

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.
F16C 33/20 (2006.01)



[12] 发明专利申请公布说明书

[21] 申请号 200480019903.9

[43] 公开日 2007年7月11日

[11] 公开号 CN 1997833A

[22] 申请日 2004.6.21

[21] 申请号 200480019903.9

[30] 优先权

[32] 2003.6.20 [33] GB [31] 0314372.4

[86] 国际申请 PCT/GB2004/002673 2004.6.21

[87] 国际公布 WO2004/113749 英 2004.12.29

[85] 进入国家阶段日期 2006.1.11

[71] 申请人 达纳公司

地址 美国俄亥俄州

[72] 发明人 C·A·梅斯通

C·P·S·约哈尔

[74] 专利代理机构 中国国际贸易促进委员会专利商
标事务所

代理人 任宗华

权利要求书 3 页 说明书 14 页

[54] 发明名称

轴承

[57] 摘要

公开了在其上具有轴承材料的滑动层的滑动轴承，该轴承材料包括聚合物基基体，所述聚合物基基体选自改性环氧树脂和聚酰亚胺/酰胺树脂，该基体具有包含在其内的至少一种添加物，所述添加物选自范围为 15 - 30 体积%的金属粉末；范围为 1 - 15 体积%的氟聚合物；范围为 0.5 - 20 体积%的陶瓷粉末；和范围为 2 - 15 体积%的氧化硅。

1. 一种在其上具有轴承材料的滑动层的滑动轴承，该轴承材料包括聚合物基基体，所述聚合物基基体选自改性环氧树脂和聚酰亚胺/酰胺树脂，该基体具有包含在其内的至少一种添加物，所述添加物选自范围为 15 - 30 体积%的金属粉末；范围为 1 - 15 体积%的氟聚合物；范围为 0.5 - 20 体积%的陶瓷粉末；和范围为 2 - 15 体积%的氧化硅。

2. 权利要求 1 的滑动轴承，其中基于固体对固体的含量，改性环氧树脂包括 30 - 60w/w 的环氧树脂，和 70 - 40w/w 的酚醛树脂。

3. 权利要求 1 或 2 的滑动轴承，其中改性环氧树脂还含有氨基树脂。

4. 权利要求 1 - 3 任何一项的滑动轴承，其中改性环氧树脂还含有乙烯基树脂。

5. 权利要求 1 - 4 任何一项的滑动轴承，其中在最初未固化的树脂基体混合物内，改性环氧树脂含有两种或更多种不同的环氧树脂成分。

6. 权利要求 1 的滑动轴承，其中聚酰亚胺是在聚酰亚胺/酰胺基体树脂内的主要成分。

7. 权利要求 6 的滑动轴承，其中聚酰亚胺/酰胺树脂还含有乙烯基树脂成分。

8. 一种滑动轴承，其中金属粉末选自：钨、铝、铜、银、锡、黄铜、青铜、不锈钢、镍。

9. 权利要求 1 - 8 任何一项的滑动轴承，其中金属粉末包括优选比例的不同金属粉末的混合物。

10. 权利要求 8 的滑动轴承，其中金属粉末包括范围介于 30/70 至 70/30 体积% A1/W 的铝和钨金属的混合物。

11. 权利要求 10 的滑动轴承，其中 A1 和 W 粉末的比例为 40/60 体积% A1/W。

12. 权利要求 10 或 11 的滑动轴承，其中 W 颗粒的形态是团状或圆形。

13. 权利要求 10-12 任何一项的滑动轴承, 其中 Al 粉末是薄片或叶状形态。

14. 前述任何一项权利要求的滑动轴承, 其中金属粉末成分的粒度范围为 0.5-10 微米。

15. 权利要求 1-9 任何一项的滑动轴承, 其中金属粉末成分选自 Al/Sn; Ag/Cu; Cu/W; Ag/W。

16. 权利要求 1-9 任何一项的滑动轴承, 其中金属粉末包括金属合金颗粒。

17. 权利要求 16 的滑动轴承, 其中合金选自不锈钢、铝合金、黄铜和青铜。

18. 前述任何一项权利要求的滑动轴承, 其中氟聚合物是聚四氟乙烯。

19. 前述任何一项权利要求的滑动轴承, 其中氟聚合物的含量范围为 1-15 体积%。

20. 权利要求 19 的滑动轴承, 其中氟聚合物的含量范围为 2-8 体积%。

21. 前述任何一项权利要求的滑动轴承, 其中陶瓷粉末选自氧化物、氮化物、碳化物、硅酸盐和硫化物。

22. 前述任何一项权利要求的滑动轴承, 其中陶瓷含量范围为 2-20 体积%。

23. 前述任何一项权利要求的滑动轴承, 其中氧化硅含量范围为 4-10 体积%。

24. 前述任何一项权利要求的滑动轴承, 其中粒度范围为 20-50 纳米。

25. 前述任何一项权利要求的滑动轴承, 其中氧化硅是反应性氧化硅, 且拥有与颗粒表面缔合的“-OH”基。

26. 前述任何一项权利要求的滑动轴承, 其中加入到聚合物基体内的全部添加物的固体含量不超过 35 体积%。

27. 权利要求 26 的滑动轴承, 其中加入到基体内的添加物的总固

体含量为 10 - 30 体积 %。

28. 前述任何一项权利要求的滑动轴承, 进一步包括范围为 0.2 - 3 体积 % 的硅烷材料。

29. 权利要求 28 的滑动轴承, 其中硅烷材料选自双(γ -三甲氧基甲硅烷基丙基)胺和 γ -环氧丙氧丙基三甲氧基硅烷。

30. 前述任何一项权利要求的滑动轴承, 其中聚合物基轴承材料沉积在另一轴承材料层上。

31. 权利要求 30 的滑动轴承, 其中另一轴承材料选自铝合金或铜合金。

32. 权利要求 30 或 31 的滑动轴承, 其中聚合物基轴承材料的厚度范围为 5 - 40 微米。

33. 权利要求 1 - 29 任何一项的滑动轴承, 其中聚合物基轴承材料直接沉积在结实的衬里材料上。

34. 权利要求 33 的滑动轴承, 其中聚合物基轴承材料的厚度范围是 40 - 100 微米。

35. 前述任何一项权利要求的滑动轴承, 其中聚合物基轴承材料作为液体施加到基底上。

36. 权利要求 35 的滑动轴承, 其中将液体喷洒施加。

轴承

本发明涉及滑动轴承，和尤其，但不仅仅涉及具有结实的衬里层，在该衬里 (backing) 层上的第一轴承材料层，和在第一轴承材料层上的第二轴承材料层的滑动轴承。

在内燃机中用作曲轴轴颈轴承的滑动轴承例如通常是半圆柱形，且通常具有层状结构。该层状结构通常包括结实的衬里材料，例如钢，例如厚度范围为约 1mm 或更大的钢；粘合到衬里上且厚度范围通常为约 0.1 - 0.5mm 的第一轴承材料衬垫 (lining)；和常常粘合到第一轴承材料表面上且厚度小于约 25 微米的第二轴承材料层。第二轴承材料的表面形成具有共操作的心轴轴颈表面的实际运转的表面。当轴承例如安装在主轴承外壳内或者在连接棒的较大端内时，衬里提供轴承壳强度和抗变形。若第二轴承材料层因任何原因应当磨损的话，则第一轴承材料层提供合适的轴承运转性能。因此，第一轴承材料层提供抗磨损性且与心轴轴颈表面兼容并防止轴颈表面与结实的衬里材料接触。如上所述，尽管第一轴承材料提供抗磨损性和相容性，但它通常比第二层材料硬。因此，就调节轴承表面和心轴轴颈之间小的失配 (保形性) 能力和就包埋在润滑油供应中循环的脏污颗粒以便防止因碎片对轴颈表面的划伤或损坏 (脏污包埋性) 来说，第一轴承材料是较差的。

第一轴承材料通常可选自或者铝合金或者铜合金材料。铝合金通常包括铝或软质金属的第二相在其内的铝合金基体。软质金属相可选自铅、锡和铋中的一种或多种。然而，当今铅由于其环境缺点导致不是优选的元素。铜基合金，如铜-铅和加铅青铜最终由于这些环境考虑因素导致也可能是有利的，和它们可例如被无铅的铜合金替代。

与心轴轴颈共操作的第二轴承材料也称为覆盖层，且通常由相对非常软质的金属层形成。实例是，例如通过电化学沉积方法沉积的铅-锡合金。然而，除了非所需的环境因素以外，这种合金还易于在现

代高负载的工程应用中磨损。为了用无铅合金替代这种覆盖合金，在具有相对高锡含量且通过诸如阴极溅射之类的技术沉积的软质铝合金上进行了耐磨得多的替代品的大量研究工作。这一技术的缺点是这种轴承层的生产昂贵，该工艺由于要求真空溅射设备，因此基本上是小规模的间歇工艺。

为了解决电沉积的铅-锡合金和后来的溅射技术的上述问题，一些研究者转向油润滑的、水力负载的轴颈轴承用的聚合物基覆盖层。

JP-A-11106775 公开了一种覆盖层，其具有聚酰胺酰亚胺树脂的聚合物基体和具有 20-69.7 体积%在其内的自润滑相。实施例显示出 28-63 体积%的自润滑相(二硫化钼)。自润滑相可选自二硫化钼、石墨、二硫化钨和类似物。

JP-A-11106779 公开了一种类似的材料，在此情况下的实施例含有 30-70 体积%的二硫化钼，但其中树脂基体具有超过 100Mpa 的拉伸强度。

然而，这种高含量的所述类型的自润滑材料的问题是，尽管材料的摩擦性能和耐磨性可能是充分的，但疲劳强度常常受到损害。

本发明试图克服现有技术的缺点。

根据本发明的第一方面，提供一种在其上具有轴承材料滑动层的滑动轴承，该轴承材料包括聚合物基基体，所述聚合物基基体选自改性环氧树脂和聚酰亚胺/酰胺树脂，该基体在其内包含选自下述的至少一种添加物：范围为 15-30 体积%的金属粉末；范围为 1-15 体积%的氟聚合物粉末；范围为 0.5-20 体积%的陶瓷粉末；和范围为 2-15 体积%的氧化硅。

本发明的轴承拟在油润滑的、水压负载的应用，如内燃机的主轴承和连接棒轴承中操作，在所述应用中，负载的图案极不均匀，在一个完整的发动机循环中范围从低负载水平到非常高的峰值负载。因此，这种应用的轴承材料必须本身拥有不仅高的强度，而且拥有高的疲劳强度耐受它们将遇到的循环负载以及对材料沉积在其上的基底非常程度的粘合剂粘结强度。

在所打算的应用中，所经历的温度通常高于塑料轴承材料通常遇到的温度。此外，应用是油润滑的应用，因此塑料材料必须抗在现代油中使用的炽热的化学添加剂，以便在现代高性能发动机内有关的恶劣条件下维持其润滑质量。

在本说明书中，术语“改性环氧树脂”拟覆盖基于固体对固体含量，含 30 - 60w/w 环氧树脂和 70 - 40w/w 酚醛树脂的树脂。基体树脂中的酚类组分提供良好的耐热和耐化学性，同时还非常耐化学性的环氧组分也提高轴承材料层的挠性并促进对它沉积在其上的基底的改进粘合。

环氧树脂组分本身可包括两种或多种不同的环氧树脂。

改性环氧树脂此外也可含有氨基树脂，以便形成环氧 - 氨基 - 甲醛树脂。氨基树脂组分促进环氧树脂固化和交联，且还促进聚合物对基底的粘合。聚合物的耐化学性还通过氨基树脂组分得以提高。

也可进一步添加乙烯基树脂。乙烯基树脂组分对树脂基体具有软化效果且赋予覆盖层保形性，从而使得它能变形，以调节例如在心轴轴颈和轴承表面之间的微小的失配。

典型的改性环氧树脂基体的实例包括：53wt%环氧/酚醛树脂；35wt%氨基树脂；12wt%乙烯基树脂。这一树脂基体组合物仅仅是例举，和更宽的组成范围可在这些数值周围显著地变化。

在聚酰亚胺/酰胺基体树脂的情况下，聚酰亚胺是主要成分。聚酰亚胺树脂具有突出的耐化学性和突出的耐热性，因此能耐受最多约 400℃ 的温度。此外，聚酰亚胺对基底的粘合特征也是优良的。聚酰亚胺/酰胺树脂也可含有乙烯基树脂组分，所述乙烯基树脂组分具有类似的保形性，从而赋予与改性环氧树脂基体一样的效果。

典型的聚酰亚胺/酰胺基体组合物可包括：84wt%聚酰亚胺/酰胺树脂；16wt%乙烯基树脂。这一组合物仅仅是例举和关于环氧树脂基体，更宽的组成范围可在这些数值周围显著地变化。

存在金属粉末成分，这是因为它赋予与高轴承负载相适应的耐磨性的优势，且鉴于在内燃机的操作过程中生成的高的点火负载，还能

改进轴承材料的抗冲性。

金属粉末成分可包括纯金属，例如铝、铜、银、钨、镍的简单粉末，或者可包括金属粉末合金，例如黄铜、青铜、不锈钢。

金属粉末成分本身可包括优选比例的不同金属或金属合金粉末的混合物。在本发明轴承材料的一个实施方案中，金属粉末可包括比例为 40/60%A1/W 体积的铝与钨金属的混合物。然而，相对比例范围可介于 30/70 至 70/30A1/W，这取决于所讨论的实际的发动机轴承应用。

各成分的粉末形态可以变化。在以上所述的实施例中，W 颗粒是团状或者圆形，和对于非常硬的 W 颗粒来说，这一形态具有改进的耐磨性，这是因为这些硬颗粒在基体内均匀分布所致。然而，甚至对于硬颗粒来说，一般来说，通常优选薄片或小片类型的颗粒形态。已经成功地使用了薄片或小片形态的不锈钢粉末。

较软的 A1 粉成分，和其它较软的金属粉末，例如黄铜、铜、银和类似物，可优选是薄片或小片形态，因为它提供较大的表面积，和所述颗粒倾向于通常在轴承材料层的平面内自校准，因此在使用中提供高温润滑效果。或者，A1 成分也可以是团状颗粒形态，因为还发现它在一些情况下是有益的。

在具有小片形态的较软的金属粉末的情况下，优选使用通常纯的金属，例如 Al、Ag 或 Cu，因为这些材料的导热率有益地将热量从轴承传导到它包含在其内的外壳中且还循环润滑油以供轴承冷却目的。

金属粉末的总含量范围可以是 15 - 30 体积%。低于 15 体积%时，耐磨性的改进不足，而超过 30 体积%，则轴承材料变得太硬，和在该层内倾向于产生孔隙度，这对疲劳强度和该材料对基底的粘合有害。

金属粉末成分的粒度可优选在 0.5 - 10 微米范围内，和更优选介于 0.5 至 5 微米。

以上所述的 A1/W 的可供替代的金属粉末成分的组合可包括 Al/Sn; Ag/Cu; Cu/W。然而，本领域的熟练技术人员要理解，可使用其它组合，例如 Ag/W 和单独的粉末可能不一定是元素，相反也可以是合金颗粒，例如不锈钢、黄铜或青铜。尽管对于轴承性能来说，铅或

含铅的材料是有益的，但这种材料由于其环境和安全方面的缺点，因此现在不是优选的。

氟聚合物因其对材料摩擦性能的有益效果以及其自润滑效果，因此可包括在轴承材料中。合适的材料可以是聚四氟乙烯 (PTFE)，然而，可使用其它氟聚合物，但性能通常不如 PTFE。

氟聚合物的合适的含量范围可以是 1-15 体积%，其中优选范围为 2-8 体积%。太高的氟聚合物含量降低基体硬度和强度到不可接受的程度。

氟聚合物的粒度所需地在 1-5 微米范围内。优选 2-3 微米的粒度范围。

在一般的意义上使用术语“陶瓷”粉末，它包括非金属、无机粒状材料的添加物，这些添加剂起到改进聚合物基体耐磨性和强度的作用。这种材料的实例可包括氧化物、氮化物、碳化物、硫化物、硅酸盐等。使用氧化铝、滑石和玻璃珠作为聚合物基体的添加物进行试验。

在所测试的各种可供替代的陶瓷粉末当中，三种材料看起来在其对各种性能的影响方面尤其有用，这些材料是氧化铝、氮化硼和滑石。

氧化铝具有有益的效果，因为它轻轻地抛光共操作的心轴的表面，使得轴颈表面对轴承表面的磨损较少，从而降低其磨损。

氮化硼表现的尤其有用，特别是在其中颗粒形态为小片形式的情况下。试验表明，小片形式的六方晶体结构的氮化硼与润滑剂共操作，提供加强的相容性，从而导致更好的耐磨性和抗划性。与此相反，采用球形或团状颗粒形式的立方晶体结构的氮化硼进行测试导致在疲劳测试下的磨损。

滑石，尽管是一种非常软的材料，但与氮化硼相反，例如表现出增强聚合物基体，特别是与主轴轴承端相邻的边缘处，其中在所述边缘处，若不存在滑石的话，在聚合物固化过程中会发生某些收缩，从而导致较大的边缘磨耗。然而，已发现，氮化硼在轴承边缘处还满足最小化收缩与磨耗效果这一功能。因此，一起使用滑石和氮化硼二者认为是不需要的，和由于氮化硼对性能的更大的有益影响，因此优选

使用氮化硼。

陶瓷粉末的含量范围可以是 0.5 - 20 体积%。高于 20 体积%的材料变得太硬且没有挠性，而低于 0.5 体积%时，没有充分实现对磨损和基体强度的有益影响。优选 2 - 20 体积%的含量。

氧化硅可以以 1 - 20 体积%的范围存在。

氧化硅不同于以上所述的陶瓷粉末添加物，因为它不作为粉末添加，和在一些配方中，与以上的陶瓷粉末添加物相比，对聚合物材料和轴承作为整体具有进一步的更加难以达到的效果。可将氧化硅以 2 - 15 体积%的范围添加到环氧基基体材料内。氧化硅具有增强基体的效果且对耐磨性具有有益的影响。低于 2 体积%没有充分实现这些效果，而高于 15 体积%时，基体太硬且没有挠性。优选范围为 4 - 10 体积%。

氧化硅的类型是重要的，因为它对材料的轴承特征具有显著的影响。优选地，氧化硅的粒度应当在 20 - 50 纳米范围内。所使用的氧化硅的类型实际辅助聚合物层粘合到基底上。所使用的氧化硅的化学形式在该颗粒的表面上拥有“-OH”基，且它键合到金属基底的表面上，因此通过改进的粘结强度改进该材料的强度和抗疲劳性这二者。因此，所使用的氧化硅不仅仅是在基体内的游离颗粒，而是氧化硅的“反应性”形式，在所述氧化硅内，-OH 基具有反应性和极性，因此改进粘合。

所需地，固体添加物的总含量对塑料基体应当不超过 35 体积%，而与以上所述的各成分含量之和无关。一般来说，添加物的总固体含量(颜料体积含量, PVC)对基体可以优选在 10 - 30 体积%范围内，和更优选在 20 - 30 体积%范围内。

优选地，本发明的轴承材料还包括进一步添加独立的粘合促进剂。这种粘合促进材料可以以硅烷材料为基础，且藉助硅烷分子键的一端，通过与聚合物基体和该分子的另一端交联相结合，是有效的，所述硅烷分子的另一端拥有高比例的“-OH”基与金属基底键合。优选添加 0.2 - 3 体积%的范围。合适的材料的实例可包括双(γ -三甲氧基甲硅

烷基丙基)胺和 γ -环氧丙氧丙基三甲氧基硅烷。

本发明的轴承可包括下述的数种不同形式之一：例如，结实的衬里材料可以是钢且具有沉积在其上的第一轴承材料层，其中第一轴承材料层具有沉积在其上的本发明的第二聚合物基轴承材料。在这一实例中，第一轴承材料可包括例如基于铝合金或铜合金的金属轴承材料。

在一些情况下，第一轴承材料层本身可构成结实的衬里材料。在这一实例中，可使用例如锡-青铜材料。

在本发明的聚合物基轴承材料沉积在第一轴承材料层上的情况下，它的厚度范围可以是约 5-40 微米。然而优选厚度范围为 10-30 微米。

还可预见本发明的聚合物基轴承材料可直接沉积在结实的衬里材料上，在大家认可的意义上，所述结实的衬里材料本身不是轴承材料。它的一个实例是聚合物基轴承材料层沉积在其上的钢制衬里。在这一结构中，本发明的聚合物基轴承材料的厚度可以大于其中存在第一轴承材料的插入层的情况。在这一结构中，聚合物基轴承材料层的厚度范围可以是 40-100 微米。优选范围可以是 40-70 微米。

本发明的聚合物基轴承材料可作为液体施加到基底上。此外，该聚合物基材料可用合适的溶剂稀释并通过已知的技术喷洒到所需的基底上。层厚的控制是良好的，和可通过例如喷洒沉积多层，形成较厚的层。

在沉积方法是借助喷洒稀释的一层或多层的情况下，喷洒的材料可首先低温热处理，以除去溶剂，接着进一步依次热处理以固化聚合物基体。

为了更充分地理解本发明，现仅仅通过说明的方式描述实施例。

为了基于环氧/酚醛材料和基于聚酰亚胺/酰胺材料的测试，制造两种不同的材料。

下表 1 列出了这些材料的组成。

在固化产物内，以体积计的材料浓度以环氧/酚醛和 PI 树脂为基础。

表 1

原料	颗粒形状	合适的粒度	配方 Ref.					
			01-008S1	01-008H1	01-008Y	01-008K1	01-008L1	
环氧/酚醛				69.3				
聚酰亚胺/聚酰胺			79.303		80.75	69.90	69.90	
钨	球形	5 μm	6.58	4.5	9			
铝	球形	5 μm	4.48	18.09				
氧化硅	球形	50nm		5.35	4.1			
聚四氟乙烯	球形	1-3 μm	3.0	1.8		6.3	6.3	
铝	不规则	5 μm			6.1	9.3	9.35	
陶瓷珠	球形	5-10 μm				14.4	14.4	
氧化铝	不规则	1-3 μm	5.65					
双(γ-三甲氧基甲硅烷基丙基)胺			0.96	0.96				
聚酯二甲基聚硅氧烷			0.027					0.05
工艺参数								
固化温度			190℃	190℃	190℃	190℃	190℃	190℃
固化时间			30分钟	20-30分钟	30分钟	30分钟	30分钟	30分钟
在铜合金和铝上的厚度			15 μm	15 μm	15 μm	15 μm	15 μm	15 μm
在钢上的厚度			50-100 μm	50-100 μm	50-100 μm	50-100 μm	50-100 μm	50-100 μm
溶剂含量								
溶剂含量 ml/L			约 700	约 725	约 870	约 825	约 780	

原料	颗粒形状	合适的粒度	配方 Ref.				
			01-008 327	01-008 326	01-008 C1	01-008M1	01-008R2
环氧/酚醛							
聚酰亚胺/聚酰胺			61.75	79.87	61.75	79.87	65.26
钨	球形	5 μm	17.25	9.34	17.25	9.34	
铝	球形	5 μm	11.6		11.6		10.4
锡	不规则	30 μm					
聚四氟乙烯	球形	1-3 μm	7.7	4.24	7.7	4.24	7.4
铝	不规则	5 μm		6.3		6.3	
陶瓷珠	球形	5-10 μm					
氧化铝	不规则	1-3 μm					6.0
氧化硅	不规则	10-13 μm					1.09
不锈钢	层状	约5 μm					9.3
双(γ-三甲氧基甲硅烷基丙基)胺							
聚酯二甲基聚硅氧烷			1.7	0.19	1.7	0.19	0.55
工艺参数							
固化温度			190℃	185℃	190℃	185℃	190℃
固化时间			30分钟	20分钟	30分钟	20分钟	30分钟
在铜合金和铝上的厚度			15 μm	15 μm	15 μm	15 μm	15 μm
在钢上的厚度			50-100 μm	50-100 μm	50-100 μm	50-100 μm	50-100 μm
溶剂含量							
溶剂含量 ml/L			约870	约760	约870	约760	约760

添加到基体内的添加物的浓度以在每一情况下特定基体聚合物的密度为基础的固化材料内的%体积计。

在“工艺参数”中参考铜合金和铝合金是指聚合物沉积在其上的基底材料。在所有情况下基底进一步提供有结实的钢制衬里材料。

由涂布的基底形成轴承，并在已知的“Viper”磨损试验装置内测试磨损和在已知的“Sapphire”疲劳试验装置内测试疲劳强度。以下给出了对于每一类试验来说的试验条件。

Viper 磨损试验是加速磨损试验并具有下述条件：

负载 8kg

心轴直径 46.25mm

心轴粗糙度 0.2Ra

心轴速度 500rev/min

油温 120℃

试验持续时间 10 - 360 分钟。

在每次试验之前和之后称取轴承重量，和所发生的重量损失代表耐磨性。将重量损失转化成体积损失，以提供磨损行为的精确比较。

Sapphire 疲劳试验在半轴承样片上进行，所述半轴承样片包括钢为衬里的浇铸铜 - 铅合金轴承金属衬垫且具有在其钻孔内喷洒的本发明的覆盖涂层。试验装置的温度为 80℃；在每一负载下，使用 20 小时的运行时间段且在每一时间段下增加负载 7kg。下表 2 给出了试验结果。

表 2

材料	涂层厚度	PVC	基底	磨损体积 损失 mm ³	时间 分钟	疲劳强 度 MPa	时间小 时
改性环氧 A1/W H1	25 μm	30%	VP2	0.122	60	76	100
聚酰亚胺 A1/W 327	12 μm	30%	VP2	0.505	60	103	180
聚酰亚胺 A1/W 326	18 μm	30%	VP2	0.501	60	83	120
聚酰亚胺 A1/W C1	10 μm	30%	VP2	0.463	60	90	140
聚酰亚胺 A1/W C1	25 μm	30%	VP2	0.463	60	90	140
聚酰亚胺 A1/W M1	15 μm	20%	F90	0.122	60	76	100
聚酰亚胺 A1/W Y	15 μm	15%	VP2	0.122	60	103	180
聚酰亚胺 A1/W/陶瓷 K1	15 μm	20%	F90	0.027	60	83	120
聚酰亚胺 A1/W/陶瓷 L1	15 μm	20%	F90	0.022	60	76	100
聚酰亚胺 A1/W/氧化铝 S1	15 μm	20%	VP2	0.24	60	76	100
聚酰亚胺 A1/不锈钢/氧化铝 R2	15 μm	20%	VP2	0.00	60	97	160

下表 3 给出了已知金属覆盖层的比较数据且示出了在已知的金属电沉积覆盖材料上的 Viper (磨损体积损失) 和 Sapphire (疲劳强度) 结果。

表 3

材料	涂层厚度	基底	磨损体积损失 mm^3	时间分钟	疲劳强度 MPa	时间小时
Pb-10Sn-2Cu	12 μm	VP2	7.8	12	69	80
Pb-In	12 μm	VP2	10.2	12	76	100
Pb-10Sn-1 氧化铝	12 μm	VP2	0.5	60	83	120

将聚合物覆盖层组合物全部喷洒在铜基 (VP2) 或铝基 (F90) 轴承合金上。

标题为“PVC”的一栏表示在基体内总的“颜料体积含量”，且包括金属粉末、氧化硅、氟聚合物和在最终原样固化并测试的轴承材料内的所有其它添加物。

可看出，正如表 1 和 2 所列出的，本发明的聚合物基覆盖层的耐磨性和抗疲劳性在大多数情况下优于表 3 列出的金属覆盖层。在覆盖层基体内仅仅含共电沉积的氧化铝相 (Pb-10Sn-1 氧化铝) 的复合覆盖层具有与本发明的聚合物覆盖层接近的耐磨性和抗疲劳性。然而，现有技术的金属覆盖层，特别是含氧化铝的复合材料生产成本高，且基于铅的基体是环境不利的。本发明的覆盖层可大批制造，并通过已知的很好理解和可控的喷洒工艺相对容易地施加。

下表 4-7 给出了在以上所述的 Viper 磨损试验方案中测试的一些额外的轴承覆盖层的组成。表 9 示出了这些磨损试验的结果。显然看出总的磨损体积损失极低。

表 4

材料 151B-L5	材料重量/gms	%wt	材料体积/mls	固体体积	干燥层的体积%
环氧树脂	103.60	23.20	21.09	7.38	38.3
氨基树脂	40.30	9.03	9.03	5.42	22.1
乙烯基树脂	9.00	2.02	2.02	2.02	10.5
树脂 %					70%
滑石	17.50	3.92	1.37	1.37	7.1
Al	39.10	8.75	0.37	0.24	1.3
不锈钢	48.70	10.90	1.55	1.4	7.3
PTFE	6.40	1.43	0.65	0.65	3.4
Al_2O_3	12.80	2.86	0.79	0.79	4.1
填料		62.11		19.27	
PVC					30.4%

表 5

材 料	材料重量 /gms	%wt	材料体积 /mls	固体体积	干燥层的体积 %
151A-K5					
环氧树脂	103.60	21.46	19.5	6.8	34.64
氨基树脂	40.30	8.35	8.35	5.1	25.98
乙烯基树脂	9.00	1.86	1.86	1.86	9.47
树脂 %					70.09%
滑石	17.50	3.62	1.27	1.27	6.46
Al	39.40	8.16	3.02	1.96	9.98
钨	121.80	25.22	1.30	1.30	6.62
PTFE	6.40	1.32	0.6	0.6	3.05
Al ₂ O ₃	12.80	2.65	0.74	0.74	3.76
填料		40.97			
PVC					29.87%

表 6

材 料	材料重量 /gms	%wt	材料体积 /mls	固体体积	干燥层的体积 %
152A-05					
聚酰亚胺	56.00	35.12	29.3	12.9	56.87
乙烯基树脂	4.80	3.01	3.01	3.01	13.27
树脂 %					70.14%
滑石	6.60	4.13	1.44	1.44	6.34
Al	12.15	7.61	2.8	1.82	8.024
不锈钢	15.00	9.4	1.34	1.20	5.29
PTFE	2.50	1.56	0.71	0.71	3.13
Al ₂ O ₃	9.20	5.76	1.6	1.6	7.05
填料		28.46			
PVC					29.84%

表 7

材料 152B-P5	材料重量 /gms	%wt	材料体积 /mls	固体体 积	干燥层的体 积%
聚酰亚胺	56.00	30.82	25.68	11.29	56.76
乙烯基树脂	4.80	2.64	2.64	2.64	13.27
树脂 %					70.03%
滑石	6.60	3.63	1.27	1.27	6.38
Al	12.15	6.68	2.47	1.60	8.04
钨	37.25	20.50	1.06	1.06	5.32
PTFE	2.50	1.37	0.62	0.62	3.11
Al ₂ O ₃	9.20	5.06	1.41	1.41	7.09
填料		70.7			
PVC					29.94%

表 8

材料 151-K6	材料重量 /gms	%wt	材料体积 /mls	固体体 积	干燥层的体 积%
环氧树脂 1	62.10	13.17	11.97	4.2	18.3
环氧树脂 2	29.00	6.15	5.6	4.2	18.3
氨基树脂	48.25	10.23	10.23	6.14	26.9
乙烯基树脂	7.20	1.53	1.53	1.53	7.7
树脂 %					71.9%
氮化硼	15.00	3.18	1.51	1.51	6.76
Al	46.20	9.8	3.62	2.36	10.56
钨	92.10	19.53	1.01	1.01	4.52
PTFE	6.80	1.44	0.65	0.65	2.91
Al ₂ O ₃	12.80	2.71	0.75	0.75	3.36
填料		36.66			
PVC					28.1%

表 9

材料	涂层厚度 (μm)	PVC	磨损体积损失 mm^3	时间分钟
151B-L5	15	30	0.024	60
151A-K5	15	29.9	0.18	60
152A-05	15	29.8	0	60
152B-P5	15	29.9	0	60

根据表 9 可看出, 表 4 - 7 所示的材料的磨损比率非常低, 且甚至在最差的情况下, 其磨损是含氧化铝的最好的可比金属覆盖层的约 35 %。