



BLUEDGE™ (溴化 SBS)

聚合物型阻燃技术白皮书

BLUEDGE™ (溴化 SBS) 聚合物型阻燃技术

目 录

1. 摘要
2. HBCD 被淘汰的原因
3. HBCD 淘汰情况概述
4. BLUEDGE™ (溴化 SBS) 作为创新型阻燃剂用于 EPS 和 XPS 泡沫保温材料
 - 4.1 技术开发
 - 4.2 安全性
 - 4.3 监管概况
 - 4.4 职业暴露
 - 4.5 安全特性和法规摘要
 - 4.6 与小分子替代品的安全特性对比
5. 性能验证和市场接受度
6. 采用 BLUEDGE™ (溴化 SBS) 的工艺要求
 - 6.1 EPS 保温板生产
 - 6.2 XPS 保温板生产
7. BLUEDGE™ (溴化 SBS) 聚合物型阻燃剂及阻燃母粒的供应
 - 7.1 BLUEDGE™ (溴化 SBS) 聚合物型阻燃剂供应商
 - 7.2 BLUEDGE™ (溴化 SBS) 聚合物型阻燃母粒供应商
8. 全球成功案例
 - 8.1 国外成功案例
 - 8.2 中国成功案例
9. 结语
10. 参考文献

1. 摘要

阻燃剂 (FR) 可以减缓建筑保温用发泡聚苯乙烯 (EPS) 和挤塑聚苯乙烯 (XPS) 泡沫的火势蔓延, 保护生命财产安全, 达到建筑和防火安全规范与标准。一直以来, 建筑泡沫保温材料主要采用六溴环十二烷 (HBCD 或 HBCDD) 作为溴化阻燃剂。然而, 由于对其毒性的担忧, 多年来 HBCD 一直受到密切的关注。如下文所述, 多项研究表明, HBCD 不仅具有环境持久性和生物累积性, 还具有生殖毒性、肝毒性和甲状腺毒性。如今, HBCD 被公认为是一种持久性、生物累积性和毒性 (PBT) 物质, 欧盟《关于化学品注册、评估、授权和限制》(REACH) 法规将其归为高度关注物质 (SVHC), 《斯德哥尔摩公约》也将其列为持久性有机污染物 (POP) (联合国环境署, 2013)。目前, 多个国家和地区已限制或禁止使用 HBCD。

BLUEDGE™ (溴化 SBS) 是一款已经上市的创新型聚合物型阻燃剂, 在全球范围内被广泛用于替代 EPS 和 XPS 泡沫保温材料中的 HBCD。BLUEDGE™ (溴化 SBS) 是聚苯乙烯和溴化聚丁二烯 (CAS 编号: 1195978-93-8) 的嵌段共聚物。与现有的阻燃剂相比, 该产品专为降低危害性而设计。经严格的环境、健康和安全管理 (EHS) 评估以及广泛的测试显示, BLUEDGE™ (溴化 SBS) 的毒性及其对环境的影响极低 (Beach 等人, 2017, 2021; 美国环保署, 2014)。BLUEDGE™ (溴化 SBS) 的危害性之所以较低, 主要是因为该产品为大分子聚合物, 而市面上的其他阻燃剂均为小分子物质。如图 1 所示, BLUEDGE™ (溴化 SBS) 的分子量超过 60,000g/mol, 因而不能穿过细胞膜, 这样也就无法被生物系统所吸收, 使得其毒性和潜在生物累积性本身就较低 (Beach 等人, 2017, 2021; 美国环保署, 2014)。与当前所有其他 HBCD 替代品相比, 上述设计为 BLUEDGE™ (溴化 SBS) 提供了独一无二的优势。

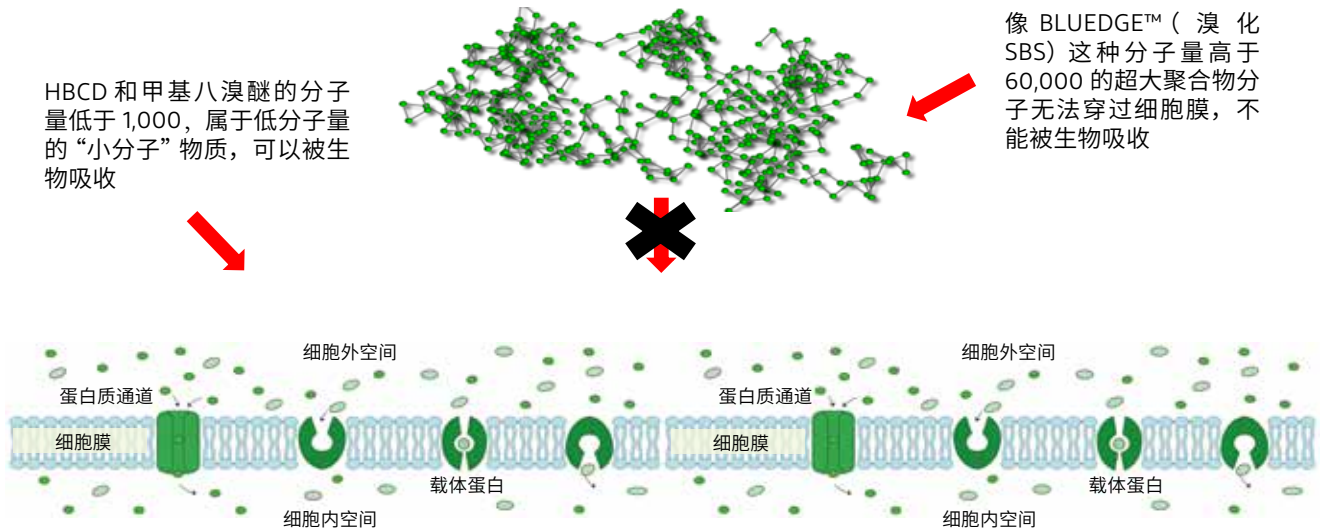


图 1: BLUEDGE™ (溴化 SBS) 聚合物型阻燃剂相较小分子阻燃剂在生物吸收方面的物理优势 (参考朗盛 Emerald Innovation™ 3000 的产品描述, ©Chemtura 2013)。

从阻燃性能来看, BLUEDGE™ (溴化 SBS) 能够提高聚苯乙烯泡沫的阻燃性, 减缓燃烧速度。此外, 它还可以满足 XPS 的热稳定性要求和 EPS 的聚合稳定性要求。无论是用于 EPS 还是 XPS, BLUEDGE™ (溴化 SBS) 都支持现有的生产工艺, 不仅能提供预期性能, 还能保持泡沫的物理特性。含有 BLUEDGE™ (溴化 SBS) 的泡沫符合 (并在某些情况下高于) 当前的防火安全和使用要求, 同时环境和人体毒性更低, 满足所有全球 (如欧盟、日本、北美、中国、韩国) 监管准则。

除了 BLUEDGE™ (溴化 SBS) 以外, 市面上的 HBCD 替代品还包括一些溴化小分子产品。其中一种可用于聚苯乙烯保温材料的商业化阻燃剂产品为四溴双酚 A 双 (2,3-二溴-2-甲基丙基) 醚 (TBBPA-DBME), 又称甲基八溴醚。不过, 人们对于这些小分子物质的危害性也存在一定的担忧, 而针对 HBCD 的监管

措施正是出于相同的担忧。例如, 甲基八溴醚是一种小分子阻燃剂, 由于对其内分泌干扰 (ED) 和 PBT 特性的担忧, 甲基八溴醚已被列入欧盟 REACH 法规“欧共体滚动行动计划” (Community Rolling Action Plan, CoRAP)。如果被归为 ED 或 PBT, 甲基八溴醚将被加入 SVHC 清单, 并像 HBCD 一样被禁止。

如今, 商业与住宅建筑领域对节约能源的需求远超过去。BLUEDGE™ (溴化 SBS) 有助于确保聚苯乙烯泡沫保温产品适用于未来各种各样的可持续建筑项目。这些高品质材料可以帮助开发商满足人们对高效节能的生活与工作空间日益增长的要求, 同时在材料健康性审查日趋严格的情况下, 达到相关的法规要求。BLUEDGE™ (溴化 SBS) 是一种经济上可行的阻燃剂, 可以替代 HBCD 用于聚苯乙烯泡沫保温材料。相较小

健康	环境
✓ 无遗传毒性	✓ 设计持久性
✓ 无急性毒性	✓ 大分子, 不能穿过细胞膜
✓ 无亚慢性毒性	✓ 无生物累积性
✓ 无发育毒性	✓ 无急性毒性: 低于生态毒性关注水平
✓ 无生殖毒性	

表 1: 摘自国际溴工业理事会的电子版手册。新一代溴化阻燃剂: 丁二烯-苯乙烯共聚物。 <https://bsef.com/wp-content/uploads/2018/08/BSEF-Polymeric-brochure-Digital.pdf>

分子替代产品，BLUEDGE™（溴化 SBS）聚合物型阻燃技术具有更加优异且广为人知的 EHS 特性。

2. HBCD 被淘汰的原因

20 多年来，六溴环十二烷（HBCD 或 HBCDD）（CAS 编号：3194-55-6）一直受到密切的关注。在全球范围内，HBCD 主要作为阻燃剂用于建筑保温材料 EPS 和 XPS 聚苯乙烯泡沫（90% 以上的 HBCD 被用于此用途）。许多科研文章研究了 HBCD 在环境中的存在情况（Haneke, 2002a; Shaw 和 Kannan, 2009; Shaw 等人, 2009; deWit 等人, 2010; Kefeni 等人, 2011; Nyholm 等人, 2013; Gorga 等人, 2013）、生物降解情况（Vrkoslavová 等人, 2011; Eljarrat 等人, 2011; Lal 等人, 2010）、在人体和动物组织中的累积情况（Hites, 2004; Inoue 等人, 2006; Sjödin 等人, 2003）及其毒理学特性（Birnbaum 和 Staskal, 2004; Viberg 等人, 2004; Zhou 等人, 2001），包括非特异性水生基线毒性（Mayer 和 Reichenberg, 2006）。一系列研究表明，HBCD 不仅具有环境持久性和生物累积性，还具有生殖毒性、肝毒性和甲状腺毒性（Ema 等人, 2008; Eriksson 等人, 2006; Van der Ven 等人, 2006）。由于以上种种原因，HBCD 已被归为持久性、生物累积性和毒性（PBT）物质。此类物质之所以令人担忧，不仅是因为它们具有毒性，还因为它们不易降解，会在环境中长期存在。出于这些担忧，多个国家和地区已限制使用 HBCD。

欧盟 REACH 法规旨在通过提供健康、安全和环境数据以及对高度关注物质（SVHC）的控制来加强化学物质的安全使用。授权旨在控制 SVHC 的使用，且 SVHC 物质根据与致癌性、致突变性或生殖毒性（CMR）相关的 PBT 评判标准基于证据权重法被添加至候选清单。HBCD 已被认定为 SVHC 物质，并被列入授权清单（欧盟 REACH 法规附件 14）。HBCD 还根据联合国环境署《关于持久性有机污染物的斯德哥尔摩公约》进行了评估，并被列入《公约》附件，该附件规定了禁止销售或严格限制使用的物质。2014 年 11 月 26 日，在全球范围内禁用 HBCD 的决议开始生效；2015 年 8 月起，HBCD 被全面禁止。到 2016 年，HBCD 已被除中国以

外的多个签署国淘汰（联合国粮农组织，2016 年；联合国环境署，2016 年；联合国环境署，2019 年）。中国将于 2021 年 12 月 26 日起全面禁止 HBCD。

HBCD 的生物积累因子（BCF）为 13,100 至 18,000（根据欧盟标准，BCF 的 PBT 阈值为 2,000），这表明其具有较高的生物累积潜力。哺乳动物毒性方面，HBCD 被列入 REACH 法规附件 6，并根据全球统一制度（GHS）被强制性列为生殖毒性 2 类。HBCD 在发育神经毒性方面被美国环保署（US EPA）认定为高危害性，在生殖毒性和重复剂量毒性方面被认定为中度危害性，在致癌性和神经毒性方面被估计为中度危害性；在其他健康状况方面的危害为低或极低（美国环保署，2014）。

在野生生物影响方面，大量研究强调了 HBCD 对众多野生生物的有害影响，尤其是对水生生物的毒性。美国环保署指出，HBCD 对水生生物有毒，且在急性水生毒性方面均有极高的危害性（美国环保署，2014）。

此外，HBCD 的风险还存在于职业环境中，例如在 HBCD 的生产过程中（加拿大环境部和加拿大卫生部，2011；澳大利亚工业化学品通告评估署，2011；瑞典化学品管理局，2008；美国环保署，2014）。例如，研究发现，HBCD 生产厂和加工厂周边地区的 HBCD 浓度较高——这可能会导致局部环境风险（Rememger 等人，2004；van der Ven 等人，2006）。

3. HBCD 淘汰情况概述

HBCD 于 2014 年在日本被禁，随后于 2015 年在欧洲被禁。加拿大自 2017 年 1 月 1 日起，禁止在建筑用 XPS 和 EPS 泡沫中使用 HBCD。在美国，虽然国家环境保护署没有对 HBCD 的使用进行监管，但 EPS 和 XPS 泡沫保温材料行业分别于 2013 年和 2015 年自愿开始采用聚合物型阻燃剂。到 2017 年底，北美所有 EPS 和 XPS 生产商都不再使用 HBCD。在中国，自 2016 年 12 月 26 日起，除用于 EPS 和 XPS 建筑保温材料外，HBCD 的生产、使用和进出口均被禁止。用于 EPS 和 XPS 的 HBCD 有 5 年豁免期，将于 2021

年 12 月 25 日到期。自 2021 年 12 月 26 日起，中国将全面禁止 HBCD（联合国粮农组织，2016；联合国环境署，2016；联合国环境署，2019）。

4. BLUEDGE™（溴化 SBS）作为创新型阻燃剂用于 EPS 和 XPS 泡沫保温材料

4.1 技术开发

BLUEDGE™（溴化 SBS）聚合物型阻燃技术由陶氏环球技术公司开发，是该公司为替代 HBCD 而进行的多项探索的一部分。作为面向 EPS 和 XPS 保温材料市场的普适性替代方案，新技术必须满足聚苯乙烯泡沫应用对防火性能、物理特性及 EHS 特性的要求。该技术在 EP1957544B1、US785155B1 和 CN20069004226.1 等全球专利中均有涉及，这些专利同属于一个包含超过 22 项全球专利的专利族。本文凡提及 BLUEDGE™（溴化 SBS）的表述，均指该技术。目前，BLUEDGE™（溴化 SBS）技术为杜邦所有，同时朗盛化学、以色列化工和山东旭锐新材已获得杜邦的技术授权许可，成为 BLUEDGE™（溴化 SBS）聚合物型阻燃剂的生产商。

4.2 安全性

BLUEDGE™（溴化 SBS）聚合物型阻燃技术专为打造更安全的 HBCD 替代品而开发。根据持久性有机污染物审查委员会（POPRC）关于替代品的指导意见（联合国环境署，2007），“更安全的替代品”要么能够减轻对人类健康或环境的潜在危害，要么尚不符合《公约》附件 D 规定的筛选标准，该标准决定了某种化学品是否会被作为持久性有机污染物列入《公约》。在 2011 年之前，可能替代 HBCD 作为阻燃剂用于 XPS 和 EPS 生产的化学物质都不具备商业或技术可行性。

BLUEDGE™（溴化 SBS）聚合物型阻燃剂技术专为替代 HBCD 而开发。作为一种更加安全的创新型阻燃剂，BLUEDGE™（溴化 SBS）不仅能为 XPS 和 EPS 泡沫保温材料提供同等防火安全性能，还具有优异的 EHS 特性。

如图 2 所示，BLUEDGE™（溴化 SBS）聚合物型阻燃剂的化学名称为溴化苯乙烯-丁二烯共聚物（CAS 编号：1195978-93-8），是一种聚苯乙烯和溴化聚丁二烯的高

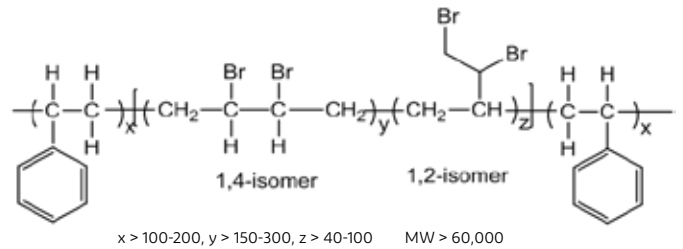


图 2: BLUEDGE™（溴化 SBS）聚合物型阻燃剂（CAS 编号：1195978-93-8）的化学结构。

分子量共聚物（MW > 60,000 g/mole，溴含量 64-66%；Moore，2013）。该产品不含低分子量成分，也不含活性基团。其阻燃特性满足欧盟阻燃标准：热稳定性优异，阻燃性能与 HBCD 相近。

BLUEDGE™（溴化 SBS）聚合物的 EHS 特性已经过充分研究，包括其在聚苯乙烯泡沫保温材料中的降解特性（Beach 等人，2013；美国环保署，2014；Davis 等人，2017；Beach 等人，2021）。BLUEDGE™（溴化 SBS）既不是持久性有机污染物（POP），也不是 PBT 化学品。由于分子较大且不含低分子量成分，BLUEDGE™（溴化 SBS）对动物和人类不具有生物累积性。用于聚苯乙烯保温材料的 BLUEDGE™（溴化 SBS）聚合物型阻燃剂在正常条件下具有出色的稳定性，不会在泡沫中分解或降解。

图 3 根据美国环保署对 HBCD 替代品的环境设计评估报告，将 BLUEDGE™（溴化 SBS）和 HBCD 的毒性进行对比（美国环保署，2014）。图中显示，BLUEDGE™（溴化 SBS）聚合物的毒性极低，HBCD 分子的毒性相对较高。因此，美国环保署认定 BLUEDGE™（溴化 SBS）较过去用于聚苯乙烯泡沫保温材料的 HBCD 阻燃剂有了显著的改进（美国环保署，2014）。

“从这种丁二烯-苯乙烯溴化共聚物的危害性来看，该化学品预计比 HBCD 更安全。由于其分子较大、不含低分子量成分和活性基团，测定或预测这种共聚物的人体健康与生态毒性危害较低。”

物质名称	CAS 编号	人体健康影响										水生毒性		环境影响			
		急性毒性	致癌性	遗传毒性	生殖毒性	发育毒性	神经毒性	重复剂量毒性	皮肤过敏	呼吸道致敏性 ¹	眼睛刺激性	皮肤刺激性	急性	慢性	持久性	生物累积性	
六溴环十二烷 (HBCD)	25637-99-4; 3194-55-6	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
BLUEDGE™ 技术 (溴化 SBS)	1195978-93-8	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
甲基八溴醚	97416-84-7	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
八溴醚	21850-44-2	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●

● 极低 ● 低 ● 中等 ● 高 ● 极高

¹目前呼吸道致敏性尚无标准测试方法或测试数据，因此这方面的危害性待定。

图 3: XPS 和 EPS 泡沫保温材料采用不同阻燃剂的危害对比。摘自美国环保署, 2014。可替代六溴环十二烷 (HBCD) 的阻燃剂。美国环保署环境设计评估最终报告 (2014 年 6 月 12 日): http://www.epa.gov/sites/production/files/2014-06/documents/hbcd_report.pdf

作为聚合物，BLUEDGE™ (溴化 SBS) 在自然环境中具有低溶解度和高稳定性，符合欧盟 REACH 法规中认定为“持久性”的评判标准。考虑到安装在建筑物中的聚苯乙烯泡沫保温产品的平均使用寿命预计为 50 至 75 年，BLUEDGE™ (溴化 SBS) 从设计角度讲具有出色的持久性，即 BLUEDGE™ (溴化 SBS) 聚合物在使用寿命内不会分解。

除了 BLUEDGE™ (溴化 SBS) 聚合物本身的危害性以外，作为其整体评估的一部分，BLUEDGE™ (溴化 SBS) 技术的降解性和全生命周期危害性也进行了评估。Beach 等人 (2013、2021) 研究了聚苯乙烯泡沫保温材料所使用的 BLUEDGE™ (溴化 SBS) 的降解情况，特别是与应用场景相关的紫外线降解和热降解情况。虽然在上述情况下降解可能会发生，但研究发现，当浓度足够高时，未观察到大量分解产物，无需进行进一步毒理学测试，因为人类和野生生物对任何分解产物的预期暴露量都非常低。例如，据热氧化降解模型预测，在 50°C 下降解 1% 的材料需要 100 年，在 20°C 下需要 1000 年 (Beach 等人, 2021)。

4.3 监管概况

从分类和标签的角度看，BLUEDGE™ (溴化 SBS) 聚合物本身毒性极低，因此被认为是一种非危险材料。例如，根据欧盟《物质和混合物分类、标签和包装法规》，BLUEDGE™ (溴化 SBS) 无需在其安全数据表中及产品包装上标注任何特定的危险标志或警示语。

中国工信部、科技部和生态环境部于 2016 年 12 月 26 日联合发布了关于《国家鼓励的有毒有害原料 (产品) 替代品目录 (2016 年版)》的通告，并建议采用丁二烯 - 苯乙烯溴化共聚物替代 HBCD (https://www.miit.gov.cn/zwgk/zcwj/wjfb/tg/art/2020/art_dc43629922e941628a7c065dad0214d6.html)。

4.4 职业暴露

BLUEDGE™ (溴化 SBS) 的使用方式与 HBCD 类似，因此其暴露情况也较为相似。不过，BLUEDGE™ (溴化 SBS) 是一种无毒、无致敏、非反应性物质，仅可能对眼睛和皮肤造成轻微刺激。因此，推行 BLUEDGE™ (溴化 SBS) 预计不会给安全实践带来任何重大改变，也无需为管理替代品的使用而调整基础设施和培训，因而这方面也不会产生过多成本。

4.5 安全特性和法规摘要

总而言之，BLUEDGE™ (溴化 SBS) 是一种创新型 HBCD 替代品，本身毒性极低 (综合性能见下页表 2)，已在美国、欧盟及其他八个国家作为安全的 HBCD 替代品得到批准和推行。BLUEDGE™ (溴化 SBS) 既不是 PBT 或 POP 物质，也未被欧盟 REACH 法规列为 SVHC 物质。凭借明显较低的危害特性，BLUEDGE™ (溴化 SBS) 成为了唯一被北欧白天鹅生态认证允许用于聚苯乙烯保温材料的阻燃剂，该标准通常不允许对溴化阻燃剂的使用进行认证。最重要的是，BLUEDGE™ (溴化 SBS) 技术不仅能使 EPS 和

HBCD 替代品的性能要求	BLUEDGE™ (溴化 SBS) 的性能特点
环境、健康和安全:	低毒性, 非 PBT 或 POP
阻燃性能:	满足全球各地对泡沫燃烧性能的规定 (欧盟、日本、美国、加拿大、韩国)
有效的泡沫特性:	保持 EPS 和 XPS 泡沫的物理特性
支持不同的生产工艺:	满足 XPS 的热稳定性要求和 EPS 的聚合稳定性要求
经济可行性:	成本可接受, 可实现商业化

表 2: BLUEDGE™ (溴化 SBS) 的性能概览

XPS 泡沫产品继续满足建筑和防火法规规定的防火性能要求, 以确保公共安全, 同时与现有的小分子阻燃剂 (如 HBCD) 相比, 其危害性得到了显著降低。

4.6 BLUEDGE™ (溴化 SBS) 与小分子替代品的安全特性对比

一些市场正在考虑采用甲基八溴醚等溴化小分子作为替代 HBCD 的阻燃剂, 该材料的化学名称为四溴双酚

A 双 (2,3- 二溴 -2- 甲基丙基) 醚 (CAS 编号: 97416-84-7)。甲基八溴醚的分子量较低, 不超过 1,000, 被认为是一种小分子阻燃剂。不过, 如图 3 所示, 甲基八溴醚和八溴醚具有类似的危害特性, 而针对 HBCD 的监管措施正是出于对这类特性的担忧。

例如, 如图 3 所示, 甲基八溴醚具有较高的生物累积潜力, 同时其潜在的烷基化特性使得该材料在致癌

国家固定灭火系统和耐火构件质量监督检验中心 检验报告			
No. Gz202006135		共 4 页 第 1 页	
产品名称	Neopor 保温板	型号规格	标称厚度 30mm
委托单位	巴斯夫 (中国) 有限公司	生产单位	巴斯夫 (中国) 有限公司
送检单位	巴斯夫 (中国) 有限公司	样品编号	202006135
抽样单位	空白	抽样基数	空白
抽样地点	空白	抽样日期	空白
样品数量	18 块 (1200mm×600mm)	抽样日期	2020-08-21
检验类别	型式检验	样品等级	GB8624B ₁ (B-s1, d0, t1)
检验日期	2020-11-17 至 2020-12-03		
检验依据	GB8624-2012		
判定依据	GB8624-2012		
检验结论	<p>经按 GB8624-2012《建筑材料及制品燃烧性能分级》检验, 燃烧性能达到 GB8624B₁(B-s1, d0, t1) 级。(以下空白)</p> <p style="text-align: right;">(检验专用章) 签发日期: 2020 年 12 月 4 日</p>		
备注	国家中心号“广”表示异地单		
批准:	审核:	编制:	

图 4: Neopor® 石墨聚苯板的中國 B1 燃烧性能测试报告。

国家防火建筑材料质量监督检验中心 检验报告			
报告编号: 2019100325		共 4 页 第 1 页	
产品名称	绝热用挤塑聚苯乙烯泡沫塑料板	型号规格	1200mm×600mm×40mm
委托单位	广州孚达保温隔热材料有限公司	商 标	孚达保温
生产单位	广州孚达保温隔热材料有限公司	检验类别	委托检验
送检单位	杜邦 (中国) 研发管理有限公司	抽样基数	/
抽样单位	自送样	抽样日期	/
抽样地点	/	到样日期	2019. 03. 07
检验地点	本中心	检验日期	2019. 03. 29~2019. 05. 05
样品数量	1200mm×600mm×40mm, 17块	样品编号	2019100325
检验依据	GB 8624-2012《建筑材料及制品燃烧性能分级》		
检验项目	燃烧性能B ₁ 级适用项目		
检验结论	<p>经检验, 该制品所检项目符合燃烧性能B₁(B-s2, d0, t1)级的规定要求。</p> <p>按GB 8624-2012判定, 该制品燃烧性能达到难燃B₁(B-s2, d0, t1)级。</p> <p>(以下空白)</p> <p style="text-align: right;">(检验专用章) 签发日期: 2019 年 5 月 5 日</p>		
备注	本报告仅对所承检项目负责。		
批准:	审核:	编制:	

图 5: FUDAXSeco 泡沫塑料板的中國 B1 燃烧性能测试报告。

性、诱变性、生殖毒性、发育毒性和重复剂量毒性方面被认定为中度危害性。此类物质在急性毒性、神经毒性、皮肤致敏性以及眼睛和皮肤刺激性方面被认定为低危害性。

由于具有危害性(图3),甲基八溴醚和八溴醚因其潜在的内分泌干扰和PBT/vPvB特性所引发的担忧于2017年被纳入欧盟REACH法规“欧共体滚动行动计划”(CoRAP)。相应的监管措施有望于2022-2023年出台。

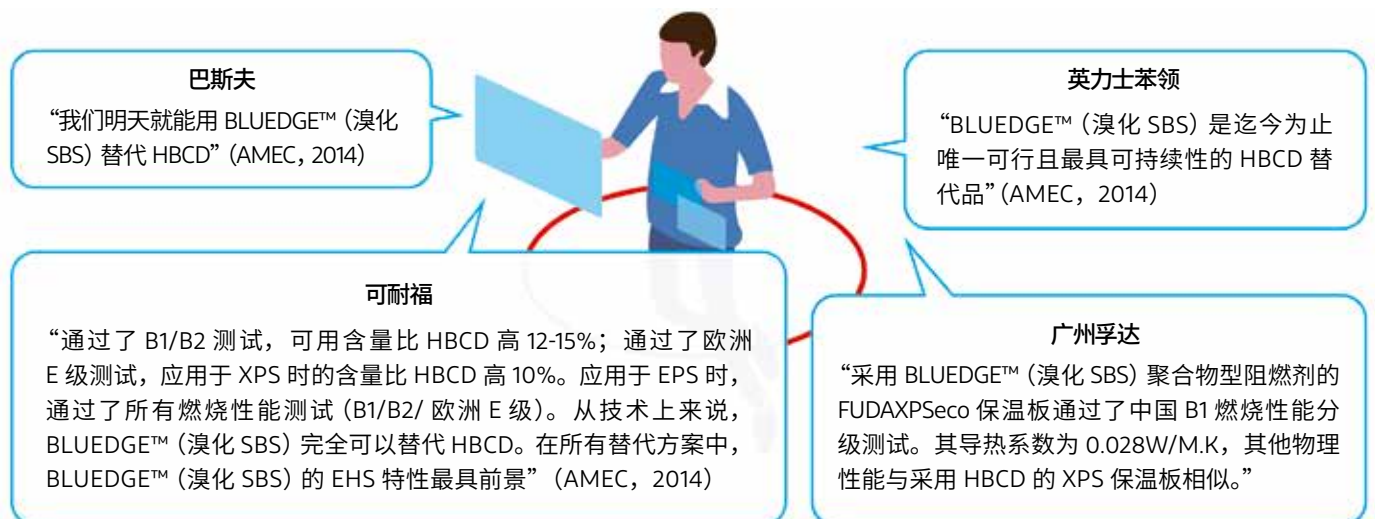
5. 性能验证和市场接受度

阻燃剂供应商已经将BLUEDGE™(溴化SBS)聚合物型阻燃技术实现了商业化,同时聚苯乙烯生产商已在其产品中对BLUEDGE™(溴化SBS)进行测试,以确保采用BLUEDGE™(溴化SBS)的聚苯乙烯符合所有性能标准。据报道,采用BLUEDGE™(溴化SBS)替代HBCD作为阻燃剂的聚苯乙烯泡沫保温材料,在溴当量相同的情况下,其阻燃效率与HBCD基本相当。BLUEDGE™(溴化SBS)聚合物型阻燃剂的溴含量比HBCD低,二者分别为约64-66%和74%。这意味着每单位EPS和XPS所需的BLUEDGE™(溴化SBS)要比HBCD多出15-17%左右。在上述浓度下,二者的技术性能相当。采用BLUEDGE™(溴化SBS)的产品已通过欧洲E级、德国B2以及中国B1(图4和图5)和B2燃烧性能测试。采用BLUEDGE™(溴化SBS)替代HBCD时,HBCD与BLUEDGE™(溴化SBS)的比例为

1:1.2。根据建筑应用所需的泡沫密度,XPS中需要添加1.7%的BLUEDGE™(溴化SBS),才能通过欧洲E级燃烧性能测试(Great Lakes公司配方),所需用量与聚苯乙烯泡沫中的HBCD相当(0.5-2.5 wt% HBCD)。此外,BLUEDGE™(溴化SBS)还具有出色的热稳定性,并且与聚苯乙烯相容。在较高温度下,BLUEDGE™(溴化SBS)需要与HBCD相似的加工条件才能稳定。

含有BLUEDGE™(溴化SBS)的产品(如STYROFOAM™品牌XPS保温材料)均已通过E级测试要求。这些产品有效维持了市场对泡沫保温材料性能的整体预期,包括其密度、抗压强度、抗折强度、防火性能、尺寸稳定性、吸水性以及零VOC排放特性。经认证,Styrofoam™品牌产品符合北美建筑规范,可用于屋面、地下、墙面、营房和冷库。

BLUEDGE™(溴化SBS)推出有一段时间了,数家公司已完成该产品的商业化。2013年,BLUEDGE™(溴化SBS)在欧洲的认证工作已大部分完成。业界发现,将BLUEDGE™(溴化SBS)用于XPS和EPS生产在技术可行性方面不存在根本性问题。该材料进行商业销售已有数年,如今被广泛视为一种常规的HBCD替代品。2019年,广州孚达保温隔热材料有限公司生产的FUDAXPSecco保温板采用了现已商业化的BLUEDGE™(溴化SBS)聚合物型阻燃剂。一些对BLUEDGE™(溴化SBS)进行了测试并成功用BLUEDGE™(溴化SBS)替代HBCD的公司给予了非常积极的反馈(如下图):



6. 采用 BLUEDGE™ (溴化 SBS) 的工艺要求

BLUEDGE™ (溴化 SBS) 聚合物对于 XPS 和 EPS 泡沫加工工艺来说都是理想的替代方案，整个泡沫行业在无需追加大量投资的情况下即可用 BLUEDGE™ (溴化 SBS) 取代 HBCD。如图 6 所示，BLUEDGE™ (溴化 SBS) 的主要优势之一在于其本身就是一种塑料。



纯聚合物型阻燃剂薄片 (正面)

纯聚合物型阻燃剂薄片 (侧面)

图 6: 摘自欧洲发泡聚苯乙烯制造商协会 (EUMEPS) 提供的聚合物型阻燃剂说明书

BLUEDGE™ (溴化 SBS) 在 XPS 和 EPS 生产中的使用方式与 HBCD 类似：对于希望在生产过程中采用 BLUEDGE™ (溴化 SBS) 聚合物型阻燃技术的 XPS 和 EPS 生产商来说，不需要进行大量资本性基础设施投资、培训或采取额外的健康与安全措施。HBCD 和 BLUEDGE™ (溴化 SBS) 均为“添加剂型”固体阻燃剂，在生产和混合过程中添加到聚苯乙烯产品中。技术变更的关键在于重新配制聚合物配方，不过主要下游用户表示，涉及 BLUEDGE™ (溴化 SBS) 的重新配制可以在较短时间内（不超过一年）完成。例如，为了将 BLUEDGE™ (溴化 SBS) 推向欧洲市场，生产商在 HBCD 受到管制之前就建立了下游市场渠道，积极与 EPS 和 XPS 生产商合作并为其提供样品，从而在 18 个月内完成了测试和验证。在中国，杜邦正与三家获得 BLUEDGE™ (溴化 SBS) 聚合物型阻燃技术授权许可的生产商（朗盛化学、以色列化工和山东旭锐新材）合作，向下游 EPS 和 XPS 合作伙伴提供样品，以期在 HBCD 被淘汰之前完成工艺和性能验证。

为确保替代材料符合相关要求，建筑材料必须保持其防火性能，而这离不开阻燃剂。作为阻燃剂，HBCD 在不同泡沫材料中需达到一定浓度才能满足欧洲 E 级

燃烧性能要求：在白色 EPS 中的浓度约为 0.7%，在灰色 EPS 中的浓度约为 1.1%，在 XPS 中的浓度约为 1.75%。BLUEDGE™ (溴化 SBS) 聚合物型阻燃剂的溴含量比 HBCD 低，二者分别为约 64-66% 和 74%。这意味着若要达到相同的防火性能，其含量要比 HBCD 高 15-17% 左右。新型阻燃剂的两个关键功能是：

- 1) 使 EPS/XPS 产品达到所需的耐火极限；
- 2) 不得改变产品的物理特性，特别是密度（影响成本）、机械强度和 λ 值（即导热系数）。

6.1 EPS 保温板生产

EPS 的批量生产工艺包含两个阶段：

- 1) 生产 EPS 珠粒：EPS 珠粒通过一种热加工工艺生产：苯乙烯单体、添加剂和阻燃剂在 65-145°C 的压力容器内在水溶液中混合。在密闭混合阶段，苯乙烯单体聚合形成聚苯乙烯，并将包括 BLUEDGE™ (溴化 SBS) 和戊烷在内的添加剂加入基体。然后，利用离心机从溶液中收集上述聚合物，经干燥得到硬质 EPS 珠粒。
- 2) 使 EPS 珠粒膨胀：用蒸汽加热 EPS 珠粒，使戊烷成分挥发并促使 EPS 珠粒膨胀，使其尺寸达到原来的 50 倍，从而得到具有高保温性能的轻质产品。然后，将膨胀后的 EPS 珠粒用蒸汽加热融化，以便通过成型工艺制成建筑保温板材。

BLUEDGE™ (溴化 SBS) 在 EPS 珠粒的生产过程中添加，使用方式与 HBCD 类似，因此只需新增少量的基础设施或设备购置。用 BLUEDGE™ (溴化 SBS) 替代 HBCD 的技术问题主要在于重新配制用于生产 EPS 的混合物：这一过程需要一定的研发工作，不仅要根据具体情况稍作调整，可能还需要进行有限的试验。调整后的配方还要在下游用户的设备上进行测试，而这又需要一定的技术支持。

6.2 XPS 保温板生产

XPS 的批量生产工艺：XPS 泡沫的原料包括高分子量聚苯乙烯树脂、着色剂和添加剂（如 BLUEDGE™ (溴化 SBS) 聚合物型阻燃剂），这些材料在挤出机中以高

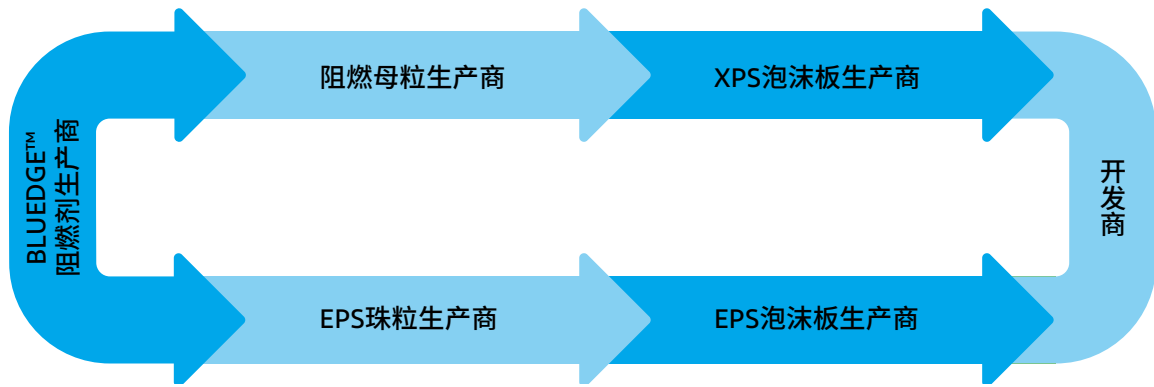


图 7: BLUEDGE™ (溴化 SBS) 聚合物型阻燃剂的价值链

于聚苯乙烯树脂软化点的温度加热，形成熔融混合物。接着，在混合物中加入发泡剂，使泡沫板在离开模具的模唇时膨胀。为了在较高的温度下进行加工，需要加入添加剂，以达到该工艺的稳定性要求。泡沫板可以通过改变加工温度 / 压力和发泡条件达到不同的密度和厚度，从而实现建筑应用所需要的各种物理性能。在生产过程中，泡沫板可以裁切出各种接口（如企口）。XPS 泡沫板通常用于要求厚度小于 4 英寸（10.16 厘米）的建筑保温系统，不过也可以采用技术手段将泡沫板热粘接在一起，用于厚度大于 4 英寸的保温系统。

7. BLUEDGE™ (溴化 SBS) 聚合物型阻燃剂及阻燃母粒的供应

7.1 BLUEDGE™ (溴化 SBS) 聚合物型阻燃剂供应商

目前，朗盛化学、以色列化工和山东旭锐新材^[*]已获得杜邦 BLUEDGE™ (溴化 SBS) 聚合物型阻燃技术的授权许可，成为 BLUEDGE™ (溴化 SBS) 聚合物型阻燃剂的生产商。朗盛化学和以色列化工成为 BLUEDGE™ (溴化 SBS) 聚合物型阻燃剂授权生产商已超过 10 年：朗盛化学以商标“Emerald Innovation™ 3000”销售 BLUEDGE™ (溴化 SBS)，以色列化工以商标“FR-122P”销售 BLUEDGE™ (溴化 SBS)。2019 年，

中国企业山东旭锐新材成为第三家 BLUEDGE™ (溴化 SBS) 技术授权合作伙伴。作为全球最大的 HBCD 供应商之一，山东旭锐新材目前正在建设生产线，将在 2021 年底以前以商标“SR-105”供应 BLUEDGE™ (溴化 SBS) 聚合物型阻燃剂。

7.2 BLUEDGE™ (溴化 SBS) 聚合物型阻燃母粒供应商

BLUEDGE™ (溴化 SBS) 聚合物型阻燃剂的价值链如图 7 所示。BLUEDGE™ (溴化 SBS) 聚合物型阻燃剂是在 EPS 珠粒的生产过程中或 XPS 挤塑板的挤出过程中添加的。在 EPS 生产工艺中，首先生成含有 BLUEDGE™ (溴化 SBS) 聚合物型阻燃剂的 EPS 珠粒，然后再发泡成 EPS 保温板。相比之下，在 XPS 生产工艺中采用 BLUEDGE™ (溴化 SBS) 则需要 BLUEDGE™ (溴化 SBS) 阻燃母粒，从而使阻燃剂在加工过程中具有热稳定性。与 HBCD 及其他阻燃剂一样，在 XPS 的加工温度下，如果缺乏热稳定性，BLUEDGE™ (溴化 SBS) 聚合物型阻燃剂会发生分解。为了能在高温下进行加工，需将稳定添加剂与 BLUEDGE™ (溴化 SBS) 一起加入到阻燃母粒中，然后将阻燃母粒直接用于 XPS 泡沫板的挤出加工。在中国，山东旭锐新材和广州孚达是杜邦授权的 BLUEDGE™ (溴化 SBS) 聚合物型阻燃母粒供应商。

8. 全球成功案例

8.1 国外成功案例

BLUEDGE™ (溴化 SBS) 已被众多 EPS 和 XPS 生产商作为有效的阻燃剂使用。多家公司已成功在多款产品中用 BLUEDGE™ (溴化 SBS) 替代 HBCD，这些产品被广泛用于保温材料。亚洲的商业案例包括：

东京国际机场（羽田机场）新航站楼停机坪（图 8）：建于人造陆地之上的羽田机场在客机停机坪下面使用 XPS 作为轻质填充物：



图 8：东京国际机场新航站楼停机坪

冲绳 Sanei Parco 购物中心（图 9）：冲绳最大的购物中心，同时也是那霸港浦添码头海岸度假规划中的一处商业设施：

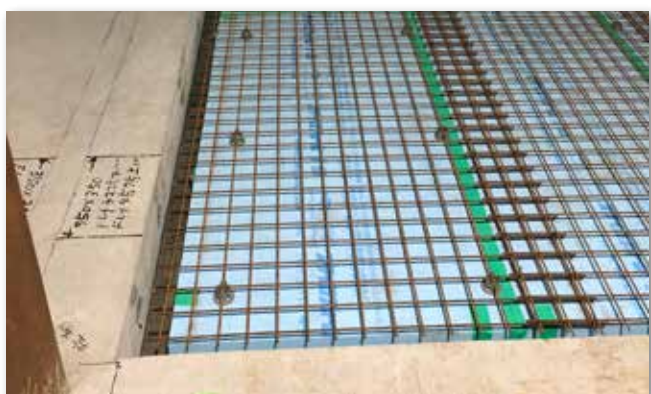


图 9：冲绳 Sanei Parco 购物中心

东京大田果蔬市场大楼 (图 10)：日本最大的市场，其仓储改造项目使用了 Styrofoam™:



图 10：东京大田果蔬市场大楼

此外，巴斯夫的聚苯乙烯保温材料组合还包括在欧洲和北美销售的 Neopor® 系列石墨聚苯板。Neopor® F 2300 保温板也已获得北欧白天鹅生态认证。北欧白天鹅生态认证在以下方面对建筑提出要求：能源使用、化学产品、建筑产品、一些与健康和环境相关的室内环境因素，以及施工过程中的质量管理。北欧白天鹅生态认证基于生命周期对建筑进行评估，并要求建筑产品、材料和化学产品满足高环保与健康要求，确保良好的室内环境和低排放。其他产品包括 Styropor® EPS 和 Styrodur® XPS。

8.2 中国成功案例

如今，中国的一些 EPS 和 XPS 生产商也将 BLUEDGE™ (溴化 SBS) 作为有效的 HBCD 替代品。广州孚达保温隔热材料有限公司 (广州孚达) 从 2019 年开始在其 FUDAXPSeco 保温产品中采用 BLUEDGE™ (溴化 SBS)，FUDAXPSeco 已成功应用于一个地暖工程和一个屋面保温工程。作为欧洲和韩国第一家用 BLUEDGE™ (溴化 SBS) 全面替代 HBCD 的生产商，如今巴斯夫又成为中国率先在 Neopor® 产品中全面使用 BLUEDGE™ (溴化 SBS) 的生产商。2015 年，巴斯夫开始在中国市场销售含 BLUEDGE™ (溴化 SBS) 的 Neopor®，由 Neopor® 珠粒发泡而成的 EPS 泡沫板作为墙体保温材料被广泛用于住宅楼。中国的商业案例包括：

万科重庆天地 2 期 (图 11)：万科集团开发，地暖项目采用 FUDAXPSeco 作为地面保温材料：



图 11：万科重庆天地 2 期

位于北京的中国建筑科学研究院未来建筑 (图 12)：屋面采用 FUDAXPSeco 作为保温材料：



图 12：中国建筑科学研究院未来建筑的屋面保温系统

京铁陈塘庄货场铁路职工定向安置经济适用房(图13):天津京铁房地产开发有限公司开发,采用 Neopor® 发泡保温板作为墙体保温材料:



图 13: 陈塘庄货场铁路职工定向安置经济适用房

石家庄远洋晟庭(图14):石家庄远乾房地产开发有限公司开发,采用 Neopor® 发泡保温板作为墙体保温材料:



图 14: 远洋晟庭住宅楼

高碑店龙湖·列车新城 (图 15): 龙湖集团开发的被动房社区, 采用 Neopor® 发泡保温板作为墙体保温材料:



图 15: 龙湖·列车新城

天津中新生态城被动式超低能耗公屋 (图 16): 中新天津生态城有限公司开发, 采用 Neopor® 发泡保温板作为墙体保温材料:



图 16: 中新生态城被动式超低能耗公屋

忠旺·上城 (图 17): 辽阳忠旺房地产开发有限公司, 采用 Neopor® 发泡保温板作为墙体保温材料:



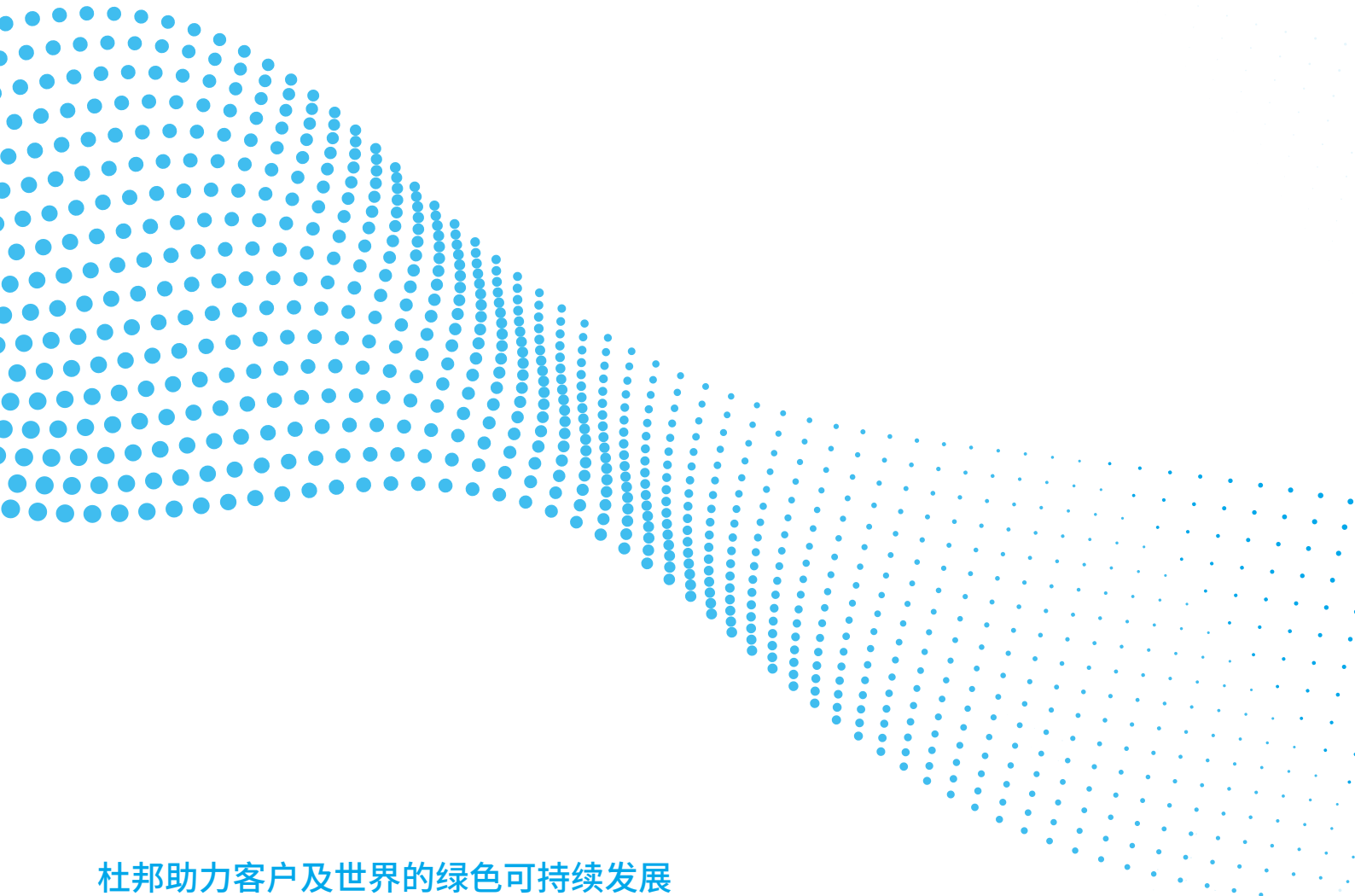
图 17: 忠旺·上城

9. 结语

杜邦公司的 BLUEDGE™ (溴化 SBS) 聚合物型阻燃剂是一种更加安全的创新型阻燃剂, 可替代 HBCD 用于聚苯乙烯泡沫保温材料。随着世界各地逐步淘汰 HBCD, BLUEDGE™ (溴化 SBS) 已在全球众多 XPS 和 EPS 生产商中成功推行。目前, BLUEDGE™ (溴化 SBS) 已在中国市场销售, 以帮助中国 XPS 和 EPS 生产商遵守 2021 年 12 月 26 日生效的 HBCD 禁令。BLUEDGE™ (溴化 SBS) 聚合物的 EHS 特性已经过充分研究, 并被证明是一种本身毒性极低的材料, 较 HBCD 有了显著的改进, 同时在毒性特征方面有别于甲基八溴醚和八溴醚等小分子阻燃解决方案。BLUEDGE™ (溴化 SBS) 已通过全球各地的多项防火性能测试, 说明 BLUEDGE™ (溴化 SBS) 技术能够提供聚苯乙烯泡沫保温板所需的防火安全性能。多年来, BLUEDGE™ (溴化 SBS) 阻燃解决方案帮助许多 XPS 和 EPS 生产商达到其产品的防火性能要求。如今, 杜邦携手朗盛化学、以色列化工和山东旭锐新材三家授权生产商, 共同为中国 XPS 和 EPS 市场提供这一创新技术。

10. 参考文献

- AMEC Environment & Infrastructure UK Limited (2014). Feasibility Study on substituting HBCD with polymeric flame retardant. Final report 20140703 for Chemtura Manufacturing UK Ltd.
- BASF (2019). Comparison of Brominated Flame Retardants used in Expanded Polystyrene (EPS).
- Beach, M., Beaudoin, D. A., Beulich, I., Bloom, C., Davis, J. W., Hollnagel, H. M., Jull, J. W., King, B., Kram, S., Lukas, C., Matteucci, M., Morgan, T., Stobby, B. (2013). New class of brominated polymeric flame retardants for use in polystyrene foams. *Cell. Polym. Vol. 32, No. 2294*.
- Beach, M.W., Hull, J.W., King, B.A., Beulich, I.I., Stobby, B.G., Kram, S.L., Gorman, D.B. (2017). Development of a new class of brominated polymeric flame retardants based on copolymers of styrene and polybutadiene. *Polym. Degrad. Stabil. 135, 99e110*.
- Beach, M.W., Kearns, K.L., Davis, J.W., Stutzman, J.R., Lee, D., Lai, Y., Monaenkova, D., Kram, S., Hu, J., Lukas, C. (2021). Stability assessment of a polymeric brominated flame retardant in polystyrene foams under application-relevant conditions. *Env. Sci. & Tech., 55 (5), 3050-3058*.
- Birnbaum, L.S., Staskal, D.F. (2004). Brominated flame retardants: cause for concern? *Environ. Health Perspect. 112, 9-17*.
- De Wit, C.A., Herzke, D., Vorkamp, K. (2010). Brominated flame retardants in the Arctic environment – trends and new candidates. *Sci. Total Environ. 408, 2885-2918*.
- Eljarrat, E., Feo, M.L., Barceló, D. Degradation of brominated flame retardants. (2011). In: Eljarrat, E., Barceló, D. (Eds.), *Brominated Flame Retardants. The Handbook of Environmental Chemistry*, 16. Springer-Verlag, Berlin, Heiderberg, 187-202.
- Ema, M., Fujii, S., Hirata-Koizumi, M., Matsumoto, M. (2008). Two-generation reproductive toxicity study of the flame retardant hexabromocyclododecane in rats. *Reprod. Toxicol. 25 (3), 335e351*.
- Environment Canada and Health Canada (2011). Screening Assessment Report on Hexabromocyclododecane. Chemical Abstracts Service. Registry Number 3194-55-6.
- Eriksson, P., Fischer, C., Wallin, M., Jakobsson, E., Fredriksson, A. Impaired behaviour, learning and memory, in adult mice neonatally exposed to hexabromocyclododecane (HBCDD). (2006). *Environ. Toxicol. Pharmacol. 21 (3), 317e322*.
- Food and Agricultural Organization of the United Nations (FAO). (2016). Announcement No. 84 of 2016 of the Ministry of Environmental Protection, the Ministry of Foreign Affairs, the National Development and Reform Commission, the General Administration of Customs, etc. on the entry into force of the Amendment to the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants to List HCBDD.
- Gorga, M., Martinez, E., Ginebreda, A., Eljarrat, E., Barcelo, D. (2013). Determination of PBDEs, HBB, PBEB, DBDPE, HBCD, TBBPA and related compounds in sewage sludge from Catalonia (Spain). *Sci. Total Environ. 444, 51-59*.
- Haneke, K.E. (2002a). Tetrabromobisphenol A [79-94-7]. Review of Toxicological Literature. National Institute of Environmental Health Sciences, Integrated Laboratory Systems, Inc., North Carolina.
- Hites, R.A. (2004). Polybrominated diphenyl ethers in the environment and in people: a meta-analysis of concentrations. *Environ. Sci. Technol. 38, 945-956*.
- Inoue, K., Harada, K., Takenaka, K., Uehara, S., Kono, M., Shimizu, T., Takasuga, T., Senthilkumar, K., Yamashita, F., Koizumi, A. (2006). Levels and concentration ratios of polychlorinated biphenyls and polybrominated diphenyl ethers in serum and breast milk in Japanese mothers. *Environ. Health Perspect. 114, 1179-1185*.
- Kefeni, K.K., Okonkwo, J.O., Olukunle, O.I., Botha, B.M. (2011). Brominated flame retardants: sources, distribution, exposure pathways, and toxicity. *Environ. Rev. 19, 238-253*.
- Lal, R., Pandey, G., Sharma, P., Kumari, K., Malhotra, S., Pandey, R., Raina, V., Kohler, H.P.E., Holliger, C.H., Jackson, C., Oakeshott, J.G. (2010). Biochemistry of microbial degradation of hexachlorocyclohexane and prospects for bioremediation. *Microbiol. Mol. Biol. Rev. 74, 58-80*.
- Mayer, P., Reichenberg, F. (2006). Can highly hydrophobic organic substances cause aquatic baseline toxicity and can they contribute to mixture toxicity? *Environ. Toxicol. Chem. 25, 2639-2644*.
- National Industrial Chemicals Notification and Assessment Scheme (NICNAS), 2011. Australian Department of Health and Aging: National Industrial Chemicals Notification and Assessment (2008). "Priority Existing Chemical Assessment Reports."
- Nyholm, J.R., Grabic, R., Arp, H.P.H., Moskeland, T., Andersson, P.L. (2013). Environmental occurrence of emerging and legacy brominated flame retardants near suspected sources in Norway. *Sci. Total Environ. 443, 307-314*.
- Remberger, M., Sternbeck, J., Palm, A., Kaj, L., Strömberg, K., Brorström-Lundén, E. (2004). The 464 environmental occurrence of hexabromocyclododecane in Sweden. *Chemosphere, 54(1), 9-21*.
- Shaw, S.D., Berger, M.L., Brenner, D., Lohmann, N., Pöpke, O., Kannan, K. (2009). Bioaccumulation of polybrominated diphenyl ethers and hexabromocyclododecane in the northwest Atlantic marine foodweb. *Sci. Total Environ. 407, 3323-3329*.
- Shaw, S.D., Kannan, K. Polybrominated diphenyl ethers in marine ecosystems of the American continents: foresight from current knowledge. (2009). *Rev. Environ. Health 24, 157-229*.
- Sjödin, A., Patterson, D.G., Bergman, A. (2003). A review on human exposure to brominated flame retardants – particularly polybrominated diphenyl ethers. *Environ. Int. 29, 829-839*.
- Swedish Chemicals Agency (2008). Risk Assessment on Hexabromocyclododecane: <https://echa.europa.eu/documents/10162/661bff17-dc0a-4475-9758-40bd6198f82>
- United Nations Environment Program (UNEP). (2007). Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants. Persistent Organic Pollutants Review Committee, Third meeting, Geneva, 19-23 November 2007, Item 7 of the provisional agenda, Presentation on environmental transport and modeling. The OECD screening tool for overall persistence and long-range transport potential. UNEP/POPS/POPRC.3/INF/7.
- United Nations Environment Program (UNEP). (2013). Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants. SC-6/13: Listing of hexabromocyclododecane. Reference: C.N.934. 2013. Treaties-XXVII.15 (Depositary Notification). (decision SC-6/13).
- United Nations Environment Program (UNEP). (2016). Amendments to Annexes to the Stockholm Convention. China ratified the Stockholm Convention on HBCD on 12/26/2016: <http://chm.pops.int/Countries/StatusofRatifications/AmendmentstoAnnexes/tabid/3486/Default.aspx>
- United Nations Environment Program (UNEP). (2019). Stockholm Convention: Register of Specific Exemptions: Hexabromocyclododecane: <http://chm.pops.int/Implementation/Exemptions/SpecificExemptions/HexabromocyclododecaneRoSE/tabid/5034/Default.aspx>
- United States Environmental Protection Agency (USEPA). (2014). EPA Publication 740R14001: Flame Retardant Alternatives For Hexabromocyclododecane (HBCD). https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-06/documents/hbcd_report.pdf
- Van der Ven, L.T.M., Verhoef, A., van de Kuil, T., Slob, W., Leonards, P.E.G., Visser, T.J., Hamers, T., Herlin, M., Hakansson, H., Olausson, H., Piersma, A.H., Vos, J.G. (2006). A 28-day oral dose toxicity study enhanced to detect endocrine effects of hexabromocyclododecane in Wistar rats. *Toxicol. Sci. 94(2), 281-292*.
- Viberg, H., Fredriksson, A., Eriksson, P. (2004). Neonatal exposure to the brominated flame-retardant, 2,2',4,4',5-pentabromodiphenyl ether, decreases cholinergic nicotinic receptors in hippocampus and affects spontaneous behavior in the adult mouse. *Environ. Toxicol. Pharmacol. 17, 61-65*.
- Vrkošlavová, J., Stiborová, H., Zemanová, T., Macková, M., Demnerová, K. (2011). Bacterial degradation of polybrominated diphenyl ethers. *Chem. Listy 105, 654-660*.
- "New Class of Brominated Polymeric Flame Retardants", BCC 22nd Annual Conference on Flame Retardancy of Polymeric Materials, Stamford, CT, May 2011, presented by Mark W. Beach.
- Zhou, T., Ross, D.G., DeVito, M.J., Crofton, K.M. (2001). Effects of short-term in vivo exposure to polybrominated diphenyl ethers on thyroid hormones and hepatic enzyme activities in weanling rats. *Toxicol. Sci. 61, 76-82*.
- "Strategic Approach Towards Developing More Environmentally Sustainable Flame Retardants", BFR 2011, 12th Workshop on Brominated and other Flame Retardants", Boston, MA, June, 2011, presented by John W. Davis.
- "New Class of Brominated Polymeric Flame Retardants", 13th European Meeting on Fire Retardant Polymers, Alessandria, Italy, June, 2011 presented by Bruce A. King.
- "New Class of Brominated Polymeric Flame Retardants", Fire Resistance in Plastics 2011, Cologne, Germany, December, 2011 presented by Inken Beulich.
- "Evaluation Of A More Environmentally Sustainable Flame Retardant For Polystyrene Foam 3rd International Conference On Flame Retardants" Shanghai, China, April 2012 poster presented by Christine Lukas.



杜邦助力客户及世界的绿色可持续发展

杜邦公司（纽交所代码：DD）提供以科技为基础的材料、原料和解决方案，致力于成为全球创新推动者之一，为各行各业和人们的日常生活带来革新。我们的员工运用多样化的科学技术和专业经验，协助客户推进他们的创意，在电子、交通、建筑、水处理、健康保健和工作防护等关键市场提供必要的创新。如需了解更多有关杜邦公司及其业务和解决方案的信息，请浏览：www.dupont.com。

该信息基于杜邦公司认为可靠的技术数据，随着知识和经验的累积，杜邦会不定时更新相应信息，这些信息可供具有相关技能的人员在其终端使用条件下进行评价，并由其自行决定并承担相关风险。由于使用条件不在我们的控制范围内，杜邦公司不作任何明示或暗示的保证——包括但不限于对适销性或特定用途的适用性的保证，也不承担任何与此信息的使用相关的责任。本文中所包含的任何信息均不得被视为对杜邦任何商标、技术信息和任何专利的使用许可或侵犯的建议。

©2021 杜邦公司版权所有，保留一切权利。杜邦™、杜邦椭圆形标志以及所有标注有™、SM 或 © 的商标和服务标识均为杜邦公司的关联公司所有（除非另外注明）。