

创新聚苯并咪唑 (PBI) 涂层的摩擦学

在不同的最终固化温度下，在铝基材上制备聚苯并咪唑 (PBI) 薄涂层。在室温下使用各种测试方法测试了它们的摩擦学性能，并与聚酰胺酰亚胺 (PAI) 涂层进行了比较。在 280°C 的最终固化温度下处理的 PBI 对基材的附着力最好。这也反映在更好的耐刮擦性上，因此在所有情况下 PBI 都优于 PAI。涂层与光滑钢制品的滑动磨损也是如此。在与砂纸的磨料磨损下，磨料颗粒越小，摩擦和磨损值就越低，但无论固化温度如何，PBI 和 PAI 之间都没有明显差异。

一、简介

聚苯并咪唑 (PBI) 属于酰亚胺化高性能聚合物，具有优异的耐热性和耐化学性以及良好的机械和摩擦学性能。其玻璃化转变温度 (T_g) 约为 427°C，降解开始于约 600°C。

优异的性能使 PBI 成为摩擦磨损系统的材料，但在公开信息中只能找到少数参考资料。在这里，摩擦学特性主要使用块状 PBI 样品和 PBI 与其他高温热塑性塑料（如 PEEK）的混合物进行。由于块状 PBI 的成本非常高，因此以薄涂层的形式使用它更有意义，但直到最近才开发出溶解 PBI 并将其应用于这种薄层配置的新技术。因此，本文主要研究创新型 PBI 涂层的摩擦学，尤其关注这些涂层如何粘附在基材表面，以及在滑动和磨料磨损条件下可实现哪些性能。

二、聚苯并咪唑涂层的制备和表征

2.1 所用化学品

为了制备涂层，将粉末状的 PBI 预聚物溶解在溶剂二甲基乙酰胺中，聚合物浓度为 15 wt. %，在高压反应器中以 230 °C 的温度加热 2 小时。在这些条件下，100% 的 PBI 溶解。

2.2 样品制备

为了研究后固化温度对 PBI 涂层最终结构的影响，以及其对最终机械和摩擦学性能的影响，使用了几种不同的固化方案。所有 PBI 系统均使用自动涂敷器 ZAA2300 作为涂层涂覆在铝基材上。最终后固化温度设定为 1 小时，分别为 180、215 和 280 °C（此温度也在以下样品命名中提及）。制备的薄膜厚度在 20-25 μm 范围内。

2.3 表征方法

2.3.1 涂层附着力和划痕试验

使用交叉切割试验确定涂层与基材分离的阻力。使用工具在涂层表面切割出直角格子图案，一直穿透到基材。

使用划痕机研究涂层的耐刮擦性。为了研究“临界载荷”，对每个涂层系统进行了至少 3 次划痕试验，速度为 1 mm/s，载荷从 0.5 增加到 100 N，划痕距离为 15 mm（图 1）。

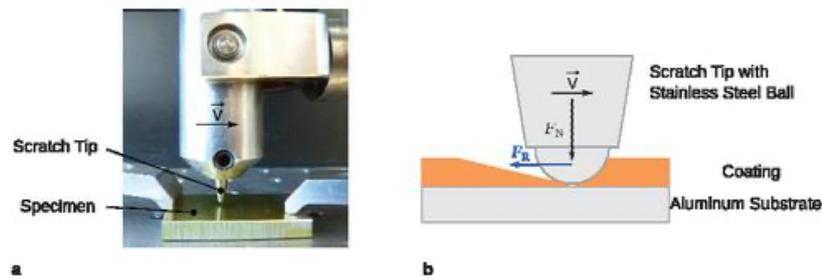


图 1：划痕试验装置。

2.3.2 滑动磨损试验

根据 ASTM G176 试验台, 在块环上进行滑动摩擦和磨损试验(图 2)。将固定涂层压在旋转的金属环上。使用的对应物是 100 个 Cr6 钢环, 外径为 13 mm, 平均表面粗糙度为 $Ra \approx 0.2 \mu\text{m}$ 。测试在室温下的干滑动条件下进行, 参数如下: 标称初始接触压力 = 0.5 MPa、滑动速度 = 1 m/s、测试时间 = 2 h。磨损量通过白光显微镜测量。

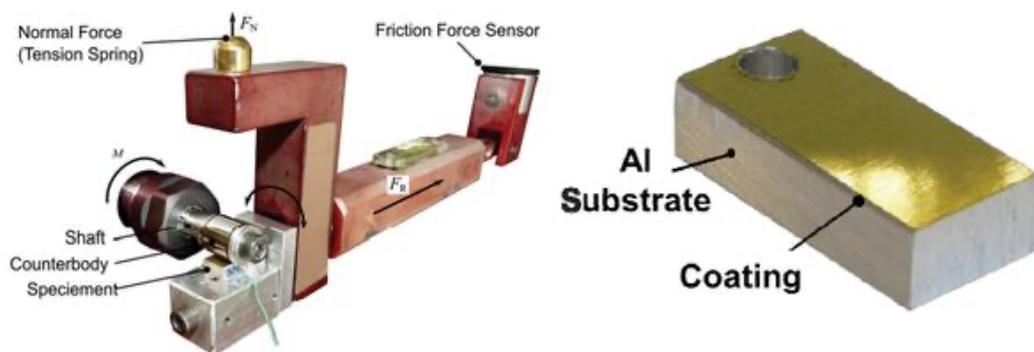


图 2：滑动磨损测试装置（左）和 PBI 涂层测试样品（右）。

2.3.3 磨料磨损测试

通过定制的划痕机研究涂层的磨损行为。将涂层样品压在 SiC 磨料纸（Matador 防水）上，并沿 y 方向移动，从而使用合适的称重传感器连续测量摩擦力。法向负载设置为 17 N，相当于标称压力 0.55 MPa，速度为 5 mm/s。样品以单次通过模式进行测试，即它们始终与磨料纸的原始表面接触（图 3）。砂纸的粒度各不相同，分别使用 P800（粒度：21.8 μm ）、P1200（粒度：15.3 μm ）、P3000（粒度：7 μm ）和 P5000（粒度：5 μm ）类型。所有测试均在室温下进行。

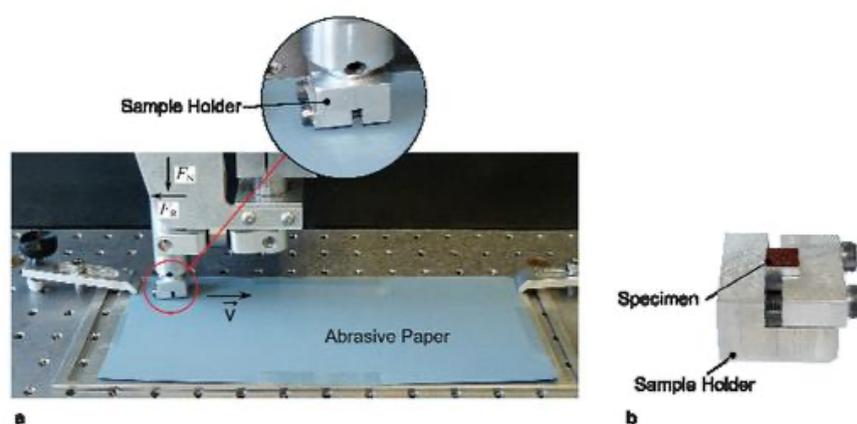


图 3：磨料磨损测试装置。

三、结果

3.1 附着力和耐刮擦性

纯 PBI 涂层的附着力受最终固化温度的影响很大。随着温度的升高，铝基板的强度显著增加。系统 PBI_280 的网格切割强度（GK=0）达到了最佳值（图 4，左）。

“临界载荷”（涂层开始破裂并从基材上剥离的载荷）的结果显示，纯 PBI 涂层和之前测试的 PAI 涂层之间存在明显差异（图 4，右）。测量到 PBI_280 涂层的最高临界载荷（约 82 N），与最高的耐刮擦性相对应。PBI_180 和 PBI_215 之间的差异很小，由于测试结果分散，可以忽略不计。其他作者也观察到块状 PBI 具有非常高的耐刮擦性。

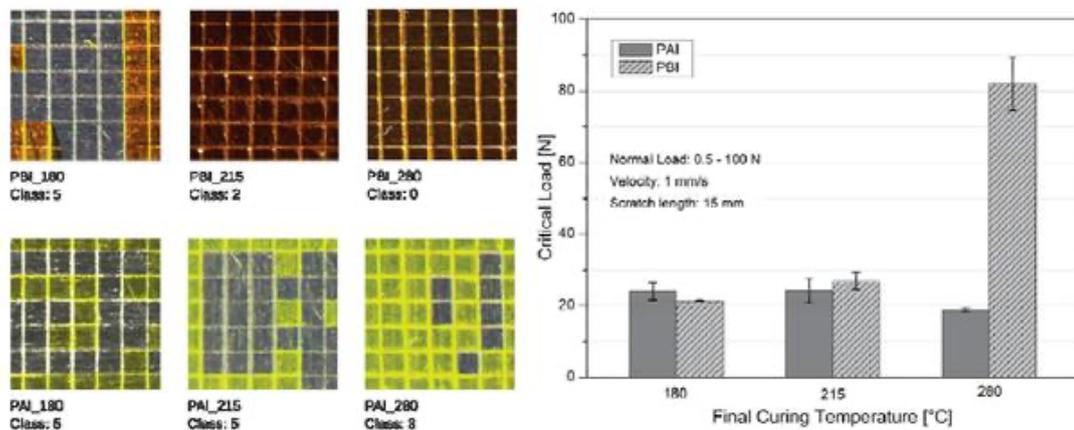


图 4：涂层附着力和耐刮擦性结果，与之前对聚酰胺酰亚胺 (PAI) 涂层的测试结果相比。

3.2 对钢的滑动磨损

PAI 系统在所有后固化温度下都表现出明显高于 PBI 系统的比磨损率 wS 。PAI_180 的磨损率最高，而 PBI_280 的磨损率最低，为 $2.18 \times 10^{(-07)} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ 。与之前的测试（网格切割、划痕）类似，随着最终固化温度的提高，PBI 涂层的耐磨性也得到了改善（图 5）。在所有情况下，PBI 涂层的摩擦系数也略优于 PAI 涂层。相应的磨损轨迹如图 6 所示。

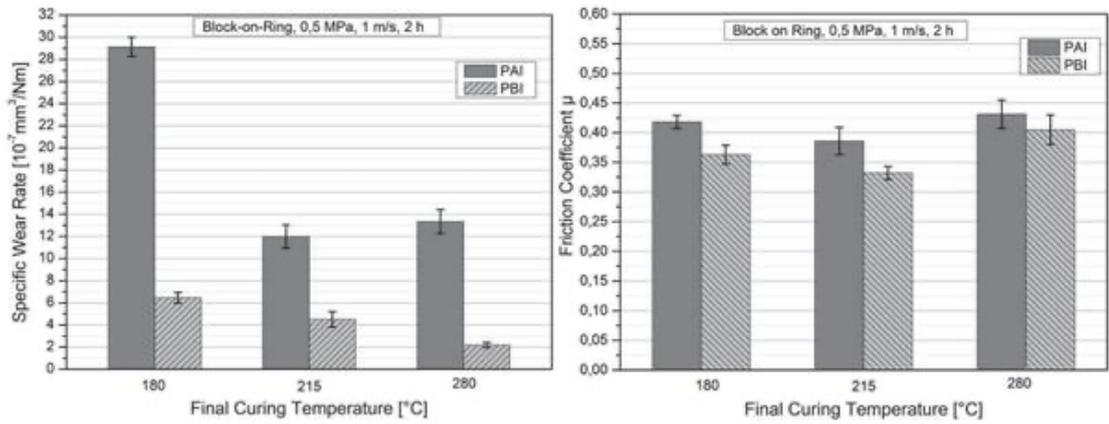


图 5: 特定磨损率和摩擦系数（滑动磨损）。

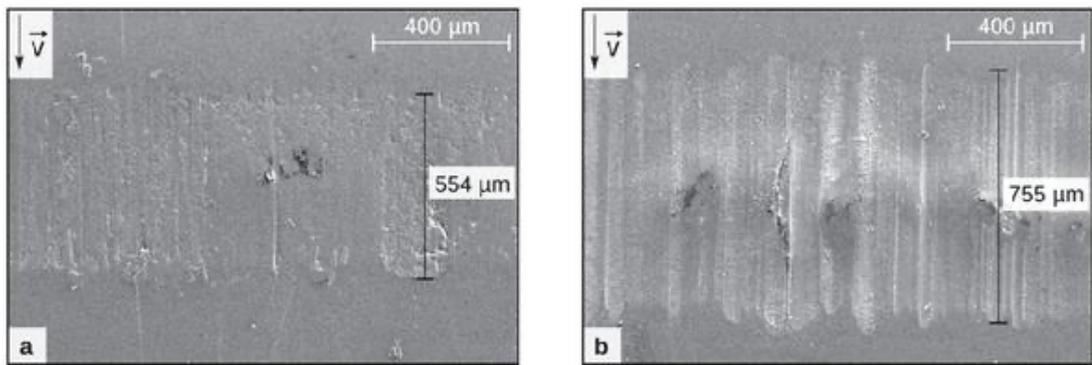


图 6: a) PBI_215、b) PAI_215 磨损表面的 SEM。

3.3 磨料磨损

正如预期的那样，磨料颗粒尺寸越小，特定磨料磨损率越低。在这里，无论最终固化温度如何，PBI 涂层和 PAI 涂层之间都没有明显差异(图 7)。

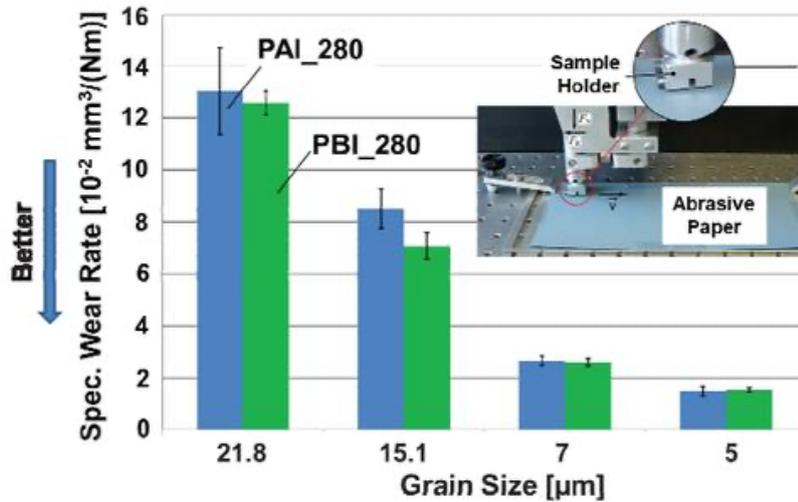


图 7: PBI 涂层和 PAI 涂层的磨料磨损率。

四、结论

聚苯并咪唑 (PBI) 是一种耐高温热塑性塑料，可用作摩擦和磨损负载部件的薄涂层。它优于其他耐高温聚合物涂层，特别是聚酰胺酰亚胺 (PAI)，它已在此显示适用于不同类型的磨损负载，即划痕、滑动和磨损。较高的最终固化温度有利于实现最佳的摩擦学性能曲线。