 3c 中 PM304 涂层中陶瓷颗粒的尺寸与形态相差不大, 而且大部分颗粒的边缘很光滑。这说明拉伸过程中, 裂纹主要是沿着粒子之间的边界扩展, 并且发生的断裂主要为脆性断裂。与粗大粒子相比, 细化粒子将会增加裂纹扩展途径, 使得涂层裂纹扩展力提高, 最终导致涂层的拉伸结合强度提高。

另外, 从 PM304 断裂面的高倍 SEM 照片上还可看到一些尺寸小于 $1\ \mu\text{m}$ 的韧窝 (图 5b), 韧窝是材料塑性断裂的主要微观特征。这表明拉伸过程中, 虽然

PM304 涂层表现为脆性断裂，但也存在微观的塑性断

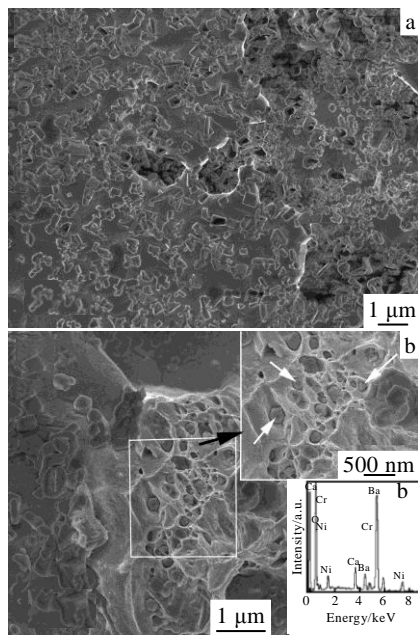


图 5 PM304 涂层断裂面的高倍 SEM 照片及韧窝区 EDXS

Fig.5 High magnification SEM images of tensile fracture (a) and EDXS of the voids zone (b) of PM304 coatings

裂。与脆性断裂相比，塑性变形将会吸收更多的变形能，从而使得材料的强度增加。相似的结果也有报道，Wiederhorn 的研究表明^[19]，随着晶粒尺寸纳米化，原本脆性断裂的 Si_3N_4 也出现了微观塑性断裂，从而使得 Si_3N_4 的强度增大。进一步的 SEM 放大照片（图 5b 右上角插图）可以发现，很多韧窝中都存在尺寸小于 500 nm 的细小粒子。这说明这些韧窝是典型的由第二相粒子引起的韧窝。为了探明第二相粒子的由来，对韧窝区域进行了成分测定，EDXS 能谱（图 5b 右下角插图）表明，该区域中含有大量的 Ni、Cr 元素和少量的 Ba、Ca 元素。这说明韧窝的主体是 NiCr 相；韧窝中的小颗粒主要为氟化物和 Cr_2O_3 ，而并非球磨过程中引入的杂质。这些细小的氟化物和 Cr_2O_3 颗粒可能是在机械球磨过程中，由于钢球的高能冲击，导致氟化物和 Cr_2O_3 固溶到 NiCr 基体中形成过饱和固溶体^[20]，在随后的烧结过程中，固溶的颗粒又从 NiCr 基体中析出，从而形成了这些细小的氟化物和 Cr_2O_3 粒子。由于 NiCr 相是 PM304 涂层的主要成分，它的强度很大程度上决定了涂层的强度。因此，正是由于这些弥散析出的、细小的第二相粒子导致在 NiCr 基体上产生了韧窝^[21]，从而消耗了更多的变形能，使得 PM304 涂层的拉伸结合强度提高。

3 结 论

1) 通过高能球磨和粉末冶金技术制备的镍基自润滑 PM304 涂层其组织均匀致密（致密度达到 95%）。自润滑相、强化相粒子尺寸细小，其中氟化物、 Cr_2O_3 粒子尺寸小于 2 μm ，Ag 粒子尺寸小于 10 μm 。

2) PM304 涂层与 Ni 基合金基底之间结合良好，涂层拉伸结合强度达到 45 MPa，明显高于喷涂涂层 PS304 的拉伸强度。拉伸断裂主要出现在涂层内部。

拉伸结合强度的增强主要归结于：（a）孔隙率降低；（b）尖锐孔隙数量减少；（c）涂层中 Ag 与 NiCr 之间形成冶金结合；（d）从 NiCr 基体中析出细小粒子的弥散强化作用使得涂层在拉伸过程中形成了韧窝，韧窝的形成将消耗更多的变形能，导致涂层的拉伸结合强度提高。

参考文献 References

- [1] Dellacorte C, Valco M J. *Tribology Transactions of ASME*[J], 2000, 43(4): 795
- [2] Dellacorte C. *Tribology Transactions of ASME*[J], 2003, 46(3): 361
- [3] Dellacorte C, Edmonds B J. *Tribology Transactions of ASME* [J], 2002, 45(4): 499
- [4] Edin E Balic, Thierry A Blanchet. *Wear*[J], 2005, 259: 876
- [5] Stanford M K, Ward L D, Dellacorte C. *NASA REPORT* 2006, TM 213603[R]. Cleveland: National Aeronautics and Space Administration, 2006
- [6] Zhu Jinglei(朱警雷), Huang Jihua(黄继华), Wang Haitao(王海涛) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2008, 37(7): 1313
- [7] Zhu L, He J N, Yan D R et al. *Applied Surface Science*[J], 2011, 257: 8722
- [8] Dellacorte C. *Surface and Coatings Technology*[J], 1996, 86-87: 486
- [9] Larson D R, Coppola J A, Hasselman D P H et al. *Journal of the American Ceramic Society*[J], 1974, 57(10): 417
- [10] Luo H, Goberman D, Shaw L et al. *Materials Science and Engineering*[J], 2003, 346: 237
- [11] Yin Xiangchu(尹祥础). *Solid Mechanics*(固体力学)[M]. Beijing: Earthquake Press, 2011
- [12] Huang Peiyun(黄培云). *Powder Metallurgy Principles*(粉末冶金原理)[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1982
- [13] Lu Ke(卢柯). *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 1995, 31(2): 74
- [14] Rice R W. *Treatise on Materials Science and Technology*[J],

- 1977, 11: 199
- [15] Wang You, Stephen Jiang, Wang Meidong *et al.* *Wear*[J], 2000, 237: 176
- [16] Cho S J, Moon H, Hockey B J *et al.* *Acta Metallurgica et Materialia*[J], 1992, 40: 185
- [17] Li J F, Liao H, Wang X Y *et al.* *Tribology International*[J], 2004, 37: 77
- [18] Karimi A, Verdon C, Barbezat C. *Surface and Coatings Technology*[J], 1993, 57: 81
- [19] Wiederhorn S M, Hockey B J. *Journal of Material Science*[J], 1983, 18: 766
- [20] Zhang Hongtao(张洪涛), Ding Chunhua(丁春华), Guo Yongfeng(郭永峰) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程)[J], 2007, 36(2): 335
- [21] Qin X Y, Cheong S H, Lee J S. *Materials Science Engineering A*[J], 2003, 363(1-2): 62

Synthesis and Tensile Binding Strength of Ni-based Self-lubricating Coatings

Duan Wenbo, Sun Yanhua, Ding Chunhua, Geng Haipeng, Qi Shemiao, Yu Lie

(State Key Laboratory of Strength and Vibration for Mechanical Structure, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The microstructure and tensile binding strength of Ni-based self-lubricating coatings PS304 by plasma spraying and PM304 by powder metallurgy were studied. The result shows that the PS304 coating prepared by plasma-spraying has a coarse microstructure and high porosity. The lubricant phase fluoride and strengthening phase Cr_2O_3 are distributed unevenly. However, the microstructure of PM304 coating prepared by mechanical milling and vacuum sintering is uniform and dense, and the size of particles is much finer. The tensile test shows that the PS304 coating has a low tensile binding strength. The tensile fracture occurs not only in the interface of coating and substrate, but also appears in the internal of the coating. The PM304 coating has a higher tensile binding strength, and a good metallurgical bonding can be obtained between coating and substrate. The tensile fracture mainly appears in the internal of the coating. The higher tensile binding strength of PM304 coating is mainly due to 4 reasons, including the increase of density, the decrease of the sharp pores number, a metallurgical bonding formed between Ag and NiCr, and the dispersion hardening effect of fine particles precipitated from the NiCr substrate which increases the strength of the NiCr substrate.

Key words: self-lubricating coating; tensile binding strength; powder metallurgy

Corresponding author: Ding Chunhua, Ph. D., Professor, State Key Laboratory of Strength and Vibration for Mechanical Structure, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, P. R. China, Tel: 0086-29-83395085, E-mail: chding@mail.xjtu.edu.cn