

紧密贴合内衬修复用聚乙烯管道加工应用中应注意的问题

铁文安¹ 沈 华² 周春联³ 李艳芳¹

(1. 陕西华山胜邦塑胶有限公司, 西安 710043; 2. 山东胜利股份有限公司, 济南 250011; 3. 陕西省产品质量监督检验所, 西安 710054)

摘要 聚乙烯(PE)管道内衬修复技术在工业、市政燃气和供水管道领域已经大量应用,修复后的管道是由旧管道和内衬PE管复合而成,内衬PE管道的选材、加工控制、管道的壁厚、等级、主管道漏点大小、介质温度等因素都对修复及修复后管线的运行产生很大影响。根据国内外的最新资料和应用经验对此进行了探讨,并提出一些建设性意见。

关键词 聚乙烯 管道 内衬 修复 紧密贴合

紧密贴合聚乙烯(PE)管道内衬技术又称改进内衬法^[1-2],其原理是将PE管道经过变形(轴向变形或径向变形)使其截面积减小后穿入旧管道,由于PE材料具有较强的“记忆”性能,当外力释放后,采用压力或压力蒸汽将PE管道紧密地贴在旧管道的内壁。根据PE内衬管道的变形方式基本可以分为拉拔缩径内衬法、滚缩缩径内衬法和U形管内衬法三种。拉拔缩径内衬法最早由英国煤气公司发明,其实现缩径的方法是将PE管道拉过金属制模头,见图1a。在实际的操作时可在冷拉前进行预热处理,也可以使用加热模具,适用的管径通常为75~900 mm。U形内衬法来源于法国,实现缩径的办法是在穿插前使用专用的设备将PE管径向压缩成U形,并使用捆扎带绑好,穿插后使用压缩空气或压力蒸汽回复,通常适用的管径为75~1500 mm,见图1b。滚缩缩径内衬法是将PE管道拉过滚缩缩径机

实现直径的减小,通常适用的管径为110~800 mm,见图1c。

在国外,PE紧密贴合内衬技术已有近20年的历史,有几千公里的应用经验。在我国虽然才刚刚起步,但发展速度非常快,已经有近百公里的应用。国内主要使用的技术是滚缩缩径内衬法和U形管内衬法,拉拔缩径内衬法由于需要解决预热技术,目前国内很少使用。

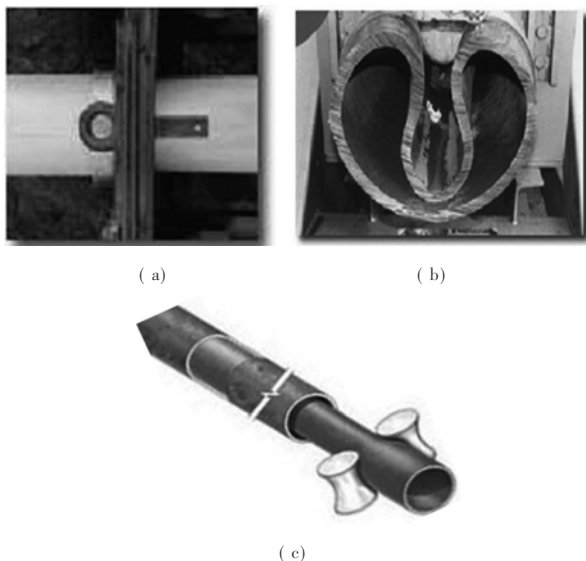
这三种内衬技术所使用的装备、施工工艺和方法基本相同,许多文献、资料已经述及^[3-5]。笔者重点就影响复合管道使用寿命的几个主要因素进行讨论,包括内衬PE管道材料的选择、加工控制、使用温度、主管道漏点大小等,以期相关的企业在设计和施工时有所参考。

1 PE内衬管的选择

紧密贴合PE管道内衬修复技术中对PE材料的要求比较高,PE管的壁厚、等级、耐慢速裂纹增长(SCG)等性能均会对修复后管线的安全运行产生较大影响。

1.1 内衬PE原料的等级

商业化的PE管材级原料经历了三代产品,目前常用的等级是PE63、PE80和PE100。厂家通过调整共聚单体的含量和种类及相对分子质量分布,不但提高了硬度、屈服强度等短期性能指标,而且提高了长期静液压强度(LTHS)、SCG、耐快速应力开裂(RCP)等长期性能指标。随着原料等级的提高,PE内衬管材的安全性得到了更大的保障,目前欧洲市场上的PE内衬管材主要是由PE80级和PE100级专用料加工而成的,其指标必须达到燃气管或水管标准对原料的要求,美国PE内衬管所用原料也



a—拉拔缩径; b—U形管; c—滚缩缩径

图1 三种缩径技术

要求达到 PE2406 和 PE3408 的要求。

但随着油田用 PE 内衬管的大量应用, 一些厂家也开发出更加适合的 PE 内衬管用料, 据资料所述, Solvay Polyolefins Europe 公司开发出一种预交联 PE 原料(TUX100), 在使用过程中通入高温水产生交联, 该原料耐温和耐溶胀性能均比普通 PE 有较大提高, 使用这种原料生产的内衬管在欧洲已经用于油田行业, 另外, 北欧化工公司也在进行类似原料的研发工作。

根据国内市场的情况, 建议生产内衬用 PE 管时至少要使用等级为 PE80 的管道级原料, 其性能指标要符合标准 GB/T13663 - 2000^[6] 或 GB15558.1 - 2003^[7] 的规定。

1.2 内衬 PE 管壁厚选择

内衬 PE 管材壁厚的选择必须考虑三个因素: ①主管道的损坏情况; ②管道的日常维护成本; ③ PE 管道焊接的允许错边量。复合管道在以后的使用过程中面临着接分支、抢修等问题, 使用厚壁的 PE 内衬管, 这一问题较好解决, 而采用薄壁 PE 内衬管较难解决这一问题。PE 管道的壁厚偏差较大, 决定了 PE 管必须保证一定的厚度才能保证不超过 10% 的错边量, 也就是保证焊接后管材的安全性。因此, 内衬 PE 管壁厚的选择必须在这三者之间寻求一个最佳的平衡点。

根据欧美等发达国家的经验, 内衬用 PE 管的壁厚与标准系列应完全一致, 首先要对旧管道的损坏状况进行评估, 并对其新功能进行定位, 然后再选择适合壁厚的内衬 PE 管。对于三种内衬穿插技术而言, 拉拔缩径和滚缩缩径内衬技术均可以使用壁厚范围较宽的 PE 管材, 管材的标准尺寸比(SDR) 值在 SDR11 ~ SDR42 之间。据资料[8] 记载, 美洲某国对防腐内衬 PE 管最小壁厚规定见表 1。而 U 形管内衬法仅适合于壁薄的管材, 通常 SDR 值大于 21。

表 1 防腐内衬 PE 管最小壁厚 mm									
钢管外径	114	159	219	273	325	377	426	529	636
内衬 PE 管壁厚	4	5	6	7	8	8.5	9.6	12.5	14.0

由于管道修复理念的不同, 国内管道修复企业为追求最低的成本, 通常选择的内衬 PE 管较薄, 这为日后管道的维护增加了很大的难度。因此, 管道修复企业必须与业主就管道日后的功能予以明确后再选择适合厚度的 PE 内衬管。

1.3 内衬 PE 管材的耐刮伤性能

PE 内衬管由牵引机(卷扬机) 穿入主管道的过程通常会划伤外表面, 因此, 正式内衬穿插前要对旧管道进行探测和物理清洗, 除去锈层和焊瘤等尖锐和突出部分, 然后使用 PE 管段进行试穿插, 通过观察试验管段的划伤程度来判定主管道的清洗效果。对于标准系列的 PE 管而言, 一般以划痕深度不超过管材壁厚的 10% 为判定依据, 若超过 10% 就需要对主管道进行重复清洗至合格为止。

穿插过程中, 如果划痕深度超过壁厚的 10%, 将影响管材的长期使用性能, 因为这些划痕作为应力集中点, 在长期的运行过程中会导致 PE 管材发生慢速裂纹增长, 导致管材破坏。

1.4 内衬 PE 管外径的选择

采用拉拔缩径内衬法和滚缩缩径内衬法可以将 PE 管的直径缩小 10% 以上, 其使用的内衬 PE 管的外径可以大于主管道的内径, 也称之为过盈配合, 这种方法更适用于油田等输送介质的温度和压力相对较高的场合。U 形管内衬法使用的 PE 管的外径通常为主管道内径的 98% ~ 99%, 更适用于温度相对稳定、压力不高的场合。

2 PE 内衬管的加工

符合标准规格系列的 PE 内衬修复管道, 根据用途不同, 按照 GB/T 13663 - 2000^[6] 或 GB 15558.1 - 2003^[7] 等标准加工。为了节约修复工程费用, 修复时往往选用薄壁的 PE 管材, 国内内衬修复用 PE 管材常用外径及壁厚见表 2。

表 2 内衬修复用 PE 管材平均外径和壁厚的范围 mm			
公称外径范围	壁厚范围	公称外径范围	壁厚范围
75 ~90	2.4 ~4.0	428 ~445	6.0 ~13.5
98 ~114	2.5 ~4.0	446 ~469	6.5 ~15.0
125 ~130	2.8 ~4.2	470 ~490	6.5 ~15.0
140 ~154	3.0 ~4.7	495 ~525	6.5 ~15.0
160 ~172	3.0 ~5.0	530 ~555	7.0 ~15.5
173 ~199	3.2 ~5.5	560 ~580	7.5 ~16.0
200 ~214	3.5 ~7.5	590 ~615	8.0 ~17.0
215 ~240	3.9 ~7.8	625 ~660	9.0 ~18.0
241 ~300	4.5 ~9.5	675 ~700	11.0 ~19.0
306 ~354	5.0 ~10.5	710 ~740	11.0 ~19.0
355 ~375	5.0 ~10.5	785 ~810	12.0 ~20.0
400 ~420	6.0 ~12.0		

内衬修复用 PE 管材因其特殊的工程使用要求, 对原材料及加工过程工艺质量控制要求更高, 加工中应注意以下问题:

(1) 选用具有更强记忆、特殊配方的改性 PE 原料, 原料性能必须均匀一致。管材生产厂家自己设

计原料配方时,应保证原料混配(或搅拌)均匀。

(2) 生产薄壁管材时应严格控制各级冷却水温度及真空度,保证管材外径及内在质量均匀稳定。

(3) 注重口模调整,利用重力计量、壁厚在线检测等质量控制手段,将管材壁厚差降至最小,过大的管材壁厚差将导致牵引修复中的失败。

(4) 加工过程中应仔细调整牵引机背压到合适的值,防止管材被压扁。

3 主管道损坏程度的影响^[9]

对于管道修复而言,主要靠原主管道的强度来承受工作压力,主管道损坏情况对 PE 内衬管壁厚和等级的选择影响重大。通常管道的腐蚀情况大致分为三种:①管道变形;②管道个别部位有穿孔,漏失严重;③主管道大面积被腐蚀,壁厚减薄至承压作用丧失。如果新管道的运行压力小于内衬 PE 管本身的设计压力时,PE 管材本体的强度完全可以抵御内压力,可以不考虑主管道漏点的影响。当 PE 管的工作压力较高时,如果主管道上仅有相对较小的间隙和孔洞,不足以使 PE 管材产生屈服,可以不考虑这些漏点的影响;如果主管道漏点尺寸比较大,对 PE 管道长期使用性能的影响将是不容忽视的,通常认为 PE 管道在此处将会发生韧性破坏,一般需要在施工前对管道进行堵漏处理。

山东胜邦柯林瑞尔管道工程有限公司在中国石油大学(华东)高压水射流实验室进行了 DN527 旧钢管内衬 PE 管(516 mm ×10 mm)和 DN273 旧钢管内衬 PE 管(257 mm ×6 mm)的短期静液压强度对比实验,腐蚀孔的尺寸见表 3。

表 3 钢管腐蚀孔的尺寸

孔形状与面积	孔尺寸/mm
长方形	80 ×35,100 ×30
椭圆形	35 ×30,55 ×20,55 ×50,130 ×40,100 ×30, 100 ×40,30 ×30
孔面积/cm ²	最大为 60.75,最小为 5.1

实验结果表明,衬入 PE 管后,模拟腐蚀钢管开孔处在常温、7 MPa 的内压下 24 h 没有任何变化,而未衬 PE 管的螺旋钢管在 5 MPa 内压下焊缝裂开,见图 2 和图 3。从图 2 和图 3 看出,7 MPa 下,衬 PE 管的模拟腐蚀穿孔旧钢管保持完好,而 5 MPa 下,未衬 PE 管的同一旧钢管从裂缝处开裂。但在长期使用过程中,长期内压作用下,或者在升高温度情况下,主管道多大的漏点会对 PE 内衬管的长期使用性能产生影响,还需要进行进一步的实验研究。

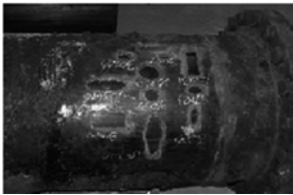


图 2 7 MPa 下内衬 PE 管的模拟腐蚀穿孔旧钢管

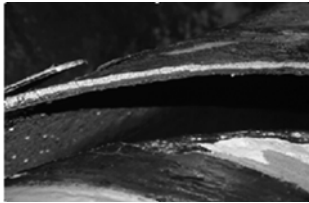


图 3 5 MPa 下未衬 PE 管的同一旧钢管

4 气体渗透

4.1 气体渗透导致的问题

油气管材的腐蚀是长期以来制约油、气田发展的一个重大问题。这种腐蚀主要是由于原油、天然气中的伴生水及油田注水中含有的腐蚀介质,如 Cl⁻、CO₂和 H₂S 等引起的。在油田开发后期,油田转入高含水期开采阶段,伴生水大量增多,钢管腐蚀日趋严重。尤其是在腐蚀性油、气田,这一现象更为严重,严重地影响了油田的正常生产。为解决这一问题,国外的一些石油相关企业研究了很多方法,如内衬 PE 管道是其中最重要的一种。对油、气田而言,这种方法的成本低廉,又能对 H₂S 和 CO₂起到非常好的防腐作用,在低温油气输送领域已经广泛应用,但在高温时出现了局部或沿轴向的塌陷现象。不论国外、国内内衬 PE 管在油田的应用实例中均出现过类似现象。

4.2 塌陷现象的原因

对于紧密贴合内衬 PE 管而言,衬管与主管道之间存在很薄的环形间隙,一些渗透性气体,如低分子的溶剂或石油产品会透过内衬 PE 管道进入环形间隙内,经过长时间的压力平衡,间隙内积聚的气体压力与管道内介质的压力相同,当管线进行检修而突然降压时,会导致管道内形成负压状态,管道间隙内的气体体积瞬间膨胀,导致局部内衬管出现塌陷现象。尤其是当输送介质温度较高时,更加加剧这一进程。

内衬 PE 管发生塌陷变形时的外部临界压力(P_{cr})可以用式(1)评估^[10]。

$$P_{cr} = \frac{E}{(1 - \nu^2)} \left(\frac{t}{d} \right)^{2.2} \quad (1)$$

式中:E——PE 的拉伸弹性模量;

v ——PE 的泊松比;
 t ——PE 内衬管的壁厚;
 d ——PE 内衬管的平均直径。

对 60℃ 的 PE80, 可取 $E = 233\text{ MPa}$, $v = 0.45$ 。
对 $d = 225\text{ mm}$, $t = 7.5\text{ mm}$ 的 PE 内衬管, $P_{cr} = 0.16\text{ MPa}$ 。当管内流体压力为 20 MPa 时, 平衡状态下的环形间隙处的压力也是 20 MPa。突然降压检修时, 环形间隙处的压力远远超过 P_{cr} 值, 肯定会引起 PE 内衬管塌陷。环形间隙处的压力是引起内衬管失效的主要原因, 但不是唯一原因。

4.3 解决塌陷可行的办法

为解决“塌陷”这一问题, 首先考虑如何将环形间隙处的压力排空。在陆地工作条件下, 人们通常在复合管的钢管主管管壁上的一定规则距离处钻一些小孔以释放环形间隙处的压力。在其它特殊环境的内衬 PE 管道修复技术中可以引用这一原理, 但其实施技术尚待进一步开发。

为了寻求一种更合适的内衬管, 从 1997 年起, Atofina、BP Exploration、BG Group、Europipe、Glynwed Pipe System、Shell、Subterra 等 17 家企业联合成立了 COREL 项目组, 对塑料内衬管项目进行了深入研究。该项目使用打孔内衬管和轴向沟槽内衬管进行高温和高压下的模拟实验, 最高温度和压力分别可达 80℃ 和 1.1 MPa。目前实验已经完成第三阶段, 取得了可喜的成果。该项目可能为探讨 PE 管道在油田管道修复领域的进一步应用打下良好的基础。

5 使用温度

国家水管标准 GB/T 13663 - 2000^[6] 和国际水管标准 ISO 4427 - 1996^[11] 中规定 PE 管材的使用温度上限为 40℃; 燃气管标准 GB15558. 1 - 2003^[7] 与国际燃气管标准 ISO4437 - 1997^[12] 中亦有此规定, 通常的使用温度为 20℃, 温度升高和降低都要进行压力折减, 国际标准体系大都考虑使用寿命为 50 a。美国的生产厂家多在使用手册中提供了 PE 管道在不同温度、不同使用年限和不同 SDR 值情况下的内压取值, 通常压力管道的使用温度不超过 60℃, 如果为非压力管道, 使用温度可以达到 82℃。

从应用方面考虑, 使用内衬 PE 管的主要目的是为了防腐, 而不是为了承受内压, 设计寿命有时根本达不到 50 a, 根据国家标准和国际标准进行选择具有一定的不合理性。

5.1 理论基础

根据时温等效原理, 可以通过提高温度来加速

PE 管道的老化, 通过研究蠕变曲线来研究 PE 管的使用寿命。该实验是根据 ISO 9080 - 2003^[13] 的要求来进行的, 测试温度通常为 80℃, 试验的环境一般为水/水环境。长期测试的结果表明, 典型的管材蠕变曲线分为三个阶段, 见图 4。

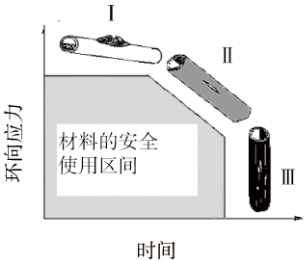


图 4 典型的塑料管道应力破坏曲线

平滑段(I)表明了管材的韧性破坏, 它相当于管材的屈服强度, 此时 PE 发生了屈服, 但还没有破坏; 出现拐点以后, 管材的破坏形式进入了陡峭段(II), 发生了破坏, 这一段主要是由管材的耐慢速开裂性能决定, 可以认为是脆性破坏强度, 主要受环境和温度的影响, 决定了管材的使用寿命; 曲线的第三段(III)也是脆性破坏, 主要原因是 PE 管材的热氧化降解, 即老化。

因此, 对于 PE 压力管道而言, 对不同使用条件下的第二段产生的时间进行研究便成为探求使用寿命的根本, 而对于内衬管而言, 由于其非承压的特点, 第二段产生的时间显然不是我们探求的根本。

5.2 实验

瑞典 Studsvik AB 公司的技术人员依据此理论进行了扩展实验, 实验原料为: HDPE, GM5010(赫斯特生产); MDPE, DGDS - 0909(Neste Polyeten AB 生产), 实验的温度为 20 ~105℃, 实验的时间跨度近 10 a(83000 h), 实验的介质为水/水和水/气两种, 实验结果见表 4。

表 4 不同温度下的使用寿命

温度 /℃	实验条件(设计应力 $\sigma = 5.0\text{ MPa}$)	
	水/水环境	水/气环境
	时间 /a	时间 /a
95	1.1	0.6
80	3.3	1.9
70	5.5	5.0
60	9.0	
50 ¹⁾	35	
47 ¹⁾	50	
40 ¹⁾	105	

注: 1) 数据为理论推导数据。

表 4 表明, 在使用温度超过 70℃ 以上时, 必须考虑水/水环境和水/气环境对使用寿命的影响, 使

用温度在 70℃ 以下,可以不考虑内、外部环境的影响。如果管线的设计使用寿命低于 50 a,可以按照表 4 所示的温度考虑使用寿命。

根据国外学者所进行的理论研究和应用经验,建议内衬 PE 管的使用温度小于 60℃,在无渗透性气体的情况下,使用压力不超过 1.5 MPa。

6 内衬修复过程中最大拖拉力的确定

通常,在穿插过程中,为确保 PE 管道不被拉断,最大拖拉力不应超过材料屈服强度的 1/2。在 JD 001 - 2004^[14] 技术导则中规定,PE 管道最大拖拉力不得大于由式(2)计算出的值。

$$F = \frac{14 \pi D N^2}{3 SDR} \quad (2)$$

式中: F ——最大允许拖拉力, N;

DN ——管道公称外径, mm;

SDR ——标准尺寸比,即管材公称外径比公称壁厚。

该规定与 ISO/TS 10839 - 2000^[15] 一致,其计算出的拖拉力数值更加安全。

7 结语

以上对紧密贴合内衬修复用 PE 管道加工应用中应注意的管道材料的选择、加工控制、使用温度、主管道漏点大小的影响、最大拖拉力等问题进行了广泛的阐述,以期相关的企业在设计和施工时能够有所参考。紧密贴合 PE 管道内衬修复技术在我国已大量应用,具有很好的前景和明显的经济、社会效益。但该技术仍有许多理论上和工程技术上的难题

有待进一步探讨。

参考文献

- [1] 孙逊. 聚烯烃管道[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007: 563, 57.
- [2] 叶建良, 蒋国盛. 非开挖铺设地下管线施工技术与实践[M]. 北京: 中国地质大学出版社, 2000: 100.
- [3] 解海林, 徐效华. 穿插衬装高密度 PE 管在线修复旧管道技术[J]. 腐蚀与防护, 2002(4): 16 - 19.
- [4] 周长山, 张宝华. 异径 HDPE 管穿插法修复在线旧管道[J]. 岩土钻凿工程, 2001(5): 174 - 175.
- [5] 美国塑料管道工业协会(PPI). 用衬入聚乙烯管修复管线[C]. 2002 年水管标准研讨会论文集. 2002: 248.
- [6] GB/T 13663 - 2000 给水用聚乙烯(PE)管材[S]. 2000.
- [7] GB 15558.1 - 2003 燃气用埋地聚乙烯(PE)管道系统 第 1 部分: 管材[S]. 2003.
- [8] 中国城市燃气协会. 城镇燃气聚乙烯(PE)输配系统[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006: 250.
- [9] 林永志. HDPE 内实修复生产关系承压能力分析 & 计算[C]. 全国聚乙烯管道生产与工程应用技术研讨会, 2003: 146.
- [10] 董孝理. 塑料压力管的力学破坏和对策[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [11] ISO 4427 - 1996 Polyethylene(PE) pipes for water supply-Specifications[S]. 1996.
- [12] ISO 4437 - 1997 Buried Polyethylene(PE) pipes for the supply of gaseous fuels-Metric series-Specifications[S]. 1997.
- [13] ISO 9080 - 2003 Plastics piping and ducting systems-Determination of the long-term hydrostatic strength of thermoplastics materials in pipe form by extrapolation[S]. 2003.
- [14] 山东省建设厅. JD - 001 - 2004 给水用聚乙烯(PE)管道工程建设技术导则[S]. 2004.
- [15] ISO/TS 10839-2000 Polyethylene pipes and fittings for the supply of gaseous fuels-code of practice for design, handling and installation[S]. 2000.

SOME QUESTIONS MUST BE NOTICED WHEN USING PE LINING PIPE TO RELINE OLD PIPE

Tie Wenan¹, Shen Hua², Zhou Chunlian³, Li Yangfang¹

(1. Shanxi Huashan Shengbang Plastics Co. Ltd., Xi'an 710043, China; 2. Shandong Shengli Co. Ltd., Jinan 250011, China;

3. Shanxi Province Institute of Product Quality Supervision and Inspection, Xi'an 710054, China)

ABSTRACT PE lining pipe was used largely in industry field, municipal gas and water distribution. As the relined pipe was composed by old pipe and PE lining pipe, the choice of PE material, the control of production process, the thick and grade of PE lining pipe, the perforation size of old pipe, and the temperature of conveyance medium affected the performance of new pipe. These questions were discussed based on recent data and application experience at home and abroad, and several personal viewpoints and advices were put forward.

KEYWORDS polyethylene, pipe, lining, relining

美国推出可使 PE 耐热性提高 20℃ 的阻燃剂

美国 Ampacer 公司推出的用于高、低密度 PE 的阻燃母粒 AmpShield 1199, 与传统溴化阻燃剂比较, 新型阻燃剂可使 PE 树脂的耐热性提高 20℃。其主要应用领域: 电线电缆和结构型薄膜。

据称新型阻燃剂对 PE 树脂的拉伸强度和断裂伸长率影响不大, 具有相对低的表面迁移, 对印刷、封合及二次加工影响较小。PE 树脂挤出加工温度可达 287℃, 用量可达 18% ~ 20%。阻燃级别可达到 UL V - 2 级。

(中国工程塑料网)