

乳胶泡沫的演变：从厨房混合机到环保床垫

章羽 编译

(全国橡塑机械信息中心, 北京 100143)

1 起源

天然乳胶的使用可追溯至阿兹特克人, 他们早在公元前1600年就利用乳胶制作球类。然而, 乳胶泡沫行业的诞生与约翰·博伊德·邓禄普密切相关。虽然邓禄普主要因1888年发明充气轮胎而闻名, 但他(除了固特异之外)对橡胶进行的实验为橡胶硫化和乳胶产品的未来发展奠定了基础。

2 商业化的曙光

乳胶泡沫的商业化进程在20世纪30年代开始加速。当时在邓禄普公司工作的英国化学家爱德华·亚瑟·墨菲(Edward Arthur Murphy)在此发展中发挥了关键作用, 他发明了生产乳胶泡沫的工艺, 该产品最初以“Dunlopillo”为名推向市场。1929年, 墨菲利用天然乳胶开发了这一工艺, 并按照妻子的建议, 借助一台厨房混合机对工艺进行了改进。这一突破促成了1931年首款乳胶床垫的诞生, 彻底革新了睡眠舒适度。“邓禄-皮洛”率先开发并推广了乳胶泡沫床垫和枕头, 其稳定化和硫化工艺为工业规模的生产奠定了基础。

3 邓禄普法与塔拉莱法

乳胶泡沫的制造主要有两种工艺。

3.1 邓禄普法

该工艺涉及将乳胶与硫化剂预先混合。随后, 混合物在连续式密炼机中发泡(历史上, 这一过程是在装有大型搅拌器的槽中分批进行的), 并在发泡阶段加入ZnO/DPG混合物。最后加入凝胶剂。所得泡沫被注入模具中凝胶固化, 从而固定泡沫结构。随后将模具放入蒸汽隧道或腔室中加热并进行硫化。最终取出芯体, 经清洗和干燥处理。

3.2 塔拉莱工艺

塔拉莱工艺于20世纪40年代开发, 其流程包括

将模具部分填充, 然后利用部分真空使泡沫膨胀以完全填满模具。随后将泡沫冷冻至 -22°C , 以稳定其结构。引入二氧化碳气体作为凝胶剂, 并采用蒸汽对泡沫进行硫化, 这与邓禄普工艺类似。

4 邓禄普与塔拉莱：对比分析

塔拉莱工艺比邓禄普工艺更为复杂, 需要采用真空处理、冷冻和二氧化碳充气等步骤, 这使得其技术要求显著提高, 特别是在模具设计方面。因此, 塔拉莱乳胶泡沫价格更高, 目前的市场份额非常小。

5 邓禄普模具的演变

在邓禄普工艺的早期, 模具采用大腔体或“销钉”设计, 以促进硫化过程中的快速且均匀的热传导, 从而确保整个泡沫的硫化效果一致。这些大腔体还解决了脱模难题, 因为较大的表面积更容易脱模。

随着时间推移, 模具逐渐演变为表面更光滑、销钉更细的结构, 进而发展为“细销钉”乳胶工艺, 该工艺利用大量细小销钉实现热传导并支持分区成型(图1)。

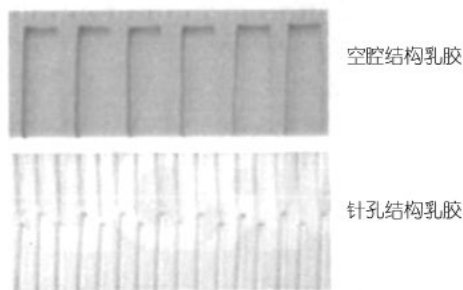


图1 邓禄普模具的发展历程

需要强调的是, 乳胶泡沫具有开孔结构, 而销钉和空腔在硫化过程中主要起到传热和定型的作用。一张特大号床垫模具每侧最多可包含2 800个销钉, 这显著增加了表面积。光滑的模具表面和脱模剂的使用对于防止乳胶芯在脱模过程中撕裂至关重要。与某些营

销宣传相反，销钉的主要功能并非增强透气性。

6 模具重量的挑战

乳胶泡沫生产的一个重要方面是模具的巨大重量。在传统的邓禄普工艺中，大型床垫的模具重量可达1 t。这意味着必须加热超过1 000 kg的金属，才能使约50 kg干重乳胶泡沫完成硫化。由此产生的热惯性相当大，并影响了该工艺的能源效率（图2）。

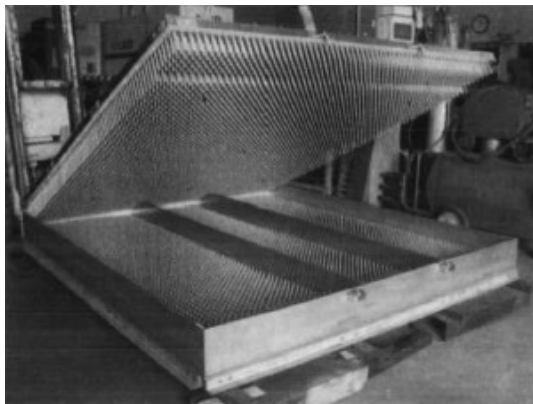


图2 模具重量的挑战

7 高频硫化带来的革命

乳胶泡沫中含有大量空气，而空气是一种良好的绝缘体。传统邓禄普工艺中，销钉的间距和长度受到限制。销钉间距增大或长度缩短都会延长硫化时间。虽然可以通过调整凸针间距和直径来制作分区床垫，但关于精确实施的知识却十分有限。通常，设计只是在原有基础上稍作修改，有时会导致不利后果，例如肩部区域比骨盆区域更硬，这违背了人体工学原理。

相比之下，高频（HF）加热是一种直接工艺。双极水分子与电磁场对齐，并根据频率改变取向，从而产生分子摩擦并加热材料。一旦达到所需的硫化温度（约100℃），模具就会从高频场中移出。实际上，这通常以连续工艺的形式实现。蒸汽硫化是一种缓慢且间接的过程，能量通过对流传递到金属模具表面。随后，能量从模具表面传导至销钉，再传导至泡沫材料。

乳胶泡沫的高频硫化工艺采用专用塑料模具，其重量不到金属模具的一半。这种重量差异对生产设施的要求产生了显著影响。

例如，邓禄普工艺中采用的12模转盘系统需要加固地面以支撑巨大的重量，而高频硫化系统则可安装

在标准工业地面上。这也意味着，与相对难以移动的蒸汽加硫系统相比，HF系统更容易搬迁或扩建（图3）。



图3 高频硫化

本文作者正积极致力于开发环保型缓冲模具材料，以取代目前使用的塑料模具，并进一步减少生产过程中的生态足迹。

8 原材料考量

考虑乳胶泡沫行业的原材料基础至关重要。液体乳胶仅占橡胶树（*Hevea brasiliensis*）产量的较小一部分（约10%）（图4）。其中大部分被加工成固体橡胶，用于各种应用，特别是轮胎行业。现有液体乳胶中，有相当一部分用于生产医用和工业手套以及避孕套。只有一小部分液体乳胶用于床垫和枕头行业。自千禧年伊始，乳胶泡沫行业在原材料来源方面已明显转向亚洲。泰国和斯里兰卡是液态天然乳胶的主要生产国。斯里兰卡已成为乳胶泡沫生产的关键枢纽，部分原因在于天然乳胶广泛采用了全球有机乳胶标准（GOLS）认证。该认证强调可持续且环保的生产实践。这一转变导致亚洲的生产能力增强，全球竞争加剧。



图4 橡胶树（*Heveabrasiliensis*）

9 HF硫化技术的突破

2004年HF硫化技术的发明（EP1508420）在这一历史背景下代表着—项重大进步。这项由笔者开发的技术，彻底革新了乳胶泡沫的传统硫化工艺。HF硫化技术无需使用定型和硫化用销钉，而是将发泡乳胶注入塑料模具中，并利用高频电磁波进行直接且均匀的加热（图5）。

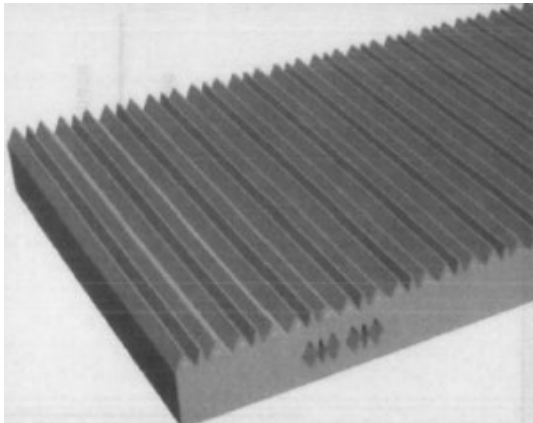


图5 在高频硫化过程中，发泡乳胶被注入塑料模具中，并利用电磁波进行直接且均匀的加热

10 HF硫化法的优势

HF硫化法具有多项优势，能显著提升乳胶泡沫生产的效率和灵活性：

10.1 硫化时间更短

与传统的蒸汽硫化相比，HF硫化法能使乳胶泡沫加热速度更快、受热更均匀。使用HF硫化法，一张标准尺寸的床垫仅需5 min即可完成硫化，而蒸汽硫化则需要1 h。

10.2 造型灵活性更高

无需使用定位销，可实现更多样化的乳胶泡沫产品设计；且模具内部接触面积的减少简化了脱模过程。

10.3 占地面积更小

传统邓禄普工艺所需的漫长硫化及干燥通道被省去，从而显著减少了所需的占地面积。床垫的蒸汽硫化通道长度可达25 m；热风干隧隧道甚至可达60 m或更长。相比之下，现代HF硫化系统通常长度不超过13 m；而HF干燥系统所需的空间则要小得多（例如12~16 m）。

10.4 节能

与大规模使用蒸汽加热相比，利用高频波进行直接加热有望实现节能。

10.5 提高产品质量

高频波能实现均匀、快速的硫化，从而使乳胶泡沫的产品质量更加稳定，并提升其力学性能。

10.6 获得“负碳”认证的潜力

根据为高频系统供电所采用的方法，使用高频技术的乳胶泡沫工厂有望获得“负碳”认证。

11 HF硫化工艺的能效

HF硫化工艺的能效更高。硫化通道和干燥通道必须提前充分预热或持续加热（全天候运行），即使在闲置期间也是如此，这导致了大量的能源浪费。相比之下，HF硫化机仅在“按需”时才消耗能源。只有当湿材料通过电极之间时才会消耗能源，从而最大限度地减少了空转能耗。在干燥过程中，HF系统将能量集中输送至湿度较高的区域，高效地去除水分。一旦床垫或枕头干燥，能耗便降至最低，这与热风通道持续散发热量的情况截然不同。总而言之，HF技术提供按需加热，从而实现高效的能源利用。

12 质量保证

业内一个关键问题是，HF硫化工艺能否提供与成熟的邓禄普工艺相同或更优的质量。目前有多种针对乳胶泡沫的化学检测标准。

德国科隆生态研究所（Eco-Institute）颁发的Eco-Test证书是一项广受认可的标准，该标准对乳胶泡沫中的多种化学物质进行评估，以确保其符合严格的环境与健康要求。德国莱茵TÜV的LGA测试旨在评估乳胶床垫的耐用性。该测试通过在数天内反复让床垫芯承受重型滚轮的碾压，模拟长达10年的使用过程。

测试前、测试中及测试后，均会测量弹簧回弹率及其他相关床垫性能指标。最高得分为100分。在笔者监督下设计系统生产的床垫取得了优异成绩，获得99分（满分100分）。此外，这些系统生产的所有枕头和床垫均通过了生态测试，证明了采用HF硫化工艺生产的乳胶泡沫具有极高的品质。

13 结论

乳胶泡沫行业的历史既充满了开创性的发明，也经历了相对停滞的时期。图6概述了乳胶泡沫的各种生产工艺。

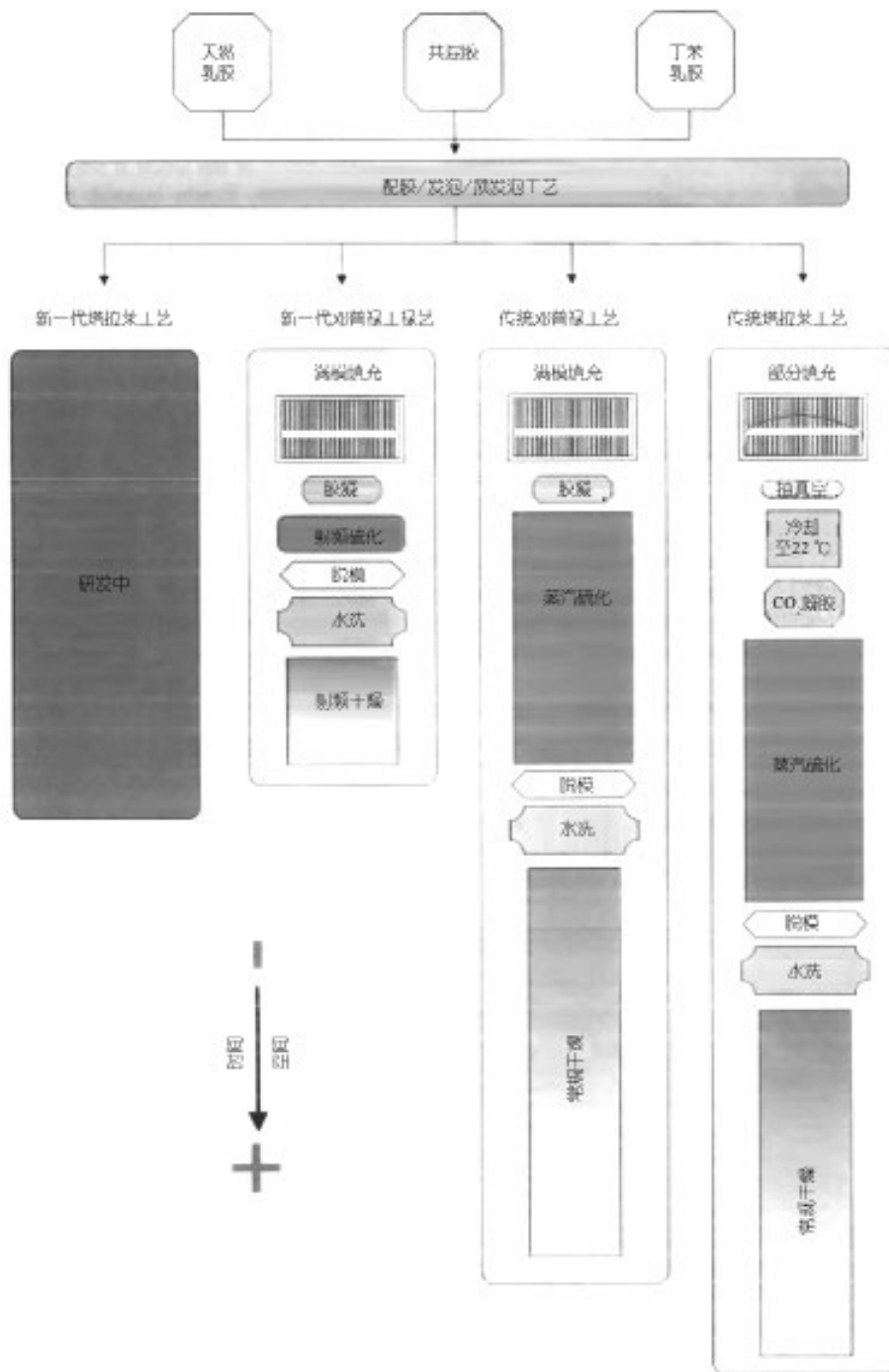


图 6 乳胶泡沫不同生产工艺的概述

自1930年左右邓禄普工艺问世以来，整个世纪的大部分时间里技术进步都较为有限。虽然模具中的型腔逐渐被更精细的销钉所取代，但硫化过程仍依赖于几何形状。2004年HF硫化法的发明重振了该行业。这项创新技术消除了硫化过程中对成型元件的需求，充分释放了天然乳胶泡沫在提升睡眠舒适度方面的潜力。原材料供应方面的挑战，以及对可持续且高效

生产方法日益增长的需求，将继续推动乳胶泡沫行业的创新。橡胶行业专业人士需要密切关注这些发展动态，并利用HF硫化等新技术，共同塑造这种多功能材料的未来。

译者：章羽

原文：RUBBER WORLD No.11/2025, by Jens Szymanska, Latexfoam Technology B. V.