

技术报告： 乳清蛋白的热稳定性



作者：

Kimberlee (K.J.) Burrington
威斯康辛乳品研究中心

校对：

美国乳业委员会

食品和饮料制造商提高产品的蛋白质含量是目前健康和保健产品发展趋势的一部分。许多食品和饮料制造商选择乳清蛋白作为新产品的蛋白质来源。拓展这些原料的应用拥有巨大的潜力，通过改良乳清的质量和性能完全可能开发出更新的配方。

本报告汇总了在提高乳清蛋白原料热稳定性方面的最新研究动向，以帮助产品开发人员更广泛地应用乳清蛋白。根据《美国联邦法规汇编》(Code of Federal Regulations, CFR)的定义，乳清是由牛奶或奶油生产奶酪的过程中分离凝乳块后得到的液体物质。牛奶中的蛋白大约有20%是乳清蛋白，乳清蛋白以液体的形式在奶酪生产过程中保留下来，继而加工成各种不同的原料。主要的乳清蛋白有 β -乳球蛋白(β -lg)、 α -乳清蛋白(α -lac)、牛血清白蛋白、免疫球蛋白和蛋白胨等。¹

每种乳清蛋白都具有特殊的物理性能，多种商用原料中都使用乳清蛋白，为种类繁多的食品增添风味、改善质构，并增加营养。乳清蛋白之所以成为一种广受青睐的营养配料，最为关键的原因在于其必需氨基酸含量，特别是支链氨基酸含量丰富。乳清蛋白配料的物理性质，使它们在许多食品应用中大显身手。但是对于一些配方来说，乳清蛋白对热的敏感性有可能是具有挑战性的问题。

乳清蛋白的特性

乳清蛋白的组成

乳清蛋白包括乳清浓缩蛋白(WPC)和乳清分离蛋白(WPI)，其蛋白质含量一般为25%~90%。² β -乳球蛋白和 α -乳清蛋白是主要的乳清蛋白，占总蛋白质的70%(见表1)。这两种蛋白质的特性决定了乳清蛋白原料的主要物理性能。

表 1. 乳清蛋白的组成²

乳清蛋白	WPC %	WPI %
α -乳清蛋白	12 - 16	14 - 15
β -乳球蛋白	50 - 60	44 - 69
糖聚肽 (GMP)	15 - 21	2 - 20
血清白蛋白	3 - 5	1 - 3
免疫球蛋白	5 - 8	2 - 3
乳铁蛋白	<1	-

¹Walstra P, Wouters JTM, Geurts TJ. Milk Components, Dairy Science and Technology. 2nd ed. CRC Press;2006:Chapter 2.

²Foegeding EA, Luck P, Vardhanabhuti B. Encyclopedia of Dairy Sciences. 2nd ed. Elsevier Ltd.;2011:Whey Protein Products.

乳清蛋白的功能性

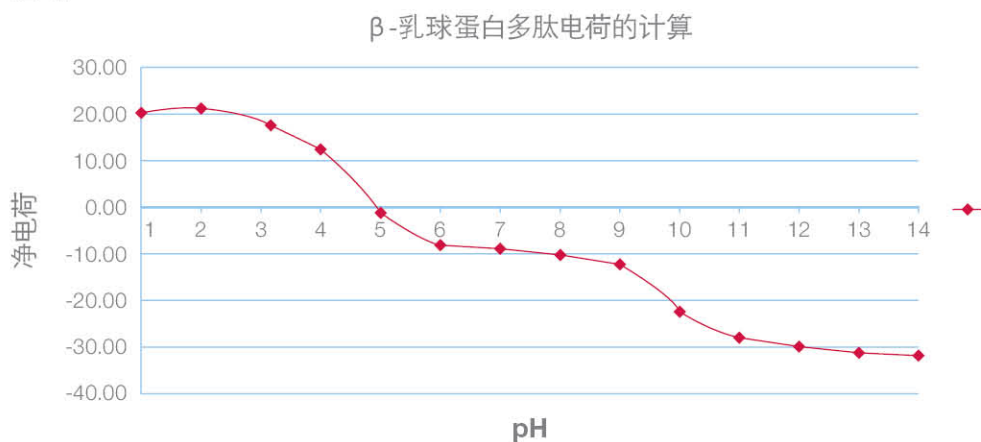
乳清蛋白是可为食品提供多种功能性的原料，在胶凝、水结合、溶解度、发泡、粘度以及乳化等方面发挥性能。在所有的功能特性中，溶解度被认为是最重要的，因为良好的溶解度是发挥其他所有功能特性所必需的。蛋白质的功能通过蛋白质分子和溶剂（水）、盐（离子）以及其他食品配料之间的相互作用表现出来。³ 乳清蛋白的一个独特功能是在较广泛的pH值（pH2~9）范围内均具有良好的水溶性，这对许多饮料的应用而言极为重要。⁴ 对乳清蛋白来说，如何在加热过程中保持其溶解度是一大挑战。很多食品都需以某种方式进行热处理，在加热过程中乳清蛋白极易发生变性等变化。

了解热稳定性和变性

热稳定性是保证蛋白质在加热过程中避免发生浊度过高、粘度增加、分离、沉淀或凝聚等不利变化的关键因素。 β -乳球蛋白和 α -乳清蛋白是决定乳清浓缩蛋白（WPC）和乳清分离蛋白（WPI）热稳定性的主要蛋白。⁴ 乳清蛋白的热变性涉及蛋白质的解折叠以及随后发生的蛋白凝聚，其中包含蛋白质之间的相互作用，形成共价（不可逆）和非共价（可逆）的聚合物。⁵

共价相互作用的一个例子是两个 β -lg分子间形成的二硫键。这可能缘于巯基氧化或巯基二硫键发生易位。乳清蛋白的热聚合取决于温度、离子强度（盐的浓度）、离子源以及蛋白质溶液的pH值等等。根据这些条件，蛋白质会出现不同程度和不同类型的聚合形式。一般情况下，大而密集的聚合物会增加溶液的浊度，然而，较小以及线型聚合物会对溶液粘度产生极大的影响，但对浊度的增加影响最小。如果蛋白质浓度足够高，这些蛋白质聚合物会形成一个混浊或透明的胶凝网络。⁶ 当盐存在时，蛋白质聚合物会增加（和氯化钠等单价盐相比，氯化钙等二价盐更易导致蛋白质聚合物的增加）。盐会增加聚合，是由于盐减少了蛋白质之间的电荷排斥（类似于将两块磁铁的N端靠拢时的情况）或在蛋白质之间形成了盐桥。因上述两种机制均涉及蛋白分子的静电荷，所以当pH值不同时，情况也随之改变。乳清蛋白的聚合物容易出现在pH 4.8~5.3，即 β -lg和 α -lac的等电点范围。该静电相互作用可以解释为 β -lg的净电荷和pH值之间的关系（见图1）。

图 1.



摘自K. Higgs和G. Rhodes⁷

³Xiong YL. Influence of pH and Ionic Environment on Thermal Aggregation of Whey Proteins. J Agric Food Chem. 1992;40:380-384.

⁴Vardhanabuti B, Foegeding EA. Effects of dextran sulfate, NaCl, and initial protein concentration on thermal stability of β -lactoglobulin and α -lactalbumin at neutral pH. Food Hydrocolloids. 2008;22(5):752-762.

⁵Ryan KN, Vardhanabuti B, Jaramillo DP, van Zanten JH, Coupland JN, Foegeding EA. Stability and mechanism of whey protein soluble aggregates thermally treated with salts. Food Hydrocolloids. 2012;27:411-420.

⁶Prabakaran S, Damodaran, S. Thermal unfolding of β -lactoglobulin: Characterization of initial unfolding events responsible for heat-induced aggregation. J Agric Food Chem. 1997;45:4303-4308.

⁷Adapted from Polypeptide Charge Calculation for Beta-lactoglobulin chart developed by Gale Rhodes, University of Southern Maine. Available at spdbv.vital-it.ch/TheMolecularLevel/Goodies/PeptChg.xls. Accessed April 19, 2012.

食物的pH值大多在3到7之间。当pH值为3的时候， β -lg有一个非常高的正净电荷，这说明溶液中的蛋白质之间存在大量斥力。这些斥力会抑制蛋白质之间的相互作用，甚至在受热时也是如此——因此，当蛋白质浓度高达7%时，仍可保持较好的热稳定性和透明度（浊度低）。一旦pH值上升到4，净电荷减少，斥力也降低。这样，由于蛋白质之间的吸引力，即使在不加热的状态下，乳清蛋白溶液的浊度也会增加。在高于 β -lg的变性温度（78°C以上）进行热处理时，会发生蛋白质的聚合和沉淀，除非添加其他配料来改善蛋白质的热稳定性。在pH值为5.2的等电点时，蛋白质的净电荷为0，此时蛋白质间的相互作用位于其最高点。在该pH值状态下，溶液中的蛋白质极易沉淀下来。当pH值上升至7的时候，蛋白质的净电荷转为负数，但pH值为7时的负净电荷接近于pH值为4.2时的正净电荷。⁸

商业化的热稳定原料的应用

当今的技术已完全能满足提高乳清蛋白配料热稳定性的需求。其中的一些技术已被用于商业化的原料。例如水解蛋白质、调整矿物质配料、或添加矿物质螯合剂等等。下一节将讨论这些技术以及其他一些新的研究工作。

在未来的商业应用中，改善热稳定性的新研究和新方法

乳品研究所资助的研究主要集中在如何提高乳清蛋白的热稳定性方面，以开拓其在食品中更广泛的应用。研究人员选择各种方法来改善乳清蛋白的热稳定性，其中包括：通过添加糖、酶交联法、矿物质螯合法和超声波法等方法来控制蛋白聚合物的体积；通过分子伴侣、酶水解、静电斥力、与碳水化合物共轭以及蛋白质包埋等来改变乳清蛋白，以阻止聚合。

控制蛋白质聚合物的体积

加糖

一些研究人员对加糖和乳清蛋白配料热稳定性之间的关系展开了研究。现已发现添加蔗糖可以提高乳清分离蛋白（WPI）和牛血清白蛋白的胶凝温度和胶凝强度。^{9、10、11、12、13} 添加甘油也可改善乳清分离蛋白（WPI）的热稳定性、降低浊度和蛋白胶凝。^{10、14} 此外，添加山梨醇还可以提高乳清分离蛋白（WPI）的热变性温度，并且比乙二醇更有效。在pH值为7.0时，向10%的 β -lg溶液中添加0~55%的山梨醇后并加热，不会生成胶凝¹⁵。许多食品在应用时都含有糖或糖醇，它们的存在能改善乳清蛋白的热稳定性，这是因为它们能有效防止大块聚合物的形成，在饮料中提供更好的透明度。

⁸Personal communication with Allen Foegeding.

⁹Foegeding EA, Davis JP, Doucet D, McGuffey MK. Advances in modifying and understanding whey protein functionality. Trends Food Sci Technol. 2002;13:151-159.

¹⁰Rich LM, Foegeding EA. Effects of sugars on whey protein isolate gelation. J Agric Food Chem. 2000;48(10):5046-5052.

¹¹Baier S, McClements DJ. Impact of preferential interactions on thermal stability and gelation of bovine serum albumin in aqueous sucrose solutions. J Agric Food Chem. 2001;49(5):2600-2608.

¹²Baier SK, McClements DJ. Influence of cosolvent systems on the gelation mechanism of globular protein: Thermodynamic, kinetic, and structural aspects of globular protein gelation. Compr Rev Food Sci F. 2005;4(3):43-54.

¹³Baier SK, McClements DJ. The effect of binary cosolvent systems (glycerol-sucrose mixtures) on the heat-induced gelation mechanism of bovine serum albumin. Int J Food Sci Technol. 2006;41(2):189-199.

¹⁴Kulmyrzaev A, Bryant C, McClements DJ. Influence of sucrose on the thermal denaturation, gelation, and emulsion stabilization of whey proteins. J Agric Food Chem. 2000;48:1593-1597.

¹⁵Chanasattru W, Decker EA, McClements DJ. Modulation of thermal stability and heat-induced gelation of β -lactoglobulin by high glycerol and sorbitol levels. Food Chem. 2007;103:512-520.

酶法交联

使用谷氨酰胺转胺酶 (TG) 使某些乳清蛋白和其他蛋白质交联可以提高热稳定性。^{16, 17, 18} 在95°C加热30分钟条件下, β-乳球蛋白和酪蛋白交联后, 5%浓度时不会形成凝胶, 10%浓度时形成软凝胶, 在pH值为8时可获得最佳的热稳定性, 在pH值为7和100°C的条件下, 5%浓度可保持90%的溶解度。¹⁶ 用4%和8%浓度的谷氨酰胺转胺酶 (TG) 水溶液在pH值为7.5的条件下处理乳清分离蛋白 (WPI) 溶液的结果显示, 温度从68°C提高到94°C的过程中胶凝强度有所下降。α-乳清蛋白和β-乳球蛋白之间产生的交联是广泛存在的, 它们可以构建足够大的聚合物, 以防止凝胶网络的形成。¹⁵ 在pH值为6.4和7.2之间、蛋白质浓度为3.5%的条件下, 使用谷氨酰胺转胺酶 (TG) 交联乳清浓缩蛋白 (30%~35%的蛋白质) 可以使热稳定性提高到90°C 30分钟。¹⁷

本研究是基于以下前提: 热稳定性得以改善的主要归因于α-乳清蛋白和β-乳球蛋白之间的交联。另一项最新的研究表明, 微生物谷氨酰胺转胺酶与乳清分离蛋白 (WPI) 的交联对蛋白质的pH和热稳定性是有效的。交联明显提高了β-Ig的变性温度, 未经处理的样品的变性温度为71.84°C, 而与谷氨酰胺转胺酶 (TG) 反应30小时后, 变性温度提高到78.50°C。¹⁹

矿物质螯合

矿物质是天然存在于乳清浓缩蛋白和乳清分离蛋白中的。钙等二价阳离子能够在两个相邻的羧基之间从不同的肽链形成一个离子桥, 而钠等单价离子却不能。在已加热到96°C的10%乳清分离蛋白 (WPI) 溶液中添加磷酸钠, 将减少蛋白质之间的相互作用。³ 另一项研究采用乙二醇二乙醚二胺四乙酸 (EGTA) 或乙二胺四乙酸 (EDTA) 作为螯合剂, 有效减少了乳清浓缩蛋白 (WPC) 和乳清分离蛋白 (WPI) 水溶液 (含量为11%) 在pH7.0时的蛋白质聚合和胶凝。²⁰ 另一项由乳品研究所资助, 由Foegeding进行的尚未公布的研究表明, 使用柠檬酸钠、EDTA和蛋白水解物与钙结合起来, 生产一种蛋白质含量为5%、pH值为中性的饮料产品, 其热稳定性在90°C时为5分钟。

超声波处理

以不同的时间 (5分钟和15分钟), 温度 (20°C, 60°C和无温控) 对总固形物含量为6.9~30.2%, 蛋白质含量为13.5%~88%的乳清蛋白溶液进行超声波处理。使用15W功率的超声波, 在60°C和无温控条件下处理总固形物为28.2%和蛋白质含量为35.6%的乳清溶液。结果显示, 浊度降低了90%。用超声波处理蛋白质含量为88%的乳清蛋白溶液时, 浊度会上升。²¹ 这个新的正在申请专利的项目的原理是: 由声空化产生的物理作用力造就了粒径小、热稳定性和纯净度更好的乳清蛋白。另一项研究表明, 如能在80°C温度下进行1分钟或85°C温度下进行30秒的预处理, 并结合超声波处理, 能显著提高乳清浓缩蛋白的热稳定性。这种热稳定性在喷雾干燥和复水后仍能保持。²²

控制蛋白质聚合

分子伴侣

分子伴侣是一种有助于稳定乳清蛋白、防止其解折叠、聚合和沉淀的化合物。酪蛋白具有与其他蛋白质相结合的能力, 使其获得

¹⁶Truong VD, Clare DA, Catignani GL, Swaisgood HE. Cross-linking and rheological changes of whey proteins treated with microbial transglutaminase. *J Agric Food Chem.* 2004;52:1170-1176.

¹⁷Tanimoto SY, Kinsella JE. Enzymatic modification of proteins: effects of transglutaminase cross-linking on some physical properties of β-lactoglobulin. *J Agric Food Chem.* 1988;36:281-285.

¹⁸Lorenzen PC. Effects of varying time/temperature-conditions of pre-heating and enzymatic cross-linking on techno-functional properties of reconstituted dairy ingredients. *Food Res Int.* 2007;40:700-708.

¹⁹Agyare K, Danodaran S. pH-stability and thermal properties of microbial transglutaminase-treated whey protein isolate. *J Agric Food Chem.* 2010;58:1946-1953.

²⁰Kuhn P, Foegeding EA. Factors influencing whey protein gel rheology: Dialysis and calcium chelation. *J Food Sci.* 1991;56(3):789-791.

²¹Martini S, Potter R, Walsh MK. Optimizing the use of power ultrasound to decrease turbidity in whey protein suspensions. *Food Res Int.* 2010;43(10):2444-2451.

²²Zisua B, Bhaskaracharyab R, Kentishb S, Ashokkumar M. Ultrasonic processing of dairy systems in large scale reactors. *Ultrasonics Sonochemistry.* 2010;17(6):1075-1081.

更多的化学的和热的稳定性以及抗聚合的能力,因此,酪蛋白可以作为分子伴侣。 α -酪蛋白可通过疏水表面与部分解折叠蛋白相互作用,防止正常的巯基二硫键与其他乳清蛋白易位,并最终聚合起来。这种酪蛋白还可以溶解疏水聚合的蛋白。同时,其伴侣的能力会随温度降低得以提升。²³ 其他一些研究人员还研究了 α -酪蛋白、 β -酪蛋白以及 κ -酪蛋白分子伴侣的能力。²⁴

β -酪蛋白通过电荷形成一个蛋白质复合物。复合物的形成可能伴随可溶性或聚合性乳清蛋白的形成,而且由此产生的化合物小于自我聚合物的乳清蛋白复合物。较小的复合物具有更好的可溶性,并且其耐热性可达到145°C,会改善溶液的纯净度。对牛奶浓缩蛋白对乳清蛋白溶液的分子伴侣效果进行的评估发现,在蒸汽加热条件下处理蛋白质含量为10%的代餐饮料是稳定的。^{25, 26}

酶水解

提高热稳定性的一个常用方法是对乳清蛋白进行酶水解。商业化的用于改善热稳定性水解乳清蛋白(WPH)的水解程度一般为5~10%。水解乳清蛋白(WPH)功能特性的变化是缘于肽的物理特性。一般说来,肽具有较低的分子量,暴露的疏水基团以及较多的离子基团。通常情况下,与未经改变的蛋白相比,水解乳清蛋白(WPH)在溶解度更高、粘度更低,在发泡、胶凝和乳化性能方面更胜一筹。²⁷ 水解过程中产生的多肽,缺少二级结构,因此在加热过程中发生的构象的改变很少。⁷ 水解乳清蛋白(WPH)的物理化学特性与以下因素有关:蛋白底物的纯度、蛋白底物的预处理、蛋白水解酶的特异性、水解时所采用的理化条件(pH值、温度、离子强度、活性)、水解度、酶钝化采用的技术(热处理、酸化或膜滤法)、以及水解的后处理。²⁸ 最近的研究还表明,乳清蛋白的部分水解可提高其热稳定性及其功能性,但过度水解则可能适得其反。²⁸

另一个研究项目是在pH值为3.0-4.5的条件下以每8盎司含5~35克蛋白的蛋白质溶液为试样进行的。通过离心技术清除溶液中沉淀的乳清蛋白,并将pH值调整到4.6。利用这项技术还改善了成品饮料的纯净度。在这项研究中也结合了酶的使用,通过离心或过滤技术,在pH值4.6时,将蛋白质分离为水溶性和不溶性部分。²⁹ 为获得生产酸性和中性饮料所需要的乳清蛋白,研究人员用胰蛋白酶修正多肽片段,使其不会过大而聚合或过小而产生苦味。通过这些方法,使饮料在pH值达到4.6时仍然具有理想的纯净度和热稳定性。

静电排斥作用

乳品研究所资助的一项新的研究工作是在酶解过程中结合静电排斥技术,以提高乳清蛋白的热稳定性和纯净度。这两种方法均用于修正乳清蛋白的电荷。其中的一个方法是在pH值8时,通过琥珀酰化反应(修改主要的氨基),包埋部分带正电荷的蛋白质。该反应能降低基群的数量,同时增加蛋白质的酸度和提高静电电荷的相斥力。在第二种方法中,酰胺化反应阻止带负电荷的 ω -羧基,并将其转换为不带电荷的氨基酸。本研究确定了最低电荷数以提高静电斥力,防止在pH值3.8~4.6时发生聚合。³⁰

²³Bhattacharyya J, Das KP. Molecular chaperone-like properties of an unfolded protein, α -casein. *J Biol Chem.* 1999;274:15505-15509.

²⁴Morgan PE, Treweek TM, Linder RA, Price WE, Carver JA. Casein proteins as molecular chaperones. *J Agric Food Chem.* 2005;53:2670-2683.

²⁵Zhang X, Fu X, Zhang H, Liu C, Jiao W, Chang Z. Chaperone-like activity of β -casein. *Int J Biochem Cell Biol.* 2005;37:1232-1240.

²⁶Yong YH, Foegeding EA. Effects of caseins on thermal stability of bovine β -lactoglobulin. *J Agric Food Chem.* 2008;56:10352-10358.

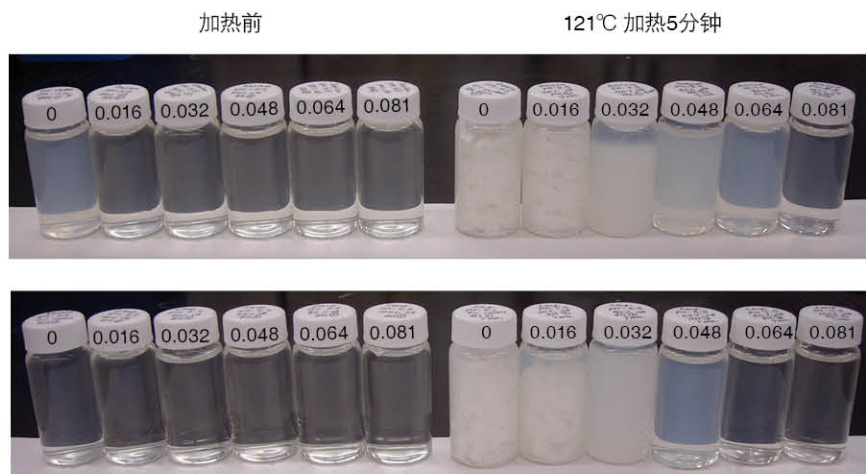
²⁷Gauthier SF, Pouliot Y. Functional and Biological Properties of Peptides Obtained by Enzymatic Hydrolysis of Whey Proteins. *J Dairy Sci.* 2003;86(13):E78-E87.

²⁸Doucet D, Foegeding EA. Gel Formation of Peptides Produced by Extensive Enzymatic Hydrolysis of β -Lactoglobulin. *Biomacromolecules.* 2005;6(2):1140-1148.

²⁹Zhu D, Damodaran S, Lucey JA. Physicochemical and emulsifying properties of whey protein isolate (WPI)-Dextran conjugate produced in aqueous solution. *J Agric Food Chem.* 2010;58:2988-2994.

³⁰Yilmaz-Gemili A. Electrostatic repulsion enhancement for heat stable, clear whey protein beverages. M.S. thesis, 2012.

图 2.



溶液1. 在pH值5.5、6.0和7.0时对溶液进行了测试。试验证明, pH值从5.5提高到7.0时, 应减少电荷的调整以防止蛋白质聚合, 从而生产出澄清的饮料。

与WPI2相比, 需要更多的电荷调整, 才能得到纯净的WPI1 (上方)。在pH值为5.5时, 77%的ε氨基调整, 才能生产出纯净的WPI1 (0.081gSA /g蛋白)。

溶液2. 65%的ε氨基调整才能生产出纯净的WPI2 (0.064gSA /g蛋白)。

本页图2表示了前面所述的琥珀酰化方法。研究人员通过向两种不同的、调整过的乳清分离蛋白(WPI)溶液添加琥珀酸酐(SA), 阻止带负电荷的羧基。由于电荷数的增加, 在pH值5.5时, 对照组的(左侧)和加热后的(右侧)乳清分离蛋白(WPI)溶液的热稳定性和纯净度均得到改善。小瓶上部的数值是SA与WPI的克数比率。对照组试样是在不添加琥珀酸酐(SA)的条件下, 使用相同程序制备的不同pH值的试样。

与碳水化合物共轭

一些研究人员探讨了乳清蛋白和多糖的共轭, 旨在提高食品应用中乳清蛋白的热稳定性。一项研究评估了氯化钠、硫酸葡聚糖以及β-Ig和α-lac的蛋白质浓度在pH值6.8时对热稳定性(85°C 15分钟)的影响。氯化钠对增加蛋白质聚合的影响最大, 它会增加浊度和分子大小、降低蛋白质溶解度。硫酸葡聚糖在低浓度时可防止蛋白质聚合。⁴ 在随后的研究中使用硫酸葡聚糖和β-Ig(6%的水溶液)在pH值5.6~6.2的条件下, 85°C温度下加热15分钟, 溶液的浊度得以下降, 这是由于降低了β-Ig的变性温度并改变了它的聚合。³¹ 另一项研究探讨了在美拉德反应的初始阶段, 溶液中的乳清分离蛋白(WPI)和葡聚糖之间的共轭反应。10%浓度的乳清分离蛋白(WPI)和30%浓度的葡聚糖在pH6.5以及60°C的温度下共轭反应(24小时)可获最佳效果。³² 此后又在类似的条件下进行了48小时的试验, 检测乳清分离蛋白(WPI)和葡聚糖复合物的热稳定性和乳化性能。与对照组相比, 在80°C温度下进行纯化共轭反应30分钟后, 热稳定性得到了明显的改善, 并可在pH值3.2~7.5的范围内保持溶解度, 离子强度达0.05~0.2摩尔, 其乳化能力和稳定性优于阿拉伯树胶和WPI溶液。²⁷

蛋白质包埋

初始工作包括包埋前的两种不同处理方法。一种方法是在微乳化和进行热处理(90°C 20分钟)前, 将5%的WPI和转谷氨酰胺酶进行交联。第二种方法是在热处理前, 在微乳化过程中将WPI和转谷氨酰胺酶进行交联。这两种方法所产生的粒子具有不同的粒径和热稳定性。通过提高转谷氨酰胺浓度、延长交联时间, 可改善热稳定性。³³ 最近的一项研究是利用水/油微乳化技术形成热稳定的乳清蛋白聚合物。这些纳米粒子处于各种表面活性剂中, 即可生产出热性能稳定、纯净透明的饮料, 即使在高浓度的盐中也没有问题。³⁴

³¹Vardhanabhuti B, Yucel U, Coupland JN, Foegeding EA. Interaction between β-lactoglobulin and Dextran Sulfate at Near Neutral pH and their Effect on Thermal Stability. *Food Hydrocolloids*. 2009;23:1511-1520.

³²Zhu D, Damodaran S, Lucey JA. The formation of WPI-dextran conjugates in aqueous solutions. *J Agric Food Chem*. 2008;56:7113-7118.

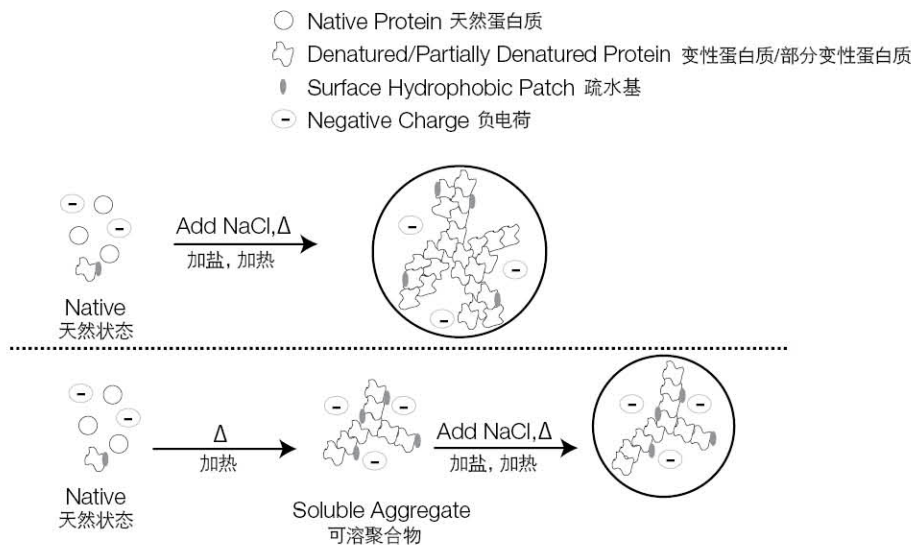
³³Zhang W, Zhong Q. Microemulsions as nanoreactors to produce whey protein nanoparticles with enhanced heat stability by sequential enzymatic cross-linking and thermal pretreatments. *J Agric Food Chem*. 2009;57:9181-9189.

目前, 乳品研究所资助的一项扩大研究项目是利用各种蛋白质的包埋技术, 在要求苛刻的生产条件下, 如pH值为酸性和中性下高压杀菌, 生产纯净透明、热稳定的乳清蛋白含量为10%~15%的溶液。

可溶性聚合物的形成

最近发表的一项研究探讨的是如何从WPI和 β -Ig中形成可溶性聚合物。将7%浓度的蛋白质溶液(缓冲至pH值6.8)在90°C温度下加热10分钟, 然后在冰浴中冷却10分钟。⁵ 使用氯化钠溶液将蛋白浓度稀释到3%后, 对未经热处理溶液和经过热处理溶液的盐类稳定性进行评价。将蛋白质的盐溶液在90°C温度下加热5分钟, 然后在冰浴中冷却至室温。在含有盐分、pH值为中性的环境中, 乳清蛋白的可溶性聚合物的热稳定性有所提高。该研究的工作机制如图3所示。

图 3.⁵



由于喷雾干燥, 乳清分离蛋白中是存在变性蛋白的。解折叠导致变性蛋白质暴露疏水基。负电荷显示蛋白质的平均电荷。研究人员建议, 可利用可溶性聚合物, 通过降低聚合物的体积和修正其形状等措施来提高热稳定性。这些变化可降低浊度和粘度, 增加最终配料的溶解度。在盐液中进行加热, 因其较高的负电荷以及得益于分支少、体积小而获得的紧凑结构等缘故, 也可减少二次相互作用的可能性。

热稳产品的应用

改进乳清蛋白的热稳定性, 有利于其在各类食品和饮料中的应用。本文引用的许多项目的设计目标是开发强化蛋白饮料。关于乳清蛋白在饮料中的应用的基础信息也已出版。³⁵ 尽管研究工作取得了这些进展, 蛋白饮料的开发人员仍面临挑战。乳清蛋白研究人员的目标是通过开发新技术, 探索如何解决乳清蛋白的稳定性问题。

³⁴Zhang W, Zhong, Q. Microemulsions as nanoreactors to produce whey protein nanoparticles with enhanced heat stability by thermal pretreatment. Food Chem. 2010;119:1318-1325.

³⁵Rittmanic S, Burrington K. U.S. Dairy Export Council Whey Applications Monograph: U.S. whey proteins in Ready to Drink Beverages. 2006. Available at: www.usdec.org/files/Publications/BEVERAGESwebversion8-16-06.pdf. Accessed April 19, 2012.

在饮料中的应用可以说是蛋白质的稳定性面临的巨大挑战，这是因为一些产品开发者希望获得高蛋白质含量的产品。实现卓越的热稳定性的一个重要步骤，就是乳清蛋白配料的水合。乳清蛋白配料是粉状的，需要在良好的水化才能在加热过程中发挥最佳性能。最佳的水化法，包括在低于60°C的水中，高速搅拌乳清蛋白配料，在进行热处理前，在缓慢或无搅拌状态下进行至少30分钟的水合。³⁴ 高剪切的连续搅拌会产生泡沫，并使乳清蛋白在预处理时发生变性。这种变性会导致浑浊或产生粒状/泛白等质感，并在加热后产生蛋白质沉淀。

热稳定性的改善还有助于乳清蛋白在其他强化乳清蛋白的食品中的应用，如高压杀菌汤料、酱料，焦糖甜点，强化蛋白的冰淇淋和其他一些为延长保质期而经过高温处理的食品。

有关乳清蛋白和正在进行的乳制品配料研究的详细信息，请访问ThinkUSAdairy.org (中英文)。

目录

章节	页码
乳清蛋白的特性	1
乳清蛋白的组成	1
乳清蛋白的功能性	2
了解热稳定性和变性	2
商业化的热稳定原料的应用	3
在未来的商业应用中, 改善热稳定性的新研究和新方法	3
控制蛋白质聚合物的体积	3
控制蛋白质聚合	4
热稳产品的应用	7