



熱塑性高分子交聯工藝

熱塑性高分子交聯工藝 (Crosslinking of Thermoplastics)

是指利用化學或物理方法，使原本呈線性或支鏈狀結構的熱塑性塑料分子鏈互相鍵結，轉變為三維網狀結構的改性技術。此工藝能顯著提升材料的耐熱性、機械強度、耐化學溶劑性與抗蠕變能力，使其具備類似熱固性塑料的優異性能，同時在特定工藝下仍能保留部分加工彈性。

核心交聯工藝分類

根據引發反應的機制不同，主流的熱塑性高分子交聯工藝主要分為以下三類：

1. 化學交聯 (Chemical Crosslinking)

利用化學交聯劑在一定溫度下分解產生自由基，引發高分子鏈之間的共價鍵結。

- **過氧化物交聯 (Peroxide Crosslinking)：**
 - **原理：**加入有機過氧化物（如 DCP），在加熱加工時分解出自由基，奪取高分子主鏈上的氫原子，使大分子自由基相互結合完成交聯。
 - **應用：**最常用於聚乙烯（交聯聚乙烯 PE-Xa 管材）及各類橡膠。
- **矽烷交聯 (Silane Crosslinking)：**
 - **原理：**將有機矽烷（如不飽和矽烷接枝到聚乙烯主鏈上），成型後在水份和催化劑（如有機錫）的作用下，通過水解縮合反應形成矽氧烷鍵（Si-O-Si）的網狀結構。
 - **優點：**可在溫水或室溫潮濕環境下緩慢完成，設備投資較低（交聯聚乙烯 PE-XB）。

2. 輻射交聯 (Radiation Crosslinking)

利用高能量射線直接照射高分子材料，使分子鏈產生自由基並發生交聯，屬於物理交聯法。 [1]

- **電子束交聯 (Beta Radiation / Electron Beam)：**
 - **原理：**利用電子加速器產生的高能電子束轟擊材料，使高分子鏈斷鍵產生自由基，隨後再結合形成交聯結構。
 - **優點：**反應在常溫下進行、速度極快（幾秒內完成）、不需添加化學引發劑，材料純度高且環保。
- **伽馬射線交聯 (Gamma Radiation)：**
 - **原理：**利用 Cobalt-60 等放射性同位素產生的 γ 射線進行深層穿透照射。
 - **應用：**常用於醫療器材（如超高分子量聚乙烯 UHMWPE 關節假體）與電線電纜（PE-Xc）。

3. 動態交聯 (Dynamic Vulcanization)

在熱塑性塑料與橡膠共混的熔融過程中，使橡膠相發生交聯的特殊工藝。

- **原理：**在強烈的高剪切混煉設備（如雙螺桿擠出機）中，一邊將橡膠與塑膠熔融共混，一邊加入交聯劑使橡膠相完成完全交聯。
 - **微觀結構：**高度交聯的橡膠粒子以微米級尺寸均勻分散在連續的熱塑性塑膠基體中。
 - **成果：**此工藝生產的材料即為**熱塑性動態交聯彈性體 (TPV)**，它兼具傳統橡膠的高彈性，又具備熱塑性塑料的重複熔融加工與回收性。
-

工藝特性對比

工藝類型	主要交聯機制	優點	缺點	典型應用材料
過氧化物交聯	加熱引發化學自由基	交聯度高、工藝成熟	需要高溫、加工窗口窄、有副產物殘留	PE-Xa 管材、EVA 膠膜
矽烷交聯	水分引發水解縮合	擠出成型容易、設備成本低	需後續溫水固化、交聯時間長	PE-Xb 電纜、熱水管
電子束輻射	高能電子束瞬間激發	綠色環保、無化學殘留、生產速度快	設備投資巨大、厚件穿透力有限	PE-Xc、熱收縮膜、汽車配件
動態交聯	熔融剪切下原位化學交聯	製品具高彈性且可完全循環回收利用	配方與螺桿組合設計複雜	EPDM/PP TPV 汽車密封條

交聯前後的性能轉變

- 熱性能提升：**從加熱可熔融的線性結構變為不熔的網狀結構，結晶度降低，維卡軟化點與長期使用溫度大幅提高。
- 力學性能優化：**拉伸強度、抗蠕變性、耐磨性及耐衝擊性能顯著增強。
- 環境耐受性：**三維網狀結構使溶劑分子難以溶脹或滲透，耐化學腐蝕與耐環境應力開裂(ESCR)能力倍增。