

Catalase Enzyme For Wastewater Treatment : 過氧化氫酶用於廢水處理與殘留 H₂O₂ 去除的技術說明

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

Catalase Enzyme For Wastewater Treatment (過氧化氫酶) 在廢水處理中的主要用途，是將殘留過氧化氫分解為水與氧，降低先進氧化、漂白、消毒或化學預處理後的氧化劑負荷。其價值不在於直接分解所有有機污染物，而是在 AOP 與生物處理之間建立「去除殘留氧化劑」的緩衝步驟，保護活性污泥、生物膜與後段製程穩定性。Enzymes.bio 供應的 Catalase Enzyme For Wastewater Treatment 以 1 kg 單位在線上販售，CoA 與 SDS 會隨訂單一併提供；Enzymes.bio 為供應商，並非製造商或實驗室。

Catalase 是什麼：以 H₂O₂ 為核心底物的過氧化氫酶

Catalase (過氧化氫酶) 是一類廣泛存在於微生物、植物與動物細胞中的抗氧化酵素，主要功能是催化過氧化氫分解。其典型反應可表示為： $2 \text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$ 。這個反應看似簡單，卻是生物系統中控制氧化壓力的重要機制，因為 H₂O₂ 雖然比羥基自由基等活性氧溫和，但在金屬離子或光化學條件下可進一步引發更高反應性的氧化物種。^[1]

在廢水處理情境中，外加 catalase 的目標通常不是「增加氧化力」，而是「終止或緩和氧化力」。許多工業流程會刻意使用 H₂O₂ 作為漂白劑、消毒劑、硫化物控制劑、氨氮或有機污染物前處理劑；但當反應完成後，殘留 H₂O₂ 可能繼續攻擊微生物細胞膜、酵素系統與胞外聚合物，造成後續生物處理不穩定。因此，catalase 的定位更接近工藝鏈中的去氧化劑調節工具，而不是一般意義上的污染物氧化劑。^[2]

為什麼廢水流程會需要去除殘留過氧化氫

過氧化氫在廢水工程中很常見。它可與紫外光、鐵鹽、臭氧或其他催化材料搭配，用於先進氧化程序 (Advanced Oxidation Processes, AOPs)，以降解抗生素、染料、1,4-二氧六環、內分泌干擾物與其他難降解微污染物。近年多篇研究顯示，UV/H₂O₂、UV/氯、H₂O₂ 輔助光催化與其他 AOP 組合，確實可提升特定污染物的轉化或去除，但同時也使後段必須面對殘留氧化劑與副產物管理問題。^[3]

殘留 H_2O_2 的風險主要有三類。第一，它會抑制活性污泥、生物膜與膜生物反應器中的微生物功能，影響有機物降解、硝化、反硝化與磷去除。第二，它可能干擾後續化學單元，例如還原、混凝、吸附或膜分離前的水質穩定。第三，在放流水中殘留過量氧化劑，可能對下游接收水體與生態微生物群落造成氧化壓力。生物膜技術與工業廢水處理回顧都指出，微生物群落穩定性、胞外聚合物與表面附著結構，是連續處理效率的重要基礎；長時間氧化衝擊會削弱這些結構。^[4]

在紡織、食品、造紙與部分生技相關流程中， H_2O_2 也常用於漂白或衛生處理。以棉織物漂白為例，文獻記載 *catalase* 可用於去除漂白後殘餘 H_2O_2 ，避免殘留氧化劑影響後續染整或處理步驟。這類應用與廢水處理具有相同邏輯：當 H_2O_2 完成其氧化任務後，必須被有效移除，才能讓後段流程回到可控狀態。^[5]

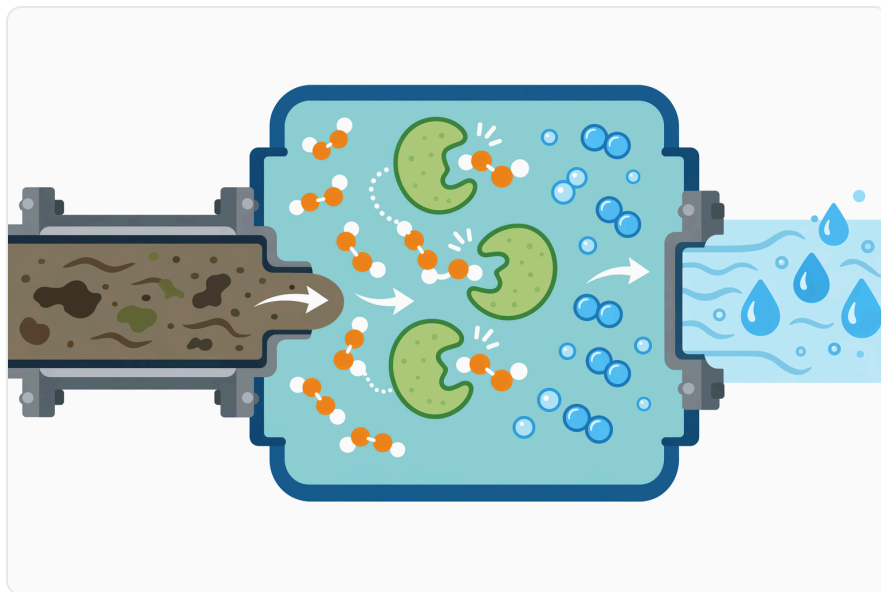


Figure 1. 過氧化氫酶可將工業廢水中殘留的過氧化氫分解為水和氧氣，而不需添加化學計量的中和藥劑。

作用機制：Catalase 如何把殘留 H_2O_2 轉化為水與氧

Catalase 的活性中心通常含有血基質鐵 (heme iron) 或其他金屬輔因子，能在氧化還原循環中快速接受並轉移氧化當量。簡化來說，第一個 H_2O_2 分子會氧化酵素活性中心，形成高氧化態中間體；第二個 H_2O_2 分子再將中間體還原回原狀，同時釋放水與氧氣。此循環使 *catalase* 能以催化方式反覆轉化 H_2O_2 ，而不是像還原劑那樣被一次性消耗。^[1]

在工程上，這個機制帶來三個具體效果。首先， H_2O_2 濃度會隨接觸與混合而下降，降低對微生物酵素、細胞膜脂質與 DNA 的氧化壓力。其次，反應產生的氧氣可能短暫提升局部溶解氧，但這並不等同於長期曝氣替代方案，因為氧氣生成取決於 H_2O_2 殘量、混合與傳質條件。第三，*catalase* 的作用具有底物選擇性：它主要處理 H_2O_2 ，不應被描述為能廣泛直接分解所有難降有機污染物。^[2]

需要特別區分的是，「 H_2O_2 參與污染物氧化」與「catalase 去除 H_2O_2 」屬於不同階段。AOP 中， H_2O_2 可在 UV 或催化條件下產生活性氧物種，用於攻擊污染物；但在反應後段，若 H_2O_2 未被移除，反而可能抑制生物處理或造成出水不穩定。Catalase 的角色是將氧化程序從高反應性狀態拉回較溫和狀態，讓後續微生物或物化單元能正常運作。^[6]

在 AOP 與生物處理串聯中的定位

許多工業廢水處理流程會採用「前段化學或光化學破壞污染物結構，後段生物處理完成礦化或穩定化」的設計。例如，UV/ H_2O_2 已被研究用於市政或三級處理出水中的抗生素、抗反轉錄病毒藥物與其他微量污染物去除；但若後續仍有生物處理、濕地、膜生物反應器或排放至敏感水體，殘留 H_2O_2 的去留就會影響整體風險。^[7]

在此串聯中，catalase 可作為 AOP 後的「反應終止」或「氧化劑淬熄」步驟。與單純等待 H_2O_2 自然分解相比，酵素路徑的優點是反應方向明確，副產物主要為水與氧；與添加還原性化學品相比，catalase 通常不會引入大量額外鹽分或還原副產物。不過，實際適用性仍取決於水質基質、pH、溫度、抑制物與接觸設計。^[8]

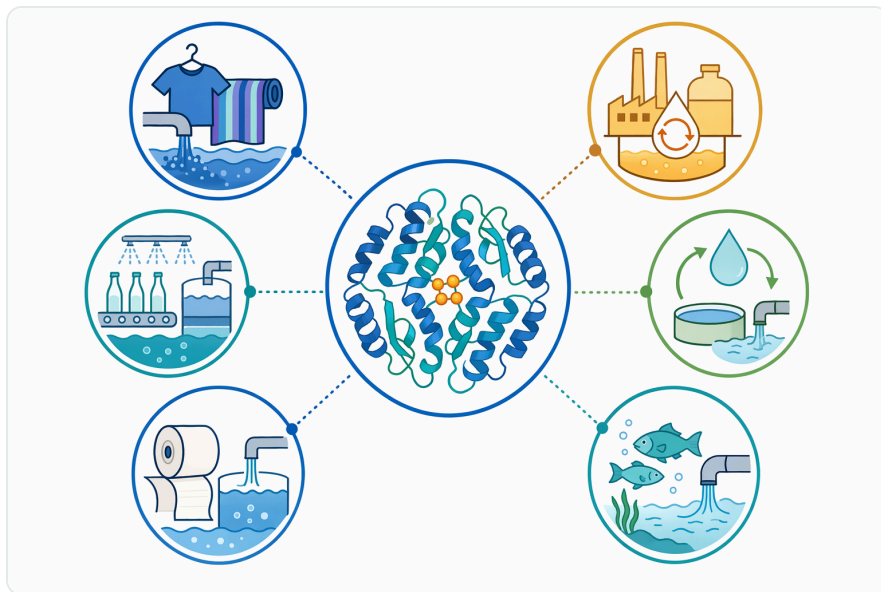


Figure 2. 含过氧化物的廢水可能來自紡織漂白、食品與飲料衛生處理、乳品相關水流、紙漿與造紙漂白、製藥清洗、醫院消毒、化學氧化以及工業清潔等過程。

以下表格整理 catalase 在不同後處理選項中的功能定位，幫助技術團隊理解它不是取代 AOP 或生物處理，而是介於兩者之間的工藝調節工具。

後處理選項	主要目的	對殘留 H ₂ O ₂ 的處理邏輯	可能優點	主要限制
Catalase 酵素處理	去除殘留 H ₂ O ₂ ，降低氧化壓力	將 H ₂ O ₂ 催化分解為水與氧	反應選擇性高，不以增加鹽分為主要代價	受 pH、溫度、抑制物與基質影響
自然衰減或延長停留	讓 H ₂ O ₂ 自行分解	依時間、光照、金屬與有機物緩慢消耗	操作簡單，不需額外材料	反應時間不可控，佔用池容
化學還原劑	以還原反應消耗氧化劑	透過化學計量反應降低氧化性	反應可快速發生	可能增加鹽分、殘留還原劑或副產物
活性碳 / 吸附單元	去除部分有機污染物或氧化副產物	對 H ₂ O ₂ 不是專一設計	可同時處理部分有機物	吸附容量、再生與競爭吸附需管理
後段生物處理	生物降解有機物、氮磷轉化	不適合承受高氧化劑衝擊	完成穩定化與礦化	殘留 H ₂ O ₂ 可能抑制微生物

對微生物系統的保護：活性污泥、生物膜與濕地單元

廢水生物處理依賴複雜微生物群落，而不是單一菌種。活性污泥中的硝化菌、反硝化菌、異營降解菌與聚磷菌，需要在相對穩定的氧化還原環境中協同工作；生物膜系統則更依賴胞外聚合物 (EPS) 維持結構、傳質與微環境。研究指出，微生物間的電子轉移、污染物降解功能與群落互作，會共同決定自然與工程環境中的污染物去除表現。^[9]

殘留 H₂O₂ 對這些系統的影響並非只限於「殺菌」。較低但持續的氧化壓力可能改變膜脂質、蛋白質構形與細胞外基質，讓群落活性下降但不一定立即崩潰；這種狀態在工業現場常表現為出水 COD 波動、硝化效率下降、污泥沉降性變差或生物膜剝落。EPS 在污染物吸附、反應界面與微生物防護中扮演重要角色，但也可能被氧化條件改變其結構與功能。^[10]

在人工濕地或自然基礎處理單元中，微生物、植物根圈與基質共同參與有機物、氮、磷與部分微污染物去除。這些系統通常不適合承受持續氧化劑衝擊，因為根圈微生物多樣性與功能基因表現會受到污染物與氧化還原條件共同影響。因此，在含 H₂O₂ 的前處理出水進入此類生物單元前，使用 catalase 降低殘氧化劑具有合理的工藝基礎。^[11]

直接污染物降解與間接促進的差異

將 catalase 用於廢水處理時，最容易被誤解的一點，是把它描述成能直接降解各種有機污染物。事實上，catalase 的主要底物是 H₂O₂；它對抗生素、染料、農藥或其他持久性有機污染物的直接分解能力，不應被當作核心賣點。污染物降解酵素領域涵蓋氧化還原酶、水解酶、脫鹵酶、漆酶、過氧化物酶等多種類型，各自具有不同底物與反應機制。^[2]

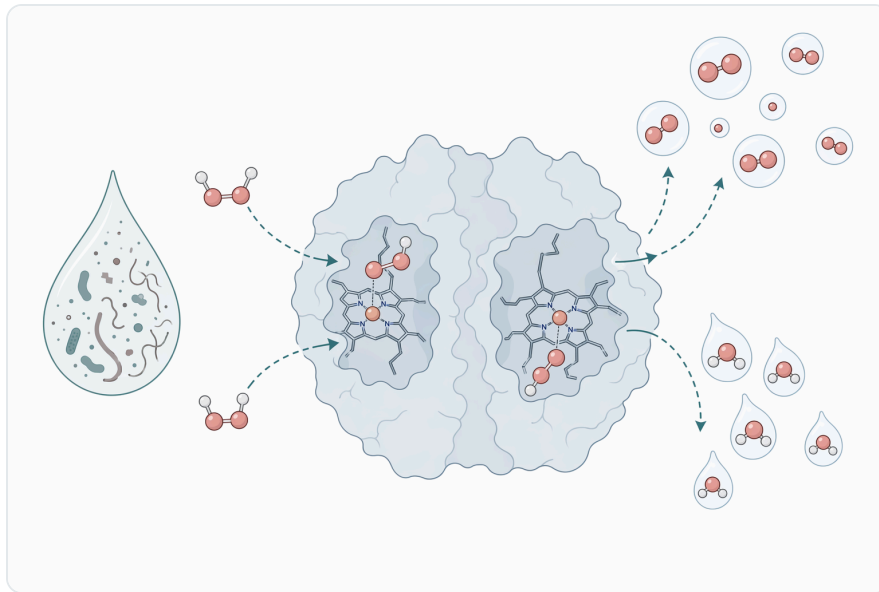


Figure 3. 過氧化氫酶會循環利用其活性位點，使兩個過氧化氫分子轉化為兩個水分子和一個氧分子。

然而，catalase 可以「間接」支持污染物去除。當 AOP 將大分子或難降解結構轉化為較可生物利用的中間產物後，若殘留 H_2O_2 抑制了後段微生物，整體處理效率仍可能受限。此時 catalase 透過消除殘氧化劑，使微生物群落恢復代謝，進而維持後段對可降解中間物、氮氮或有機碳的處理能力。這是工藝協同效果，不等於 catalase 本身直接氧化污染物。[12]

這種區分對技術文件與工程溝通很重要。若目標是破壞抗生素分子、染料發色團或含磷有機污染物，AOP、光催化、吸附、專一酵素或化學處理可能才是主反應單元；若目標是讓上述處理完成後的水進入生物系統前降低 H_2O_2 ，catalase 才是更直接的工具。近期關於抗生素與 AOP 的回顧也顯示，污染物去除通常需要吸附、氧化與後處理整合，而非單一材料或單一步驟即可解決所有問題。[6]

可能應用場景：工業廢水與流程水中的殘氧化劑管理

第一個典型場景是 AOP 後處理。UV/ H_2O_2 、Fenton 類反應、 H_2O_2 輔助光催化或碳酸氫鹽 / H_2O_2 系統都可能在反應後留下不同程度的 H_2O_2 。針對染整廢水，碳酸氫鹽 - 過氧化氫系統已被研究用於有機污染物降解與脫色；若其後接續生物處理，殘留 H_2O_2 管理便成為工藝銜接重點。[13]

第二個場景是硫化氫與臭味控制。城市污水管線或泵站有時會使用 H_2O_2 進行原位硫化氫控制，以降低腐蝕與臭味風險。這類操作的核心目標是氧化硫化物，但若下游處理單元對氧化劑敏感，殘留 H_2O_2 仍需納入整體水質與微生物衝擊評估。[14]

第三個場景是高強度氮氮或特殊工業廢水前處理。有研究以 H_2O_2 前處理結合電化學氧化，處理半導體等高強度氮氮廢水；此類流程中，氧化劑、電化學反應與後段單元之間的銜接，會影響整體處理穩定性與能耗。Catalase 在這類架構中的潛在位置，是在氧化完成後降低 H_2O_2 殘留，而非取代主氧化

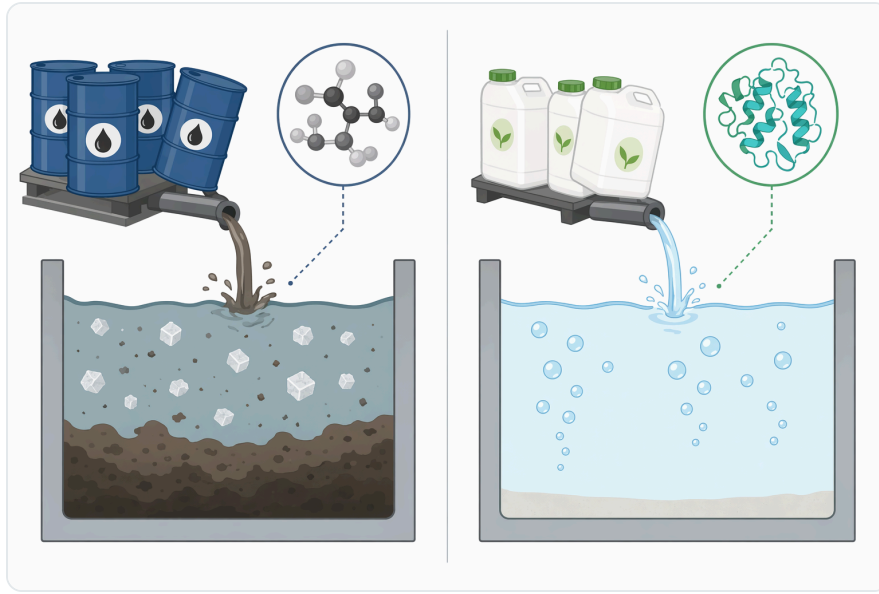


Figure 4. 過氧化氫酶不同於亞硫酸鹽類淬滅法，因為其去除過氧化氫的反應產物是水和氧氣，而不是由中和劑產生的溶解性殘留物。

第四個場景是漂白、清洗或消毒後的流程水。紡織漂白後以 catalase 去除殘留 H_2O_2 的文獻，顯示其可作為後續染整或排水前的去氧化劑步驟；食品與生技相關流程同樣可能需要降低殘氧化劑，以保護後續生物材料、包材或污水處理微生物。[5]

操作條件如何影響 Catalase 的表現

Catalase 是蛋白質型催化劑，因此其表現受水質與環境條件影響。pH、溫度、鹽度、有機溶劑、表面活性劑、重金屬、強氧化劑與固體懸浮物，都可能改變酵素構形、活性中心或底物接觸效率。工業廢水的複雜性遠高於緩衝溶液，因此同一種酵素在不同現場可能呈現不同反應速度與穩定性。[16]

混合與接觸設計同樣重要。即使 catalase 對 H_2O_2 具有明確反應機制，若酵素未能與含 H_2O_2 水流充分接觸，或水流中存在分層、短流、局部高濃度氧化劑，也可能造成反應不完全或局部酵素失活。對連續式系統而言，接觸槽、靜態混合、回流與投加點位置都會影響實際結果；這些屬於工程設計問題，不能單靠酵素本身解決。

另外， H_2O_2 濃度本身也需要被視為反應與失活風險的雙重因素。適量 H_2O_2 是 catalase 的底物，但過高氧化負荷可能加速蛋白質氧化或活性中心損傷。若水中同時存在可促進自由基生成的金屬或光化學條件，氧化環境可能更劇烈；因此，catalase 最適合被放在氧化主反應已達成目標、但仍需降低殘留 H_2O_2 的位置。[8]

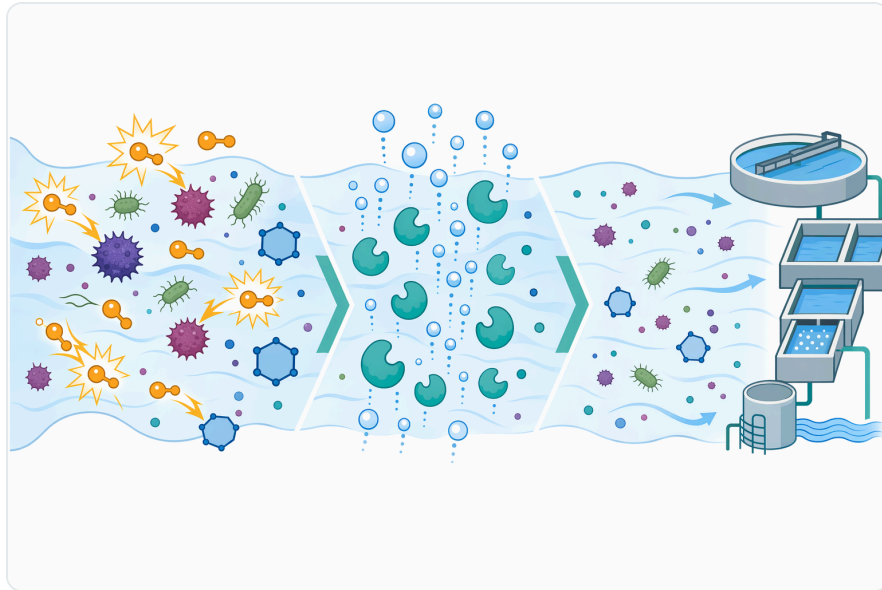


Figure 5. 過氧化氫酶可去除過氧化氫殘留的氧化能力並釋放氧氣，但其本身不會去除廢水中的其他污染物。

固定化與載體化：延長使用與連續處理的工程方向

在某些連續處理或回收使用情境中，游離酵素可能面臨流失、分離困難與穩定性不足等問題。固定化酵素技術可將 catalase 連結或包埋於載體上，例如多醣材料、膜、顆粒、磁性材料或其他多孔結構，以提升可回收性與操作穩定性。危害污染物修復領域的固定化酵素回顧指出，固定化可改善酵素重複使用與環境耐受性，但也可能帶來傳質限制與載體成本。^[16]

針對 catalase，已有研究將其固定於戊二醛活化幾丁聚醣等材料上，並評估其用於人工廢水中 H_2O_2 去除的可行性。這類研究支持「固定化 catalase 可作為 H_2O_2 去除工具」的概念，但不同載體、廢水基質與反應器形式之間差異很大，不能直接把實驗條件視為所有工業現場的保證結果。^[8]

奈米載體與酵素負載材料也是近年研究方向。酵素載入奈米粒子可改善局部濃度、保護酵素或提供回收功能，但在實際廢水中仍需考量顆粒釋放、環境安全、膜污染、固液分離與成本。對多數企業而言，游離 catalase 適合用於較單純的批次或接觸槽處理；固定化或載體化則較適合有連續化、回收或長期運行需求的工程方案。^[17]

與其他廢水處理技術的整合

Catalase 不應被視為單獨完成廢水處理的完整方案，而是與 AOP、生物處理、膜處理、吸附或沉澱等單元搭配的功能材料。現代工業廢水處理越來越依賴混合流程，原因是單一技術通常難以同時處理高鹽、有毒有機物、氨氮、色度、微污染物與生物抑制性。膜生物反應器結合人工智慧控制的研究趨勢，也反映出工業廢水處理正在走向多參數、動態化與整合式管理。^[18]

在一個典型整合流程中，前段 AOP 用於降低毒性或打斷難降解結構；中段 catalase 去除殘留 H_2O_2 ；後段生物處理或膜生物反應器完成有機碳與營養鹽處理；最後可再以吸附、過濾或消毒進行拋光。這樣的設計邏輯能避免直接讓微生物承受 AOP 後的殘氧化劑，同時保留 AOP 對難降污染物的處理優勢。[12]

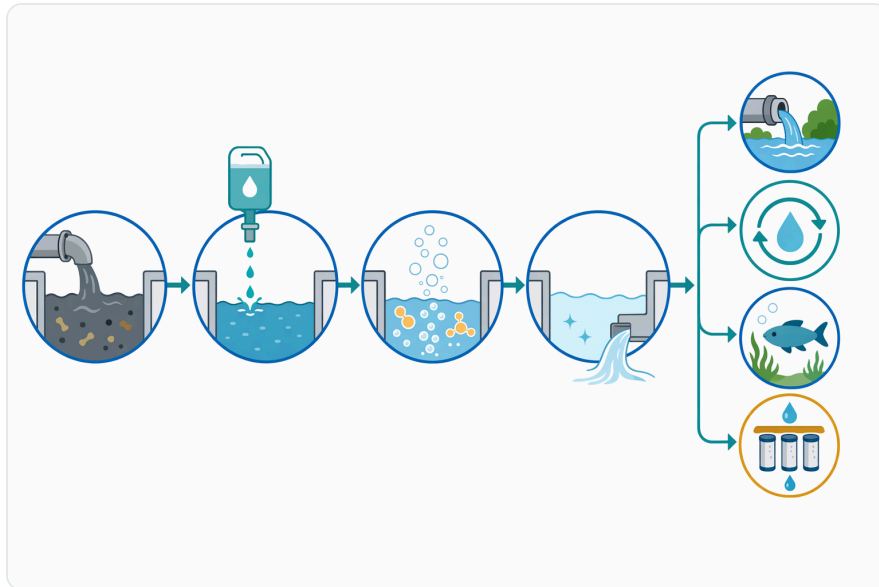


Figure 6. 實務上的過氧化氫酶處理步驟取決於水流相容性、有效混合、足夠接觸時間、氧氣管理，以及確認殘留過氧化氫已降低。

若流程中包含生物膜或顆粒污泥，catalase 的價值可能更加明顯。生物膜技術仰賴內外層氧、底物與電子受體梯度，過度氧化環境可能破壞其微環境分區。以去除 H_2O_2 作為中間緩衝，可降低氧化衝擊對群落結構與功能分工的干擾。[4]

安全與品質文件：以實際訂單文件為準

Catalase 屬於蛋白質類生物製劑，操作時應避免吸入粉塵、長時間皮膚接觸或不必要的氣溶膠暴露；若與含強氧化劑、強酸鹼或其他反應性化學品的廢水接觸，也應考量反應放熱、氣體釋放與局部泡沫。產品實際安全處置、儲存條件與個人防護，應依隨訂單提供的 SDS 執行。

Enzymes.bio 供應 Catalase Enzyme For Wastewater Treatment，產品以 1 kg 單位在線上直接販售；CoA 與 SDS 會隨訂單一併提供。需要明確的是，Enzymes.bio 是供應商，不是製造商，也不是實驗室；因此，技術導入時應由使用者的工程、環安與水處理團隊，依現場水質與既有流程進行內部評估與放大整合。

實務導入時的判斷重點

導入 catalase 前，最重要的判斷是：流程中的主要問題是否確實來自殘留 H_2O_2 。若出水不穩定是由高鹽、重金屬、毒性有機物、營養失衡、污泥齡不當或曝氣不足造成，單靠 catalase 不會解決根本問題。相反地，若問題發生在 H_2O_2 、UV/ H_2O_2 、Fenton、漂白或消毒後，且後段微生物活性出現氧化衝擊跡象，catalase 才具有明確的工藝相關性。^[3]

其次，需要注意 catalase 的目標是降低殘氧化劑，而不是把前段氧化反應提前終止。若投加位置太早，可能削弱 AOP 對污染物的氧化效果；若投加位置太晚，殘留 H_2O_2 已經進入生物系統，則保護效果會下降。因此，較合理的位置通常是在主氧化反應完成後、進入生物或敏感後處理單元之前。

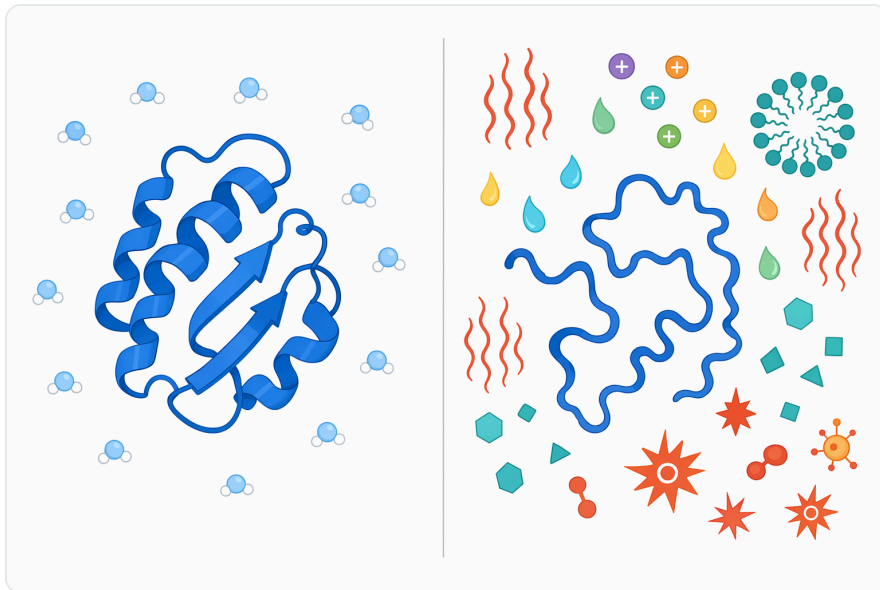


Figure 7. 當廢水條件破壞蛋白質結構或抑制酶的活性位點時，過氧化氫酶的效能可能會下降。

最後，成效應以流程結果判斷，而不只看單一參數。殘留 H_2O_2 下降固然重要，但後段活性污泥呼吸、硝化穩定性、COD 或 BOD 變化、色度、泡沫、膜污染趨勢與出水毒性，都可能反映 catalase 是否真正改善工藝鏈。這種整體觀點符合當代工業廢水處理對多單元整合與動態控制的方向。^[18]

技術結論：Catalase 的價值在於可控地結束 H_2O_2 氧化階段

Catalase Enzyme For Wastewater Treatment 的核心功能，是將廢水或流程水中的殘留 H_2O_2 轉化為水與氧，降低氧化壓力，保護後段生物處理、膜生物反應器、生物膜、濕地或製程敏感材料。其科學基礎明確，反應機制清楚；但它不應被描述成可直接降解所有有機污染物的萬用酵素。^[1]

在 AOP 與生物處理串聯流程中，catalase 特別適合扮演「氧化後調節」角色：前段用 H₂O₂ 參與污染物轉化，後段再用 catalase 移除殘留 H₂O₂，讓微生物系統回到較低氧化壓力的操作環境。對處理抗生素、染料、含硫臭味問題、漂白排水或高強度工業廢水的企業而言，這種定位比單純宣稱「提高去除率」更準確，也更符合文獻證據。^[6]

整體而言，catalase 的實務效益取決於水質基質、投加位置、接觸設計、pH、溫度與抑制因子管理。當流程中確有殘留 H₂O₂ 造成的後段抑制或出水氧化風險時，Catalase Enzyme For Wastewater Treatment 可作為具科學基礎的工藝輔助材料；當問題不是 H₂O₂ 時，則應回到整體廢水工程診斷，而非期待單一酵素解決所有處理挑戰。

線上訂購 Catalase Enzyme For Wastewater Treatment

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 Catalase Enzyme For Wastewater Treatment →](#)

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. Alhumaydhi, F., Younus, H., & Khan, M. A. (2025). Catalase Functions and Glycation: Their Central Roles in Oxidative Stress, Metabolic Disorders, and Neurodegeneration. *Catalysts*.
2. Xu, A., Zhang, X., Wu, S., Xu, N., Huang, Y., Yan, X., Zhou, J., ... et al. (2021). Pollutant Degrading Enzyme: Catalytic Mechanisms and Their Expanded Applications. *Molecules*, 26.
3. Schnabel, T., Mehling, S., Londong, J., & Springer, C. (2020). Hydrogen peroxide-assisted photocatalytic water treatment for the removal of anthropogenic trace substances from the effluent of wastewater treatment plants. *Water Science and Technology*, 82 10, 2019-2028 .
4. Maurya, A., Kumar, R., & Raj, A. (2023). Biofilm-based technology for industrial wastewater treatment: current technology, applications and future perspectives. *World Journal of Microbiology & Biotechnology*, 39.
5. Yu, Z., Zheng, H., Zhao, X., Li, S., Xu, J., & Song, H. (2016). High level extracellular production of a recombinant alkaline catalase in E. coli BL21 under ethanol stress and its application in hydrogen peroxide removal after cotton fabrics bleaching. *Bioresource Technology*, 214, 303-310 .
6. Gahrouei, A. E., Vakili, S., Zandifar, A., & Pourebrahimi, S. (2024). From Wastewater to Clean Water: Recent Advances on the Removal of Metronidazole, Ciprofloxacin, and Sulfamethoxazole Antibiotics from Water through Adsorption and Advanced Oxidation Processes (AOPs). *Environmental Research*, 119029 .

7. Ngumba, E., Gachanja, A., & Tuhkanen, T. (2020). Removal of selected antibiotics and antiretroviral drugs during post-treatment of municipal wastewater with UV, UV/chlorine and UV/hydrogen peroxide. *Water and Environment Journal*, 34.
8. Tabaru, I. N., & Türkhan, A. (2024). Immobilisation of catalase purified from mushroom (*Hydnum repandum*) onto glutaraldehyde-activated chitosan and characterisation: Its application for the removal of hydrogen peroxide from artificial wastewater. *Green Processing and Synthesis*, 13.
9. Zhou, Q., Li, R., Li, T., Zhou, R., Hou, Z., & Zhang, X. (2023). Interactions among microorganisms functionally active for electron transfer and pollutant degradation in natural environments. *Eco-Environment & Health*, 2, 3 - 15.
10. Wei, Z., Niu, S., Wei, Y., Liu, Y., Xu, Y., Yang, Y., Zhang, P., ... et al. (2023). The role of extracellular polymeric substances (EPS) in chemical-degradation of persistent organic pollutants in soil: A review. *Science of the Total Environment*, 168877 .
11. Wang, J., Long, Y., Yu, G., Wang, G., Zhou, Z., Li, P., Zhang, Y., ... et al. (2022). A Review on Microorganisms in Constructed Wetlands for Typical Pollutant Removal: Species, Function, and Diversity. *Frontiers in Microbiology*, 13.
12. Silva, J. R. P., Monteiro, M. A., Mendonça Ochs, S., Silva Moura, C., Fonseca, F. V., & Borges, C. P. (2020). Study of effects of pharmaceuticals on the activated sludge process combining advanced oxidation using ultraviolet/hydrogen peroxide to increase their removal and mineralization of wastewater. *Journal of environmental chemical engineering*, 104576.
13. Urbina-Suarez, N., Rivera-Caicedo, C., González-Delgado, Á., Barajas-solano, A. F., & Machuca-Martínez, F. (2023). Bicarbonate-Hydrogen Peroxide System for Treating Dyeing Wastewater: Degradation of Organic Pollutants and Color Removal. *Toxics*, 11.
14. Brahmi, A., & Abderafi, S. (2021). Hydrogen sulfide removal from wastewater using hydrogen peroxide in-situ treatment: Case study of Moroccan urban sewers. *Materials Today: Proceedings*.
15. Chung, S., Chung, J., & Chung, C. (2020). Enhanced electrochemical oxidation process with hydrogen peroxide pretreatment for removal of high strength ammonia from semiconductor wastewater. *Journal of water process engineering*, 37, 101425.
16. Yaashikaa, P. R., Devi, M. K., & Kumar, P. (2022). Advances in the application of immobilized enzyme for the remediation of hazardous pollutant: A review. *Chemosphere*, 134390 .
17. Karthik, V., kumar, P. S., Vo, D., Selvakumar, P., Gokulakrishnan, M., Keerthana, P., Audilakshmi, V., ... et al. (2021). Enzyme-loaded nanoparticles for the degradation of wastewater contaminants: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 19, 2331 - 2350.
18. Chang, H., Liu, Y., Keng, C., Jiang, H., & Hu, J. (2024). Challenges of industrial wastewater treatment: utilizing Membrane bioreactors (MBRs) in conjunction with artificial intelligence (AI) technology. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 41, 422 - 427.


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。