



制造风力发电机叶片的先进聚氨酯树脂： 提升叶片性能，降低叶片成本

顾永明 孙国斌 博士
朱宏 吴迪 肖双印
科思创（上海）投资
有限公司

Klaus Franken 博士
Dirk Soontjens
科思创股份有限公司

Roland Stoer 博士
Heiko Hartfiel
WINDnovation Engineering
Solutions GmbH



摘要

开发和扩大可再生能源使用的主要目的是着重于研发能带来社会效益的技术和产品。虽然风能作为清洁能源展现出显著的优势，但其广泛使用仍面临着成本方面的挑战。本文根据聚氨酯材料的进展，评估了可持续风能的新发展，同时还指出了风能发展的一个目标是降低风电成本。



提高风电竞争力

科思创是全球领先的高科技聚合物材料制造商，业务涉及各行各业；WINDnovation 是领先的多兆瓦级风力发电机叶片设计公司。科思创研发了用于风力发电机叶片的高性能聚氨酯材料，并和WINDnovation 共同对新型聚氨酯材料在风机叶片中的应用进行评估。目的在于评估聚氨酯材料在提高叶片生产效率和降低叶片成本方面的作用，同时也是为了应对整个行业在未来长期发展中所面临的挑战。

此项研究的一个关键目标是证明风力发电作为一种高性价比、更可持续能源的“可行性”，实现这一目标需要整个产业链加强合作，包括生产、营销和服务过程监控环节。当前，研发企业认为，风能的可再生性使其成为全球能源市场的重要组成部分。为了提高风能竞争力，不仅需要简化供应链，还需要研发创新方法以提高发电效率。

制造更长叶片是行业趋势，为了满足这一发展需求，需要新型材料创新。从材料方面而言，轻量化叶片是至关重要的研究重点。叶片轻量化可以减少原材料使用，同时还需达到更好的产品性能。

另一个目标是提高生产速度和效率，而这需要缩短灌注和固化时间。再加上将生产整个风机叶片的生产周期最小化，总体上能够降低相关的生产能耗。由于该工艺能增加可再生能源的占比，最终能提升空气质量。



制造更长叶片是行业趋势，为了满足这一发展需求，需要新型材料创新。



因此，这项研发活动与多项联合国可持续发展目标（UN SDG）相契合，具体包括：



经济适用的清洁能源



体面工作和经济增长



产业、创新和基础设施



可持续城市和社区



负责任的消费和生产



气候行动

此外，该研究证实可以降低平准化度电成本（LCOE^a）。如果叶片的生产成本降低 10% 至 15%，重量更轻，性能不变，而且长度增加，那么可以进一步降低平准化度电成本。

^a 平准化度电成本（LCOE）是一种发电衡量标准；便于以一致方式对不同的发电方法进行比较。

风机叶片的形状和尺寸由有效获取风能的空气动力学性能以及叶片承载强度决定。而更高强度的材料在承载强度方面可以发挥出它的作用。

图 1 显示了过去几年间叶片长度和质量间的变化关系。

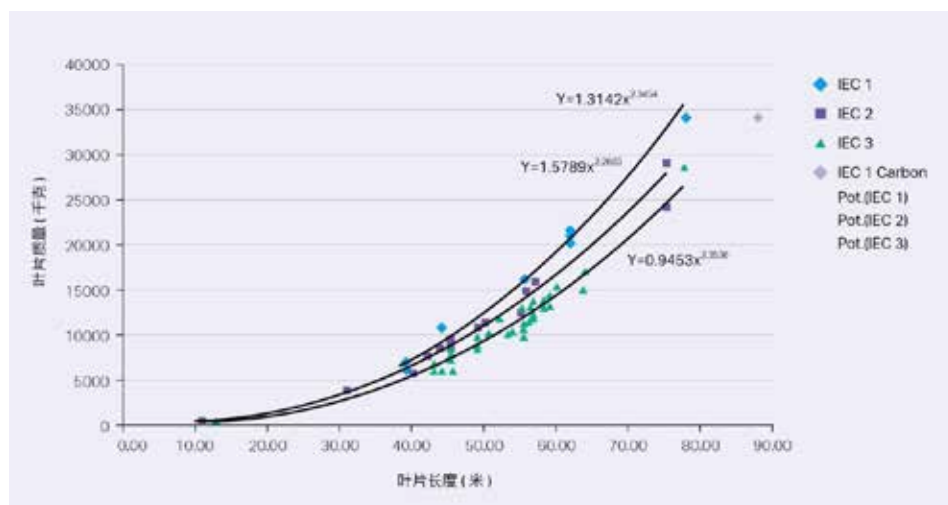


图 1 全球的叶片长度和质量发展趋势（来源：WINDnovation）

对于现代叶片设计而言，刚度、压缩强度以及疲劳性是设计的驱动参数。所有超越现有玻璃纤维增强环氧基复合材料限制的发展突破都受到了风机叶片设计师和制造商的青睐。

过去几年，已经确定出叶片结构设计中的挑战有：

- 细长的叶片可容纳叶片结构的内部空间非常有限。
- 叶片质量应尽量轻（以降低载荷、充分缩减成本）。
- 细长的叶片往往会遇到叶片尖部与塔体的间隙问题，这说明需要使用高性能的玻璃纤维和碳纤维材料，以及复杂的分析方法。

风机叶片占到整个风力发电机成本的 20% 至 25%

研究和新材料推动发展进步

2009 年，在美国能源部（US DoE）的资助下，科思创开始研究创新型聚氨酯（PU）解决方案，以推动风电行业摆脱阻碍其未来发展的重大难题。鉴于中国和欧洲的风电发展趋势，这项研究的前景无疑是光明的。风机叶片占到整个风力发电机成本的 20% 至 25%，所以降低叶片成本有助于降低风电行业的平准化度电成本。

聚氨酯树脂的研发从化学研究开始，并拓展到聚氨酯灌注工艺的开发。首款商业化产品于 2019 年问世。这项突破性研究中的重要部分——叶片，是由科思创和整个风电产业链上的合作伙伴共同开发的。其中包括风机整机制造商、风机叶片制造商、玻璃纤维供应商、机器生产商和叶片设计公司 WINDnovation。

聚氨酯（PU）树脂的应用使得叶片技术取得了关键性的进展。采用轻量化设计能制造出更加细长的风机叶片，而采用新的树脂可以满足基本的设计要求。WINDnovation 首先表示有兴趣利用聚氨酯的特性和优势提升叶片设计。这项研究表明，聚氨酯树脂适合于风力发电机叶片的制造，并且能降低叶片成本。

图 2 所示为东北地区大唐风力发电厂的一个风力发电机装置。该风机叶片长 55.2 米，配有聚氨酯主梁和承剪腹板，自 2018 年 10 月以来一直运转良好。附图显示了截至 2019 年 5 月中旬该风机的装机发电量（千瓦时）。

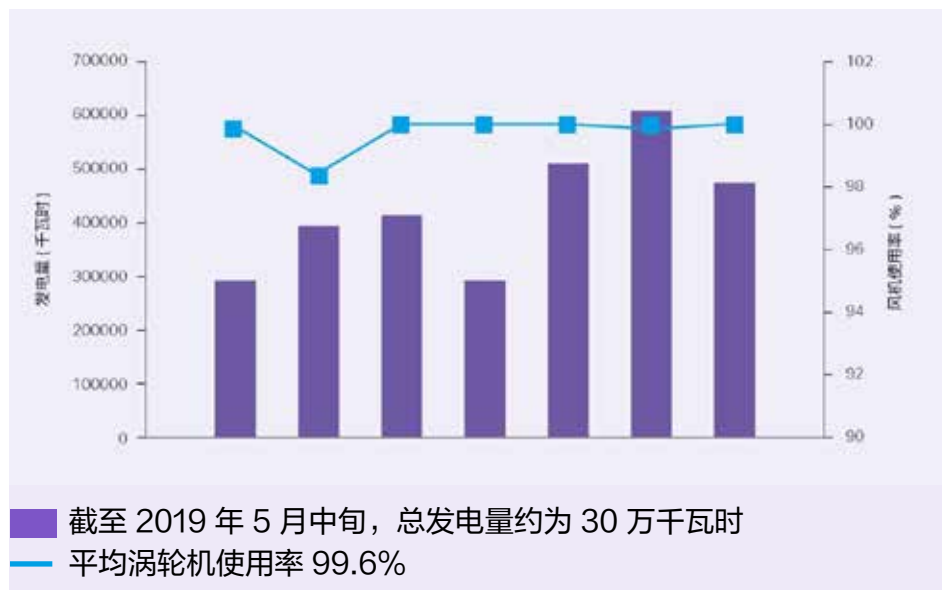


图 2 该风力发电机及其聚氨酯风机叶片使用频繁，但仍然运行良好



灵活的设计性及其优势

在生产叶片中使用的大型纤维复合材料部件时，全新的聚氨酯树脂具有灌注速度快和固化速度快的优势。聚氨酯树脂的初始粘度很低，能在风机叶片生产过程中实现快速灌注。图 3 显示在 25°C 时，聚氨酯树脂粘度只有 58mPa.s，远低于传统的环氧灌注树脂。

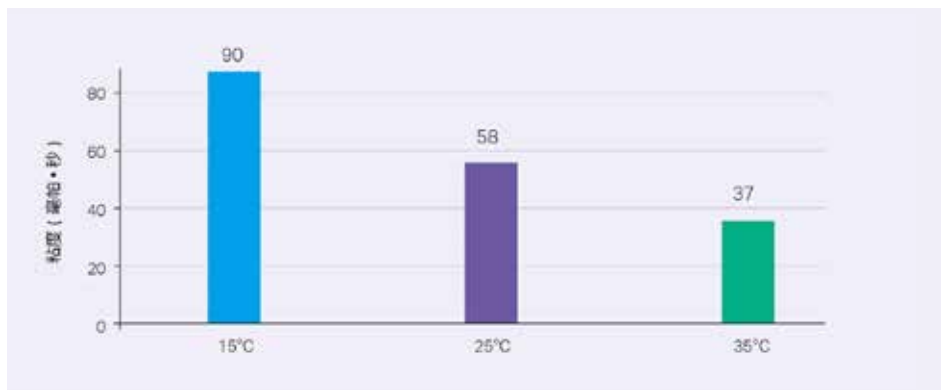


图 3 不同温度时的初始粘度

在相同条件下，由于粘度低，聚氨酯树脂比环氧树脂的流动性更好，灌注速度更快。图 4 显示，在 25°C 条件下，混合 140 分钟后聚氨酯粘度小于 600mPa.s，非常适合大型风机叶片生产使用。尤其在 90 分钟开始时，聚氨酯粘度持续低于 300mPa.s，这意味着在风机叶片生产过程中，聚氨酯的灌注速度比常规的环氧注塑树脂快很多。

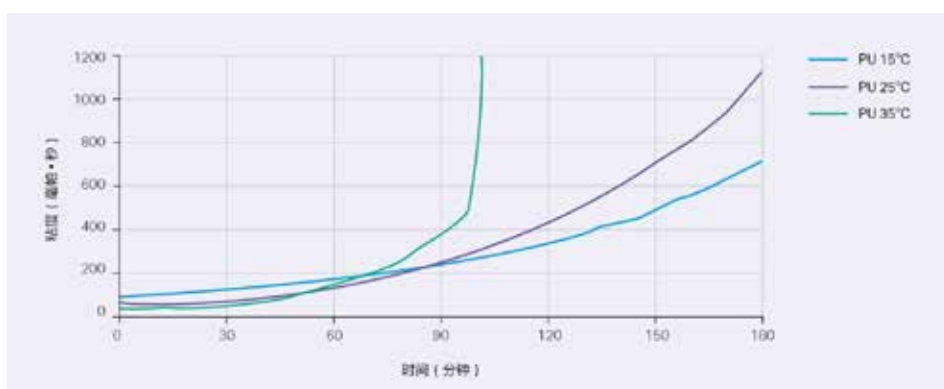


图 4 不同温度时的粘度曲线

聚氨酯树脂的固化性能为叶片生产带来更多的优势。在 80°C 情况下，叶片固化时间小于 4 小时，预固化时间甚至更短，这能节约宝贵的生产时间。

聚氨酯树脂的核心优势：

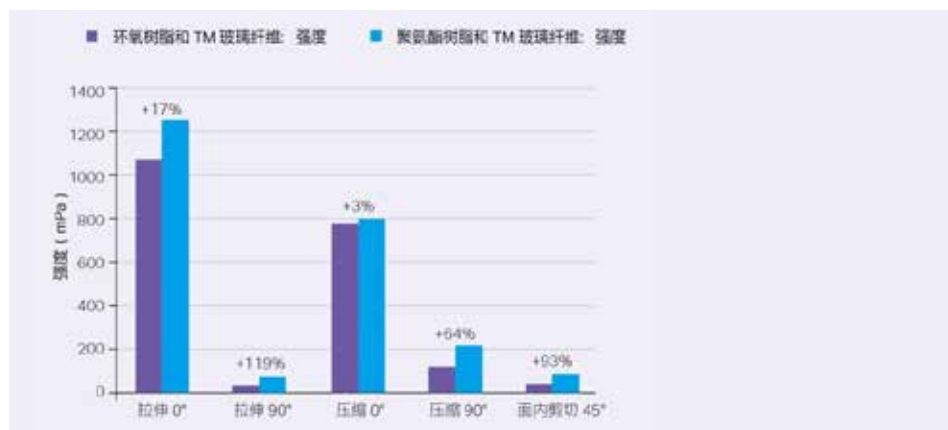
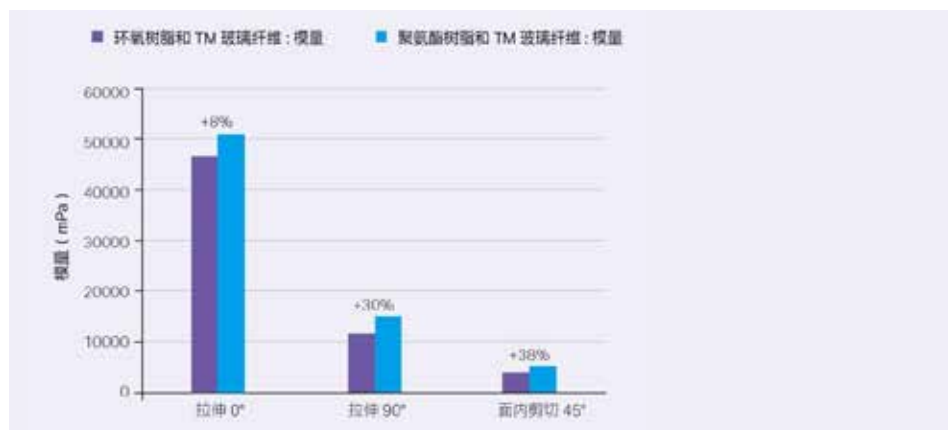
- ✓ 粘度低
- ✓ 灌注速度快
- ✓ 固化及预固化速度快

风机叶片生产过程中，聚氨酯的灌注速度比现有的环氧树脂快得多。

特性评估小结

WINDnovation 就 SR552-2 风机叶片设计进行了基准研究，以下是对叶片特性的描述与评估^b。

材料数据 聚氨酯基复合材料结合聚氨酯灌注工艺，可以提高纤维含量，带来优于传统环氧树脂复合材料的力学性能，从而使减轻叶片重量(图 5) 成为可能。WINDnovation 根据两种情境开展了分析研究：(a) 1:1 取代现有环氧树脂，不做任何形式的优化；(b) 利用聚氨酯力学性能优势进行结构优化。



(EP: 环氧树脂 PU: 聚氨酯树脂 TM: CPIC 供应的TM 玻璃纤维)
图 5. 力学性能比较

为了减少质量，
需要根据新的强度特性调整叶片结构。

^b 资料来源：文件编号：00220-00，科思创聚氨酯基准研究

结构形式 PU-1on1 设计（1:1 取代环氧树脂，不做任何形式的优化）与原来的叶片 SR552-2 具有相同的结构形式，只是在整个叶片中用聚氨酯树脂取代了环氧树脂。这样设计出的叶片重量更轻，偏转更低，疲劳性更佳，而且稳定性更高。为了减少质量，需要根据新的强度特性调整叶片结构。对于 PU-opt 设计（利用聚氨酯的力学特性优点进行结构优化），主要是通过减少主梁层数并通过调整根部的铺层来保持有效的安全系数。图 6 显示了主梁层在叶片上的铺层分布。

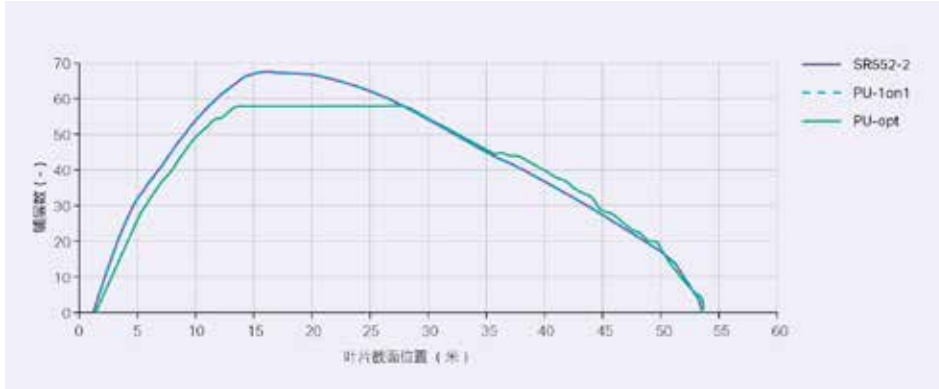


图6.主梁的铺层分布



叶片重量. 计算表明, 采用直接树脂替代法, 在保持必要的强度的条件下, 叶片重量初步可以减轻 1.1%。图 7 显示采用 Pu-opt 叶片设计, 叶片重量减轻高达 5.0%。

描述			SR552-2	PU-1on1	PU-opt
主梁UD和 后缘UD	主梁质量	千克	5074.7	4913.7	4700.0
	质量差	千克	-	-161.0	-374.7
	质量差率	%	-	-3.2%	-7.6%
壳体 (叶壳和叶根)	壳体质量	千克	4502.1	4565.4	4354.0
	质量差	千克	-	+63.3	-148.1
	质量差率	%	-	+1.4%	-3.2%
叶片 (包括其他部件)	壳体质量	千克	11179.1	11058.8	10621.9
	质量差	千克	-	-120.3	-557.2
	质量差率	%	-	-1.1%	-5.0%

图 7. 可能的重量减轻比较

叶片偏转 在特定的额定功率, 随着叶片长度的增加, 叶片偏转变得更加重要。这是避免叶片尖部和塔筒之间碰撞的必要的关键设计指标。图8比较了采用更高纤维含量 (FMR) 时的参数值。将聚氨酯用作基材, 采用 PU-1on1设计, 偏转偏移显著减小2.1%。采用Pu-opt设计法, 偏转保持不变, 与原来的SR552-2相近, 偏差仅为-0.03%。

采用 PU-opt 叶片设计, 叶片重量减轻高达 5.0%

叶片	偏转	差率
(-)	(M)	(%)
SR552-2	9.162	-
PU-1on1	8.968	-2.1%
PU-opt	9.160	-0.03%

图 8. 偏转比较

静力矩 如图9所示，随着叶片重量减轻，静力矩也减小。

采用重量优化设计PU-opt，静力矩减小2.54%。而PU-1on1设计仅通过取代树脂，便使得静力矩减小1.76%。静力矩减小有助于减小风机承受的疲劳载荷，并延长部分组件的使用寿命。

叶片	静力矩	
(-)	(kg.m)	(%)
SR552-2	1.89E+05	-
PU-1on1	1.86E+05	-1.71%
PU-opt	1.84E+05	-2.54%

图 9. 静力矩比较

纤维间失效 (IFF) 在风机叶片设计中，纤维间失效是最关键的失效模式之一。图10显示了各设计中所有叶片构件的最大总体纤维间失效指标。更高的主梁刚度会使叶片中的载荷重新分布，因而能显著减小PU-1on1设计中各个构件的纤维间失效指标。

即使采用PU-opt优化设计法，纤维间失效力也能显著减少，因而能显著提高安全余量。纤维间的失效指标可以降低至0.87，降低率为11.2%，展现更多的优化潜力。

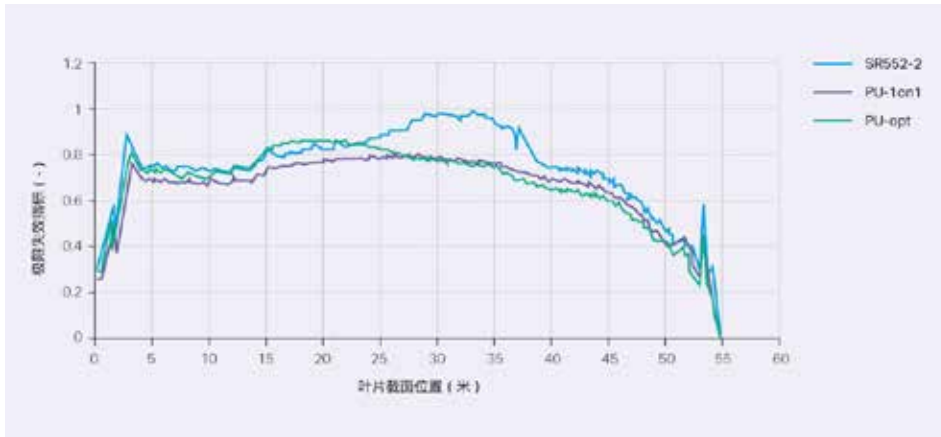


图 10. 最大总体纤维间失效指标

在叶片设计中使用聚氨酯树脂解决方案，纤维间的失效指标能降低 **11.2%**。

结论

采用PU/TM层合板以1:1取代各个标准层合板时（PU-1on1设计），叶片重量略有减轻。但是纤维间失效指标和偏转安全余量得到显著改善。

通过对PU-1on1设计进行优化，形成PU-opt优化设计，聚氨酯能显著减少整个叶片的材料使用量，叶片减重5.0%。尤其对于大型风力发电机而言，这是一个非常重要的结果，减轻质量将能降低疲劳载荷，也有助于设计师进一步减轻叶片质量，同时按照比例降低其它风力发电机构件（尤其是涡轮机轂）的质量。另外，铺层数减少有助于实现更快速和容易的灌注工艺流程。

总之，根据聚氨酯材料的性能顺利地执行了SR552-2优化，实现了更轻的叶片设计。



附录

认证证书

DNV-GL (“Det Norske Veritas Germanischer Lloyd” 公司简称) 是一家全球性的质量保证和风险管理公司, 不论是安全、可靠性还是性能标准方面, 都在国际风电行业处于领先地位。

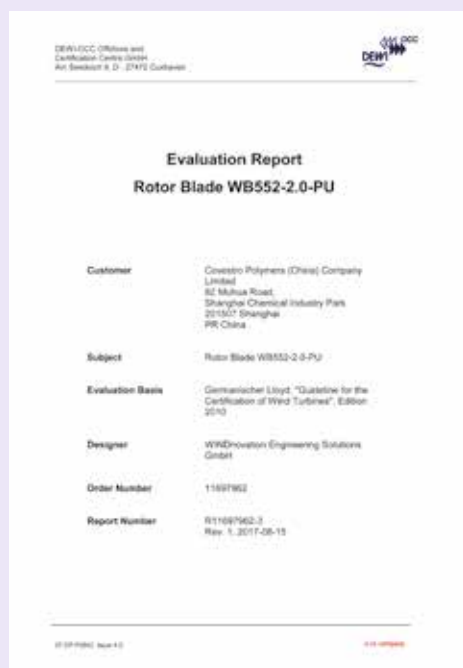
科思创聚氨酯树脂体系 (Desmodur 44CP20 / Baydur 78BD085) 已经过DNV-GL 批准和认证, 这些产品符合“GL classification and construction II Materials and welding part 2 non-metallic materials”的要求, 用于玻璃纤维增强塑料复合材料结构中的基体树脂。

对于风电行业而言, 尤其是对于风力发电机和风机叶片制造商而言, DNV-GL 认证是证明科思创聚氨酯树脂用作风机叶片制造树脂基材具有良好特性和性能的一张名片。



风机叶片检测认证

用于 2 兆瓦风力发电机且配有聚氨酯主梁和承剪腹板的 55.2 米风机叶片已经在北京鉴衡认证中心（CGC）通过静力试验和疲劳试验的检测。该型叶片由 WINDnovation 设计且叶片设计通过了 DEWI 认证。





想要了解更多相关信息？
请联系我们的专家获取更多内容

Marc Schuetze (EMLA)
marc.schuetze@covestro.com

Lisa Donaldson (NAFTA)
lisa.donaldson@covestro.com

Sean Xiao (APAC)
sean.xiao@covestro.com

我们不对所提供的信息与技术支持提供保证或担保，如有更改将不会另行通知。您明确理解并同意，您将承担使用我们产品、技术支持与信息而产生的所有责任、侵权、合同以及其他责任，并就此赔偿我方和使我方免受损害。此处未包含的任何声明或建议均未得到授权，且对我们不具有约束。此处的任何信息不得解释为对任何与其他材料或其使用方法的专利主张相冲突的产品的使用建议（该等产品与其他材料或其使用方法专利相冲突）。对于涉及到任何专利主张的权

Covestro Deutschland AG
Business Unit Polyurethane
51365 Leverkusen
Germany

[covestro.com](https://www.covestro.com)

