

技術報告： 瞭解乳蛋白在原料與產品性能中的角色



引言

蛋白質是飲食中不可或缺的營養成分，充分攝取對健康與均衡的飲食至關緊要。現今，消費者越來越認識並了解到蛋白質在飲食中的益處。他們知道蛋白質在幫助提供飽足感、持續提供能量以及提升表現方面扮演重要角色。乳品是優質、多用途與多功能性蛋白質的重要來源。許多食品與飲料製造商正努力將乳蛋白應用至其產品中。除了作為優異的營養來源，牛奶蛋白還能提供消費者期望的「潔淨標章」特性，並在最終產品中展現一系列功能性優勢，例如：溶解性、熱穩定性、凝膠性、發泡性及乳化性。

牛奶是一種提供多重營養與功能性益處的複雜、動態營養系統。加工程度會影響其特性及其在食品系統中的表現。牛奶中的蛋白質格外複雜，且容易受到乳品與食品產業使用之多種加工條件（例如，剪切、熱處理）的影響。加工會改變牛奶蛋白質的結構，導致蛋白質的變性、聚合與相互作用。蛋白質交互作用的類型與程度會因多種因素而異，包括加工條件（例如，時間與溫度的組合）、產品成分、pH值、蛋白質濃度與離子強度等。這些蛋白質的改變也會影響乳品原料的功能特性，例如溶解性、凝膠性、熱穩定性及乳化性，進而影響乳品原料在最終產品的表現。另一方面，加熱導致的牛奶蛋白功能性改變，可幫助提升優格、烘焙食品及糖果等乳製品與食品的感官特性。因此，瞭解乳蛋白與其功能性，有助於為乳品原料以及最終的乳製品與食品產品帶來量身打造的功能性特性。

本技術報告為食品與飲料配方設計者提供關於牛奶蛋白複雜性、不同蛋白質類型及特性的資訊，以及針對不同乳蛋白的研究。報告還探討加工條件如何影響乳蛋白的性能，並提出改善品質及運用乳蛋白創造新食品與飲料的建議。報告章節索引請見第16頁。

蛋白質的結構

胺基酸是構成蛋白質的基石。蛋白質中的特定胺基酸序列決定了蛋白質的結構、構形與特性。根據所含胺基酸的種類，可能出現不同的構形，而這些構形在各種分子的作用力下維持穩定。決定蛋白質構形的分子作用力包括靜電相互作用、氫鍵、雙硫鍵、偶極-偶極相互作用、疏水相互作用以及凡得瓦力（請見圖1）。^{1,2,3}

蛋白質的原生結構可分為四個不同層次：一級結構、二級結構、三級結構與四級結構（請見圖2）。一級結構是沿著共價連結多肽鏈的特定胺基酸序列（請見圖2a）。由於胺基酸側鏈之間形成的分子作用力，一級結構會以有序的方式摺疊，形成二級結構與三級結構，產生具備最低可能之自由能的獨特摺疊原生結構。蛋白質中最大的常規二級結構為 α -螺旋與 β -摺疊。 α -螺旋是透過胺基酸鏈的螺旋纏繞形成，並由肽鍵原子之間的氫鍵穩定其結構。 β -摺疊則是透過胺基酸鏈某些區域的線性排列所形成（請見圖2b），這種結構同樣由鍵之間的氫鍵進行穩定。

三級結構是蛋白質內部多個胺基酸鏈的立體排列。分子內和分子間相互作用的精密平衡所促成這種立體結構的形成，並由氫鍵、疏水相互作用、凡得瓦力和靜電相互作用維持其穩定（請見圖2c）。四級結構是蛋白質分子的超級聚合體。四級結構是兩條或多條多肽鏈之間相互作用的結果（請見圖2d），多肽鏈非共價相互作用的空間排列形成了這種多聚蛋白。^{2,5}

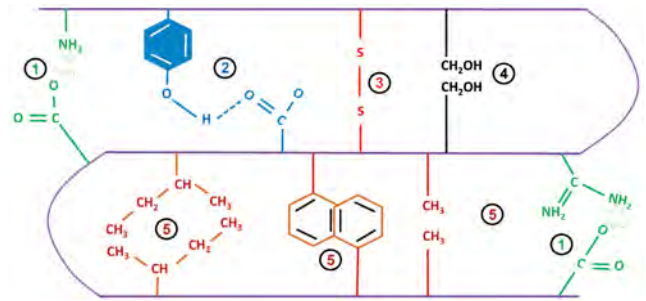


圖1：穩定蛋白質構形之作用力的示意圖：

1. 靜電相互作用；2. 氫鍵；3. 雙硫鍵；4. 偶極-偶極相互作用；5. 疏水相互作用。¹

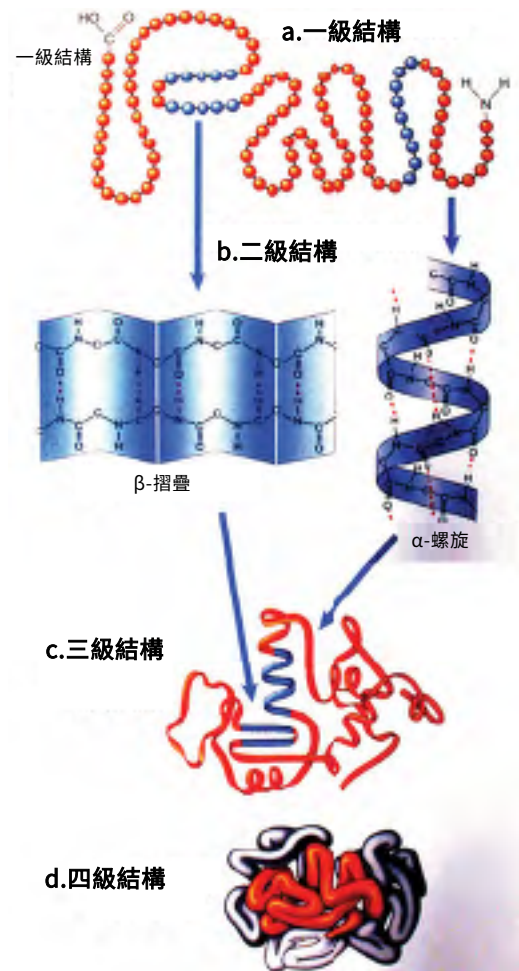


圖2：蛋白質結構之四種不同層次的示意圖：

a. 一級結構；b. 二級結構；c. 三級結構；d. 四級結構。⁴

蛋白質變性

蛋白質的變性或被展開是指其原生結構中穩定作用力的斷裂或改變，導致蛋白質失去或解開原生結構。加熱、壓力、剪切或環境（例如，pH值或離子強度）的改變都可能使蛋白質喪失原生結構；緊密的原生蛋白分子開始被展開為無序的隨機結構（請見圖3）。根據配方或加工條件，蛋白質可能透過共價鍵（例如，雙硫鍵）或非共價鍵（例如，凡得瓦力與靜電相互作用）等分子間或分子內連結而產生聚合。需要注意的是，「變性」這個通用術語涵蓋了蛋白質的許多變性形式，包括三級結構輕微改變而二級結構無改變（例如，非原生形式），以及二級結構重大改變進而改變三級結構。¹

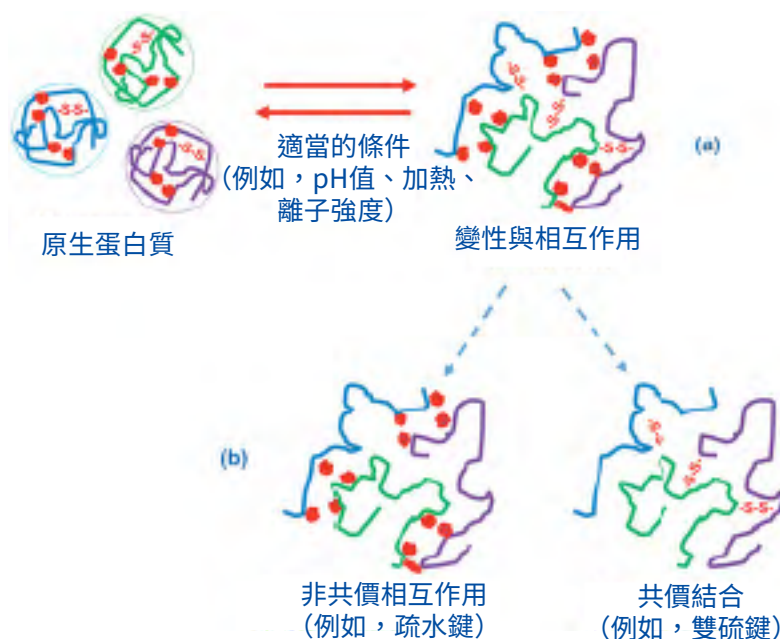


圖3：加熱導致原生蛋白質結構改變的示意圖：a. 蛋白質的變性與聚合；b. 蛋白質共價與非共價相互作用的形成。

奶蛋白：識別、結構與物理化學特性

牛奶是一種複雜的生物液體，包含水、脂肪、乳糖、蛋白質和礦物質（請見表1）。水以連續相形式存在，其他成分溶解或懸浮於其中。乳糖和部分礦物鹽溶解在水溶液中；蛋白質和其餘礦物質則呈膠體懸浮狀態。

表1：生牛奶的一般成分⁶

成分	在牛奶中所占的% (W/W)
水	87.30
乳糖	4.60
脂肪	3.90
蛋白質	3.30
酪蛋白	
乳清蛋白	0.70
礦物質	0.70
有機酸	0.20

牛奶每公斤含有約30至35公克的蛋白質，主要分為兩大類：酪蛋白與乳清蛋白。^{6,7}酪蛋白主要以膠體形式存在；乳清蛋白以可溶形式存在。酪蛋白與乳清蛋白根據它們在水溶液中的狀態與結構，提供不同的功能特性並發揮不同的作用。

酪蛋白與乳清蛋白的結構截然不同，因此具有不同的物理化學特性，而這些特性構成了許多乳製品和食品的製造基礎。**表2**概述了酪蛋白與乳清蛋白特性的比較。根據表中列出的酪蛋白與乳清蛋白特性，可明顯看出牛奶蛋白的特性會影響它們在食品中的表現。一個常見的例子是酪蛋白的沉澱。透過發酵或直接酸化降低牛奶的pH值，可以製成優格和茅屋起司等產品。利用凝乳酶使 κ -酪蛋白（ κ -CN）凝結則能製成乳酪。

κ -CN是四種主要酪蛋白分子之一，另外三種為 α -s1-酪蛋白、 α -s2-酪蛋白與 β -酪蛋白。 α -與 β -酪蛋白是疏水性蛋白，遇鈣容易沉澱；而 κ -CN的分子截然不同，不會遇鈣沉澱。隨著酪蛋白的分泌，酪蛋白會自我聚合為膠束，其中， α -與 β -酪蛋白透過與 κ -CN的相互作用以避免沉澱。基本上， κ -CN通常會保持大部分牛奶蛋白的溶解性，防止其自發性凝結。

表2：酪蛋白與乳清蛋白部分物理化學特性的比較⁸

特性	酪蛋白	乳清蛋白
結構	缺乏明確的二級、三級與四級結構；具有無規則捲曲結構	明確的三級與四級結構
胺基酸成分	低含硫胺基酸；高脯胺酸	較高的含硫胺基酸；低脯胺酸
物理狀態	以大型膠體聚合物形式存在，被稱為酪蛋白膠束	存在形式為單體-八聚體球形蛋白質，會因pH值而變化
在pH 4.6的溶解性	在pH 4.6不會溶解	在pH 4.6可溶解
熱穩定性	熱穩定性非常好（可承受滅菌、超高溫（UHT）或二次高溫滅菌處理）	不耐熱（可被完全變性，尤其是加熱至攝氏90度以上時）
因限制性蛋白分解或乙醇處理而凝結的特性	可透過特定、限制性蛋白分解（例如，凝乳酶凝結）或乙醇處理而凝結	不容易因酵素或限制性蛋白分解或乙醇處理而凝結

酪蛋白

酪蛋白是牛奶的主要蛋白質，其占牛奶總含氮物質的80%左右。它們以酪蛋白膠束形式存在於牛奶中。自1969年的最初報告以來，已有多種酪蛋白膠束結構模型被提出。⁹酪蛋白親水又親油的特性使其具備優異的表面活性與乳化特性。酪蛋白有較高的電荷，含有許多脯胺酸殘基，但半胱氨酸殘基的含量很少。¹⁰關於酪蛋白膠束結構與特性的詳細概述已被發表。¹¹

酪蛋白具有低度的二級與三級結構，此特性使其在高溫下展現顯著的穩定性。然而，當經受嚴苛的熱處理時，酪蛋白會發生一些變化，例如去磷酸化與蛋白分解。酪蛋白的聚合可能因縮合反應（例如，梅納反應）及離胺丙胺酸的形成所引起。熱處理導致的酪蛋白膠束變化包括流體動力直徑的增加、界面電位（Zeta Potential）與水合作用的減少，以及酪蛋白從膠束解離，^{12,13}而這些變化已獲得詳細探討。^{14,11}

酪蛋白膠束的聚合與解離可能因加工條件、pH值與離子環境而異。這是酪蛋白膠束的一項重要特性，並構成各種產品與功能性乳品原料的基礎，例如優格、乳酪及酪蛋白鈉（請見圖4）。

牛奶的許多技術性重要特性（例如熱穩定性、凝乳酶可凝結性，以及凝乳酶凝膠的強度與脫水收縮特性）都受到鈣離子（ Ca^{2+} ）的強烈影響。 Ca^{2+} 與酪蛋白的結合主要通過磷酸絲氨酸殘基以及羧酸側鏈進行。

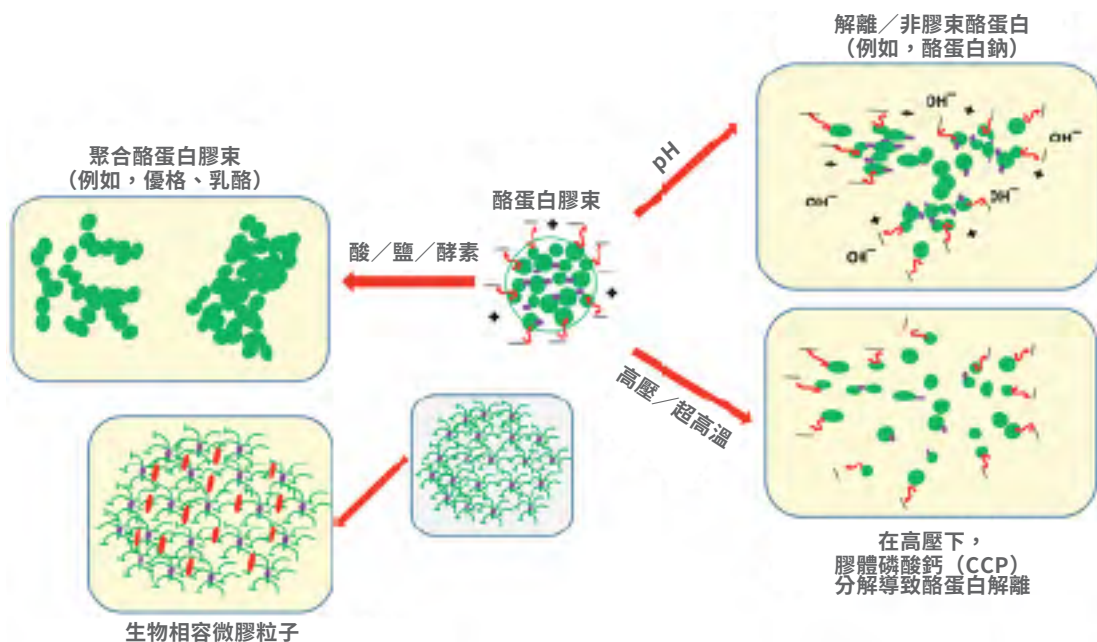


圖4：調整牛奶蛋白功能性的各種方法。¹⁵本示意圖呈現加工與配方條件的改變導致的酪蛋白膠束變化。

乳清蛋白

乳清蛋白或牛奶血清蛋白是指在pH 4.6、攝氏20度的環境下，透過酪蛋白的等電沉澱產生酸乳清後，或透過使用凝乳酶進行限制性蛋白分解產生甜乳清後，剩餘仍保持可溶性的蛋白質。^{16,17}這兩種乳清的一般成分請見表3。

乳清蛋白約占牛奶總含氮物質的20%（亦即，每公升5至7公克）。主要的乳清蛋白按乳清蛋白濃度的高低排列為： β -乳球蛋白（ β -LG）、 α -乳白蛋白（ α -LA）、牛血清白蛋白（BSA）及免疫球蛋白（Igs）。³相較於酪蛋白，乳清蛋白主要為球狀結構，且其多肽鏈上的疏水性與親水性胺基酸的分布比較均勻一致。

表3：甜乳清與酸乳清的蛋白質成分^{18,19,17}

蛋白質	占總乳清蛋白的比例 (%)	
	酸乳清	甜乳清
β -乳球蛋白	54	45
α -乳白蛋白	23	18
牛血清白蛋白	6	5
免疫球蛋白	6	5
酪蛋白衍生肽	2	20
酶	2	2
磷脂-蛋白複合物	5	5

乳清蛋白缺乏酪蛋白單體次單元的親水又親油特性，而這正是賦予酪蛋白許多獨特功能特性的原因之一。¹⁸乳清蛋白分子的脯氨酸含量顯著較低，使其能形成含有大量螺旋結構的球狀構形，而這也解釋了它們為何對加熱十分敏感，容易因此變性。²⁰

乳清蛋白被作為食品與營養原料進行商業販售，例如乳清粉、濃縮乳清蛋白（WPC）與分離乳清蛋白（WPI）。WPC與WPI是食品產業的重要原料，因為它們具備優異的營養價值以及重要的功能特性，例如乳化性、溶解性，以及熱或壓力誘導形成凝膠的能力。^{21,22}市售WPC的成分因多種因素而異^{23,24}，例如濃縮程度、季節性變化、乳清類型（來源）及生產WPC的加工方法等（請見表4）。

乳清蛋白的變性發生於氫鍵、疏水鍵或共價鍵受到影響時。¹⁸此時，通常隱藏於原生立體結構內的疏水性胺基酸側鏈被暴露，導致這些基團的反應活性提高。透過疏氫-雙硫交換和疏水相互作用，被展開的蛋白分子可能彼此結合形成聚合體（請見圖3），並且隨著聚合體的體積增大，將逐漸變得無法溶解。高強度的熱處理可能導致與其他蛋白分子的相互作用，形成分子間的連結與聚合，並根據多種因素（例如蛋白濃度、加熱與冷卻速率、pH值和離子強度），最終導致沉澱或凝膠化。^{25,26,18,2,14,3}表4總結了牛奶蛋白可能因加熱產生的變化。

表4：蛋白質可能因加熱產生的變化²⁷

蛋白質變性是指蛋白質的二級、三級或四級結構發生的任何改變，但並未伴隨一級結構肽鍵的斷裂。變性後的最終構形可能是完全展開（無規則捲曲）或部分展開的多肽結構。

聚集或聚合：聚集或聚合、沉澱、凝結與絮凝等術語，指的是非特定蛋白質-蛋白質相互作用導致高分子量大複合體的形成。

凝膠化是原生與／或（部分）變性蛋白質有序聚合，形成一種立體網絡結構。在該結構中，蛋白質-蛋白質以及蛋白質-溶劑的相互作用達到平衡，產生能夠保持大量水分的有序基質。

牛奶蛋白質結構與功能的關係

牛奶蛋白的結構與功能之間的關係決定了它們在最終產品中的作用。牛奶是一種膠體系統。外在和內在因素會影響蛋白質內部和蛋白質之間的相互作用。在分子層面影響變性、聚合以及蛋白質-蛋白質相互作用的外在因素包括溫度、蛋白質濃度、pH值、離子強度與離子類型、加工條件，以及剪切、熱、高壓或超音波等外部能量。內在因素包括疏水性、靜電相互作用、雙硫鍵、分子量以及胺基酸成分（請見圖5）。²⁸

外在因素	內在因素
溫度	胺基酸成分
壓力	分子量
pH	疏水性
蛋白質濃度	靜電相互作用
離子強度	雙硫鍵與游離硫氫基團的數量
鹽的類型（單價、二價）	

圖5：影響蛋白質-蛋白質相互作用的因素。²⁸

食品的結構會決定最終產品的外觀、質地、口感、感官屬性、生物利用率和營養輸送。因此，可利用特定的配方與加工條件，量身打造特定的蛋白質-蛋白質相互作用，最終開發出具備不同結構的食品。如 6 的概述，食品系統中的環境會影響不同種類的蛋白質相互作用。因此，蛋白質結構與蛋白質-蛋白質相互作用的知識被用於開發具備特定功能性的乳品原料，以及最終的食品與飲料產品。

將蛋白質結構-功能關係、蛋白質-蛋白質相互作用，以及蛋白質功能特性的知識結合起來，可調整加工結果，例如乳蛋白的變性與聚合路徑。舉例來說，牛奶蛋白具備優異的穩定性、保水性與乳化性，而這些特性可被優化，用於開發符合「潔淨標章」要求的食品（亦即，減少穩定劑與乳化劑的使用）。要實現量身打造的食物結構，需要結合對蛋白質物理化學特性，以及加工與配方參數之間相互作用的知識。

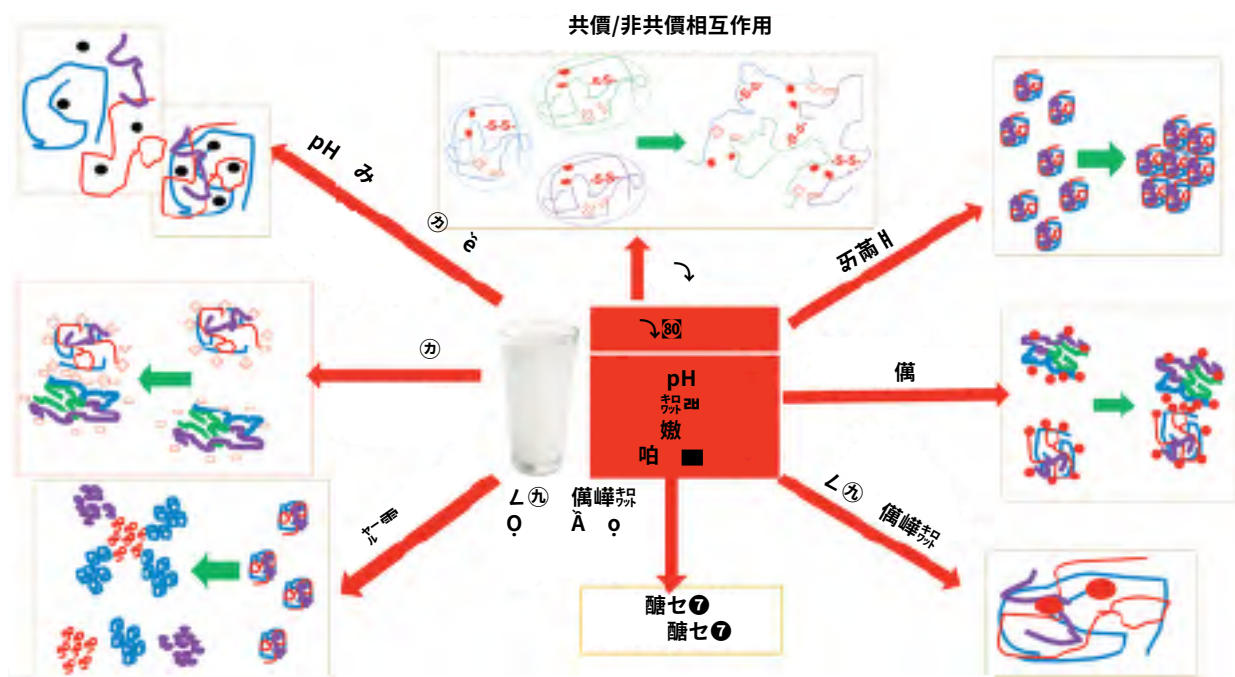


圖6：利用各種不同加工方式與配方條件操控蛋白質相互作用之可能性的示意圖。²⁹

蛋白質結構與蛋白質-蛋白質相互作用的改變，以及蛋白質與食品系統中其他成分的相互作用，會影響最終產品的質地與功能特性（例如，凝膠化、黏度）。蛋白質可與食品系統中的其他蛋白質或成分（例如碳水化合物、脂肪和礦物質）發生相互作用。這使得系統更加複雜，但也提供了開發新型質地產品的機會。例如，有文獻指出，在含有脂肪的系統中，且小脂肪球粒徑分布較窄時，蛋白質凝膠能具備更光滑的質地與更高的凝膠強度。³⁰這表示，透過操控食品系統中蛋白質與脂質之間的相互作用，可能實現對最終產品質地與細緻感的操控。

蛋白質分子在特定pH值下的電荷非常重要，因為這會影響蛋白質之間的靜電排斥與相互作用（請見圖7）。^{31,32}改變蛋白質溶液的pH值，或向蛋白質溶液添加離子或鹽，可調整排斥作用力，也可實現量身打造的蛋白質-蛋白質相互作用。

這也是離子強度增加的情況下，靜電排斥力減弱的原因之一。³³鹽的種類（例如，單價鹽與二價鹽）也會影響蛋白質-蛋白質相互作用以及形成的凝膠類型。改變凝膠微結構所需的鹽濃度，取決於鹽在霍夫梅斯特（Hofmeister）序列的位置。³⁴

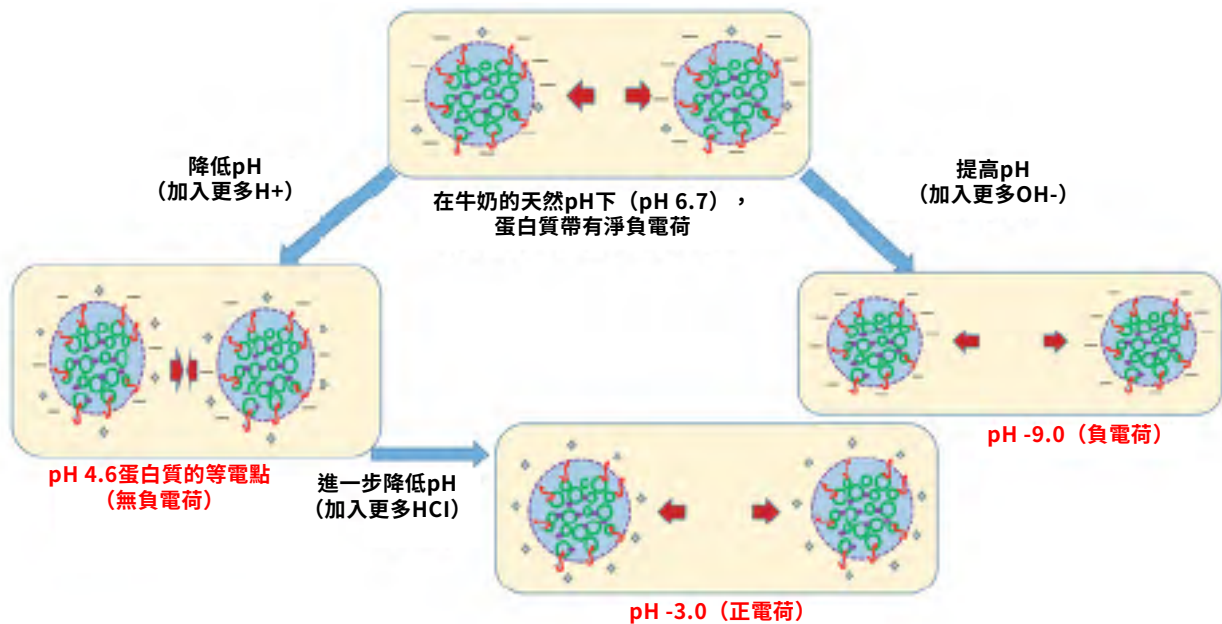


圖7：淨負電荷pH對蛋白分子電荷與蛋白相互作用之影響的示意圖。³⁵

牛奶蛋白的功能特性

除了作為優異的營養來源，牛奶蛋白在提供理想功能特性給最終產品方面也扮演著重要角色。在食品產業，乳品原料被作為功能性原料進行廣泛應用（請見表5）。舉例來說，全脂奶粉（WMP）、脫脂奶粉（SMP）、濃縮牛奶蛋白（MPC）、WPC與WPI被用於營養補充飲料、代餐飲料或重組乳的配方。

在許多情況下，為了延長保存期限並確保人類攝取時的食物安全，這些食品和飲料會經歷嚴格的熱處理，例如超高溫（UHT）處理或二次高溫滅菌。因此，應用於這類食品和飲料的乳品原料，尤其是那些需要在即飲（RTD）飲料中保持蛋白質系統溶解性的原料，必須具備熱穩定性並能承受常見的高強度熱處理。

熱穩定性指的是蛋白質在接受高強度熱加工期間或之後不久，能避免出現不良變化的能力，例如過度混濁、黏度增加、相分離、沉澱或凝膠。⁴¹牛奶的熱穩定性是其蛋白質穩定性的一項功能。⁴²加熱會造成蛋白質一定程度的變性和聚合，進而可能導致混合物的增稠或凝膠化。⁴³在一些需要熱穩定性的情況下，乳清蛋白的變性與聚合可能會帶來不良影響。加工過程中熱穩定性不良的後果包括：

- 限制可加工的固形物濃度（總固形物）
- 降低加工效率
- 減少加工時對時間與溫度的耐受能力

因此，在選擇用於食品與飲料的原料時，熱穩定性是最重要的加工考量因素之一。

乳清蛋白特別容易因加熱發生變性、聚合與凝膠化（請見圖8）。能夠形成熱誘導凝膠，進而實現理想的食品感官與質地性質，是乳清蛋白的重要功能特性之一。這些凝膠可依外觀、微結構或流變性分為「細絲型」或「顆粒型」。結構的類型會對最終產品帶來不同的質地特性。在乳清蛋白的聚合與凝膠化過程中，可能發展出非共價鍵（主要為疏水鍵）與二硫鍵連結的蛋白質聚合物。^{44,45,46}

表5：乳品原料的一些功能特性及其在最終產品的應用^{36,37,38,39,40}

編號	特性	說明	特定的應用範例
1	保水性	與產品的成分進行相互作用，提供高保水能力	肉製品 烘焙產品 糖果 仿製乳酪 冷凍甜品 調理食品
2	黏性	與其他產品成分進行相互作用，有助於濃度、蛋白質結構與熱處理	湯與醬汁 優格 布丁 飲料
3	乳化	能讓兩種不相溶的液體（例如，水與油）共存於穩定的乳狀液中	奶精 冰淇淋 沙拉醬 香腸（煉合肉） 湯、醬汁、沾醬 美乃滋 加工乳酪
4	發泡	能在氣-水介面形成穩定的泡沫，提供絕佳的攪拌起泡性能（亦即，能在產品融入並保有空氣）	冰淇淋 冷凍甜品 鮮奶油與配料 含氣糖果（例如，牛軋糖與棉花糖） 蛋糕與慕斯 糖飾
5	膠化	透過交聯蛋白質提供物理結構給食品；改善特定應用的口感	優格 烘焙產品 卡士達 糖果 肉製品 調理食品
6	溶解性／熱穩定性	在不同加工條件與濃度，以及在pH值、礦物質含量與熱處理等不同條件下，保持溶解的能力	重組、UHT與滅菌牛奶 湯與醬汁 嬰兒與病患營養品 奶精 運動飲料 蛋白質強化果汁飲料
7	混濁度／清澈度	視覺屬性，從混濁的飲料到高酸性清澈的運動飲料	強化牛奶飲料 蛋白質運動飲料 巧克力 糖果／焦糖 醬汁 佐醬
8	促進風味／色澤	通常與梅納反應有關，可提供理想的特性，例如均勻的褐色與焦糖風味	糖果，焦糖 軟糖與糖果塗層 烘焙產品 （麵包、蛋糕、鬆餅、餅乾） 醬汁／湯

蛋白質凝膠化通常利用加熱達成，但也可使用其他物理與化學方法。⁴⁷加壓便是物理方法的例子。化學方法包括酸化、酵素交聯以及使用鹽類。這些方法會改變蛋白質的結構，以及蛋白質與其他蛋白質和溶液中其他成分之間的相互作用。凝膠的特性因各種因素而異，例如蛋白質濃度，由pH、溫度、離子強度和／或壓力導致的變性程度等。⁴⁸此外，影響蛋白質凝膠化的因素還會改變蛋白質-蛋白質以及蛋白質-溶劑的相互作用，進而影響凝膠的類型與特性。^{49,31}

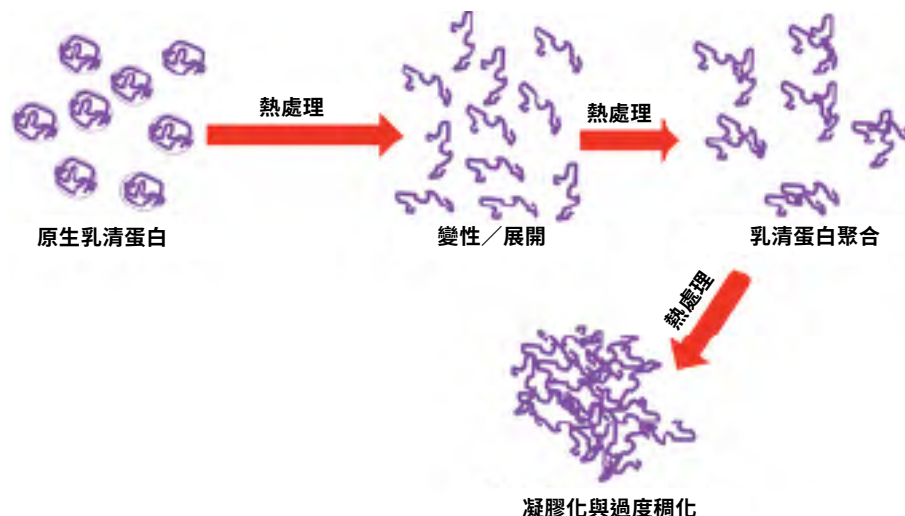


圖8：UHT與二次高溫滅菌等高強度熱處理對乳清蛋白溶液之影響的示意圖。針對乳清蛋白溶液的高強度熱處理會造成乳清蛋白的變性、聚合，以及凝膠化或過度稠化。

熱處理與牛奶蛋白：對功能特性的影響

為了確保產品的微生物安全性、延長保存期限與調整牛奶產品的功能特性，熱處理是乳品工業的必要操作步驟。^{17,14,44,50,51}表6列出乳品加工中最常見的熱處理方式範例。^{17,14}

表6：牛奶與牛奶產品商業加工的常見熱處理^{17,14}

熱處理	溫度／時間條件
熱殺菌	攝氏65度／30秒
巴氏殺菌	攝氏72度／15秒
奶粉預熱處理	攝氏80至120度／2至10分鐘
優格製造預熱處理	攝氏90度／5至10分鐘
UHT滅菌	攝氏140度／3至20秒
滅菌／二次高溫滅菌（分批／裝瓶）	攝氏110至120度／5至20分鐘

這些熱處理全都會導致不同程度的蛋白質變性、聚合與相互作用。^{50,52,53}免疫球蛋白、乳鐵蛋白和BSA對熱處理特別敏感。在商業化巴氏殺菌過程中，這些蛋白質會部分變性。在奶粉製造的預熱處理以及UHT處理期間， β -LG與 α -LA會大幅變性。根據熱處理的強度，這些蛋白透過二硫鍵的連結形成各種比例的高分子量聚合物或疏水鍵連結聚合物。此外，除了形成可溶性聚合物（例如 β -LG、 α -LA與BSA的二聚物和三聚物），還會生成酪蛋白（ κ -CN和 α_{s2} -CN）與乳清蛋白之間的二硫鍵連結複合物。^{50,54,52}這類由加工引起的相互作用也可連結到特定的功能特性。

對同時含有酪蛋白與乳清蛋白的牛奶進行加熱時，乳清蛋白會與酪蛋白膠束相互作用，形成酪蛋白-乳清蛋白複合物（請見圖9）。^{55,56,52,53}多數研究認為，會導致形成分子間二硫鍵的硫醇／二硫鍵交換反應，對 β -LG的熱誘導聚合以及 β -LG和其他蛋白（包括酪蛋白）的相互作用，扮演著重要角色。研究還指出，除了分子間共價（二硫）鍵導致的聚集，非共價相互作用（例如疏水或離子相互作用）亦參與牛奶蛋白的熱誘導交互作用。對於許多乳製產品的功能性來說， β -LG與 κ -CN之間的相互作用十分重要。 β -LG原生結構中的兩個二硫鍵與一個自由硫氫基在 β -LG與 κ -CN的熱誘導相互作用扮演著重要角色（請見圖9）。^{57,14,58,59,52}

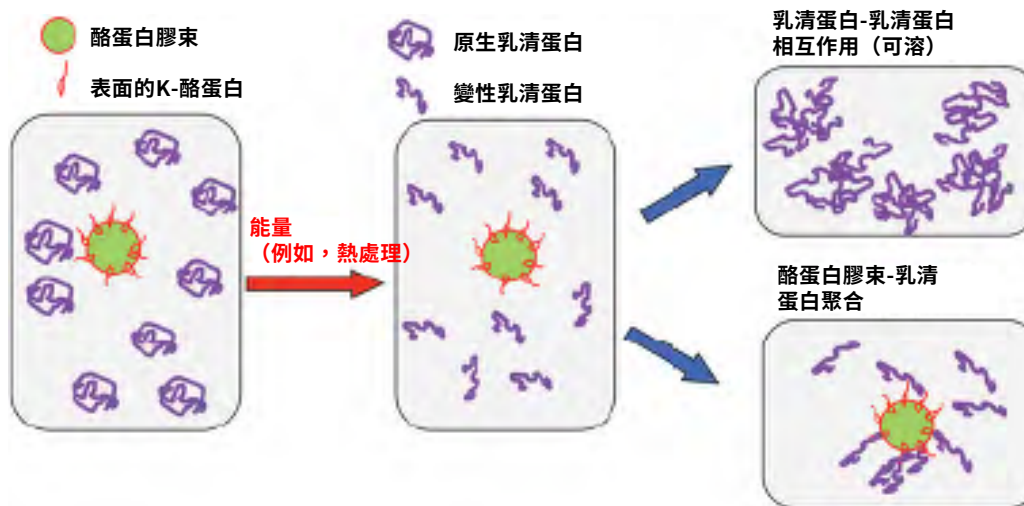


圖9：熱處理牛奶系統中可能出現之蛋白質相互作用的示意圖。

一些眾所周知的例子說明了熱誘導牛奶蛋白功能性的有益效果，包括乳清蛋白的熱誘導凝膠化³，提升奶粉、蒸發乳及滅菌牛奶產品^{60,61}熱穩定性的預熱處理；改善奶粉⁶²的功能特性；以及提升優格的質地。⁶³此主題目前已
有詳細的綜述。⁵²

熱處理與乳清蛋白：對功能特性的影響

在加熱時，乳清蛋白可能因為與系統中的其他乳清蛋白進行相互作用（請參見表5的術語描述）而變性，並形成可溶聚合物或不可溶聚合物（凝膠）。^{64,65,66,67,68,69,70,46,71,72,73}值得注意的是，不同乳清蛋白對加熱處理有著不同的反應，包括構形改變、鍵結模式的改變、透過二硫鍵交換形成的蛋白質聚合物，以及疏水性關聯的變化。由於不同乳清蛋白具備不同的熱轉變溫度（請見表7），因此其變性行為會有顯著的差異。因為乳清蛋白系統的異質性，以及各個蛋白質對熱的反應不同，所以整體乳清蛋白的熱變性與聚合呈現的是整體蛋白質成分的集體反應。⁷⁴

表7：乳清蛋白的熱變性溫度與焓（熱含量）^{25,75,17}

乳清蛋白	TD (°C)	TTR (°C)	ΔH (kJ/mol)
β -LG	78	83	311
α -LA	62	68	253
BSA	64	70	803
Ig	72	89	500

TD = 最初的變性溫度；TTR = 示差掃描熱分析法峰值對應的溫度； ΔH = 變性的焓。

熱處理在蛋白質功能性方面的一些商業應用

1. 優格

在優格製造中，牛奶原料常採用預熱處理（例如，用攝氏90度加熱10分鐘），而據說此舉能改善優格的質地、微結構及流變性。^{76,77}透過硫氫-雙硫交換進行的 β -LG與 κ -CN加熱誘導相互作用，被認為是改善優格質地的關鍵因素。^{14,52}此外，相較於使用未經加熱處理的牛奶，用預熱處理牛奶製成的優格在凝膠時擁有較高的pH質，且生成的凝膠更為緊實。^{76,63,56,78}

2. 奶粉

在奶粉製造過程中，為了生產具備特定功能性的奶粉，會對牛奶進行一系列的預熱處理。脫脂奶粉可分為低熱、中熱和高熱處理奶粉。這種分類通常基於乳清蛋白氮指數（WPNI），即奶粉中未變性乳清蛋白的含量。在奶粉的製造過程中，尤其是預熱處理、蒸發及乾燥階段，使用特定熱處理會導致乳清蛋白變性。⁵¹變性乳清蛋白與酪蛋白膠束之間的相互作用最終會影響奶粉的功能性。這些蛋白質的相互作用還會影響酪蛋白膠束在進一步加工（例如蒸發和乾燥）時的作用方式。⁷⁹在蒸發過程中，酪蛋白膠束的尺寸主要因膠束的聚合或乳清蛋白與膠束的結合而增大。

在製造高蛋白奶粉時，牛奶經過超濾濃縮（尤其是乾燥前的透析過濾）會導致膠體磷酸鈣的溶解，進而造成酪蛋白膠束結構變得鬆散，並可能讓酪蛋白膠束膨脹。增加濃縮程度會引起膠束結構的逐步崩解，從完整的膠束變為膨脹四散的膠束，並最終變為較小的碎片膠束結構。酪蛋白膠束的這些變化使得牛奶系統在噴霧乾燥過程中更容易發生蛋白質-蛋白質相互作用，進而影響原料的功能特性。^{79,80,81}

非熱處理對牛奶蛋白功能特性造成的改變

牛奶蛋白的穩定性以及黏性、凝膠性與乳化等功能特性，可以透過以下方法進行調整：針對牛奶蛋白的物理化學修飾（亦即，使用熱處理、剪切、高壓處理、超音波處理，pH值、離子強度和電荷操控）；酵素修飾（例如，蛋白質的轉氫醯胺酸酶（TGase）交聯）；化學修飾（例如，琥珀醯化、乳糖糖基化和配體結合）。這些方法可以用來量身打造符合顧客期待的牛奶蛋白功能特性。

研究指出，透過TGase對牛奶蛋白進行酵素交聯與修飾，可提升牛奶蛋白的功能特性，⁸²包括提高凝膠強度、保水能力⁸³以及酸性凝膠的黏度。^{84,85,86}此方法讓製造低脂優格可能不用添加增稠劑，⁸⁶並能幫助防止因溫度變化或物理衝擊導致的乳清分離或脫水收縮現象。牛奶蛋白的TGase處理還可提升其熱穩定性。^{87,88,89}酵素修飾也有助於改善牛奶蛋白的表面活性與乳化性。⁹⁰

牛奶蛋白⁹¹的化學修飾（例如琥珀醯化），則是利用帶負電的原生蛋白與帶正電的蛋白衍生物形成靜電穩定複合物，開發新產品成為可能。酪蛋白鈉亞膠束的微分層可透過階段轉變形成薄膜層，而這能在食品乳化穩定性方面發揮重要作用。^{92,90}

近來，二氧化碳處理被應用於牛奶蛋白加工，其目的是優化牛奶中膠束酪蛋白與非膠束酪蛋白的比例，進而製造具有客製化質地、口感與風味的優格。此技術還被用來改善MPC和濃縮膠束酪蛋白MCC的功能特性，包括溶解性、乳化性與熱穩定性。⁹³

另一種方法是採用高壓加工（HPP）保存和改變食品的各種面向，包含功能特性的改變。^{94,95,96,97,98}高壓處理是一種蛋白質改造的物理工具，因此具有生產搭載改良質地與功能特性之新型乳製產品的潛力。由於消費者對微生物安全、營養豐富、潔淨標章及「類新鮮」食品的需求增加，且要求這類食品具備可接受的保存期限，所以HPP逐漸被食品加工與保存領域採用。^{99,94,95,96}HPP透過改變穩定蛋白質原生結構之鍵結的微妙平衡，導致蛋白質的變性、聚合與凝膠化。^{100,101,102,103,104}這種影響與熱處理不同，且取決於蛋白質類型、pH值、離子強度、施加壓力及加壓溫度，以及壓力處理的時間。^{105,102,106,107}這種不穩定性可能會影響蛋白質的聚合行為、壓力誘導功能性（例如凝膠形成），以及乳清蛋白的物理性、流變性與微結構性。^{108,109,110,111}如需有關HPP對牛奶蛋白之影響的詳情，可查閱相關文獻。^{53,112,51,113}

在食品與乳品應用領域，超音波加工是一項新興技術。超音波指的是頻率高於人類可聽範圍（約18 kHz以上）的聲波。當超音波通過液體時，液體中的氣泡核會因氣泡聚節與整流擴散而成長。當氣泡達到臨界尺寸後，會在近絕熱條件（即沒有熱量增減的情況下）下發生坍塌，在周圍液體產生極端條件，包括強烈的剪切力、湍流與微流動。這種現象被稱為聲穴現象（acoustic cavitation），¹¹⁴而這些物理效應被用於食品加工中。超音波誘發物理效應在乳品加工的應用日益增多，例如改善乳清超過濾、¹¹⁵降低產品黏度、¹¹⁶牛奶脂肪球均質化、改變發酵特性、¹¹⁷乳糖音波結晶，¹¹⁸以及乳酪塊的切割。¹¹⁹

隨著高效、大規模超音波系統的普及，這些加工技術已從實驗室走向歐洲與美國的商業化運營。¹²⁰超音波加工正在確立其在食品加工領域的重要地位，並已展現改變乳蛋白（酪蛋白與乳清蛋白）功能應用的巨大潛力。它具備大規模商業化的能力，並擁有良好地資本投資回報率。¹²⁰

結論

牛奶，特別是牛奶蛋白，是由大自然設計的美妙、複雜系統。它們可被加工為各式各樣的營養美味食品與飲料。隨著食品科學與技術的進步，我們持續學習如何充分發揮牛奶蛋白的潛力，為食品的發展與行銷提供更多營養和功能性益處。現今的食品消費者越來越挑剔，除了要求新產品，還要求改進風味與質地，而且成分標示簡單明瞭。牛奶，更具體一點來說，牛奶原料獨具優勢，能為食品科學家提供無限可能性並滿足與超越消費者的期待。

如需更多關於乳品原料研究的資訊，請造訪ThinkUSAdairy.org。

USDEC在此感謝作者Hasmukh Patel、Sonia Patel，編輯Robert Beausire以及審稿人員Shantanu Agarwal提供他們的專業知識。

參考文獻：

- ¹ Privalov PL, Gill SJ. Stability of protein structure and hydrophobic interactions. *Adv Protein Chem.* 1988;39:191-234.
- ² Paulsson M. *Thermal denaturation and gelation of whey proteins and their adsorption at the air/water interface.* Lund: Lund University, Sweden; 1990.
- ³ Singh H, Havea P. Thermal Denaturation, Aggregation and Gelation of Whey Proteins. In: Fox PF, McSweeney PFH, eds. *Advanced Dairy Chemistry, Volume 1: Proteins.* 3rd ed. New York, NY: Kluwer Academic/Plenum Publishers; 2003:1257-1283.
- ⁴ Nishiura J. Lecture 2: Structures and Properties of Biological Molecules: Proteins. Retrieved from Brooklyn College Biology 4: http://academic.brooklyn.cuny.edu/biology/bio4fv/page/3d_prot.htm.
- ⁵ Considine T, Patel HA, Anema SG, Singh H, Creamer LK. Interactions of milk proteins during heat and high hydrostatic pressure treatments — A Review. *Innov Food Sci Emerg Technol.* 2007;8(1):1-23.
- ⁶ Walstra P, Jenness. R. *Dairy Chemistry and Physics.* John Wiley & Sons, New York; 1984.
- ⁷ Fox PF. Milk Proteins: General and Historical Aspects. In: Fox PF, McSweeney PLH, eds. *Advanced Dairy Chemistry, Volume 1: Proteins.* 3rd ed. New York, NY: Kluwer Academic/Plenum Publishers; 2003:1-48.
- ⁸ O'Mahony JA, Fox PF. Milk Proteins: Introduction and Historical Aspects. In: McSweeney PLH, Fox PF, eds. *Advanced Dairy Chemistry, Volume 1A, Proteins: Basic Aspects.* 4th ed. New York, NY: Springer Science+Business Media; 2013:43-85.
- ⁹ Huppertz T. Chemistry of caseins. In: McSweeney PLH, Fox PF, eds. *Advanced Dairy Chemistry, Volume 1A: Proteins: Basic Aspects.* 4th ed. New York, NY: Springer Science+Business Media; 2013:135-160.
- ¹⁰ Swaisgood HE. Chemistry of the caseins. In: Fox PF, McSweeney PLH, eds. *Advanced Dairy Chemistry, Volume 1: Proteins.* 3rd ed. New York, NY: Kluwer Academic/Plenum Publishers; 2003:139-201.
- ¹¹ de Kruif CG, Holt C. Casein Micelle Structure, Functions and Interactions. In: Fox PF, McSweeney PLH, eds. *Advanced Dairy Chemistry, Volume 1: Proteins.* 3rd ed. New York, NY: Kluwer Academic/Plenum Publishers; 2003:233-276.
- ¹² Fox PF. Heat-induced coagulation of milk. In: Fox PF, ed. *Developments in Dairy Chemistry, Volume 1: Proteins.* London, England: Applied Science Publishers; 1982:189-228.
- ¹³ Singh H, Creamer LK. Heat stability of milk. In: Fox PF, ed. *Advanced Dairy Chemistry—1 Proteins.* 2nd ed. London, England: Elsevier Applied Science Publishers; 1992:621-656.
- ¹⁴ Singh H. Heat-induced changes in casein, including interactions with whey proteins. In: Fox PF, ed. *Heat-induced Changes in Milk.* 2nd ed. Brussels, Belgium: International Dairy Federation; 1995:86-104.
- ¹⁵ Huppertz T, Smiddy MA, de Kruif CG. Biocompatible Micro-Gel Particles from Cross-Linked Casein Micelles. *Biomacromolecules.* 2007;8(4):1300-1305.
- ¹⁶ Donovan M, Mulvihill DM. Thermal Denaturation and Aggregation of Whey Proteins. *Ir J Food Sci Tech.* 1987;11(1):87-100.
- ¹⁷ Jelen P, Rattray W. Thermal denaturation of whey proteins. In: Fox PF, ed. *Heat-induced changes in milk.* 2nd ed. Brussels, Belgium: International Dairy Federation; 1995:66-85.
- ¹⁸ Mulvihill DM, Donovan M. Whey Proteins and Their Thermal Denaturation - A Review. *Ir J Food Sci Technol.* 1987;11:43-47.
- ¹⁹ Pearce RJ. Thermal denaturation of whey protein. *Int Dairy Fed Bull.* 1989;238:17-23.
- ²⁰ Sawyer L. β -Lactoglobulin. In: Fox PF, McSweeney PLH, eds. *Advanced Dairy Chemistry, Volume 1: Proteins.* 3rd ed. New York, NY: Kluwer Academic/Plenum Publishers; 2003:319-386.
- ²¹ de Wit JN. Thermal Stability and Functionality of Whey Proteins. *J Dairy Sci.* 1990;73(12):3602-3612.
- ²² Mulvihill DM. Production, functional properties and utilization of milk protein products. In: Fox PF, ed. *Advanced Dairy Chemistry, Volume 1, Proteins.* London, England: Elsevier Applied Science; 1992:369-404.
- ²³ Morr CV, Foegeding EA. Composition and functionality of commercial whey and milk protein concentrates and isolates: a status report. *Food Technol.* 1990;44(8):100-112.
- ²⁴ Huffman LM. Processing of whey for use as a food ingredient. *Food Technol.* 1996;50(2):49-52.
- ²⁵ de Wit JN. Functional properties of whey proteins in food systems. *Neth Milk Dairy J.* 1984;38:71-89.
- ²⁶ de Wit JN. *The use of whey protein products. A review.* Ede, Neth: NIZO; 1989.
- ²⁷ Messens W, Van Camp J, Huyghebaert A. The use of high pressure to modify the functionality of food proteins. *Trends Food Sci Technol.* 1997;8(4):107-112.
- ²⁸ Phillips LG, Whitehead DM, Kinsella J. Protein Gelation. In: Phillips LG, Taylor SL, eds. *Structure—Function Properties of Food Proteins.* San Diego, CA: Academic Press, Inc.; 1994:179-204.
- ²⁹ Livney YD. Milk proteins as vehicles for bioactives. *Curr Op Colloid Interface Sci.* 2010;15(102):73-83.
- ³⁰ Sikorski ZE. *Chemical and functional properties of food components.* 2nd ed. Lancaster, PA: Technomic Publishing Company, Inc.; 1997:119-160.
- ³¹ Kinsella JE, Rector DJ, Phillips LG. Physicochemical properties of proteins: Texturization via gelation, glass and film formation. In: Yada RY, Jackman RL, Smith JL, eds. *Protein Structure-Function Relationship in Foods.* New York, NY: Springer Science+Business Media; 1994:1-21.
- ³² Zayas JF. *Functionality of Proteins in Foods.* Berlin: Springer-Verlag; 1997:310-365.
- ³³ Foegeding EA, Bowland EL, Harding CC. Factors that determine the fracture properties and microstructure of globular protein gels. *Food Hydrocolloids.* 1995;9(4):237-249.
- ³⁴ Bylund G. *Dairy processing handbook.* Lund, Sweden: Tetra Pak Processing Systems AB; 1995.
- ³⁵ Mulvihill DM, Kinsella JE. Gelation of β -Lactoglobulin: Effects of Sodium Chloride and Calcium Chloride on the Rheological and Structural Properties of Gels. *J Food Sci.* 1988;53(1):231-236.
- ³⁶ Huppertz T, Patel H. Advances in Milk Protein Ingredients. In: Ghosh D, Das S, Debasis B, Smart RB, eds. *Innovation in Healthy and Functional Foods.* London, England: CRC Press; 2012:363-386.
- ³⁷ Morr CV. Functional properties of milk proteins and their use as food ingredients. In: Fox PF, ed. *Development in Dairy Chemistry.* London, England: Applied Science Publishers; 1982:375-379.
- ³⁸ DairyGood website. dairygood.org. Accessed June 24, 2015.
- ³⁹ Canadian Dairy Commission website. <http://www.milkingredients.ca/>. Accessed June 24, 2015.
- ⁴⁰ Patel H. Prepared Food Application of Milk Powders and Dairy Ingredients. In: Lagrange V, ed. *Reference Manual for U.S. Milk Powders: 2015 Revised Edition.* Arlington, VA: US Dairy Export Council; 2015.
- ⁴¹ Burrington KJ, Agrawal S. *Technical Report: Whey Protein Heat Stability.* Arlington, VA: US Dairy Export Council; 2012.
- ⁴² Singh H. Heat stability of milk. *Int J Dairy Technol.* 2004;57(2-3):111-119.
- ⁴³ Singh H, Fox PF. Heat stability of milk: pH-dependent dissociation of micellar K casein on heating milk at ultra high temperatures. *J Dairy Res.* 1985;52(4):529-538.
- ⁴⁴ Patel HA, Singh H, Anema SG, Creamer LK. Effects of Heat and High Hydrostatic Pressure Treatments on Disulfide Bonding Interchanges among the Proteins in Skim Milk. *J Agric Food Chem.* 2006;54(9):3409-3420.
- ⁴⁵ Havea P, Singh H, Creamer LK, Campanella OH. Electrophoretic characterization of the protein products formed during heat treatment of whey protein concentrate solutions. *J Dairy Res.* 1998;65(1):79-91.
- ⁴⁶ Havea P, Singh H, Creamer LK. Heat-induced aggregation of whey proteins: comparison of cheese WPC with acid WPC and relevance of mineral composition. *J Agric Food Chem.* 2002;50(16):4674-4681.
- ⁴⁷ Aguilera JM. Gelation of whey proteins. *Food Technol.* 1995;49(10):83-89.

48. Totosaus A, Montejano JG, Salazar JA, Guerrero I. A review of physical and chemical protein-gel induction. *Int J Food Sci Tech*. 2002;37(6):589-601.
49. Hermansson, AM. Aggregation and denaturation involved in gel formation. In: Pour-El A, ed. *Functionality and Protein Structure*. ACS Symposium Series 92. Washington, DC: American Chemical Society; 1979:81-103.
50. Patel HA, Anema SG, Holroyd SE, Singh H, Creamer LK. Methods to determine denaturation and aggregation of proteins in low-, medium- and high-heat skim milk powders. *Lait*. 2007;87(4-5):251-268.
51. Patel HA, Carroll T, Kelly AL. Nonthermal Preservation Technologies for Dairy Applications. In: Chandan RC, Kilara A, Shah NP, eds. *Dairy Processing & Quality Assurance*. Ames, IA: Wiley-Blackwell; 2008:465-482.
52. Anema SG. The whey proteins in milk: thermal denaturation, physical interactions and effects on functional properties of milk. In: Thompson A, Boland M, Harjinder S, eds. *Milk Proteins: From Expression to Food*. 1st ed. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Inc.; 2009:239-281.
53. Patel HA, Creamer LK. High pressure-induced interactions involving whey proteins. In: Thompson A, Boland M, Singh H, eds. *Milk Proteins: From Expression to Food*, 1st ed. Food Science and Technology: International Series. New York, NY: Elsevier Inc.; 2009:205-227.
54. Considine T, Patel HA, Singh H, Creamer LK. Influence of binding of conjugated linoleic acid and myristic acid on the heat- and pressure-induced unfolding and aggregation of β -lactoglobulin B. *Food Chem*. 2007;102(4):1270-1280.
55. Anema SG, Li Y. Further Studies on the Heat-induced, pH-dependent Dissociation of Casein from the Micelles in Reconstituted Skim Milk. *Lebensm Wiss Technol*. 2000;33 (5):335-343.
56. Anema SG, Li Y. Association of denatured whey proteins with casein micelles in heated reconstituted skim milk and its effect on casein micelle size. *J Dairy Res*. 2003;70(1):73-83.
57. Jang HD, Swaisgood HE. Characteristics of the interaction of calcium with casein submicelles as determined by analytical affinity chromatography. *Arch Biochem Biophys*. 1990;283(2):318-325.
58. Corredig M, Dalgleish DG. The mechanisms of the heat-induced interaction of whey proteins with casein micelles in milk – effect of protein concentration at pH 6.75 and 8.05. *Int Dairy J*. 1999;9(3):233-236.
59. Cho Y, Singh H, Creamer LK. Heat-induced interactions of β -lactoglobulin A and κ casein B in a model system. *J Dairy Res*. 2003;70(1):61-71.
60. O'Connell JE, Fox PF. Heat-Induced Coagulation of Milk. In: Fox PF, McSweeney PLH, eds. *Advanced Dairy Chemistry, Volume 1: Proteins*. 3rd ed. New York, NY: Kluwer Academic/Plenum Publishers; 2003:879-945.
61. Nieuwenhuijse JA, van Boekel MAJS. Protein Stability in Sterilised Milk and Milk Products. In: Fox PF, McSweeney PLH, eds. *Advanced Dairy Chemistry, Volume 1: Proteins*. 3rd ed. New York, NY: Kluwer Academic/Plenum Publishers; 2003:947-974.
62. Kelly AL, O'Connell JE, Fox PF. Manufacture and Properties of Milk Powders. In: Fox PF, McSweeney PLH, eds. *Advanced Dairy Chemistry, Volume 1: Proteins*. 3rd ed. New York, NY: Kluwer Academic/Plenum Publishers; 2003:1027-1061.
63. Lucey JA, Singh H. Acid Coagulation of Milk. In: Fox PF, McSweeney PLH, eds. *Advanced Dairy Chemistry, Volume 1: Proteins*. 3rd ed. New York, NY: Kluwer Academic/Plenum Publishers; 2003:1001-1026.
64. McSwiney M, Singh H, Campanella OH. Thermal aggregation and gelation of bovine β lactoglobulin. *Food Hydrocolloids*. 1994;8(5):441-453.
65. McSwiney M, Singh H, Campanella OH, Creamer LK. Thermal gelation and denaturation of bovine β -lactoglobulins A and B. *J Dairy Res*. 1994;61(2):221-232.
66. Gezimatı J, Creamer LK, Singh H. Heat-induced Interactions and Gelation of Mixtures of β -Lactoglobulin and α -Lactalbumin. *J Agric Food Chem*. 1997;45(4):1130-1136.
67. Prabakaran S, Damodaran S. Thermal Unfolding of β -lactoglobulin: Characterization of Initial Unfolding Events Responsible for Heat-Induced Aggregation. *J Agric Food Chem*. 1997;45(11):4303-4308.
68. Manderson GA, Hardman MJ, Creamer LK. Effect of Heat Treatment on the Conformation and Aggregation of β -lactoglobulin A, B, and C. *J Agric Food Chem*. 1998;46(12):5052-5061.
69. Manderson GA, Creamer LK, Hardman MJ. Effect of heat treatment on the circular dichroism spectra of bovine β -lactoglobulin A, B, and C. *J Agric Food Chem*. 1999;47(11):4557-4567.
70. Havea P, Singh H, Creamer LK. Characterization of heat-induced aggregates of β lactoglobulin, α -lactalbumin and bovine serum albumin in a whey protein concentrate environment. *J Dairy Res*. 2001;68(3):483-497.
71. Schokker EP, Singh H, Pinder DN, Norris GE, Creamer LK. Characterization of intermediates formed during heat-induced aggregation of β -lactoglobulin AB at neutral pH. *Int Dairy J*. 1999;9(11):791-800.
72. Schokker EP, Singh H, Creamer LK. Heat-induced aggregation of β lactoglobulin A and B with α -lactalbumin. *Int Dairy J*. 2000;10(12):843-853.
73. Hong Y-H, Creamer LK. Changed protein structures of bovine β lactoglobulin B and α -lactalbumin as a consequence of heat treatment. *Int Dairy J*. 2002;12(4):345-359.
74. de Wit JN, Klarenbeek G. Effects of Various Heat Treatments on Structure and Solubility of Whey Proteins. *J Dairy Sci*. 1984;67(11):2701-2710.
75. Kinsella JE, Whitehead DM. Proteins in Whey: Chemical, Physical, and Functional Properties. *Adv Food Nutr Res*. 1989;(33):343-438.
76. Lucey JA, Singh H. Formation and physical properties of acid gels: a review. *Food Res Int*. 1998;30(7):529-542.
77. Tamime AY, Robinson RK. *Yoghurt: Science and Technology*. 2nd ed. Boca Raton, FL: Woodhead Publishing Ltd. and CRC Press LLC; 1999.
78. Anema SG, Li Y. Effect of pH on the Association of Denatured Whey Proteins with Casein Micelles in Heated Reconstituted Skim Milk. *J Agric Food Chem*. 2003;51(6):1640-1646.
79. Singh H. Interactions of milk proteins during the manufacture of milk powders. *Lait*. 2007;87(4-5):413-423.
80. Patel H, Huppertz T. Effects of High-pressure Processing on Structure and Interactions of Milk Proteins. In: *Milk Proteins: From Expression to Food*. 2nd ed. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Inc.; 2014:243-267.
81. Patel H, Patel S. *Technical Report: Milk Protein Concentrates: Manufacturing and Applications*. Arlington, VA: US Dairy Export Council; 2014.
82. Nonaka M, Tanaka H, Okiyama A, et al. Polymerization of Several Proteins by Ca^{2+} -Independent Transglutaminase Derived from Microorganisms. *Agric Biol Chem*. 1989;53(10):2619-2623.
83. Kuraishi C, Yamazaki K, Susa Y. Transglutaminase: Its utilization in the food industry. *Food Rev Int*. 2001;17(2):221-246.
84. Faergemand M, Sorensen MV, Jorgensen U, Budolfsen G, Qvist KB. Transglutaminase: effect on instrumental and sensory texture of set style yoghurt. *Milchwissenschaft*. 1999;54:563-566.
85. Bonisch MP, Huss M, Weit, K, Kulozik U. Transglutaminase cross-linking of milk proteins and impact on yoghurt gel properties. *Int Dairy J*. 2007;17(11):1360-1371.
86. Yüksel Z, Erdem YK. The influence of transglutaminase treatment on functional properties of set yoghurt. *Int J Dairy Technol*. 2010;63(1):86-97.
87. O'Sullivan MM, Kelly AL, Fox PF. Effect of Transglutaminase on the Heat Stability of Milk: A Possible Mechanism. *J Dairy Sci*. 2002;85(1):1-7.
88. O'Sullivan MM, Kelly AL, Fox PF. Influence of transglutaminase treatment on some physico-chemical properties of milk. *J Dairy Res*. 2002;69(3):433-442.
89. Mounsey JS, O'Kennedy BT, Kelly PM. Influence of transglutaminase treatment on properties of micellar casein and products made therefrom. *Lait*. 2005;85:405-418.
90. Kralova I, Sjöblom J. Surfactants Used in Food Industry: A Review. *J Dispers Sci Technol*. 2009;30(9):1363-1383.
91. Ibel K, May RP, Kirschner K, Szadkowski H, Mascher E, Lundahl P. Protein-decorated micelle structure of sodium-dodecyl-sulfate--protein complexes as determined by neutron scattering. *Eur J Biochem*. 1990;190(2):311-318.
92. Dickinson E, Golding M, Povey M. Creaming and Flocculation of Oil-in-Water Emulsions Containing Sodium Caseinate. *J Colloid Interface Sci*. 1997;185(2):515-529.
93. Marella C, Salunke P, Biswas AC, Kommineni A, Metzger LE. Manufacture of modified milk protein concentrate utilizing injection of carbon dioxide. *J Dairy Sci*. 2014;98(6):3577-3589.

- ⁹⁴ Datta N, Deeth HC. High pressure processing of milk and dairy products. *Aust J Dairy Technol.* 1999;54(1):41-48.
- ⁹⁵ Datta N, Deeth HC. High pressure processing. In: Roginski H, Fuquay JW, Fox PF, eds. *Encyclopedia of Dairy Sciences*. London, England: Academic Press; 2003:1327-1333.
- ⁹⁶ Huppertz T, Kelly AL, Fox PF. Effects of high pressure on constituents and properties of milk. *Int Dairy J.* 2002;12(7):561-572.
- ⁹⁷ Trujillo AJ, Capellas M, Saldo J, Gervilla R, Guamis B. Applications of high-hydrostatic pressure on milk and dairy products: a review. *Innov Food Sci Emerg Technol.* 2002;3(4):295-307.
- ⁹⁸ Claeys WL, Indrawati O, Van Loey AM, Hendrickx M. Review: are intrinsic TTIs for thermally processed milk applicable for high-pressure processing assessment? *Innov Food Sci Emerg Technol.* 2003;4(1):1-14.
- ⁹⁹ Balny C, Masson P. Effects of high pressure on proteins. *Food Rev Int.* 1993;9(4):611-628.
- ¹⁰⁰ Balci AT, Wilbey RA. High pressure processing of milk – the first 100 years in the development of new technology. *Int J Dairy Technol.* 1999;52(4):149-155.
- ¹⁰¹ Tedford L-A, Kelly SM, Price NC, Schaschke CJ. Interactive Effects of Pressure, Temperature and Time on Molecular Structure of β -Lactoglobulin. *J Food Sci.* 1999;64(3):396-399.
- ¹⁰² Fertsch B, Müller M, Hinrichs J. Firmness of pressure-induced casein and whey protein gels modulated by holding time and rate of pressure release. *Innov Food Sci Emerg Technol.* 2003;4(2):143-150.
- ¹⁰³ Patel HA, Singh H, Anema SG, Creamer LK. Effects of heat and high hydrostatic pressure treatments on the aggregation of whey proteins in whey protein concentrate solutions. *Food New Zealand.* 2004;4(3):29-35.
- ¹⁰⁴ Patel H, Patel S. Major Characteristics of Milk Powders and Test Methods. In: Lagrange V, ed. *Reference Manual for U.S. Milk Powders: 2005 Revised Edition*. Arlington, VA: US Dairy Export Council; 2005.
- ¹⁰⁵ Messens W, Van Camp J, Huyghebaert A. The use of high pressure to modify the functionality of food proteins. *Trends Food Sci Technol.* 1997;8(4):107-112.
- ¹⁰⁶ Huppertz T, Fox PF, Kelly AL. High pressure treatment of bovine milk: effects of casein micelles and whey proteins. *J Dairy Res.* 2004;71(1):97-106.
- ¹⁰⁷ Huppertz T, Fox PF, Kelly AL. High pressure-induced denaturation of α -lactalbumin and β -lactoglobulin in bovine milk and whey: a possible mechanism. *J Dairy Res.* 2004;71(4):489-495.
- ¹⁰⁸ Walkenström P, Hermansson A-M. High-pressure treated mixed gels of gelatin and whey proteins. *Food Hydrocoll.* 1997;11(2):195-208.
- ¹⁰⁹ Van Camp J, Feys G, Huyghebaert A. High Pressure Induced Gel Formation of Haemoglobin and Whey Proteins at Elevated Temperatures. *Lebensm Wiss Technol.* 1996;29(1-2):49-57.
- ¹¹⁰ Van Camp J, Messens W, Clément J, Huyghebaert A. Influence of pH and Calcium Chloride on the High-Pressure-Induced Aggregation of a Whey Protein Concentrate. *J Agric Food Chem.* 1997;45(5):1600-1607.
- ¹¹¹ Arias M, López-Fandiño R, Olano A. Influence of pH on the effects of high pressure on milk proteins. *Milchwissenschaft.* 2000;55:191-194.
- ¹¹² Patel HA, Huppertz T. Effects of High-pressure Processing on Structure and Interactions of Milk Proteins. In: *Milk Proteins: From Expression to Food*. 2nd ed. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Inc.; 2014:243-267.
- ¹¹³ Patel HA, Carroll T, Kelly AL. Nonthermal Preservation Technologies for Dairy Applications. In: Chandan R, ed. *Dairy Processing and Quality Assurance*. 2nd ed. Ames, Iowa: Wiley-Blackwell; 2015.
- ¹¹⁴ Ashokkumar M, Mason TJ, Sonochemistry. In: *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons; 2007. doi:10.1002/0471238961.1915141519211912.a01.pub2.
- ¹¹⁵ Muthukumar S, Kentish SE, Ashokkumar M, Stevens GW. Mechanisms for the ultrasonic enhancement of dairy whey ultrafiltration. *J Membrane Sci.* 2005;258(1-2):106-114.
- ¹¹⁶ Zisu B, Schleyer M, Chandrapala J. Applied ultrasound to reduce viscosity and control the rate of age thickening of concentrated skim milk. *Int Dairy J.* 2013;31(1):41-43.
- ¹¹⁷ Wu H, Hulbert GJ, Mount JR. Effects of ultrasound on milk homogenization and fermentation with yogurt starter. *Innov Food Sci Emerg Technol.* 2008;1(3):211-218.
- ¹¹⁸ Zisu B, Sciberras M, Jayasena V, Weeks M, Palmer M, Dincer TD. Sonocrystallisation of lactose in concentrated whey. *Ultrasonics Sonochem.* 2014;21(6):2117-2121.
- ¹¹⁹ Arnold G, Leiteritz L, Zahn S, Rohm H. Ultrasonic cutting of cheese: Composition affects cutting work reduction and energy demand. *Int Dairy J.* 2009;19(5):314-320.
- ¹²⁰ Patist A, Bates D. Ultrasonic innovations in the food industry: From the laboratory to commercial production. *Innov Food Sci Emerg Technol.* 2008;9(2):147-154.

索引

章節	頁數
引言	1
蛋白質的結構	2
蛋白質變性	3
牛奶蛋白：識別、結構與物理化學特性	3
酪蛋白	4
乳清蛋白	5
牛奶蛋白質結構與功能的關係	6
牛奶蛋白的功能特性	8
熱處理與牛奶蛋白：對功能特性的影響	10
熱處理與乳清蛋白：對功能特性的影響	11
熱處理在蛋白質功能性方面的一些商業應用	12
非熱處理對牛奶蛋白功能特性造成的改變	12
結論	13
參考文獻	14