



利用先进的聚氨酯树脂和涂料开发高性能风力涡轮机叶片



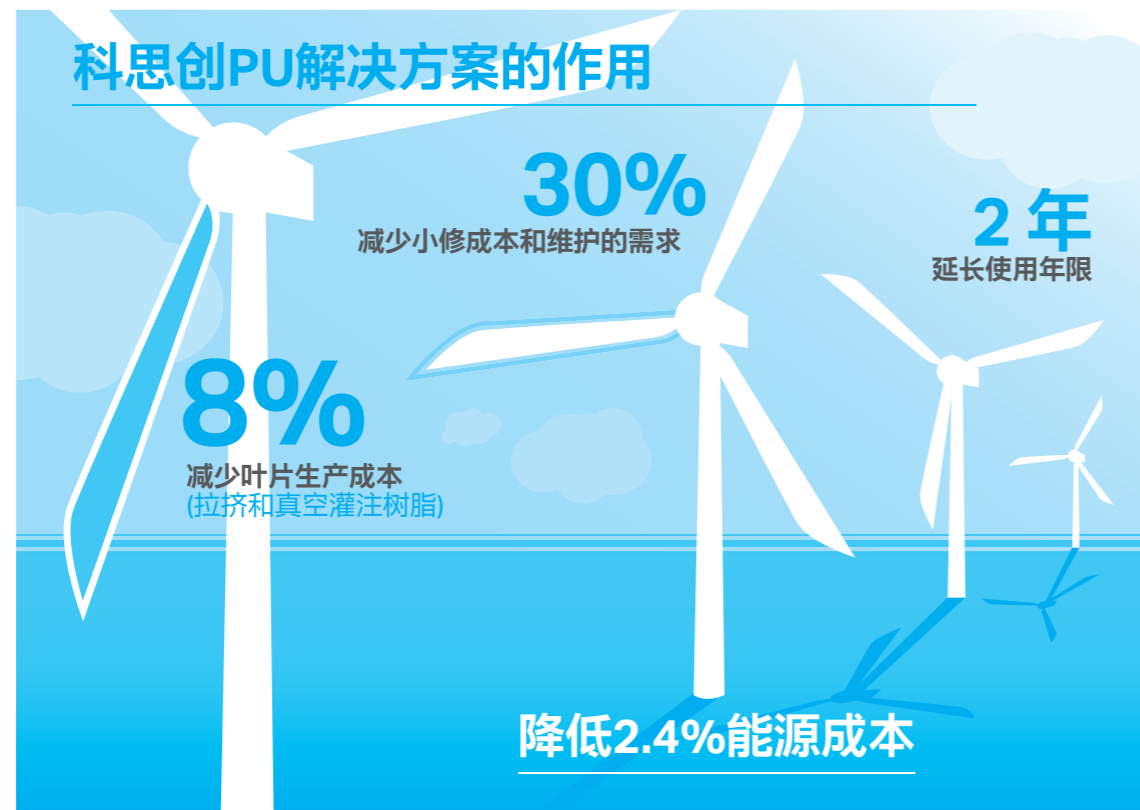
Johann Maass 博士
Bewind GmbH

Ernesto Silva M.
科思创德国AG
定制化聚氨酯事业部

Dirk Soontjens
科思创NV

Thomas Baeker
科思创德国AG
涂料与胶粘剂事业部





科思创和 Bewind 运用独特的叶片材料特性为风力发电节约成本

科思创应用其在高科技聚合物材料方面的专业能力，为风机叶片应用开发创新的聚氨酯 (PU) 解决方案，实现了性能优势和更低的叶片成本。

为了评估其 PU 解决方案对叶片应用的影响，科思创委托专业风能工程咨询公司 Bewind GmbH 模拟这些解决方案在生产、运营性能和涡轮机寿命方面的成本和优势。Bewind 评估了三种 PU 产品：拉挤树脂、灌注树脂和用于前缘保护 (LEP) 的涂层原材料，以量化科思创聚氨酯解决方案与典型海上风电场的标准替代产品相比的影响。

研究表明，科思创 PU 解决方案可加快叶片部件的制造，从而提高效率并降低生产成本。PU 叶片需要更少的原材料，从而减轻了叶片的重量，并为风电场提供显著的优势。PU 树脂的先进物理特性为叶片赋予了高性能和更长的寿命，以增加其整个使用寿命期间的发电量。基于 PU 原材料的 LEP 涂层具有出色的耐用性，可提供出色的防腐蚀保护，降低叶片在整个使用寿命期间的维修频率和维护成本。研究表明，科思创 PU 解决方案可加快叶片部件的制造，从而提高效率并降低生产成本。PU 叶片需要更少的原材料，从而减轻了叶片的重量，并为风电场提供显著的优势。PU 树脂的先进物理特性为叶片赋予了高性能和更长的寿命，以增加其整个使用寿命期间的发电量。基于 PU 原材料的 LEP 涂层具有出色的耐用性，可提供出色的防腐蚀保护，降低叶片在整个使用寿命期间的维修频率和维护成本。

科思创高性能 PU 树脂与涂料原材料的结合代表了一项突破性的创新，对风电项目的经济性产生了巨大的积极影响。

科思创是世界领先的聚合物公司之一

科思创是全球最大的聚合物公司之一，2021 年销售额达 159 亿欧元，有 50 个生产基地和约 17,900 名员工。公司业务活动的重点是制造高科技聚合物材料，以及开发针对当今时代最大挑战的创新、可持续的解决方案。科思创正致力于实现循环经济，可再生能源是公司的主要推动力。

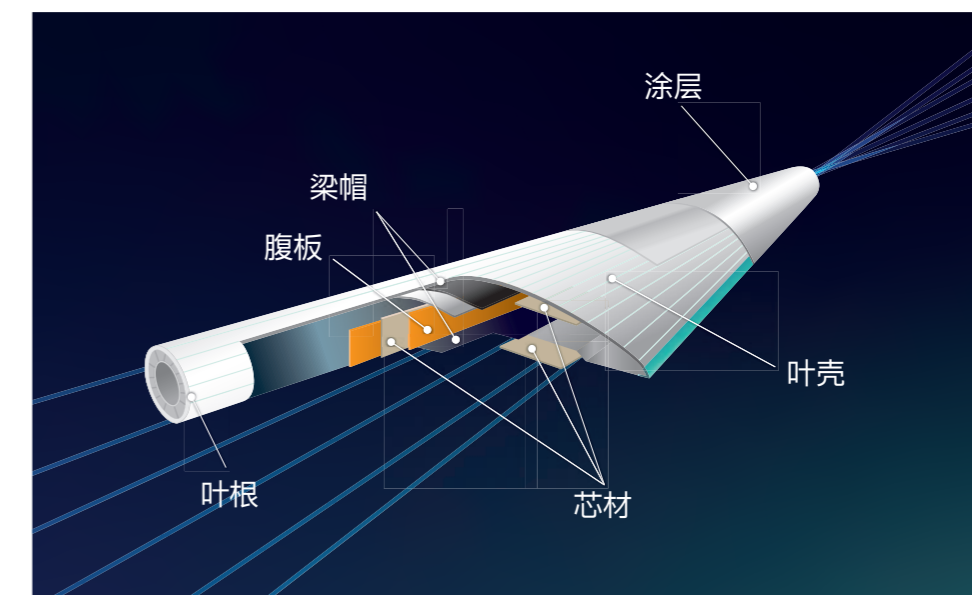
尤其是对于风能行业，科思创正在努力寻求更具成本效益、更可持续的材料解决方案，并利用其全球性的材料和工艺专业能力支持风能的进一步扩张。

Bewind 是一家专业的风能工程咨询公司，拥有出色的专业知识

Bewind 的使命是通过整合敏捷和数据驱动的方法来增强和优化风力涡轮机的产品开发过程。其目标是显著缩短上市时间，并提高快速发展的风电行业的市场适应性。Bewind 已为全球多家客户提供风能解决方案的标杆设置，使用最先进的设计工具和流程来优化工程解决方案并提供创新产品。

更高效地制造更轻质、更强韧、更低价的叶片

得益于 PU 树脂的低粘度和快速固化时间，叶片制造商可以缩短生产周期，在更短的时间内交付更多的叶片。这反过来又优化了模具占用情况，并降低了每个叶片的材料和劳动力成本，这直接降低了平准化度电成本。在案例研究中，与基准情景相比，科思创 PU 解决方案可将叶片总制造成本降低多达 8%。



典型的叶片设计中显示了灌注和拉挤部件。涂料通过喷涂或滚涂到叶壳上

PU 灌注树脂的优势

以下案例研究中的模拟表明，PU 灌注树脂的优越性能可将灌注部件的生产成本降低多达 13%。真空灌注过程涉及在低压下将树脂混合物注入含有干纤维层的模具中，然后在高温下固化。

与环氧树脂相比，PU 灌注具有两个关键优势。尽管在 PU 灌注前需要干燥（这类似于延长压降测试的过程），但树脂的低粘度（35°C 时 PU 为 50 mPas，而环氧树脂为 150 mPas）使材料易于流动并快速填满模具。PU 树脂在高温下反应活性高，固化时间比环氧树脂短；在 80°C 下为 3 小时，在 90°C 下只需 1 小时。相比之下，典型环氧树脂的固化时间为 6 至 9 小时，具体取决于树脂体系和固化温度。即使考虑到 PU 灌注所需的额外干燥步骤，与环氧树脂工艺相比，总工艺时间估计也可减少 20%。

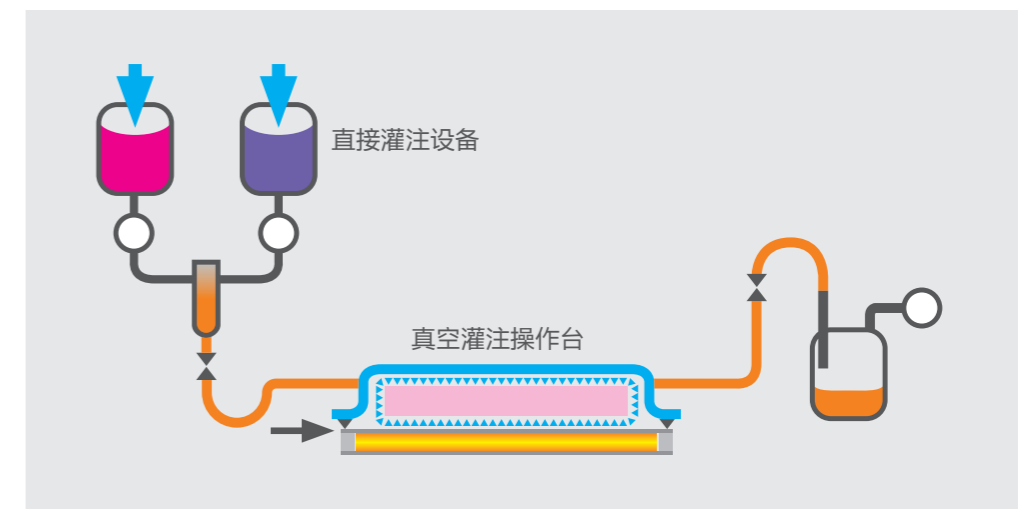
此外，PU 采用的直接灌注工艺能将树脂更精确地注入模具。这最大限度地减少了浪费，并避免了挥发性有机化合物 (VOC) 的释放，从而带来重要的健康、安全和环境 (HSE) 改进。精确数量的 PU 组分在注入模具前混合，这意味着树脂总是新鲜混合，并且在灌注过程中，其粘度没有显著变化。由于脱气、混合和灌注均由一台机器完成，因此该流程可以高度自动化且可追溯。科思创与机器制造商合作优化流程并加速机器开发，将其推向市场。

PU 拉挤树脂的优势

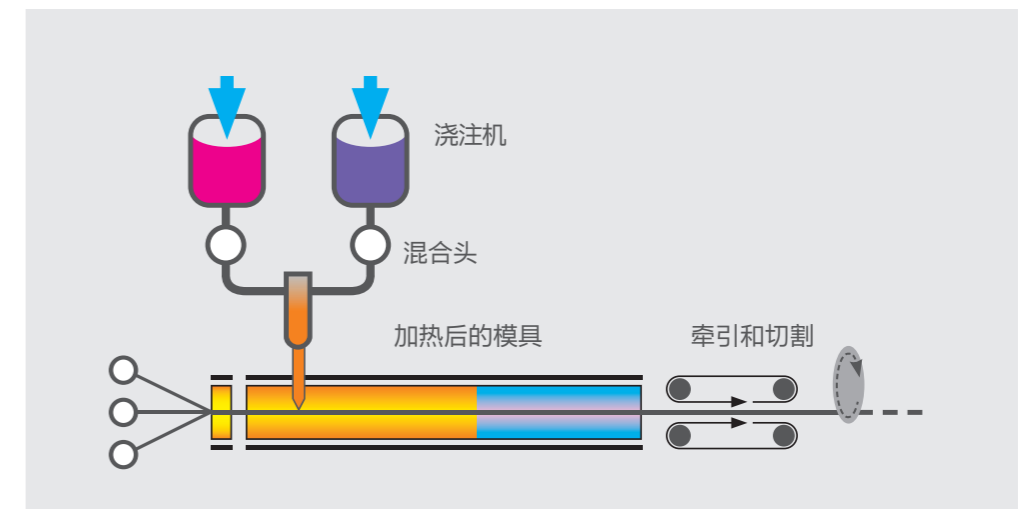
Bewind 模拟表明，PU 拉挤技术可将制造梁帽的成本最多降低达 14%。拉挤成型是一种自动化、连续的制造工艺，用于生产具有恒定横截面的纤维增强聚合物 (FRP) 型材，其中纤维增强材料被树脂浸透并导入加热的模具中。型材固化后离开模具。

由于 PU 拉挤树脂的低粘度和快速固化，与替代树脂（乙烯基酯或环氧树脂）相比，生产线速度可快两倍。为了生产满足最高要求（尤其是在刚度方面）的部件，科思创开发了用于玻璃纤维和碳纤维拉挤成型的 PU 树脂，可提供优异的纤维润湿性和快速固化，支持拉挤制造商提高生产率并显著降低生产成本，以满足大批量生产的要求。

此外，聚氨酯在封闭系统中加工，可提供最高的生产安全性。即使拉挤生产线有时需要暂时停机，科思创 PU 树脂易控制的特性可确保顺利生产。



直接灌注工艺可最大限度地减少浪费，避免 VOC 排放并提高操作人员的安全性



PU 拉挤工艺可提高生产线速度，实现高生产率

灌注和拉挤部件的较短生产周期可节约 7% 的直接加工费。较低的材料成本产生了额外的节省，因此叶片生产的总成本可以降低最多达 8%。

与环氧树脂相比，PU 树脂的低粘度可实现出色的浸润和更密集的纤维堆积，这意味着只要更少的树脂和更简化的纤维增强铺层即可实现目标机械性能，从而支持轻量化设计，使叶片重量与标准环氧树脂叶片相比最多减轻 5%。

虽然从使用环氧树脂或聚酯树脂的现有叶片制造技术过渡到 PU 树脂需要新设备或设备改造投资，但更快的产出和产能的高效利用（例如，模具占用率、拉挤线速度）为现有的基础设施和新产能投资提供了显著的优势，以满足全球对风能不断增长的需求。

增加风电场发电量

在运营性能方面，科思创 PU 解决方案为风力涡轮机叶片的设计提供了两个关键优势：(i) PU 树脂的机械性能可提高叶片的可靠性，并且更轻的部件重量可降低静态和动态负载，(ii) 高性能涂层提供无与伦比的前缘保护 (LEP) 以防止侵蚀，需要更少的维护并减少停机时间。这些解决方案的综合优势有助于维持较高的年发电量 (AEP)，并将叶片寿命延长 2 年，从而在风力涡轮机的使用寿命内显著提高总发电量。

更少的维护、更短的停机时间、更多的电量

科思创 PU 树脂的低粘度可以实现更密集的纤维堆积或更高的纤维体积含量 (FVC)，从而在强度和刚度方面实现更好的机械性能。PU 树脂的基体主导特性可改善抗疲劳性。

由于改进的几何惯性矩，更强韧和更薄的梁帽可减少叶片的变形，并支持设计人员满足塔间隙载荷情况。这对于更易变形的长叶片尤其重要，通常需要将它们放置在远离塔架的位置以防止损坏或碰撞。

叶片重量是叶片设计的关键考虑因素。PU 体系可生产具有高 FVC 和高机械性能的部件，帮助设计师减少壁厚、使用更少的树脂和更简化的纤维增强铺层，从而减轻叶片的重量。卓越的机械性能还将小修成本和维护的需求减少约 30%，从而带来额外的节省。

拥有更轻的叶片可减少胶粘剂应力和根部工作。胶粘剂的疲劳失效主要由边缘载荷的应力引起，这与叶片本身的重量而不是风的强度有关。叶片越轻，边缘载荷越低，因此胶粘剂所受的应力越低。模拟表明，叶片重量减少 5% 可将胶粘剂寿命提高多达 50%，从而将整体叶片寿命延长至少 2 年（基于保守估计）。

最后，与替代解决方案相比，基于科思创 PU 原材料的先进叶片涂层有助于保持表面特性并显著改善前缘保护 (LEP)。完好无损的前缘意味着最佳（即接近设计）的空气动力学轮廓、更少的维护、更短的停机时间和更高的耐用性，有助于随着时间的推移防止因表面侵蚀造成的发电损失 (AEP) 减少。

正如以下具有代表性的海上风电场的 Bewind 案例研究所示，当结合使用科思创的 PU 解决方案时，可对叶片制造和运营性能产生显著的积极影响，从而大幅增加风能项目的价值并降低电力成本。

事实与数据 - 案例研究

模拟 科思创 PU 解决方案在 100 米 海上风机叶片上的应用

Bewind 评估了科思创 PU 解决方案的独特物理特性在风机叶片制造和风力涡轮机性能方面的优势。对于配备 100 米长叶片的 12 MW 海上风力涡轮机而言，可预见对叶片生产、结构设计和耐久性的积极影响。

假设：在基准情景下，成本估算使用欧洲、中东和非洲地区以往的树脂价格、生产成本和劳动时间模型。鉴于直接灌注是新安装的标准配置，因此不考虑直接灌注机的额外资本支出。叶片被认为是涡轮机寿命的限制因素，在传统解决方案中，涡轮机寿命限于 25 年，LEP 维修周期为 5 年。

参考案例为 100 米长叶片，设计中包括以下材料：

用于灌注的常规环氧树脂

基于乙烯基酯 + 碳纤维的拉挤梁帽

轻木芯材

传统的 LEP 涂层

PU 案例研究使用相同的 100 米长叶片，并替换了以下材料：

科思创 PU 灌注树脂

基于科思创 PU 拉挤树脂 + 碳纤维的拉挤梁帽

PET 泡沫芯（价格与轻木相同）

基于科思创 PU 原材料的 LEP 涂料

模拟识别了科思创 PU 解决方案的 4 个显著优势，具有降低平准化度电成本 (LCoE)、防止年发电量 (AEP) 损失以及增加海上风电场在整个生命周期内的总发电量的巨大潜力。

凭借更短的生产周期和材料节省，叶片制造成本降低了 8%。

由于潜在的叶片重量减轻可减少胶粘层疲劳并将叶片寿命延长至少 2 年，因此在涡轮机的整个使用寿命期间可额外产生高达 8% 的电量。

由于 PU 复合材料的高机械性能和 LEP 涂层改善的耐用性，可节省高达 30% 的小修成本和维护。

这些解决方案组合可以在涡轮机的整个生命周期内将 LCoE 降低约 2.4%，并防止效率损失，将平均 AEP 提高约 1%。

更大、更轻、更耐用的风机叶片

PU 复合材料的优势为整个价值链创造了附加值。科思创优质 PU 材料具有改进的加工性能 (低粘度和快速固化), 使叶片制造商能够从更高效、更具成本效益的叶片生产过程中受益。这反过来又降低了 LCoE 并提高了发电效率, 从而为风电场运营商带来优势。在纤维含量、机械强度和抗疲劳性方面有所改进的材料特性为叶片制造商提供了设计全新、改进叶片的机会, 打造更好的机械性能和更轻的部件, 跨越叶片设计的极限, 以增加清洁能源的生产。这些特性在降低能源成本和快速部署新的风能装机方面发挥着重要作用。

本文中介绍的科思创解决方案可在全球范围内使用, 商品名称为: Baydur®、Desmodur®、Desmophen NH® 和 Bayhydro®。请访问 www.solutions.covestro.com, 以进一步了解风能解决方案和这些产品的其他应用。

点击了解

#EfficientWindPower - Efficient wind power systems | Covestro | Covestro AG



Covestro Deutschland AG
Kaiser-Wilhelm-Allee 60
51373 Leverkusen
Germany

solutions.covestro.com
info@covestro.com

您对我们的产品、技术协助以及信息 (无论是口头上的、书面的或者是生产评估的方式) 的使用, 包括任何推荐的配方和建议, 均不受我们控制。因此, 您有必要对我们的产品进行测试, 以确定其是否满足您的工艺以及使用目的。您的分析必须至少包含对从技术、健康、安全、环保和法规的角度来确定其适用性的测试。除非另有明确说明, 科思创未必已进行过此类测试, 且科思创并未就产品的某项特别用途或应用获得任何的批准或特许。科思创所提供的任何样品仅用于测试目的, 而非用于商业目的。除非我方另行书面同意, 否则所有产品都严格按照我方的标准销售条款来出售, 如有需要我方可提供这些标准销售条款。我方不对所提供的任何信息和技术协助进行担保或保证, 如有变更, 恕不另行通知。贵方需要明确了解并同意, 贵方将就贵方对我方产品、技术协助和信息的使用承担所有责任并确保我司不会为贵方使用我司的产品而导致的责任受到任何损害, 该等责任包括侵权、合同或其他责任。此处未包含的任何声明或者建议都未经授权, 且对我方不具任何约束力。此处任何信息都不得视为建议使用侵犯任何材料及用途相关的任何专利权的产品。此处信息不含任何暗示的或事实上的对任何专利权许可的授予。该等信息仅为我司的客户和相关政府部门所准备。其他方不应以复印或电子 (如网络) 等方式复制该等信息。在未得到科思创书面许可前不得部分的或全部的复制该等信息。该等数值仅为典型值。除非另有书面约定, 该等数值并不构成有约束力的材料规格或担保的值。
2022-德国印制