

高靜水壓技術 對牛乳品質之影響

◎畜產加工組／葉瑞涵、吳鈴彩、黃寂槐、郭卿雲

◎國立宜蘭大學／許馨云

前言

高靜水壓技術（High Pressure Processing, HPP）是一種非熱處理殺菌方法，可取代傳統熱處理殺菌，不但能提升食品安全，且對食品品質影響較小。HPP之主要原理有二，分別為勒沙特列原理（Le Chatelier principle）和等靜壓原理（isostatic principle）。勒沙特列原理是指，化學平衡是動態平衡，如果改變系統的濃度、溫度或壓力，系統中的化學平衡就會向減弱這種改變的方向移動。等靜壓原理則指，每當壓力施加到系統上時，無論系統內部產品尺寸或形狀如何，壓力都會立即均勻地傳遞到整個系統中。HPP技術藉由提高系統等靜壓，進而影響食品的化學平衡，最終在較低溫條件下（如室溫）使微生物或酵素失去活性，達到延長產品保存期之效果。

HPP會使細菌、酵母菌或黴菌的細胞壁、細胞膜、遺傳物質和細胞質造成損傷，並影響酵素活性及生理代謝。除了有

內生孢子的微生物有較高抵抗力之外（如梭菌屬，需要1,000 MPa），大多數微生物在300-600 MPa加壓10分鐘後即失去活性，防止它們在儲存期間的增殖。

相較於傳統熱處理殺菌，HPP技術具有保持營養和風味的優點，但設備成本較高，較適合應用於附加價值較高的產品（如：起司）。且即使HPP技術可減少高溫品質損失，仍有部分成分可能受到高壓影響。本文探討HPP技術對牛乳成分及理化特性的影響。

HPP技術對牛乳成分的影響

HPP技術主要影響牛乳中的蛋白質，而脂肪、碳水化合物及礦物質的影響則較不明顯，分述如下：

（一）蛋白質：蛋白質由特定胺基酸序列組成，並在各種化學鍵（共價鍵、離子鍵、疏水性、氫鍵、二硫鍵）的影響下產生特殊結構及功能性。相較於加熱處理，HPP對蛋白質結構影響雖然較小，但仍影響共價鍵

以外之化學鍵，進而導致酪蛋白膠微粒破碎和部分乳清蛋白變性。加壓超過300 MPa會導致酪蛋白膠微粒破碎而縮小。HPP可藉調整壓力條件控制乳製品酵素活性，以此維持品質或加速分解，進而間接影響蛋白質組成，如：壓力低於350 MPa可促進酵素與基質的相互作用，而400 MPa以上壓力則會使酵素開始失去活性。

- (二) 脂肪：HPP對牛乳脂肪含量及脂肪組成影響不大，但會輕微影響脂肪球的大小。高壓處理會促進 β -乳球蛋白、 κ -酪蛋白和 α -乳清蛋白與乳脂肪球膜（Milk Fat Globule Membrane, MFGM）的蛋白結合。此外，HPP亦可能經由影響脂肪活性，進而影響牛乳脂肪風味。
- (三) 碳水化合物及礦物質：牛奶主要碳水化合物是乳糖，HPP僅造成其輕微降解，基本上影響不大。而礦物質方面，因為HPP使酪蛋白膠微粒破碎，進而釋出礦物質，最終影響礦物質在牛乳固形物與非固形物之間的分佈。

HPP技術對牛乳理化特性的影響

HPP技術對牛乳成分的影響會影響其理化特性，而理化特性又與產品特徵及加工特性有關，分述如下：

- (一) pH值：HPP對牛乳pH值之影響程度，受到加壓條件、微生物活性及牛乳成分影響。高壓會使酪蛋白膠微粒破碎，影響礦物質在牛乳中的分佈，進而提高pH值。壓力低於300 MPa，殺菌效果較差，存活的微生物可能會降低pH值。牛乳的酪蛋白膠束具有緩衝能力，因此其濃度會影響HPP對牛乳pH值變化。脂肪可作為酪蛋白膠微粒保護屏障，減緩HPP處理所造成的酪蛋白膠微粒破碎，進而減少pH值變化。
- (二) 色澤和濁度（turbidity）：牛奶色澤和濁度與脂肪球和酪蛋白膠微粒的大小有關。HPP會減小脂肪球及酪蛋白膠微粒的大小，降低牛乳對光的散射程度，導致亮度（lightness）及濁度降低。脂肪對酪蛋白膠微粒的保護作用會降低影響，因此HPP對脫脂牛乳色澤和濁度影響較明顯，300-400 MPa的壓力即導致濁度降低。
- (三) 乳化安定性（emulsion stability）：HPP影響乳蛋白及MFGM中的蛋白

質，進而影響牛奶的乳化安定性。適當的壓力處理可讓蛋白質展開和變性，進而使液滴尺寸（droplet size）減小或使蛋白質結構分裂為較小分子，進而提高乳化安定性。然而，更強更久的壓力處理（400 Mpa以上）會降低乳清蛋白溶解度，進而對乳化安定性產生負面影響。對於已均質的產品，承受這種高壓往往會增加液滴絮凝或聚集。

（四）黏度（viscosity）：HPP使酪蛋白膠微粒破碎，進而使酪蛋白膠微粒水合作用（casein micelle hydration）增加，水分子與酪蛋白膠微粒表面相互作用，防止酪蛋白膠微粒的聚集或沉澱，並提升牛奶黏性。相較於傳統熱處理牛乳，400 Mpa處理3分鐘的牛乳黏度顯著提升。

（五）感官特性：HPP對牛乳品質的影響較傳統加熱殺菌技術輕微。雖然HPP仍對部分牛乳成分及理化特性造成影響，但人們普遍認為HPP處理的牛乳較傳統加熱殺菌牛乳，更接近於天然牛乳的風味。

結語

相較於傳統熱處理，HPP技術對牛乳品質的影響較小，但仍可能影響部分成分和理化特性。本文彙整並精簡HPP技術及條件（300-600 MPa）可能造成的影響，以供未來參考應用。HPP主要影響牛乳中的蛋白質結構，可能使酪蛋白微粒破碎及乳清蛋白變性，但在脂肪、碳水化合物及礦物質方面影響較小。理化特性方面，HPP可能影響牛乳pH值、色澤、濁度、乳化安定性及黏度。儘管HPP技術在食品安全和延長保鮮方面具有優勢，但其成本較高，且壓力條件需要精確控制，以避免造成牛乳品質負面影響。因此，HPP技術應適合應用於附加價值較高的乳製品。

參考文獻

Serna-Hernandez, S. O., Z. Escobedo-Avellaneda, R. García-García, M. J. Rostro-Alanis, and J. Welti-Chanes. 2021. High Hydrostatic Pressure Induced Changes in the Physicochemical and Functional Properties of Milk and Dairy Products: A Review. *Foods* 10: 1867.