尼龍在機能性成衣的未來：
生物基尼龍與回收再生尼龍會是要角？

2025年8月

紡拓會 編譯

尼龍在機能性成衣的未來：生物基尼龍與回收再生尼龍會是要角？

目 錄	頁次
摘要.....	1
緒論.....	1
尼龍 6 與尼龍 6.6 之比較.....	1
尼龍的性能與在機能性成衣的應用.....	2
尼龍與其他纖維混紡.....	3
尼龍纖維的生產、公司及品牌.....	3
公司與品牌.....	3
擴張.....	4
回收再生尼龍纖維的生產.....	4
回收再生尼龍纖維的評估標準.....	5
生物基尼龍纖維產量.....	5
生物基與回收再生尼龍纖維生產與消費的成長潛力.....	5
生物基與回收再生尼龍纖維	
Aquafil：Econyl.....	5
Aquafil 與 Genomatica(Geno)：生物基尼龍 6.....	6
Lululemon 與 Genomatica(Geno)：環境衝擊較低的生物基尼龍.....	7
BASF：Ultramid Ccycled.....	7
Fulgar：Q-Cycle.....	8
Samsara Eco 與 Nilit：來自紡織品到紡織品回收再生的尼龍 6.6 聚合物.....	8
Nilit：Sensil Flow.....	9
Syntetica：解聚作用.....	10
Asahi Kasei 與 Microwave Chemical：微波回收循環.....	10

Domo : Nyleo.....	11
Toray Industries : Ecodear N510.....	12
Toray Industries : 生物基己二酸.....	12
加速商用生物基己二酸的生產.....	13
值得注意的尼龍布料與成衣新產品	
Pertex與Bureo : NetPlus製成的布料.....	14
Teijin Frontier : 尼龍與聚酯的混合Microft MX.....	15
Aquafil Econyl紗, Gucci與The North Face : The North Face x Gucci 系列.....	15
Aquafil Econyl紗與Burberry : Reburberry Edit.....	16
Invista : Cordura re/cor RN66.....	16
Polartec : Power Shield以及含Biolon的Power Stretch Pro布料與 薄膜.....	16
Invista與Royal Marines Commandos : Cordura Nycó製成的制服.....	17
Carhartt與Cordura : Yukon Extremes系列.....	17
Carrington Textiles : Spartan HT Flex Lite.....	18
結論	19

摘要

尼龍纖維被廣泛使用於一些機能性成衣品項，包括防護性服裝、運動服飾及泳裝。特別是應用在高端市場品牌的戶外服飾與工作服。這款纖維受到特別青睞是因為它的耐用性、易於洗濯、快乾、抗縮、有伸縮彈性及防皺等特性。

回收再生尼龍的產量正在增長，不過占尼龍纖維總產量的比重仍很小，於 2023 年僅有 2.1%。有數家製造商開發自回收廢棄物再生尼龍纖維的製程，還有更多的製程在開發中；回收再生尼龍纖維也被一些高端的布料與服裝系列所採用，例如，Aquafil 公司就利用舊地毯與棄置的漁網製造 Econyl 紗，為 Burberry 及 The North Face x Gucci 系列所採用；此外，Aquafil 也與 Geno 公司合作，生產 100% 可再生生物基尼龍 6。BASF 以化學方式處理舊輪胎，做為其生產 Ultramid Cycled 尼龍的原料；Fulgar 公司又使用 Ultramid Cycled 尼龍來製造 Q-Cycle 紗。Samsara Eco 已開發一個使用酶的回收再生方法，並和 Nilit 公司合作建造一座生產自紡織品到紡織品回收再生尼龍 6.6 聚合物的工廠。Syntetica 開發出一種在低溫與大氣壓力下進行的解聚過程。Asahi Kasei 與 Microwave Chemical 合作尋求將一個新製程達到商業化，一個以化學方式使用微波科技進行回收再生的製程。Toray Industries 公司開發一種 100% 生物基聚醯胺 510 的變體，名為 Ecodear N510；該公司也開發世界第一批取自非食用生物質的糖製成的 100% 生物基己二酸。Polartec 使用可再生的生物基尼龍纖維 Biolon 來製造數款布料與薄膜。

緒論

尼龍是一個聚醯胺大群組的通稱，其中最常應用於紡織業、尤其是機能性成衣的變體有：

- 聚醯胺 6(PA6)，通常稱為尼龍 6
- 聚醯胺 6.6(PA6.6)，通常稱為尼龍 6.6

這些聚醯胺變體也應用於工程塑膠。

尼龍 6 最初是於 1938 年時，將己內醯胺(Caprolactam, CPL)單體聚合而成；名稱中的 6 源自於己內醯胺有六個碳原子。

尼龍 6.6 最初是於 1935 年 2 月 28 日，將己二酸(adipic acid)與己二胺(Hexamethylenediamine)兩種單體聚合而成；名稱中的 6.6 源自於兩種單體皆各有六個碳原子。

尼龍 6 與尼龍 6.6 之比較

尼龍的耐用性是無與倫比的。在合成纖維的黃金時代，一幅尼龍製的美國國旗於 1969 年 7 月 21 日由太空人艾德林插在月球上，成為歷史象徵。這幅旗幟是當時美國太空總署的一名秘書花了 5.5 美元在西爾斯(Sears)百貨公司買的。

不過即使耐用，這幅旗幟也不太可能經得起超過 55 年之久的月球上冷熱交織的風霜。

這兩種尼龍纖維在強度與熔點上不同。尼龍 6.6 的強度超過尼龍 6，熔點也較高，大約達 260°C，尼龍 6 則是 220°C。此外，尼龍 6.6 的耐熱性也較佳，耐酸性也優於尼龍 6。

尼龍 6.6 也較尼龍 6 有較大的機械應力、硬度、抗潛變性、耐熱性及耐磨損性。

不過尼龍 6 有較高的耐衝擊度與機械吸震性質；尼龍 6 也能吸收更多的濕氣，有較佳的抗縮性。

兩種尼龍變體則有相似的耐化學性；一項共同的主要缺點是皆以石油原料製成，這種原料因為屬於化石燃料，所以是會耗竭的資源，並不永續。

因此有下列的嘗試：

- 以生物基材料取代尼龍 6、尼龍 6.6 及生產它們的單體原料
- 為尼龍製品建立回收再生鏈
- 解決海洋與環境塑膠持續存在的問題

此處的一個關鍵問題是，要回收再生尚有商業利用價值的尼龍，仍缺乏最初始的廢物流(註：waste stream，廢棄物從收集到最終處置的過程。)來處理尼龍廢棄物。相對之下，生產回收再生聚酯纖維則有主要的廢棄物來源，就是廢棄的寶特瓶。

尼龍的性能與在機能性成衣的應用

在機能性成衣的領域，尼龍 6 與尼龍 6.6 纖維普遍應用於防護服裝、運動服及泳衣。此外就是汽車內部，地毯及襪類。

在這些方面的應用是著眼於它們的屬性優點，如耐磨性、堅韌及易洗。

尼龍很堅韌，它的耐磨性只有那些昂貴的纖維能超過，例如芳香族聚醯胺纖維(aramid)。尼龍也透氣、輕量、快乾、抗縮、有伸縮彈性及抗皺。

使用尼龍絲製成的布料有高度的韌性、輕量、平滑感及柔軟感。此外，尼龍的吸水率高於其他合成纖維，尤其是聚酯纖維，因此可運用於開發具蒸發冷卻效果的布料，穿起來更舒服。

在運動服裝方面，尼龍材質因其排濕與快乾的特性常被使用。這項優點延伸到冬季服裝品項，例如內衣，在寒冷季節被當作底層穿著，在從事冬季運動時穿著。也應用於夏季服裝，在酷熱與高濕度的氣候時穿著。

尼龍與其他纖維混紡

尼龍往往與聚酯混紡，以製造較柔軟的布料。為加強舒適感與伸縮性，尼龍也可與彈性纖維混紡。

尼龍也可與其他合成纖維混紡以賦予抗起毛球特性與耐磨性。尼龍與羊毛混紡也很常見，兩者皆可維持布料的形狀不會延展或縮水；兩者也皆具排濕性質，亦皆快乾，不過尼龍比羊毛快乾。

尼龍有一定程度的彈性，標準級的羊毛則無。因此，以尼龍羊毛混紡製的成衣可行動自如與伸展而不會變形，這一點特別有利於用洗衣機洗滌衣服。

尼龍纖維的生產、公司及品牌

全球的尼龍產量自 2022 年的 620 萬噸，成長到 2023 年的 670 萬噸，占當年所有種類纖維總產量的 5%。

公司與品牌

就地理上而言，中國大陸企業在尼龍 6 與尼龍 6.6 的生產上居於領導地位。不過，有部份尼龍 6 與尼龍 6.6 的品牌，歷史悠久，商業地位重要，常為歐美市場常見的機能性服飾所使用。這些尼龍品牌包括：

- Cordura，由總部位於美國堪薩斯州的 Invista(英威達)公司供應
- Econyl，由總部位於義大利的 Aquafil 公司供應
- Nyleo，由總部位於比利時的 Domo 公司供應
- Sensil，由總部位於以色列的 Nilit 公司供應
- Ultramid，由總部位於德國的 BASF(巴斯夫)公司供應

也有一些世界重要的尼龍 6 與尼龍 6.6 生產商位於其他亞洲國家，包括：

- 日本旭化成公司(Asahi Kasei)
- 日本帝人公司(Teijin)
- 日本東麗公司(Toray)
- 韓國曉星集團(Hyosung)
- 韓國 Kolon Industries
- 臺灣台塑集團

有趣的是，在兩千年代初期，中國大陸的尼龍有三分之二是自臺灣進口。

擴張

自 2018 年始，尼龍產量每年皆穩定增加，除在 2020 年因為 COVID-19 疫情¹略有減少。

近年來最大的擴產之一，是擁有 Cordura 品牌的 Invista 公司，於 2024 年 8 月將尼龍 6.6 的產能自 19 萬噸翻倍到 40 萬噸，由其位於上海化學工業區斥資 2.4 億美元的工廠生產。

於此之前，同一間工廠於 2020 年已將尼龍 6.6 的產能自 15 萬噸增加 4 萬噸到 19 萬噸，並同時宣布將增蓋下列工廠：

- 一座位於法國的己二酸工廠
- 一座位於美國德州的己二酸工廠
- 一座位於中國大陸上海化學工業區的己二胺工廠

回收再生尼龍纖維的生產

回收再生尼龍 6 與尼龍 6.6 纖維的全球生產以緩慢的速度增加，占所有尼龍纖維總產量的比重則仍很小。2023 年全球的回收再生尼龍纖維產量僅 14 萬公噸，僅占整體產量的 2.1%。原因是：

- 回收再生技術的挑戰
- 進料品質與取得性的限制
- 缺乏投資

製造回收再生尼龍，可採用機械式或化學式回收再生過程，以下列兩大類為進料：

1. 消費前或製程後的尼龍廢棄物，包括：
 - 製程中的廢料
 - 裁剩的布料
 - 硬尼龍廢棄物
2. 消費後尼龍廢棄物，包括：
 - 使用過的地毯
 - 丟棄的漁網
 - 其他使用過的紡織品

¹ COVID-19，也稱為 2019 冠狀病毒（coronavirus）疾病，是由嚴重急性呼吸系統綜合症冠狀病毒 2（severe acute respiratory syndrome coronavirus 2，SARS-CoV-2）引起之傳染病。該病毒於 2019 年 12 月在中國大陸武漢首次發現。2020 年 1 月 30 日全球衛生組織（World Health Organization，WHO）宣佈其為國際關注之公共衛生緊急事件（Public Health Emergency of International Concern），並於 2020 年 3 月 11 日宣佈其為疫情（pandemic）。

最常見的進料，是在纖維紡絲或塑膠射出成型的製程中釋出的以機械方式回收的製程後廢棄物。

消費後尼龍廢棄物通常因為過度汙染無法以機械方式回收，但是已逐漸出現數種有潛力的化學式回收方式。

回收再生尼龍纖維的評估標準

用以評估回收再生尼龍的主要標準包括全球回收標準(GRS)²和回收聲明標準(RCS)³。

生物基尼龍纖維產量

2023 年全球生物基尼龍纖維產量約為 3.5 萬噸。相對於同一年尼龍纖維的全球總產量 670 萬噸顯得很少，僅占 0.5%。

生物基與回收再生尼龍纖維生產與消費的成長潛力

生物基與回收再生尼龍纖維的生產與消費在未來幾年將會增加，因為許多機能性成衣品牌已承諾會增加使用這類纖維，以減少碳排。

尼龍纖維的生產過程在 2020 年據稱排放了約 6,000 萬噸的溫室氣體。這樣的高排放量歸咎於使用化石燃料；同時亦製造了一氧化二氮(N₂O)，N₂O 的暖化能力較二氧化碳強三百倍。

生物基與回收再生尼龍纖維

Aquafil : Econyl

在以消費後廢棄物製成的尼龍中，Econyl 可能是最知名的品牌。這是義大利公司 Aquafil 的產品，該公司位於斯洛維尼亞的工廠生產尼龍 6。

Aquafil 生產尼龍 6 已超過 50 年的歷史，在相關紡織品生產、設計及時尚方面，於全世界有超過一千家合作夥伴，並致力於讓產業更為環保循環。

使用於製造 Econyl 產品的回收再生尼龍據稱具許多環保優點，且仍具備與原生尼龍 6 相同的品質與性能。

² Global Recycled Standard ; GRS 驗證製造產品使用的回收材料的真實性。用以保證產品包含至少 20% 回收材質，並以符合嚴格的環保與社會標準方式製造。GRS 是美國德州紡織交易所 Textile Exchange 開發的標準。

³ Recycled Claim Standard ; RCS 是一套國際志願性標準，用以保證產品包含至少 5% 回收材質。RCS 是美國紡織交易所開發的標準，其回收材料的定義是依 ISO14021 : 2016 環境標誌與宣告－自行宣告之環境訴求(第二類環境標誌)來決定。

在環保優點方面，經計算後得出每生產 1 萬噸 Econyl 材料，節省 7 萬桶原油，並減少排放 57,100 噸二氧化碳當量⁴。

Aquafil 公司生產 Econyl 尼龍是來自廢棄漁網，係由深海潛水人自地中海岸區回收來的，這是由備受讚揚的「健康海洋」⁵組織所支持的行動。

Aquafil 並不孤單，因為兩家臺灣公司台塑集團與集盛實業也在收集廢棄漁網製造回收再生尼龍。

不過，有更多的尼龍廢棄物來自大量的舊地毯。Aquafil 現在由位於美國鳳凰城旗下特定工廠回收處理此類廢棄物。Aquafil 並在鳳凰城及加州的三個城市皆各擁有一座回收與分類中心。

Aquafil 與 Genomatica(Geno)：生物基尼龍 6

Aquafil 的另一項研發，是於 2020 年 1 月在一項實驗計畫中生產全世界第一噸生物基尼龍 6 的前驅體，並於 2020 年 11 月宣布與加州的 Genomatica(Geno) 公司達成夥伴關係，建造一座示範規模的設備基地，生產 100% 可再生生物基尼龍 6。

Geno 運用生物科技與發酵作用，將生物基成分轉化為普遍使用的化學「積木」⁶，包括使用於製造尼龍的積木，然後再轉化成尼龍粒與尼龍絲。

2022 年 7 月，Aquafil 與 Geno 宣布成功生產首批示範規模的生物基尼龍 6。

尤值一提的是，他們已生產了幾噸首度問世的生物基 CPL，將 CPL 轉化成尼龍 6 聚合物，並且致力於 CPL 的轉變，以評估應用於數種不同的用途，包含地毯用、工程塑膠用及紡織品用的尼龍絲。

這些前商業化規模的產量有助於它們決定未來商業化規模工廠的最終設計。

⁴二氧化碳當量 (carbon dioxide equivalent, CO₂e) 是衡量溫室氣體排放之指標，它包括了二氧化碳 (CO₂) 和其他溫室氣體，例如水蒸氣、甲烷 (CH₄)、一氧化二氮 (N₂O) 和含氯氟烴 (CFCs)。這個指標讓其他溫室氣體排放得以根據其相對全球暖化潛力 (global warming potential, GWP) 以二氧化碳 (CO₂) 的形式表示。例如，CO₂ 之 GWP 為 1，而 CH₄ 的 GWP 約為 25 (以 100 年之時間範圍計算)。因此，排放 1 噸 CH₄ 的 GWP 相當於 25 噸 CO₂。

⁵ Healthy Sea 是一個基金會，成立宗旨在：移除海洋垃圾，特別是漁網；培養更健康的海洋；將廢棄物重生成為創新產品。這是 Aquafil、Star Sock 及一個非政府組織於 2013 年成立的倡議組織。

⁶化學積木 (chemical building blocks) 是小分子，帶有反應性官能基，可用來產生更複雜的產品。

這些材料被分配到全球領導性品牌和它們的價值鏈夥伴，以便它們：

- 探索開發可再生產品
- 打造展示品
- 從顧客處獲得回饋

lululemon 與 Genomatica(Geno)：環境衝擊較低的生物基尼龍

加拿大運動服品牌 lululemon 於 2021 年 8 月宣布與 Geno 公司開始一項歷時多年的協議，旨在打造對環境低衝擊的生物基尼龍。

這項合作協議是 lululemon 第一次以股權投資方式投資永續材料公司，也是 Geno 公司最大一宗與零售業公司的合作案。

BASF：Ultramid Cycled

來自舊輪胎的材料被回收再生製造成 Ultramid Cycled 尼龍，這個製程名為 ChemCycling，是總部位於德國的化學品公司 BASF(巴斯夫)所開發的製程。

這個製程是以源自輪胎化學式回收再生製程的裂解油⁷做為進料，在 BASF 位於德國路德維希港的工廠進行，這麼做部分取代了通常使用的化石原料。

使用的回收再生原料部分係採用一種經過驗證的物料平衡作法⁸分配給特定產品。

名稱裡有 Ultramid Cycled 尼龍字樣的產品，和以化石原料製成的相同產品，性質完全一樣。這代表客戶可用相同的方法處理 Ultramid Cycled 尼龍產品，並在傳統製程使用它們。

因此，Ultramid Cycled 尼龍可應用於需高品質與高性能的終端用途，包括紡織產業的應用在內。

除舊輪胎，BASF 的 ChemCycling 平台也可使用來自城市回收的垃圾裡混了尼龍塑膠的廢棄物作為進料。

⁷ 裂解油係將有機材料加熱至高溫製成的，這個過程將長烴鏈分解成較小的液體片。裂解油的化學成分視進料和高溫分解的狀況而定。

⁸ 物料平衡作法(mass balance approach)可用於追蹤原料在複雜的價值鏈上的流動。通常在生產時，化學式回收再生的進料與生物基進料和其他材料混合在一起，因此用物理方式將回收再生的進料與生物基進料分開，實務上及經濟上往往行不通。物料平衡作法則得以在價值鏈(而不是在產品)上追蹤回收再生進料和/或生物基進料的數量，然後在可核實的記帳方式下，將之歸屬於產品。

Fulgar : Q-Cycle

Fulgar 是義大利一家纖維與紗供應商，於 2022 年 2 月推出 Q-Cycle 紗種，這是以 BASF 的 Ultramid Cycled 回收再生尼龍為基底的紗種。

一個月後，戶外服飾領導品牌 Vaude 就推出以 Q-Cycle 紗製成的機能褲⁹。

Q-Cycle 紗據稱具與傳統尼龍 6 紗相同的輕量、強力，以及抗阻性等功能與美感，並且容易處理及可使用於混紡紗中。

生產 Q-Cycle 具雙層環保優點：

- 促進消費後廢棄材料的回收再生，否則這些廢棄物會送往掩埋場或被焚化
- 本身是永續的材料，因為使用後無法再生為原料的部分，可經熱解成為氣體，再被使用於產生能源，供製紗過程使用

在推出 Q-Cycle 紗之前，Fulgar 公司已成功生產出 Q-Nova¹⁰ 回收再生尼龍、以蓖麻油為原料的 Evo 尼龍、以及 Amni Soul Eco 尼龍纖維。Amni Soul Eco 尼龍纖維在三年內就可生物分解。

Samsara Eco 與 Nilit：來自紡織品到紡織品回收再生的尼龍 6.6 聚合物

澳洲回收再生技術公司 Samsara Eco 於 2024 年 8 月宣布，該公司計劃和以色列 Nilit 公司，在東南亞建造一座生產從紡織品到紡織品回收再生尼龍 6.6 聚合物的工廠，預計於 2026 年末運轉。Nilit 是全球最大的尼龍 6.6 後向整合¹¹製造商。

Samsara Eco 已開發出一個專利的酶催化回收再生方法，將塑膠分解成原始的核心分子。這些分子可用來重製出嶄新的塑膠。

這個方法名為 EosEco，可將一系列的廢棄原物料回收再生，包括彩色紡織品，以及含尼龍 6.6 與彈性纖維的混紡材質。

Samsara Eco 公司係於 2020 年與國立澳洲大學合作成立，合作夥伴還有澳洲的創投基金公司 Main Sequence 與零售集團 Woolworths Group。

⁹ 機能褲的特色包括輕量結構，伸縮布料，以及口袋或反光細節，以便在戶外活動時增加功能與安全性。

¹⁰ Q-Nova 回收再生尼龍原料來自 Fulgar 工廠的剩餘廢料。這些收集來的廢料由第三方經由機械式製造過程重製，再以聚合物的型態送回 Fulgar，用於生產 Q-Nova。Q-Nova 有 99% 的成分是來自以此方式再生的尼龍。

¹¹ backward integration 是一種垂直整合的型態，企業併購其原料供應商，以掌控其原料供應鏈。

至 2024 年 8 月，該公司已自國內外投資者募集 1.02 億美元，他們包括：澳洲的 Breakthrough Victoria、Wollemi Capital，美國的 DCVC，加拿大的 lululemon athletica，德國的日立創投(Hitachi Ventures)以及新加坡的淡馬錫控股。

這座新工廠將是唯一能以從紡織品到紡織品方式，回收紡織廢棄物再生成高品質的尼龍 6.6 聚合物的工廠，以供紡織品牌與製造商無縫接軌他們現有的供應鏈，以生產新布料。

Nilit：Sensil Flow

2024 年 4 月 Nilit 公司推出 Sensil Flow 紗，是將成衣內含的尼龍 6.6 回收再生的新做法。

成衣回收再生為原來成分的可能性，一直受到衣服分類與材質分開的複雜性所限制，尤以纖維混紡布料製成的成衣更是難以回收再生。

Sensil Flow 紗經過改造，更易於生產單一成分具伸縮性的布料，而不需使用彈性纖維。這款紗據稱：

- 具良好的色彩吸收性
- 能打造 3D 效果
- 消費後回收再生更容易

這款紗使用一種機械式過程就可輕鬆回收再生，不需額外的化學品，只會產生最少的二氧化碳排放量。

Nilit 公司並和回收再生專家合作，促成有效率地回收再生廢棄布料、消費後布料及成衣，這些布料成衣本來會送往掩埋場或是焚化處理。

預期這些回收再生專家可打造出高品質的回收再生尼龍粒，將之導入 Nilit 尼龍纖維製程中，生產高品質的紗種。

Nilit 在官網上聲稱「對承諾打造循環紡織經濟的合作夥伴而言，驗證證書可證明循環性並提供透明度與問責性。就像我們對其他 Sensil 紗種的做法一樣，我們提供消費後的驗證證明，讓成衣回到回收再生階段時可溯源」。

Nilit 提供一系列範圍周全的「頂級」尼龍紗，用以協助成衣產業轉型至更永續的層級。

這個系列包括：

- Sensil ByNature，使用掩埋場廢棄物回收再利用產生的生物基氣體製成
- Sensil BioCare，經特別技術強化，有助減少海水與掩埋場微塑膠的存在
- Sensil EcoCare，使用回收再生尼龍為原料
- Sensil WaterCare，包含內建色彩，節省可達 100% 傳統濕製程染色的用水

Nilit 自 2023 年 1 月就開始行銷新版本「美國製」的 Sensil EcoCare 紗，完全以美國原料在其維吉尼亞州的工廠生產。

新版紗符合貝瑞修正案¹²、美墨加協定(USMCA)及中美洲貿易協定(CAFTA-DR)的規定。

「美國製」版的 Sensil EcoCare 紗有數種變體，以供用於製造圓編針織布、經編針織布、一體成型無縫針織布及梭織布。

Syntetica：解聚作用

總部位於巴黎的新創公司 Syntetica 開發出一個解聚過程，適用於回收再生尼龍 6 與尼龍 6.6 廢棄物。

2024 年 7 月該公司成功募集 460 萬美元，將運用於擴充規模，打算在 2026 年中達到商業化前的生產階段。

在這個解聚過程中，紡織廢棄物中的尼龍以分子的形式從其他材質，諸如棉、聚酯、彈性纖維等中分離出來。分離出的尼龍接著被清除任何額外的染料與加工助劑，只剩下純粹的成分，準備進入生產尼龍的流程。

Syntetica 的過程是在低溫與大氣壓力下進行。其他的尼龍回收再生過程則是在高溫與高壓下進行，因此成本昂貴並耗費能源，限制了商業化的範圍。

Asahi Kasei 與 Microwave Chemical：微波回收循環

Asahi Kasei(旭化成)與 Microwave Chemical(微波化學)於 2023 年 4 月推出一項聯合示範方案，目的是將使用微波科技以化學方式回收再生尼龍 6.6 的新製程並達到商業化。

Asahi Kasei 是總部位於東京的化學品公司；Microwave Chemical 則是位於大阪的公司，專精開發微波技術，「為各種產業挑戰開發與提供最佳的微波解決方案」，以及「達成碳中和」。

新製程將尼龍 6.6 解聚以直接獲取己二胺與己二酸單體。據稱獲取量高且能源消耗量低。這些單體然後使用於製造新的尼龍 6.6。

在示範方案中，有下列物質被解聚：

- 自尼龍製程廢棄物獲得的尼龍 6.6 聚合物
- 自廢棄的安全氣囊與廢棄汽車零件回收的尼龍 6.6 聚合物

¹² Berry Amendment 是一項法令規定，意在防止美國國防部採購在美國境外生產的軍用紡織品與服裝，除非採購美國來源的做法會延誤運送這些物品至戰場上的軍隊，或是所需的材質美國無法提供。

Asahi Kasei 也生產傳統源自化石燃料的己二胺與己二酸單體，以製造 Leona 尼龍 6.6，這是一款具優異耐熱性與硬度的工程塑膠。這款尼龍 6.6 有各種用途，包括應用於安全氣囊布料的塑膠成分、汽車用品及電子產品。

Microwave Chemical 一直在提升其專利的 PlaWave 技術「平台」¹³，這是一項使用微波來分解塑膠的技術。

2021 年開始的實驗室規模研究已證實，微波可應用於解聚尼龍 6.6，達到高產出量，也可在解聚後將獲得的材質分離與純淨化。

Microwave Chemical 大阪的工廠也已配置小規模的設備，並於 2024 年進行一項小規模的示範性試驗計畫，以收集基本的製程資料，作為商業化的準備。

Domo : Nyleo

總部位於比利時的 Domo 公司以生產工程材料為主，自 2022 年 5 月就一直在行銷品牌名為 Nyleo 的尼龍 6.6 機能性纖維系列。

該公司在法國有一座工廠，配置有全球最新的設備，藉以聚合尼龍 6.6，並以製造短纖。

整體而言，該公司的尼龍 6.6 產品組合包括：

- 短纖
- 捲曲絲束
- 用以製作起絨效果的纖維束

這些產品以優異的性能著稱，包括耐磨損性、色牢度、品質一致性、可染性、高強力、韌性、柔軟手感及耐穿性。

Domo 新近推出的纖維變體包括：

- Nyleo 4earth
- Nyleo Protect
- Nyleo Safe

Nyleo 4earth 具備強化的生物分解性，可在五年內分解。傳統的尼龍 6.6 纖維恐需要 50 到 100 年的時間分解。

¹³ 此處的平台指的是一種基礎技術或系統，做為發展多種產品、解決方案或應用程式的基礎。

Nyleo Protect 的開發是為讓衣服、家具、個人防護裝備及運輸產業的安全性提升到更高程度。這款變體據稱結合尼龍 6.6 的所有優點，包括舒適、低單位重量、機械性能及出色的抗磨損性，阻燃性能也改進了，其極限氧指數 LOI¹⁴ 是 28%。

Nyleo Safe 是一個新的抑菌纖維，為對抗細菌繁殖問題而開發。細菌繁殖已成為健康的隱憂，愈來愈需快速處理。

製造這款纖維是在 Nyleo Safe 的聚合物結構中加入一種抑菌助劑，以產生長效，可保護纖維並抑止細菌成長。

Toray Industries：Ecodear N510

總部位於東京的 Toray Industries(東麗)公司於 2022 年 1 月宣布開發一款 100% 生物基聚醯胺 510 的變體，名為 Ecodear N510, 主要應用於製造屬於利基產品的運動及戶外布料。

該公司於 2023 年開始販售 Ecodear N150，並逐漸增加產量。

Ecodear N150 是將下列兩者聚合製出：

- 自蓖麻油植物獲取的癸二酸
- 源自玉米與紡紗廢料的戊二胺

不像其他 100% 的生物基尼龍，Ecodear N150 有著高熔點與良好的尺寸穩定性，並且像尼龍 6 一樣地強韌與耐熱。

未來 Toray 的目標是結合各項專利技術，讓纖維更為進步，特別是藉著改變橫切面形狀，讓纖維更薄、更輕，或是增加功能性。

Toray Industries：生物基己二酸

2022 年 8 月，Toray Industries 宣布開發出據稱是世界第一批以取自非食用生物質的糖所製成的 100% 生物基己二酸。己二酸是生產尼龍 6.6 的關鍵原料。

這項物質是採用一項專利合成技術，結合微生物發酵與一種使用分離薄膜的化學純化技術。

該公司已開始提升在這方面的能力，並正：

- 試驗用以製成尼龍 6.6 的聚合反應
- 開發量產技術
- 進行市場研究，著眼約於 2030 年時能使用這種生物基己二酸生產的尼龍，投入商業化的應用

¹⁴ limiting oxygen index 係指在局部空間中試樣材質燃燒的最低氧濃度，值愈高愈難燃；亦稱為臨界氧指數 Critical Oxygen Index。

傳統製造己二酸的化學合成法會產生一氧化二氮(N₂O)，這是一種溫室氣體，暖化能力較二氧化碳強三百倍。

Toray 已發現部分微生物，可從糖產生一種己二酸的中間產物。

為擴大生產效率，該公司已重新配置這些微生物內的代謝途徑，這是藉著應用基因工程技術以人工方式重組基因並精簡順暢合成過程而成。

Toray 也使用生物資訊科技為合成作用設計最佳的微生物發酵途徑。

自從 Toray 初次發現前述微生物之後，由微生物合成的己二酸中間產物產量據稱增加了超過一千倍，合成過程的效率也大幅改進。

Toray 使用逆滲透分離薄膜以深化己二酸中間產物在純化過程中的濃度。這個做法據稱較其他方法皆更具能源效率。

產生己二酸中間產物的技術不會排放一氧化二氮，以取材自石油的傳統過程來產生己二酸則會排放。

加速商用生物基己二酸的生產

這個領域的最新發展是，Toray 於 2024 年 11 月宣布，該公司正和 PTT Global Chemical(GC)公司攜手，探索開發自一種非食用生物質量產己二酸的技術。GC 是曼谷一家石化產品的製造商。

兩家公司也評估在泰國與日本將己二酸商業化生產的可行性。如果可行的話，他們的目標為利用泰國的農業廢棄物，可年產數千噸的生物基己二烯二酸。

己二烯二酸是一種生物基底的「平台化學物」(註：平台化學物指的是可用做生產其他化學產品的基礎原料)，可轉化成己二酸或對苯二甲酸，或用來做為全能型的單體。

兩家公司將使用這種生物基己二烯二酸生產生物基己二酸，然後以這款己二酸製造生物基尼龍 6.6，並預定在 2030 年前達到商業化的規模。

2023 年兩家公司開始攜手開發生產這些原料的技術，以便自非食用的糖製造尼龍 6.6，這些糖取自 Cellulosic Biomass Technology 公司製造的生物質。Cellulosic Biomass Technology 是一家曼谷企業，Toray 擁有 84% 的股份。

GC 公司運用專利的發酵技術將非食用糖快速轉化成高產出的己二烯二酸；Toray 則運用其氫化作用過程，自己二烯二酸製造出高產量的高純度生物基己二酸。

結合這些過程產生的生物基己二酸可做為原料，供製造樹脂用與纖維用的尼龍 6.6，性能類似源自石油的尼龍 6.6。

此外，全部過程不會產生一氧化二氮這種溫室氣體，通常化學合成過程中會排放這類氣體副產品。

值得注意的尼龍布料與成衣新產品

Pertex 與 Bureo：NetPlus 製成的布料

Pertex 與 Bureo 合作開發以 NetPlus 紗製成的輕量尼龍布料，NetPlus 紗是以取材自漁網的 100% 回收再生原料製成的紗。

Pertex 是位於英國的公司，生產高性能布料，是東京三井物產旗下企業。Bureo 則是美國公司，專司回收再生來自漁網的尼龍廢棄物。

在雙方的合作條件下，Pertex 以 NetPlus 紗製成的布料，已由數個品牌的 2024/25 秋冬系列採用，這些品牌包括 Albion Cycling、Burton Snowboards、Jötnar、Macpac 及 Patagonia。

Bureo 致力於消除漁網造成的汙染，該公司提供漁夫一項針對「使用周期結束」棄置漁網的解決方案。

Bureo 公司自成立的 2013 年開始，就宣稱是以棄置漁網製成 100% 回收再生材料的唯一供應者，這些廢棄漁網皆是可完全溯源的。

該公司直接和漁業團體合作，提供他們需要的資源、訓練及誘因，以便在漁網使用生命結束時能負責任地處理這些廢棄物。

廢棄的漁網被轉化成可完全溯源、優質的 100% 回收再生尼龍 6，名為 NetPlus，性質據稱可比擬原生的尼龍 6 材質。

Pertex 公司以 NetPlus 製成的布料品牌名稱有 Equilibrium、Quantum 及 Shield，符合和 Pertex 其他系列布料一樣嚴格的性能標準，因此確保「在機能表現上沒有打折」。

這些布料一樣耐穿、輕量及透氣。在實驗測試中，Pertex 公司以 NetPlus 製成的布料，具原生尼龍製成的布料相同的抗磨損性與抗撕裂強力。

此外，使用 NetPlus 紗，相較於使用原生尼龍，據稱可減少 20% 的溫室氣體排放，70% 的耗水量，67% 的化石燃料使用，以及 68% 的能源消耗。

Teijin Frontier：尼龍與聚酯的混合 Microft MX

Teijin Frontier 開發一款高性能布料，名為 Microft MX，結合聚酯與尼龍的組織與功能性。

Teijin Frontier 公司位於東京，生產高性能的纖維與紡織品，是 Teijin Group (帝人集團)的一部分。

Microft MX 布料是聚酯與尼龍單絲均勻一致混合排列製成的布料，採用獨特的紡紗技術製造，以產生高度變形的「和緩 V 形」橫切面，並能賦予膨鬆感與類似傳統短纖加撚紗的柔軟組織。

藉著在梭織布表面與結構上均勻一致混合排列聚酯與尼龍，得以讓布料產生結合了兩種材質的吸引特色。

布料具聚酯的吸水、快乾及形狀穩定的特性，加上尼龍的抗磨性與可染多樣色彩的能力。

特別是，Microft MX 擁有雙色調，可反映出布料材質聚酯絲與尼龍絲染色效果的差異。

Teijin Frontier 正推廣將 Microft MX 布料應用於 2025 春夏戶外服飾與運動服飾系列。

用途將接著擴充到機能性內衣與流行服裝，目標是 2026 年時 Microft MX 布料的年銷售量達到 50 萬公尺。

近年來，將運動與戶外服裝的實用性和生活風格結合的流行服飾日益受到歡迎，因此對結合優異機能性與新外觀及組織的布料需求也在成長。

然而，除 Microft MX 布料的開發，其他結合聚酯和尼龍組織與機能性的新材料開發進展則不多見。

Aquafil Econyl 紗，Gucci 與 The North Face：The North Face x Gucci 系列

前面介紹過的 Aquafil 公司的 Econyl 紗，曾被廣泛應用在許多令人矚目的系列上。其中之一是 The North Face x Gucci，這是一個服裝與配件系列，靈感來自 1970 年代，是 The North Face 與 Gucci 的合作成果。此系列分兩階段推出，第一次是在 2020 年 12 月，第二次是在 2022 年 12 月。

The North Face x Gucci 系列特色是色彩鮮活的羽絨夾克與仿舊後背包，延伸到漁夫帽、登山靴、羊毛針織絨球帽及腰袋，甚至還有睡袋和帳篷。

The North Face 的羽絨夾克在 2020/21 季時曾引起流行熱潮。事實上，當時的年輕消費者著迷於追求 1990 年代的二手經典物品，自 2020 年 7 月到 12 月之間，在 eBay 拍賣網站上每三秒鐘就有人搜尋 The North Face。

在羽絨夾克的成功之前，The North Face 於 2018 年重新推出最受喜愛的 Nuptse 羽絨夾克，並請出不同的名人穿著，包括饒舌歌手肯伊·威斯特。後來亦有名模穿著，結果單單在 2020 年，The North Face 某些精選羽絨夾克的銷售，就攀升了 400%。

Aquafil Econyl 紗與 Burberry：ReBurberry Edit

英國奢華品牌 Burberry 採用 Aquafil 公司的 Econyl 紗織成布，做為 2020 ReBurberry Edit 系列的用布，系列包括風衣、連帽外套、披風及配件。

Burberry 品牌設計與配銷的服裝品項包含風衣、皮件及鞋履，以格紋出名。

Invista：Cordura re/cor RN66

2022 年 1 月 Invista 公司宣布 Cordura re/cor RN66 布料的上市，這是以消費前廢棄物製成的 100% 尼龍 6.6 纖維為原料、並經全球回收標準(GRS)認證的布料。

在此款布料結構使用的回收再生尼龍 6.6，被形容為耐用耐久，和原生尼龍 6.6 相較，其製造可減少 83% 的溫室氣體排放，82% 的能源消耗，以及 57% 的耗水量。

Polartec：Power Shield 以及含 Biolon 的 Power Stretch Pro 布料與薄膜

Polartec 推出的 Power Shield 與 Power Stretch Pro 布料及薄膜，皆含 Biolon 纖維。Biolon 纖維是一種可再生的生物基尼龍纖維，據稱比原生尼龍 6.6 製的纖維的碳足跡要少掉一半。這些布料與薄膜於 2023 年 10 月上市。

Biolon 的性質，據悉較現行市面上許多其他回收再生的尼龍纖維皆要更接近尼龍 6.6。

Biolon 占新上市的 Power Shield 布料的材質成分 48%，占新上市的 Power Stretch Pro 布料材質成分則是 50%。

Power Shield 布料據稱防水與防風，並展現持久透氣性，高度耐用性及伸縮舒適性。

此外，這款布料具濕度管理特性，特別是，濕氣會以水蒸氣分子的形態自布料的內表面到外表面擴散出去。

Power Shield 布料在極端氣候情況下的性能表現特別好。此種布料的耐水壓¹⁵超過 20,000 毫米，因此在極高壓下能防雨及防水，故可承受暴雨與大雪。此外，此種布料的透濕率¹⁶為 20,000 g/m²/24h。

Power Stretch Pro「雙表層」布料則具四面伸縮彈性，包含高度耐用的尼龍外層與柔軟舒適的聚酯內層。

Polartec 公司宣稱，Power Stretch Pro 布料既透氣、舒適又耐用。

Invista 與 Royal Marines Commandos：Cordura Nyco 製成的制服

英國皇家海軍陸戰隊使用 Invista(英威達)研發的高強力尼龍 6.6 纖維 Cordura Nyco 製作制服，這反映出這種纖維的堅韌結實。

Cordura Nyco 與棉纖維混紡，生產一款抗撕裂織法¹⁷的布料，供製作制服使用。這布料是由位於紐約的軍用裝備廠商 Crye Precision 製造，該公司也在布料上印製官方正式的迷彩圖案。

這種布料擁有陸戰隊在作戰時需要的額外牢固性，卻比標準的尼龍/棉 50/50 制服用料輕，並提供舒適的伸縮彈性。

同時它也比標準的制服用料擁有更高的抗撕裂力，快乾且更透氣，因此適合在極端與惡劣的環境下穿著。

Cordura Nyco 布料是特別為軍事與戰鬥應用而打造，據稱已在戰場上證實過其性能效果。

Carhartt 與 Cordura：Yukon Extremes 系列

美國優質工作裝品牌 Carhartt 的 Yukon Extremes 系列是為與極端寒冷狀況對抗的人們而打造的。

¹⁵ hydrostatic head，耐水壓係以等壓水柱之高度來描述施加於材料上壓力的方法。由於施加之壓力僅取決於水柱的高度，故可使用此數字來量化織物的防水程度。例如，可以承受一公尺高水壓的織物將可阻擋水分通過，直至水壓超過此值。

¹⁶ MVTR，moisture vapour transmission rate，透濕率是織物在一定時間內允許水分通過到達外部空氣的速率。此處的 MVTR 定義為在 24 小時內通過 1 平方公尺織物的水蒸氣量（以克為單位）。MVTR 越高，透出的濕氣量就越大。

¹⁷ ripstop weave，抗撕裂織法是以強化厚實的紗線以規律的間隔交織成交叉格狀結構。布料破損時，紗線成為阻礙，撕裂處就止於最靠近的強化紗線處，不會繼續擴大。

系列中的品項經過設計以提供額外的溫暖感、加強的行動力，以及改進的功能，但體積卻減輕。

這些系列品項是以 500 丹尼的 Cordura 布料做為外層衣著，被宣稱為「Carhartt 製造過的最溫暖與耐用的服飾配備」。

為確保 Yukon Extremes 系列在最艱苦狀況下的防護作用，Carhartt 採購各種布料，以嚴格的方法測試它們。

該公司也發明自己的耐磨性測試方法，以便激烈地試驗布料的牢固性。在系列裡的許多品項，Cordura 布料的外層衣著則被使用來搭配 3M 的新雪麗保溫棉(Thinsulate insulation)單品穿著。

這些服飾也具逆反射性¹⁸，由 3M 提供的新反光安全技術來實現這項功能。

Carrington Textiles : Spartan HT Flex Lite

英國公司 Carrington Textiles 推出一款抗撕裂布料，名為 Spartan HT Flex Lite。Carrington Textiles 是軍用布料的製造商，其布料製成的服裝為歐洲、中東及澳洲的武裝部隊所穿著。

此款布料於 2023 年 2 月推出，屬於該公司的 Defence 產品系列。布料重量為 195g/m²(公克/平方公尺)，是軍用布料中唯一含 2%Lycra 與 37%棉者，因此具伸縮彈性與優異的舒適感。它也含 61%軍用等級的高韌性尼龍 6.6 纖維 Cordura，因此具備強力與耐用性。

布料適於製作適合任何地區的戰鬥服，並可在該公司英國的印花基地印上客製化的圖案。

Carrington Textiles 專長於製造防衛布料、環保永續布料、阻燃布料、防水布料及工作服裝用料，應用範圍幾乎遍及所有工業。

該公司每年布料產量超過 1.3 億公尺，生產基地遍及亞洲、歐洲大陸及英國。產品銷售則及於全球超過 80 個國家。

使用其產品的著名終端客戶包括 Airbus (空中巴士)、ArcelorMittal(位於盧森堡的全球最大鋼鐵生產商)、BP(英國石油)、BUPA(位於英國的醫療保險公司)、Jaguar Land Rover(捷豹路虎汽車)、麥當勞、殼牌石油、Tata Steel(印度塔塔鋼鐵公司)及可口可樂公司。

¹⁸逆反射性指裝置、材料或表面將光線或其他輻射反射回其來源方向的能力。

結論

尼龍在機能性成衣產業最值得注意的應用包括高端品牌的戶外服飾以及工作服。

尼龍是以其特定的性能特質受到重視，在這方面幾乎和聚酯一樣重要。以 lululemon 公司產品使用的合成纖維而言，聚酯與尼龍就幾乎是一半一半。

不過在一般成衣市場，聚酯的使用量在 2023 年估計約 7,110 萬噸，尼龍的 670 萬噸就相形見绌了。

此外，聚酯的回收再生利用迅速成長，使用的方法有四種：甲醇解法、糖解作用、水解法及酵素還原法。

這對在產品中廣泛使用尼龍的機能性服飾與工作服的品牌來說，會是愈來愈大的問題。

還有，龐大且繼續增長的聚酯廢棄物解決系統仍待商業開發，隨著未來數年禁止掩埋或焚化的立法將會生效，例如歐盟在 2025 年 1 月就會生效，這些系統將迅速增加。

單單一家美國 Eastman(伊士曼化學)公司就已規劃就緒，將於 2025 年開始每年回收再生 15 萬噸聚酯廢棄物，至 2030 年則至少達到每年 30 萬噸。

許多其他回收再生聚酯的方法皆在迅速發展中。

然而，尼龍在這方面卻未見表現。