

PHA 聚合物的再生

探索 PHA 的「end-of-life」方案

GO!PHA 白皮书 – 2020 年 5 月 15 日

文：Jan Ravenstijn (GO!PHA 联合创始人)

Phil Van Trump (Danimer Scientific 首席技术官)

译：蓝晶微生物

PHA 有不同的再生途径，即不同的「end-of-life」方案。本文将详细解析这句话背后的含义。

在许多国家和地区，人们对塑料垃圾污染的容忍度不断降低，因为他们几乎能在任何地方，包括陆地、河流、湖泊和海洋中找到塑料垃圾的身影。目前，塑料垃圾的数量正在逐年增加。其中，「无形」塑料垃圾的数量甚至比「有形」塑料垃圾还要惊人。

至少有两种原因导致了「无形」塑料垃圾的增长：第一，由于塑料垃圾表面的污垢增加了物体自身的重量，90% 落入水中的塑料垃圾会沉入底部；第二，服装和众多日用品中的塑料微颗粒不仅会以各种方式进入水路系统，还会以我们看不见的方式出现在陆地上或食物链中。毋庸置疑，塑料垃圾污染问题早应引起人们的重视。

目前全球在海洋塑料垃圾的治理和再生方面已采取了相关措施，但是这些再生方式都面临着一个问题，即再生塑料被重复加工利用后，还是会被人们扔回海洋。虽然我们可以反复打捞这些垃圾，这在技术层面上称得上是「循环经济」，但实际并未从根本上解决塑料污染的问题。

如今，全球各地也陆续出台了治理塑料垃圾的相关法案，不同地区的立法者在拟写的方案中都提到，希望停止使用基于大量石油基聚合物生产的一次性塑料制品，以降低塑料垃圾对陆地和水体的环境污染。一些立法者提出可以使用生物可降解聚合物来替代石油基聚合物，但其所在国家或地区对于生物可降解聚合物的认知尚处概念搭建的阶段，没有形成完整的使用体系。另一些立法者倾向在法案中规定只允许用天然材料制作一次性产品，因为这些材料可在自然界中生物降解。然而部分天然材料，如木材，无法在水中生物降解。木材由纤维素和木质素组成，木质素是通过一类真菌实现生物降



解，而这些真菌不存在于水中，因此木质素在海洋环境中不能生物降解，这就是沉船在海底停留数百年仍可保持基本骨架形态的原因。

那么问题来了：「我们究竟该如何应对这些挑战？」

我们正在寻找一种理想的、有广泛用途的新材料，实现所有已知的再生方案。在减少塑料制品的使用并将其重新设计后，立法者、生产商、零售商和其他社群应当考虑以下方案：

- 方案一：**重复使用 → 资源的再生与再利用
- 方案二：**重新加工 → 聚合物的再造与新应用
- 方案三：**原材料 → 使用「可再生碳」
- 方案四：**环境堆肥 → 工业堆肥和家庭堆肥
- 方案五：**焚烧 → 生产可再生能源
- 方案六：**微生物的营养成分 → 完全生物降解和反硝化

很多情况下，人们不能严格按照所有的方案处理再生后的塑料制品，但这些方案对于塑料制品的循环、再利用或堆肥尤其关键。如果有一种新型材料适用于所有的再生方案，不管使用者是否以特定的方式再生这些塑料制品，制造商都可以最大限度地减少其产品对环境的不利影响。如果这些塑料制品最终都会进入陆地和水体环境，则必须考虑其原材料是否「可完全生物降解」。

以下会对每种循环方案做一些补充声明。

1. 重复使用

在日常生活中，我们经常会重复使用饮料瓶、塑料购物袋、啤酒箱等塑料制品。尽管这种行为是环保的，但我们需要意识到，塑料制品在重复使用的过程中，会因反复的磨损而产生微型的塑料颗粒，这些微塑料最终会进入海洋并污染环境。

合成纤维制品，如 T 恤等就是很好的例子。通常，人们会将 T 恤多次洗涤，但每次洗涤后，都会有合成纤维流失到洗衣废水中。根据国际自然合成纤维保护联盟的数据，全球最终流入海洋的微塑料中，有 35% 来自合成纤维，而它们的重量加起来可达数百万吨。

如果这些合成纤维都是由海洋可降解的材料制成，那该多好？

2. 重新加工

这种方案通常在再生大量塑料制品的场景中使用。在加工过程中，塑料材料会被熔化并转变为另一种形态。例如，被再生的 PET 瓶子可在重新熔融加工后用来制作纺织合成纤维。



只要纯度相对较高，所有的热塑性塑料都可以通过这种方式再生处理。然而，再生塑料只能重熔和加工 2~3 次，因为每次处理都会降低聚合物的分子量，影响其物理性能。最终人们不得不采用其他方案处理这些塑料制品。

3. 原材料

这种方案可以用于处理所有含碳材料和大多数热塑性、热固性聚合物以及被有机废弃物污染的材料。在这种情况下，这些再生的材料可以作为化学品制造原料被二次利用。这种可再生碳源在 Nova Institute 的报告中被称作「技术层面的可再生碳」。目前，国际上已有公司针对这种方案开发了相关技术并建立了工厂，利用塑料垃圾制造可再生化学品。而海洋中就有大量的塑料垃圾，如此看来，制造可再生化学品是减少海洋塑料污染的有效途径。

4. 环境堆肥

常见的环境堆肥有工业堆肥和家庭堆肥。

工业堆肥是一种在高温下进行的再生方案。工业堆肥最初出现于农林业的废料管理中，这种方案可将塑料制品转化为混合肥料用于农业生产。目前，在已发布的「鉴定聚合物制品是否具有工业堆肥性能」的标准中，通常会对测试材料特定部分的厚度进行限定。需要注意的是，在测试中，材料降解所花费的时间和材料的厚度成正比，当材料的厚度超过一定限度时，材料可能无法完全生物降解。

家庭堆肥是在自然环境温度下进行的。工业堆肥和家庭堆肥的生物降解条件可能会因性能标准不同而存在差异。最常见的符合环境堆肥标准的聚合物包括脂肪族聚酯、纤维素和淀粉，在聚酯中也允许存在一些有限的芳香结构。

5. 焚烧

如果以上四种方案都不适用，还可以考虑通过焚烧聚合物中固定的有机碳实现热能发电。方案五与方案三的原理相同，但在方案五中，材料并不用于制造新的化学物质，而是生产能源。

当然，通过太阳、风能、潮汐、水力资源或核能等非碳源途径获取的能源对环境更加友好。

6. 微生物的营养成分

细菌和真菌需要营养物质来维持正常的生命活动，当 PHA 聚合物材料散布在陆地和水环境中时，它们可以充当细菌和真菌的营养物质。实际上，某些聚合物材料可在陆地上实现生物降解，但这种特性在饮用水或者海水中受到限制。而目前工业生产的 PHA 聚合物可以在多种环境中下进行生物降解。



此外，PHA 聚合物还有另外一个功能：在污水中进行反硝化。它可以作为固态碳源，在微生物的作用下将氮氧化物，如硝酸盐、亚硝酸盐和氨转化为氮气。

目前可以完全满足以上六种再生方案的高分子材料包括纤维素、PHA 聚合物、淀粉以及它们的共混材料。这些材料属于「天然产品」，细菌可以这些天然营养物质为原料进行生物合成。

自然界中有许多微生物在其所处环境中，利用不同的营养物来源合成各种 PHA 聚合物。作为营养物质和能量来源，这些聚合物被认为在生物（植物、动物、人类）的新陈代谢中起着重要作用。

聚羟基脂肪酸酯（PHA）是一系列天然生物无害材料的总称，与木材、纤维素产品、蛋白质和淀粉等天然材料相似，已经在自然界中存在于数百万年。在过去的 20~30 年里，全球已经有几十个开发项目将 PHA 材料应用于耐用品和结构件领域。他们致力于模拟自然界中 PHA 的合成方式来生产 PHA 材料和相关产品，以此替代人工的化学合成。

如今，PHA 已被证实可通过不同的原料，如气体、液体或固体废弃物等来进行生产，为众多废弃物创造了一条「用后价值链」，对「循环经济」做出贡献。

在一次性物品的应用场景中，传统的石油基塑料制品可能由于设计缺陷或者不恰当的废弃物管理进入到环境中，而 PHA 材料可以代替石油基塑料解决这类问题。在如堆肥、土壤和水体等环境中，PHA 材料的生物降解速度与纤维素（如纸张）相当，甚至更快。

PHA 材料可以部分替代任何传统的化石基聚合物品类，拥有巨大的潜在市场。PHA 材料可以根据不同的类型和性能等级应用于多种场景，如注塑、挤出（材料在外力作用下发生塑性变形，流经孔口或模具）、热压成型、泡沫、非织造布、纤维、3D 打印、纸张和化肥涂层、胶水、粘合剂、增塑剂等，并可用作涂料和泡沫中的热固性构件。此外，由于 PHA 具有生物可吸收性，该材料已被商业化应用于伤口缝合等医疗领域。

目前，多种 PHA 聚合物的生产制备工艺已扩大至工厂规模。这些聚合物的性能在至少 24 个商业化案例中得到了验证。虽然 PHA 聚合物不能完全代替现有的石油基聚合物材料，但就技术方向而言，其应用场景非常多。PHA 这种新型聚合物的工业化始于 1992 年，在全球范围内受到广泛关注，但尚处于早期发展阶段，主要生产商都是中小型企业。目前，全球已有数家公司具备了批量生产 PHA 的能力，并且其工厂规模还在进一步扩大。





PHA 全球组织 (GO!PHA) 是一家会员驱动型的国际非营利性行动机构, 旨在推动 PHA 行业的发展。通过应用一系列基于可再生原料的可持续、高质量的天然产品和材料, PHA 材料为减少温室气体和环境塑料污染提供了独特的解决方案, 打造了良性的循环经济模式。

GO!PHA 提供了一个平台, 用于创建和共享经验知识, 并促进联合开发行动。

成为会员或赞助者, 开始分享、贡献及合作, 以加速 PHA 平台行业的发展。

www.gopha.org

