

Keratinase 角蛋白酶：羽毛蛋白回收、羊毛紡織再生與皮革去毛的 B2B 技術指南

Enzymes.bio 研究團隊 · 紐西蘭威靈頓 · June 21, 2026

Keratinase (角蛋白酶) 是一類可水解角蛋白的蛋白酶，主要用於處理羽毛、毛髮、羊毛、皮革去毛與其他高角蛋白副產物，使原本難溶、難消化的結構蛋白轉化為較容易利用的肽與胺基酸。

在 B2B 應用中，keratinase 的核心價值不只是「分解蛋白」，而是協助飼料、紡織、皮革與廢棄物資源化流程降低化學處理依賴、提高蛋白回收率，並支援循環經濟與低污染製程設計。

Enzymes.bio 供應 keratinase 粉末，產品以 1 kg 單位線上銷售；CoA 與 SDS 會隨訂單一併提供，供使用端進行合規、安全與批次文件管理參考。

Keratinase 是什麼？為什麼角蛋白需要專用酵素處理？

Keratinase 通常被歸類為角蛋白分解型蛋白酶，但它不是單一分子或單一來源的酵素，而是一群能作用於 keratin 結構的酵素總稱。角蛋白存在於羽毛、羊毛、毛髮、角、蹄、指甲與皮膚角質層中，具有高度交聯、疏水性強、二硫鍵密集等特徵，因此一般蛋白酶即使能水解可溶性蛋白，也不一定能有效處理完整角蛋白纖維或羽毛基質；這正是 keratinase 在工業應用上受到重視的原因 ^[1]。

角蛋白之所以難降解，主要來自三個結構因素：第一，半胱胺酸形成的二硫鍵讓蛋白鏈彼此交聯；第二， β -摺疊或 α -螺旋結構讓蛋白質緊密排列；第三，纖維表面常有疏水區域與外層保護構造，阻礙水、酵素與一般化學處理劑進入。Keratinase 的作用通常不是單靠「剪斷一條肽鍵」即可完成，而是需要讓蛋白主鏈暴露、纖維膨潤或交聯密度降低後，才能逐步釋放可溶性肽與胺基酸 ^[2]。

從來源來看，文獻中已報導多種細菌、真菌與放線菌可產生 keratinase，例如 *Stenotrophomonas maltophilia*、*Acinetobacter*、*Penicillium*、*Aspergillus*、*Alcaligenes*、*Pseudomonas*、*Bacillus* 與 *Amycolatopsis* 等。不同來源的 keratinase 在底物偏好、耐溫性、耐鹼性、金屬離子需求、洗劑相容性與膠原蛋白副作用風險上可能不同，因此「keratinase」在技術文件中應被視為功能類別，而不是完全等同的單一規格品 ^[3]。

主要應用總覽：從羽毛水解到紡織循環

Keratinase 的主要應用集中在「高角蛋白材料的減量、回收與功能化」。其中最成熟、文獻支持度較高的方向包括羽毛與魚鱗等動物副產物處理、羊毛或羊毛混紡材料的生物加工、皮革製程去毛，以及飼料產業對羽毛蛋白與角蛋白廢棄物的利用。近年研究也延伸到洗劑、農業氮源與特定生物材料處理，但這些應用在法規、配方穩定性與製程整合上仍需依使用情境評估 [4]。

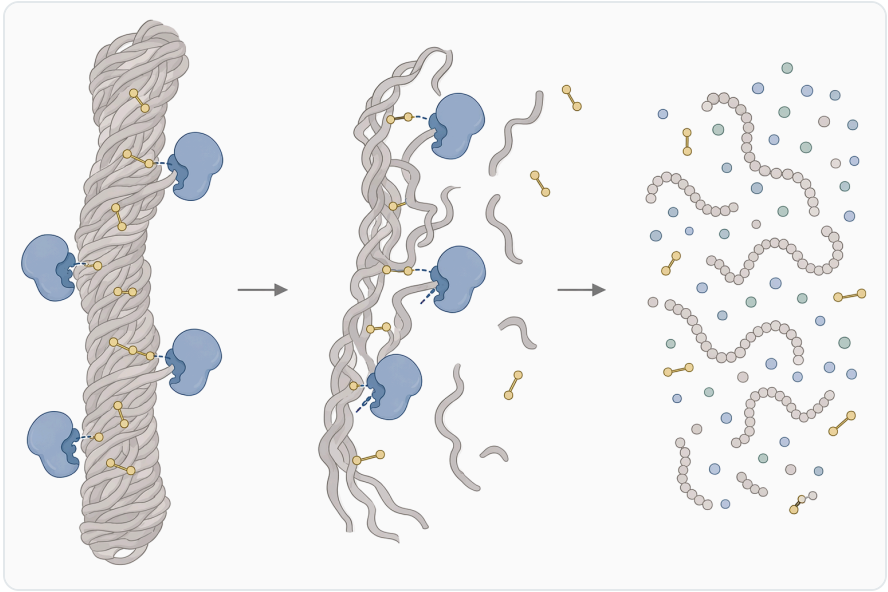


Figure 1. 角蛋白酶會吸附在外露表面，作用於具抗性的角蛋白纖維，削弱其緻密結構，並將肽鍵水解成較小的片段。

應用領域	Keratinase 的主要作用	典型基質	產業價值	證據成熟度
羽毛蛋白回收與飼料原料處理	分解羽毛角蛋白，釋放可溶性肽與胺基酸	雞羽、禽類羽毛	提高蛋白可利用性、降低廢棄物負擔	高
紡織羊毛加工與混紡回收	改變羊毛纖維表面或協助纖維分離	羊毛、羊毛/聚酯混紡	支援低化學加工與紡織循環	中至高
皮革去毛	分解毛根與表皮角蛋白，降低硫化物依賴	原皮、毛髮、表皮角質	減少污染負荷、改善製程環境	中至高
洗劑與去污	降解角質、皮屑與蛋白性污垢	衣物蛋白污漬、角質殘留	配方功能化、降低強鹼或高溫依賴	中
有機肥與氮源資源化	將角蛋白廢棄物轉為較易礦化的含氮物	羽毛、毛髮、魚鱗	支援廢棄物資源化	中

在羽毛處理方面，keratinase 的重要性特別明顯。羽毛含有大量蛋白質，但原始羽毛的消化率與溶解性都受到角蛋白結構限制；若只以高熱或強化學方式處理，可能造成能耗、胺基酸破壞或副產物品質不穩。以 keratinase 參與的生物水解流程，目標是把羽毛轉為較可利用的蛋白水解物，使其更適合進一步作為飼料原料、發酵基質或有機氮源 [5]。

作用機制：Keratinase 如何打開角蛋白結構？

Keratinase 的機制可用「結構鬆動 + 肽鍵水解」來理解。角蛋白纖維先因水合作用、物理處理、還原環境或微生物代謝產物而產生局部鬆動，使原本被包埋的蛋白主鏈暴露；接著 keratinase 進入可接觸區域，切割肽鍵並產生較短的胜肽片段。研究利用 FITC 標記酵素追蹤 keratinase 在羊毛纖維上的動態作用，顯示酵素與纖維表面的接觸、滲入與局部水解是逐步發生的，而不是瞬間均勻分解整根纖維 [1]。

二硫鍵是角蛋白抗降解能力的關鍵，因此 keratinase 的效率常與二硫鍵鬆動策略有關。某些微生物系統在分泌 keratinase 的同時，也可能透過還原性代謝產物或相關酵素降低角蛋白交聯程度，使蛋白鏈更容易被蛋白酶切割；在工業流程中，物理預處理、溫和化學輔助或製程條件調整也常被用來提高酵素可及性。重點是：keratinase 對角蛋白的效果往往是系統性結果，不宜把它簡化為單步驟反應 [3]。

在催化類型上，keratinase 可包含絲胺酸蛋白酶、金屬蛋白酶與其他蛋白水解酵素類型。舉例來說，*Acinetobacter* sp. R-1 來源的金屬型 keratinase 被研究於皮革產業應用，其特點之一是低膠原蛋白酶活性，這對皮革去毛尤其重要，因為理想的去毛酵素應盡量作用於毛髮與表皮角質，而不是過度破壞真皮膠原纖維 [6]。



Figure 2. 酸性、中性與鹼性蛋白酶可水解易接近的蛋白質；而角蛋白酶的特點在於能作用於羽毛、毛髮、羊毛與角等由二硫鍵強化的角蛋白材料。

底物辨識則與酵素活性位點周邊結構有關。針對 *Stenotrophomonas maltophilia* KerSMD 的定點突變研究顯示，S1 口袋會影響 *keratinase* 的底物特異性；另有針對耐熱 *keratinase* 的理性工程研究，透過調整 S1' 底物結合口袋來改善角蛋白降解效率。這些研究說明 *keratinase* 的產業表現不只取決於「有沒有蛋白酶活性」，也取決於活性位點如何辨識角蛋白或類角蛋白底物 [2]。

羽毛水解與飼料應用：把難消化蛋白變成可利用資源

禽類羽毛是 *keratinase* 最具代表性的應用場景之一。羽毛廢棄物量大、蛋白含量高，但因角蛋白結構緊密，直接作為飼料或肥料時利用率有限。研究指出，透過產 *keratinase* 微生物或外加酵素處理，可促進羽毛降解並釋放可溶性蛋白、胜肽與胺基酸，使其更適合作為蛋白回收與飼料產業的原料前處理方向 [4]。

在放大與製程策略方面，*Stenotrophomonas maltophilia* BBE11-1 曾被用於羊毛廢棄物生物降解與 *keratinase* 生產的發酵放大研究，顯示角蛋白廢棄物可同時作為誘導性基質與轉化目標。這類研究對 B2B 使用端的啟示是，*keratinase* 不只是單純添加劑，也可被納入「廢棄物—酵素—水解產物」的整合流程，形成更完整的資源化模型 [3]。

飼料產業關注的不是羽毛是否「看起來被分解」，而是水解後蛋白質是否更容易被動物消化、胺基酸組成是否適合配方、是否降低抗營養或難消化比例，以及製程是否可穩定重複。2024 年關於 *keratinase* 基因表現與家禽飼料潛力的綜述指出，提升 *keratinase* 表現與穩定性，是推動羽毛蛋白在飼料領域更有效利用的重要研究方向 [5]。

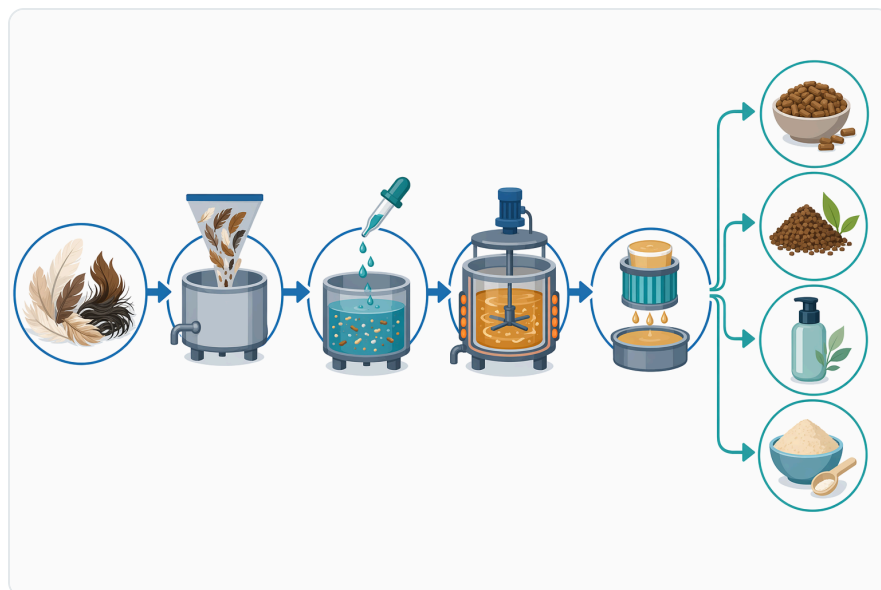


Figure 3. 在羽毛粉加工中，將含水的富角蛋白材料與角蛋白酶混合，並維持反應以進行水解，製成富含胜肽的飼料配方原料。

紡織與羊毛處理：從纖維表面改質到混紡回收

在紡織產業中，keratinase 主要與羊毛相關。羊毛纖維外層鱗片與角蛋白結構會影響氈縮、染整、手感與混紡回收。以 keratinase 控制性處理羊毛，可望改變纖維表面性質，降低部分傳統化學處理的需求；但處理強度必須受控，否則可能造成纖維損傷、強力下降或手感變化過度 [7]。

羊毛/聚酯混紡布的回收是另一個具代表性的方向。混紡材料難以機械分離，若能利用 keratinase 選擇性分解羊毛角蛋白，就可能將羊毛成分轉為可溶性水解物，同時回收聚酯纖維。Navone 等人的研究以酵素纖維分離切入 wool/polyester fabric blends 的閉環回收，說明 keratinase 在紡織循環經濟中不只是加工助劑，也可能成為材料分離工具 [8]。

不過，紡織應用中的「選擇性」比單純降解更重要。若目標是羊毛防縮或表面改質，keratinase 需要主要作用於表層鱗片與表面角蛋白；若目標是混紡分離，則可能需要較深度的蛋白水解。這兩種情境對反應時間、基質接觸、纖維完整性與後處理的要求不同，因此使用端通常會以成品性能為導向，而不是只追求最高降解程度 [1]。

皮革去毛：降低硫化物依賴的生物製程選項

傳統皮革去毛常依賴強鹼與硫化物，能有效破壞毛髮與表皮組織，但也帶來高污染負荷、氣味、安全與廢水處理壓力。Keratinase 的應用邏輯是針對毛髮角蛋白與毛根相關組織進行選擇性分解，讓毛從皮面鬆脫，同時盡量保留真皮膠原結構，降低傳統化學品用量或處理強度 [6]。

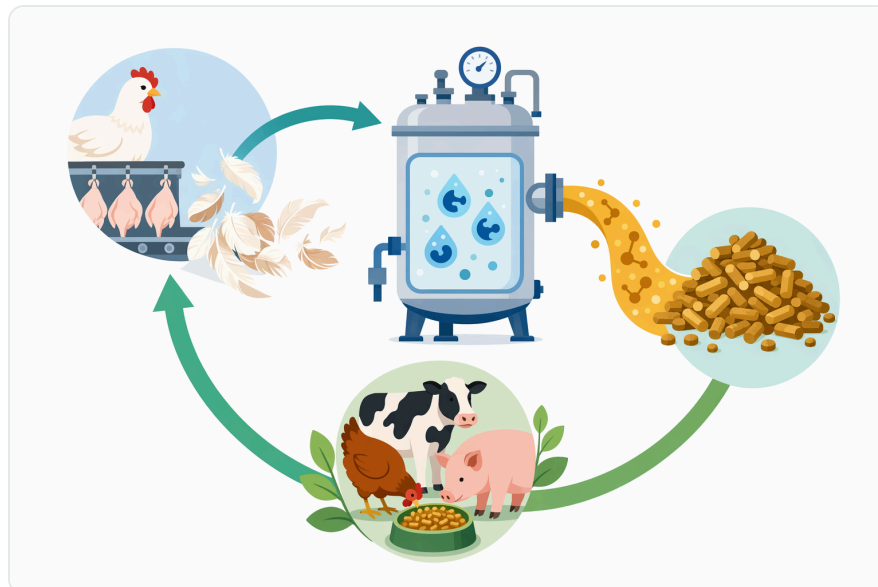


Figure 4. 角蛋白酶可將家禽羽毛廢棄物轉化為水解產物，而非僅將羽毛視為需處置的廢料，從而支持蛋白質的循環回收。

皮革應用的關鍵風險是膠原破壞。理想的 *keratinase* 或角蛋白分解系統，應具有足夠角蛋白分解能力，但不應對膠原造成過度水解。*Acinetobacter* sp. R-1 來源金屬型 *keratinase* 的研究特別提到低膠原蛋白酶活性與皮革應用潛力，代表未來皮革酵素方案會更重視「角蛋白選擇性」而不是單純蛋白酶強度 [6]。

與化學去毛相比，酵素去毛通常需要更精細的製程控制。若反應不足，毛根殘留會影響後續浸灰、鞣製與成革外觀；若反應過度，則可能影響粒面品質與機械性能。因此，*keratinase* 在皮革製程中的價值，通常來自降低污染負荷、改善操作環境與提高製程精準度，而不是完全取代所有化學步驟 [7]。

洗劑、清潔與工業去污：蛋白污垢的延伸應用

Keratinase 在洗劑中的潛力來自其對角質、皮屑、毛髮碎屑與蛋白性污垢的水解能力。與常見洗劑蛋白酶相比，*keratinase* 的差異在於能處理更具結構抗性的角蛋白類基質；若能與界面活性劑、其他酵素與配方鹽類相容，便可能在低溫、溫和或特殊去污場景中提供附加功能 [4]。

近年也有研究聚焦於冷適應、洗劑穩定或鹼性穩定 *keratinase*。例如 *Penicillium oxalicum* AUMC 15084 被報導可利用高蛋白羽毛廢棄物進行冷適應且具洗劑穩定性的 *keratinase* 生產；*Amycolatopsis* sp. BJA-103 的新型鹼性穩定 *keratinase* 研究則從生化特性與分子對接角度分析其穩定性與應用潛力。這些方向反映出清潔與工業配方更重視「環境適應性」與「配方耐受性」 [9]。

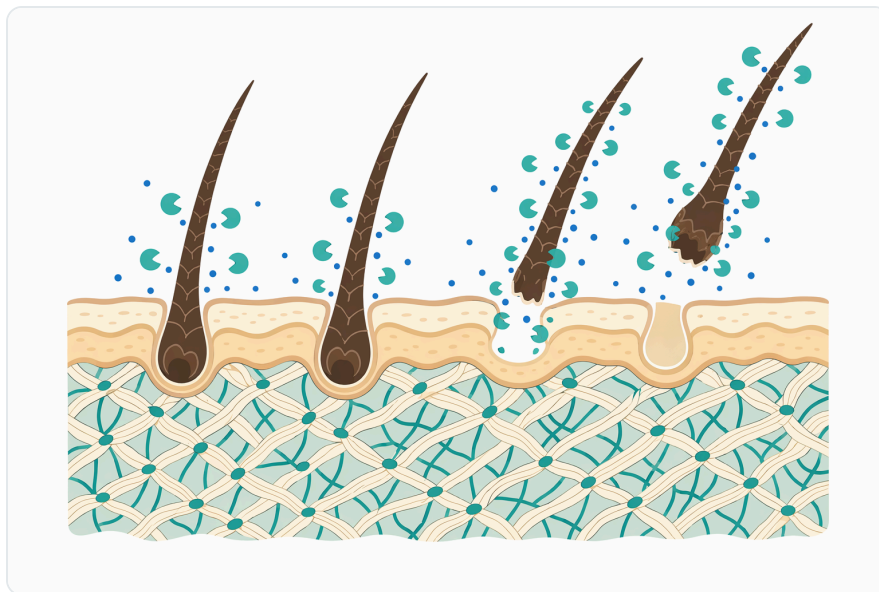


Figure 5. 皮革脫毛需要攻擊毛髮結構中的角蛋白，同時限制對富含膠原蛋白的皮革基質造成損傷。

然而，洗劑應用不能只看酵素本身能否分解角蛋白，還要看儲存期間是否穩定、是否被氧化劑或界面活性劑抑制、是否與其他酵素相容，以及是否符合最終市場對過敏原與標示的要求。因此，*keratinase* 在洗劑中較適合作為功能性蛋白酶候選，而非所有配方皆通用的標準成分 [4]。

不同來源 Keratinase 的差異：菌種、酵素類型與應用取向

不同來源的 keratinase 可能表現出明顯差異。真菌 keratinase 常被研究於角蛋白分解與生物轉化，細菌來源則常見於皮革、羽毛水解與工業酵素開發；放線菌來源則可能提供耐鹼或特定穩定性特徵。Paecilomyces marquandii 與 Doratomyces microsporus 的真菌角蛋白分解蛋白酶比較研究指出，真菌 keratinase 與已知蛋白酶之間既有相似性，也有特異性，說明來源差異會影響底物偏好與應用定位 [10]。

來源或研究方向	常見特徵	可能應用	需注意的技術重點
細菌 keratinase	反應速度快、易與工業發酵研究連結	羽毛水解、皮革去毛、廢棄物資源化	底物選擇性、穩定性、放大一致性
真菌 keratinase	對角蛋白基質具多樣分解能力	羽毛、毛髮、農業氮源、特殊生物處理	反應時間、產物組成、培養條件
金屬型 keratinase	可能受金屬離子與抑制因子影響	皮革、生物加工	膠原副作用與製程相容性
工程化 keratinase	透過活性位點或表現策略改善特性	高效率降解、耐熱或特定底物	商業化成熟度與法規定位

基因工程與蛋白質工程正逐漸改變 keratinase 的開發方式。針對 S1' 底物結合口袋的理性工程研究顯示，透過改變底物結合區域，可提高耐熱 keratinase 對角蛋白降解的效率與專一性；這對工業使用端而言，代表未來產品可能不只以來源菌種區分，也會以「針對特定基質最佳化」的功能特徵來區分 [11]。

另一方面，底物特異性研究也提醒使用端：不同 keratinase 對羽毛、羊毛、魚鱗、毛髮或可溶性蛋白底物的表現不一定一致。Bacillus megaterium UCM B-5710 keratinase 的底物特異性研究即指出，keratinase 可對多種蛋白基質展現不同程度作用；因此，應用端在評估時應以目標基質與最終產品品質為核心，而不是只以單一模型底物結果判斷 [12]。

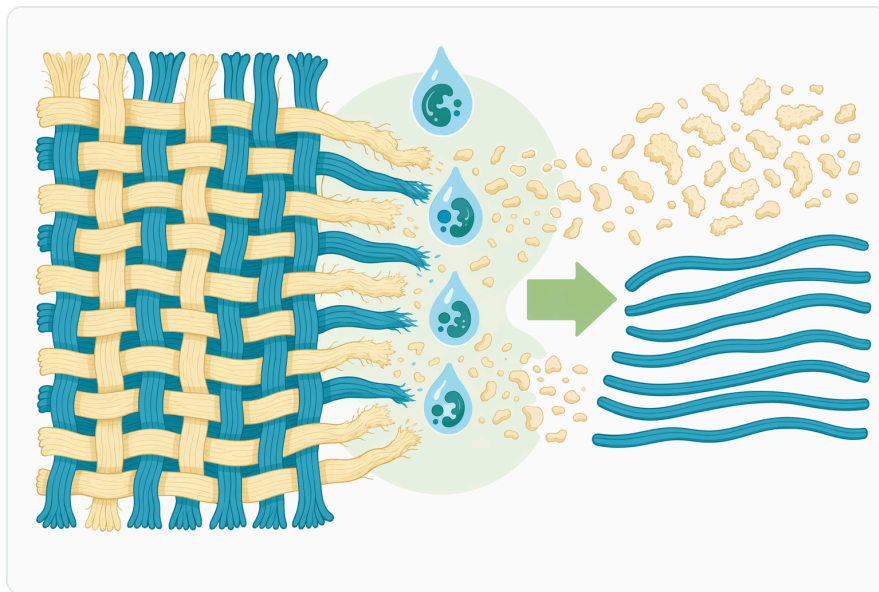


Figure 6. 角蛋白酶可用於紡織領域，以改質羊毛角蛋白，或協助將羊毛從聚酯混紡材料中分離。

製程整合：Keratinase 在工廠流程中通常扮演什麼角色？

在實務製程中，keratinase 常被放在「預處理後的生物轉化段」或「化學處理減量段」。例如羽毛處理可先經清洗、破碎或熱處理，使基質更容易與酵素接觸；接著加入 keratinase 進行水解；最後再依用途進行固液分離、濃縮、乾燥、調配或發酵後處理。這種流程設計的目的，是讓酵素作用集中在最能創造價值的位置，而不是讓酵素承擔所有物理破壞任務 [13]。

在紡織與皮革場景中，keratinase 更像是「選擇性表面處理工具」。羊毛表面改質需要控制纖維損傷，皮革去毛需要避免膠原破壞，因此酵素處理往往與既有濕加工流程銜接，而不是完全獨立存在。這類應用的關鍵績效指標通常包括纖維強力、手感、去毛完整度、廢水負荷、成品外觀與後續加工穩定性 [8]。

對廢棄物資源化而言，keratinase 的流程價值在於降低角蛋白廢棄物的惰性。羽毛、毛髮與魚鱗若未經處理，降解速度慢且可利用性低；經酵素水解後，產物可進一步成為飼料蛋白水解物、微生物培養基氮源、肥料原料或其他生物基材料成分。魚鱗來源微生物與 keratinase 生產研究也顯示，非羽毛角蛋白廢棄物同樣可作為探索 keratinase 生產與應用的基質 [14]。

效益與限制：哪些主張有較強證據，哪些仍需保守看待？

目前文獻對 keratinase 的強證據主要集中在三個方向：第一，微生物或酵素系統能促進羽毛、羊毛等角蛋白材料降解；第二，羽毛蛋白水解可提高資源化潛力；第三，皮革去毛與紡織纖維處理具可行性。這些方向有實驗室、中試或工業應用導向研究支持，因此可視為 keratinase 最具現實商業意義的應用群 [3]。



Figure 7. 角蛋白酶的應用包括飼料與羽毛粉水解、羽毛廢棄物資源化、皮革脫毛、羊毛與紡織品加工，以及清除富含角蛋白的蛋白質殘留物。

較需要保守看待的，是所有涉及人體接觸、高附加價值保健或化妝品宣稱的應用。雖然 *keratinase* 理論上可分解皮膚角質與毛髮蛋白，但人體安全性、刺激性、過敏性、配方穩定性與法規分類都比工業廢棄物處理更複雜。若用於個人護理或特殊清潔產品，應依最終市場法規與配方安全要求進行更嚴謹的產品開發，而不能直接套用羽毛水解或皮革去毛的資料 [10]。

另一個限制是原料變異性。羽毛來源、清洗狀態、脂質殘留、灰分、乾燥方式、纖維尺寸與前處理條件，都會影響 *keratinase* 的接觸與水解效果；羊毛與皮革亦會因品種、加工歷史與染整殘留而出現差異。因此，*keratinase* 的效益通常需要以實際基質驗證，而不是只以文獻中的單一材料推論到所有現場原料 [4]。

Enzymes.bio 供應資訊與文件交付方式

Enzymes.bio 供應 *keratinase* 粉末，定位為 B2B 使用端可線上購買的酵素產品，並以 1 kg 單位銷售。Enzymes.bio 是供應商，並非製造商或實驗室；因此，使用端在閱讀產品資訊時，應把它視為商業供應與技術支援資料，而不是製造端研發報告或第三方檢測報告。

對於工業與飼料相關使用端，CoA 與 SDS 會隨訂單一併提供。CoA 可協助批次文件管理，SDS 則用於倉儲、搬運、職業安全與風險溝通；粉末型酵素在操作時通常需避免粉塵吸入與皮膚、眼睛接觸，現場防護仍應依 SDS 與公司內部 EHS 規範執行。



Figure 8. 角蛋白酶產品應依照工業衛生規範及所提供的安全文件進行處理。

結論：Keratinase 的商業價值在於「角蛋白資源化」

Keratinase 的核心價值不是單純取代一般蛋白酶，而是處理一般蛋白酶難以有效分解的角蛋白材料。對羽毛與動物副產物產業，它可協助把低利用度廢棄物轉為可利用蛋白水解物；對紡織與皮革產業，它提供較低化學負荷的表面處理、纖維分離或去毛選項；對清潔與資源化應用，它則是支援蛋白污垢處理與有機氮回收的功能性酵素工具 [8]。

從研究趨勢來看，未來 keratinase 的競爭重點會從「能否分解角蛋白」轉向「是否能在指定基質、指定流程與指定品質目標下穩定作用」。底物特異性、膠原副作用、洗劑相容性、耐溫耐鹼性與工程化改良，都會影響其在不同產業中的實際價值 [11]。

對 B2B 使用端而言，keratinase 最適合被視為製程設計中的生物催化模組：它能降低角蛋白材料的處理難度，但仍需要與原料前處理、反應條件、下游分離、品質規格與法規要求共同設計。當目標是羽毛蛋白回收、羊毛紡織循環或皮革低污染去毛時，keratinase 已具備相當明確的文獻基礎與應用邏輯 [6]。

線上訂購 Keratinase

以 1 kg 單位販售，現貨供應，可立即出貨。請直接於我們的線上商店下單並付款，我們將為您處理訂單。每筆訂單皆附分析證明書與安全資料表。

[購買 Keratinase →](#)

參考文獻

依首次引用順序編號。所有來源皆為開放取用資料，並於發布時確認可連線；正文中的引用編號會連結至此。

1. Cao, Z., Song, X., Zhu, Q., Wang, J., Gong, R., Zhang, Y., & Wang, G. (2021). Dynamic action of keratinase on wool fibre tracked by FITC-labelled enzyme. *Biocatalysis and Biotransformation*, 39, 214 - 220.
2. Fang, Z., Zhang, J., Liu, B., Du, G., & Chen, J. (2015). Insight into the substrate specificity of keratinase KerSMD from *Stenotrophomonas maltophilia* by site-directed mutagenesis studies in the S1 pocket. *RSC Advances*, 5, 74953-74960.
3. Fang, Z., Zhang, J., Liu, B., Du, G., & Chen, J. (2013). Biodegradation of wool waste and keratinase production in scale-up fermenter with different strategies by *Stenotrophomonas maltophilia* BBE11-1. *Bioresource Technology*, 140, 286-91 .
4. Abdel-Latif, A. M. A., Abo-Dahab, N., Moharram, A. M., Hassane, A., & Al-Bedak, O. (2025). Sustainable exploitation of high-protein feather waste for green production of cold-adapted and detergent-stable keratinase by *Penicillium oxalicum* AUMC 15084. *World Journal of Microbiology & Biotechnology*, 41.
5. Saeed, M., Yan, M., Ni, Z., Hussain, N., & Chen, H. (2024). Molecular strategies to enhance the keratinase gene expression and its potential implications in poultry feed industry. *Poultry Science*, 103.
6. Zhang, R., Gong, J., Zhang, D., Su, C., Hou, Y., Li, H., Jin-Shi, ... et al. (2015). A metallo-keratinase from a newly isolated *Acinetobacter* sp. R-1 with low collagenase activity and its biotechnological application potential in leather industry. *Bioprocess and biosystems engineering (Print)*, 39, 193-204.
7. Srivastava, B., Singh, H., Khatri, M., Singh, G., & Arya, S. (2020). Immobilization of keratinase on chitosan grafted- β -cyclodextrin for the improvement of the enzyme properties and application of free keratinase in the textile industry. *International Journal of Biological Macromolecules*.
8. Navone, L., Moffitt, K., Hansen, K., Blinco, J., Payne, A., & Speight, R. (2020). Closing the textile loop: Enzymatic fibre separation and recycling of wool/polyester fabric blends. *Waste Management*, 102, 149-160 .
9. Yan, X., Zhou, H., Wang, R., Chen, H., Wen, B., Dong, M., Xue, Q., ... et al. (2025). Biochemical characterization and molecular docking of a novel alkaline-stable keratinase from *Amycolatopsis* sp. BJA-103. *International Journal of Biological Macromolecules*, 139669 .
10. Gradišar, H., Friedrich, J., Križaj, I., & Jerala, R. (2005). Similarities and Specificities of Fungal Keratinolytic Proteases: Comparison of Keratinases of *Paecilomyces marquandii* and *Doratomyces microsporus* to Some Known Proteases. *Applied and Environmental Microbiology*, 71, 3420 - 3426.
11. Pei, X., Fan, H., Jiao, D., Li, F., He, Y., Wu, Q., Liu, X., ... et al. (2024). Rational engineering S1' substrate binding pocket to enhance substrate specificity and catalytic activity of thermal-stable keratinase for efficient keratin degradation. *International Journal of Biological Macromolecules*, 130688 .
12. Avdiyuk, K. V., & Varbanets, L. (2023). Substrate Specificity of *Bacillus megaterium* U C M B-5710 Keratinase. *Mikrobiologichnyi zhurnal*.
13. Al-Sa'ady, A. (2023). Optimize and Purification of Keratinase Produced from Local *Aspergillus Terreus* A13 Isolate Using A Feather as Substrate. *Iraqi Journal of Science*.

14. Abba, O., Anyaoha, V., Abbah, D., Ekwegbalu, E., & Odibo, F. (2024). Production and characterization of keratinase enzymes from Alcaligenes faecalis and Pseudomonas aeruginosa isolated from decayed fish scales. *International Journal of Science for Global Sustainability*.

聯絡 Enzymes.bio

對訂單有疑問嗎？我們的團隊很樂意協助。

電子郵件 wholesale@enzymes.bio 電話（美國） **+1 (507) 428-6057**

聯絡我們 →

 **400+** B2B 客戶  **60+** 大學研究合作夥伴  **54** 服務遍及全球

© 2026 Enzymes.bio · 工業與食品加工用酵素供應 · 非供人體食用或零售銷售。