乳清粉对高筋粉热力学和糊化特性及面团流变学特性的影响

马娟，吴艳，郭锐，吴金鸿

（上海交通大学农业与生物学院,农业部都市农业（南方）重点实验室,上海 200240）

摘要：采用差示扫描量热仪(DSC)、快速粘度仪(RVA)、粉质仪和拉伸仪研究乳清粉对高筋粉热力学特性、糊化特性及面团流变学特性的影响。DSC测试结果表明添加3.0%和5.0%乳清粉时，高筋粉的糊化起始温度和热焓值较空白高筋粉（未添加乳清粉）明显上升。RVA测试结果显示混合粉的峰值粘度、最低粘度、最终粘度、衰减值及回生值随着乳清粉添加量的增加呈下降趋势，糊化温度呈上升趋势。粉质试验结果表明添加乳清粉显著降低了高筋粉的吸水率和面团形成时间，增加了面团的稳定时间和粉质质量指数。拉伸试验结果显示面团的拉伸曲线面积、拉伸阻力和拉伸比例随着乳清粉含量的增加呈上升趋势，延伸度则呈下降的趋势。总体而言，添加乳清粉增强了高筋粉的热稳定性和抗老化能力，优化了面团的流变学特性。

关键词：乳清粉；热力学特性；糊化特性；流变学特性

文章篇号：1673-9078(2016)10-96-101 DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2016.10.016

Effect of Whey Powder on Thermodynamic and Pasting Properties of High-gluten Flour and the Rheological Properties of Dough

MA Juan, WU Yan, GUO Rui, WU Jin-hong

(Key Laboratory of Urban Agriculture (South), Ministry of Agriculture, School of Agriculture and Biology, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The effect of whey powder on the thermodynamic and pasting properties of high-gluten flour and the rheological properties of dough was investigated using differential scanning calorimeter (DSC), rapid viscosity analyzer (RVA), farinograph, and extensograph. DSC test results indicated that the addition of 3.0% and 5.0% whey powder significantly increased the initial pasting temperature and enthalpy value of high-gluten flour compared to those of blank high-gluten flour. RVA test results showed that the peak, trough, final viscosities, and breakdown and setback of high-gluten flour decreased with increasing amounts of added whey powder, whereas pasting temperature showed an upward trend. In addition, the results of farinograph experiments revealed that with whey powder, the water absorption and development time of the dough decreased, whereas the stability time and farinograph quality number of the dough increased. In the extensograph experiments, the tensile curve area, resistance to stretching, and resistance to extension (R/E) ratio showed an increasing trend with increasing amounts of whey powder, whereas the extensibility showed a decreasing trend. In general, the addition of whey powder improved the thermodynamic stability and anti-retrogradation ability of high-gluten flour, and optimized the rheological characteristics of dough.

Key words: whey powder; thermodynamic properties; pasting properties; rheological properties

乳清是乳经酸凝乳或凝乳酶凝固后的液体部分，是生产干酪（或干酪素）产品的副产物，包含乳中约55%的营养成分，乳中的乳糖、矿物质和多种维生素几乎全部留在乳清中，因此乳清具有较高的营养价值和良好的功能特性，在乳制品、焙烤食品、糖果及饮料生产中应用广泛[1~2]。乳清粉是以乳清为原料，经杀菌、浓缩、干燥等工艺制成的粉末状产品，按照生产工艺的不同可分为甜乳清粉、酸乳清粉、脱盐乳清粉和低乳糖乳清粉等。

乳清粉中的主要成分为乳糖和乳清蛋白，应用在焙烤食品中可以起到促进褐变、强化营养、改善产品质构和风味等作用[3]。目前研究主要集中在乳糖和乳清蛋白分别应用在焙烤食品中，而对乳清粉直接应用于焙烤食品中的研究则相对较少。面包作为大众食品，深受消费者喜爱，近年来随着社会经济的发展和人们

收稿日期：2015-10-16

基金项目：“十二五”农村领域国家科技计划课题（2013BAD18B02）

作者简介：马娟（1990-），女，硕士研究生，研究方向：功能性食品研究与开发

通讯作者：吴艳（1977-），女，博士，副研究员，研究方向：功能性食品

生活水平的提高，消费者对面包产品的要求也不断提高，不仅仅局限于面包的口感和风味，更注重其营养与功能。我国对乳清的综合利用尚处于起步阶段，乳清的回收和利用较少且规模化生产程度较低，因此研究开发新型乳清粉面包既能满足市场和消费者的需求，又能促进乳清的综合应用，具有重要的经济意义和广阔的发展前景。

面团是制作各类面制食品的基本形态，其流变学特性综合反映面团的耐揉性、粘弹性和延展性等，不仅是评价面粉质量的重要指标，而且对面包、蛋糕等面制品的加工品质有着重要影响。因此，研究乳清粉面团的流变学特性对乳清粉在面包产品中的应用显得尤为重要。本文旨在研究乳清粉对高筋粉热力学特性和糊化特性及对面团流变学特性的影响，以期为乳清粉在面包产品中的应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验原料

甜乳清粉：上海今朝食品有限公司；高筋粉：内蒙古恒丰食品工业（集团）股份有限公司；其它试剂均为分析纯及以上。

1.2 主要仪器和设备

NDA701 杜马斯定氮仪，意大利 VELP 公司；RVA 4500 快速粘度仪（RVA），波通澳大利亚公司；204 F1 差示扫描量热仪（DSC），德国 Netzsch 公司；Farinograph-E 型粉质仪和 Extensograph-E 型拉伸仪，德国 Brabender 公司。

1.3 试验方法

1.3.1 原料主要成分分析

高筋粉和乳清粉水分含量、灰分含量、蛋白质含量的测定分别参照定 GB/T 5009.3-2010、GB/T 5009.4-2010 和 GB/T 5009.5-2010；高筋粉中淀粉含量的测定参照 GB/T 5514-2008；乳清粉中乳糖含量的测定参照 GB/T 5413.5-2010。

1.3.2 乳清粉与高筋粉混合粉的配制

在高筋粉中分别添加 1.0%、2.0%、3.0%、4.0%、5.0%（以高筋粉质量为基重）的甜乳清粉，混合均匀，以不添加乳清粉的高筋粉作为空白对照组。

1.3.3 热力学特性的测定

准确称量4.00 mg（精确至0.01 mg）混合粉于铝坩埚中，用微量进样器加入适量蒸馏水（混合粉:水=1:2 *m/m*），坩埚加盖密封后，置于4 ℃冰箱中平衡24 h，以空坩埚为对照，采用DSC进行测定，扫描温度范围为20~120 ℃，升温速率为10 ℃/min，利用软件记录糊化的起始温度（Onset Temperature，T_o）、峰值温度（Peak Temperature，T_p）、终止温度（Completion Temperature，T_c）和热焓值（Enthalpy，ΔH）。

1.3.4 糊化特性的测定

依据GB/T 24853-2010方法，利用RVA测定混合粉的峰值粘度（Peak Viscosity)、最低粘度（Trough）、最终粘度（Final Viscosity）、衰减值（Breakdown）、回生值（Setback）等糊化指标。量取25.0±0.1 mL水（按14.0%湿基校正）于RVA样品筒中，准确称取3.50±0.01 g混合样品放入样品筒中，用搅拌器桨叶在试样中上下剧烈搅动10次使试样分散均匀，测定初始温度为50 ℃保持1 min，以12 ℃/min升高到95 ℃，保持2.5 min，再以12 ℃/min降到50 ℃保持2 min，前10 s内以960 r/min搅拌，之后整个过程以160 r/min搅拌，整个过程共计13 min。

1.3.5 面团流变学特性的测定

粉质特性的测定参照GB/T 14614-2006，粉质参数包括吸水率（Water Absorption，WA）、面团的形成时间（Development Time，DT）、面团稳定时间（Stability Time，ST）、粉质质量指数（Farinograph Quality Number，FQN）。拉伸特性的测定参照GB/T 14615-2006，根据拉伸曲线读取相应的面团拉伸参数，包括面团拉伸曲线面积、拉伸阻力、延伸度和拉伸比例。

1.4 数据分析

使用 SPSS 19.0 进行数据分析和统计，实验数据平均值±标准差表示，运用方差分析法（ANOVA）进行显著性分析。

2 结果与讨论

2.1 高筋粉和乳清粉的主要成分分析

表 1 原料主要成分分析

Table 1 Analysis of the main components of raw materials

原料	水分/%	灰分/%	粗蛋白/%	乳糖/%	淀粉/%
高筋粉	14.30±0.26	0.53±0.01	12.03±0.04	-	71.30±0.12
乳清粉	3.51±0.05	8.19±0.05	13.35±0.15	72.86±0.21	-

由表1可知，高筋粉主要成分为淀粉（71.30%）、水分（14.30%）和蛋白质（12.03%），乳清粉主要成分为乳糖（72.86%）、蛋白质（13.35%）和灰分（8.19%）。乳糖是还原糖，其甜度约为蔗糖甜度的20%~30%，将其应用在烘焙食品中可以略微降低蔗糖的使用量、促

进褐变、保持水分及改善风味等[4]。乳清粉中的蛋白质主要是乳清蛋白，其中胆固醇和钠含量较低，矿物质含量较高，是支链氨基酸（亮氨酸、缬氨酸和异亮氨酸）的良好来源，并且具有成胶性、搅打起泡性、乳化性等多种功能特性[5]，应用在焙烤食品可以起到强化营养、改善风味和提高产品质量等。

2.2 乳清粉对高筋粉热力学特性的影响

表 2 添加 3%和 5%乳清粉对高筋粉热力学特性的影响

Table 2 Effect of 3.0% and 5.0% whey powder on the thermodynamic properties of high-gluten flour

添加量/%	T_o/℃	T_p/℃	T_c/℃	ΔH/(J/g)
0.0	59.25±0.07^a	65.41±0.07^a	73.00±0.14^a	4.26±0.06^a
3.0	61.16±0.37^b	66.07±0.33^a	73.40±0.28^a	4.81±0.13^b
5.0	60.20±0.85^b	65.90±0.64^a	73.45±0.21^a	4.47±0.11^b

注：同一列中不同的小写字母表示具有显著差异（p<0.05）。

淀粉糊化是颗粒状淀粉在水中因受热吸水膨胀，分子间及分子内部的氢键断裂，淀粉水合分子扩散的过程，此过程伴随的能量变化在DSC分析图谱上表现为吸热峰。由表2可知，空白高筋粉的糊化起始温度为59.25 ℃，热焓值为4.26 J/g；添加3.0%和5.0%乳清粉时，混合粉的糊化起始温度和热焓值较未添加乳清粉的高筋粉明显上升（p<0.05），说明添加乳清粉增强了高筋粉的热稳定性，但其峰值温度和终止温度没有显著性差异，文献报道[6~7]添加糖类物质会影响淀粉的糊化：糖类物质所含的羟基与淀粉分子竞争水分改变了水分活度，使淀粉不能充分吸水膨胀，低温条件下没有足够的水分子进入淀粉颗粒内部瓦解淀粉结晶结构，只有借助高温破坏糖与水分子间的氢键作用，淀粉分子才能达到完全糊化状态；糖类能与淀粉链形成“糖桥”，稳定了淀粉链的分子结构特别是结晶区的结构，低温状态下水分子很难破坏淀粉分子的有序结构，需要更高的温度以破坏淀粉颗粒，因此导致体系糊化的峰值温度和热焓值上升。此外，Perry等人认为[8]糖类物质的添加能够降低溶剂的增塑作用从而使提高淀粉的糊化温度。

2.3 乳清粉对高筋粉糊化特性的影响

表 3 乳清粉对高筋粉糊化特性的影响

Table 3 Effect of whey powder on the pasting properties of high-gluten flour

添加量/%	峰值粘度/cp	最低粘度/cP	衰减值/cP	最终粘度/cP	回生值/cP	峰值时间/min	糊化温度/℃
0.0	2580.50±13.43^a	1755.35±19.09^a	825.00±32.53^a	3144.15±14.14^a	1388.50±33.23^a	6.44±0.06^a	68.95±0.64^a
1.0	2237.25±43.84^b	1499.64±26.87^b	738.45±16.97^b	2761.50±34.65^b	1262.43±7.78^b	6.33±0.02^a	70.18±0.03^a
2.0	2320.40±31.11^c	1558.50±28.99^c	761.57±2.12^c	2866.50±16.27^c	1308.06±12.73^c	6.37±0.03^a	70.13±0.04^a
3.0	2107.33±31.82^d	1456.00±21.81^d	651.50±14.99^d	2635.07±45.25^d	1179.00±16.56^d	6.41±0.14^a	79.25±0.64^b
4.0	2173.50±26.16^e	1470.56±19.09^d	703.23±7.07^e	2715.10±29.60^e	1244.50±10.01^e	6.37±0.05^a	78.05±0.55^b
5.0	2091.50±55.15^d	1414.48±27.57^d	677.00±15.41^d	2635.92±31.62^d	1221.50±17.95^d	6.37±0.04^a	78.80±0.7^b

注：同一列中不同的小写字母表示具有显著差异（p<0.05）。

淀粉糊化是一个复杂的变化过程，通常伴随有淀粉糊粘度和透明度变化以及糊化淀粉重结晶等现象，在糊化的不同阶段，淀粉糊表现出不同的粘度特性。糊化特性影响多孔面包心的稳定性，回生特性则与面包的老化有关。如表3所示，随着乳清粉添加量的增加，高筋粉的峰值粘度、最低粘度、衰减值、最终粘度和回生值呈下降趋势，峰值时间没有显著性差异，且乳清粉添加量为3.0%和5.0%时混合粉的糊化粘度较低。高筋粉糊化粘度指标降低一方面是因为乳清粉的添加稀释了高筋粉中的淀粉，减弱了淀粉糊化，另一方面可能是因为糖-淀粉-水三元体系之间的相互作用[6~8]：糖类可以通过氢键作用与水结合，阻碍水分子的运动，降低体系中自由水的含量，抑制淀粉链的活动；糖分子通过羟基取代水分子的位置改变了水分子的空间结构，产生强烈的抗塑化作用；糖分子与淀粉链形成“糖桥”，稳定淀粉分子的结构，减弱淀粉分子间凝胶能力，降低淀粉的糊化粘度。此外，乳清蛋白可通过非共价键与直链淀粉和暴露的支链淀粉分支发生相互作用，并作为惰性填充剂阻碍淀粉分子间氢键的形成，抑制淀粉颗粒吸水膨胀，从而降低体系的最终粘度[9]。

衰减值为峰值粘度与最低粘度之差，反映淀粉颗粒在高温的条件下抗剪切的能力，衰减值越小，说明淀粉颗粒越稳定。由表 3 可知，高筋粉的峰值粘度与最低粘度呈下降趋势，因此衰减值也会下降，且乳清粉添加为 3.0%时混合粉的衰减值最小，为 651.50 cP，衰减值的降低说明添加乳清粉增强了高筋粉的热稳定

性。最终粘度和最低粘度之差称为回生值，它表示淀粉溶液在冷却过程中的回生粘度，能够反映糊化后淀粉回升的程度即淀粉分子重结晶的程度，回生值越小则老化程度越低，即抗老化能力强。与空白高筋粉（未添加乳清粉）相比，混合粉的回生值显著降低，且乳清粉添加量为 3.0%时回生值最小，降低了 15.09%，说明添加乳清粉能够减弱淀粉分子的重结晶，增加高筋粉的抗老化能力。

由表3可知，随着乳清粉含量的增加，混合粉的糊化温度呈上升趋势，且乳清粉添加量为3.0%时混合粉的糊化温度最高，为79.25 ℃，高筋粉的糊化温度为68.95 ℃，高于DSC测试得出的糊化温度，其主要原因[10]在于RVA测定淀粉的糊化温度是基于Temp At Visc Rate（T1、T2、Tinc、Vinc）程序，即粘度变化速率（Vinc/Tinc）首次达到设定值时所记录的温度。测定过程中，粘度升高即表明淀粉发生糊化，此时的温度即为淀粉的真实糊化温度。如果淀粉乳粘度的变化速率可以迅速达到Temp At Visc Rate程序的设定值，则能准确测定出淀粉的糊化温度；反之淀粉糊粘度变化速率增加缓慢，测定值将高于真实值，并且粘度上升速率增加越慢，测量偏差越大。

2.4 乳清粉对面团粉质特性的影响

粉质特性是面粉加水和面形成面团的耐揉性和粘弹性的综合表现，不仅决定了面制品加工过程中面团的可操作性能，而且对最终产品的品质具有重要影响。由图1A可知，面团的吸水率和形成时间随着乳清粉的增加逐渐降低，其中面团的吸水率从60.50%下降到54.75%，形成时间从2.7 min下降到1.9 min，且不同添加量间面团吸水率有显著差异（p<0.05），其原因可能是在面团形成过程中乳糖上的羟基吸收了面团蛋白质间的游离水或对蛋白质胶体内部的水产生渗透作用，使得面团的吸水率下降，从而减少了面团的形成时间。稳定时间是衡量小麦粉“内在”品质的重要指标，稳定时间的长短反映面团的耐揉性和强度。稳定时间越长，表明面团的筋力越强，面筋网络越牢固，搅拌耐力越好，面团的加工性能越好。粉质质量指数是指从和面开始到曲线达到最大稠度后以图形中线为基准再下降30 FU处的距离，其值是用到达该点所用的时间乘以10来表示，与稳定时间有良好的相关性。由图1B可以看出，随着乳清粉含量的增加，面团的稳定时间和粉质质量指数逐渐增大，乳清粉添加量为3.0%、4.0%和5.0%时面团的稳定时间和粉质质量指数显著高于未添加乳清粉的高筋粉面团（p<0.05），说明适量的乳清粉的添加可以增强面团的筋力，改善面团的粉质特性。这可能是由于乳清粉的添加增加了高筋粉中的蛋白质含量，且乳清蛋白具有与面筋蛋白类似的结构和气体包埋的性质[11]，这与杨铭铎等人[12]研究结果基本一致。

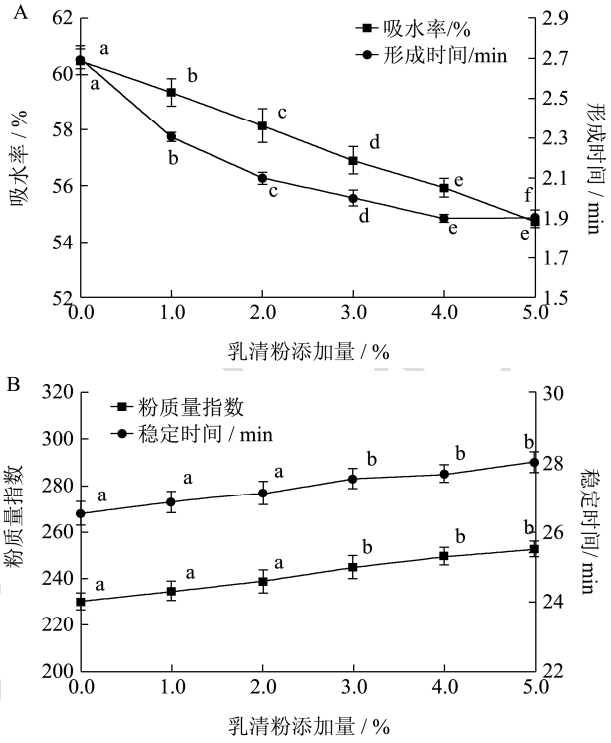
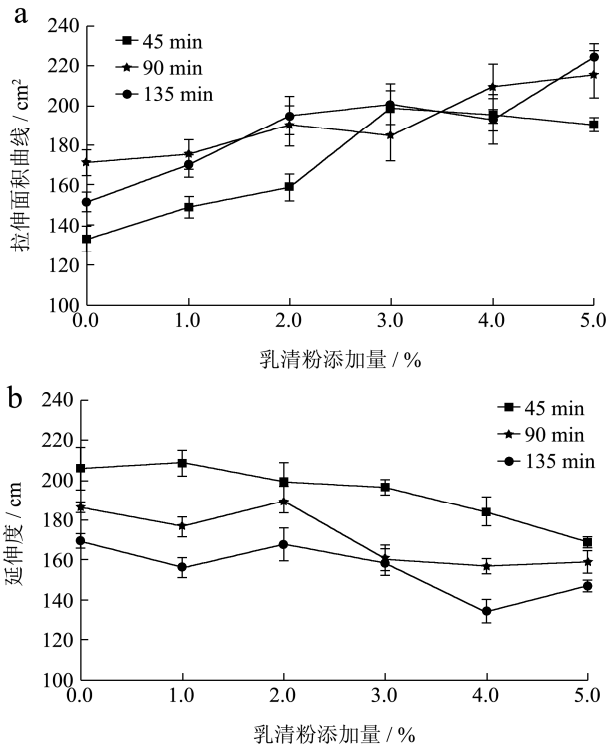


图 1 乳清粉添加量对面团粉质特性的影响

Fig.1 Effect of whey powder on the farinograph properties of dough

注: 同一粉质测定指标的不同字母表示与空白高筋粉相比具有显著差异（p<0.05）。



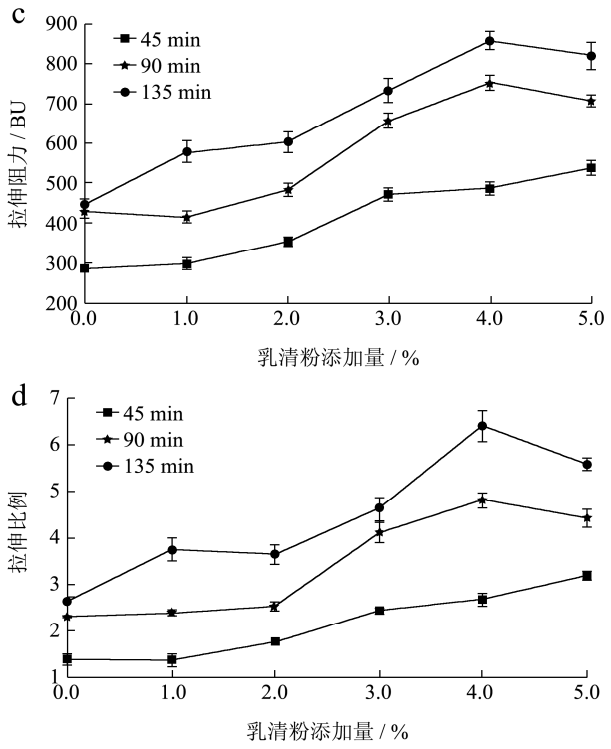


图 2 乳清粉添加量对面团拉伸特性的影响

Fig.2 Effect of whey powder on the extensograph properties of dough

2.5 乳清粉对面团拉伸特性的影响

拉伸曲线反映面团形成后的流变学特性，反映了麦谷蛋白赋予面团的强度和抗延伸阻力，以及麦醇溶蛋白提供的易流动性和延伸性所需要的黏合力。拉伸曲线面积亦称粉力，反应面团从开始拉伸到断裂为止所需的总能量，一般来说拉伸曲线面积值低于50 cm^2以下的小麦粉其烘焙特性较差；拉伸曲线面积越大表明小麦粉筋力越强，烘焙质量相对越好。分析图2a可知，面团的拉伸面积曲线随着乳清粉添加量的增加呈上升趋势，乳清粉添加量为2.0%、3.0%、4.0%和5.0%时面团拉伸曲线面积显著高于空白高筋粉面团（p<0.05）。醒发45 min、90 min和135 min时，空白高筋粉面团和混合粉（乳清粉量为5.0%）面团的拉伸面积曲线分别为133.24 cm^2、171.05 cm^2 、151.50 cm^2和190.05 cm^2、215.40 cm^2、223.74 cm^2，说明添加乳清粉增强了高筋粉的筋力。面团的延伸度是指从拉面钩接触面团开始至面团被拉断拉伸曲线横坐标的距离，表征面团的延展性和可塑性。由图2b可以看出，延伸度随着乳清粉添加量的增加呈下降趋势，乳清粉添加量为3.0%、4.0%和5.0%时面团的延伸度显著低于空白高筋粉面团（p<0.05）。乳清粉添加量与延伸度醒发135 min时面团的延伸度从169.35 mm（空白高筋粉面团）下降到134.28 mm（添加4.0%乳清粉），下降了20.72%，这表明乳清粉的添加降低了面团的延伸性。这可能是因为乳清粉中的乳糖增加了面团中的还原性物质，使面团中部分-S-S-基转变为-SH，面团网状结构被破坏，出现易断裂的现象，进而使面团的延伸性下降。Indrani等人[13]指出，乳清粉的添加稀释了小麦面筋蛋白，乳清蛋白与小麦蛋白部分相互作用，在面团形成阶段乳清蛋白的巯基基团干扰了巯基/二硫化物交换反应使得面团的延伸度减小。

拉伸阻力表明面团的强度和筋力，拉伸阻力大，表明面筋网络结构牢固，面团筋力强，在发酵过程中保持CO_2的能力越强。由图2c可知，面团的拉伸阻力随着乳清粉含量的增加呈上升趋势，乳清粉添加量大于1.0%时面团拉伸阻力显著增加（p<0.05）。添加4.0%乳清粉的面团醒发45 min、90 min和135 min时拉伸阻力相对较大，分别为488.75 BU、753.56 BU和860.05 BU，说明乳清粉的添加增强了面团的筋力。Bilgin等人[14]采用巴氏杀菌乳清替代水制作乳清面包时发现，乳清的添加显著地提高了面团的拉伸曲线面积和拉伸阻力，减小面团的延伸度，并认为这与乳清中所含的固形物有关。拉伸比是指拉伸阻力与延伸度的比值，反映面团的机械特性，比值小，面团发酵时会迅速变软和流散；比值大，发酵时面团膨胀会受阻，起发不好。由图2d可以看出，随着乳清粉添加量的增加，面团的拉伸比总体上呈上升趋势，且乳清粉添加量大于1.0%时面团拉伸比显著增加（p<0.05）。乳清粉添加量为4.0%的面团醒发45 min、90 min和135 min时拉伸比较大，分别为2.67、4.81和6.41。总体来说添加乳清粉对面团的拉伸特性有一定的改善作用。

3 结论

乳清粉添加量为3.0%和5.0%时，高筋粉的糊化起始温度和热焓值明显增加，乳清粉的添加在一定程度上增强了高筋粉的热稳定性。随着乳清粉添加量的增加，高筋粉的峰值粘度、最低粘度、最终粘度、衰减值和回生值呈下降趋势，糊化温度呈上升趋势，乳清粉的添加增强了高筋粉的热稳定性和抗老化能力。面团的吸水率和形成时间随着乳清粉添加量的增加逐渐降低，其中吸水率从60.50%（未添加乳清粉）下降到54.75%（乳清粉添加量为5.0%），面团的稳定时间和粉质质量指数则逐渐增加；面团的拉伸曲线面积、拉伸阻力和拉伸比例随着乳清粉的增加上呈上升趋势，延伸度则呈下降的趋势，乳清粉的添加增强了面团的筋力，稳定了面团网状结构，改善了面团的流变学特性。面团的吸水率、稳定时间、拉伸曲线面积及拉伸比值等会影响面团的硬度、粘性及焙烤面包的品质等，

拉伸曲线面积大、拉伸比值和吸水率大小适中的面团，具有适宜的延伸性，适合于长时间发酵，制作的面包体积大，因此在实际生产乳清粉面包等发酵面制品时要综合考虑这些因素对面包品质的影响。乳清粉具有较高的营养价值和良好的功能特性，添加到高筋粉中可以改善面团特性，优化其加工性能，具有广阔的发展前景。

参考文献

[1] Hernández-Ledesma B, Ramos M, Gomez-Ruiz J A. Bioactive components of ovine and caprine cheese whey [J]. Small Ruminant Research, 2011, 101(1): 196-204

[2] Smithers G W. Whey-ing up the options-yesterday, today and tomorrow [J]. International Dairy Journal, 2015, 48: 2-14

[3] 李宇辉,尹丽娟,李开雄.乳清的营养价值及产品的综合利用现状[J].乳业科学与技术,2010,3:146-148
LI Yu-hui, YIN Li-juan, LI Kai-xiong. The nutrient value of whey and comprehensive utilization status of products [J]. Journal of Dairy Science and Technology, 2010, 3: 146-148

[4] Schaafsma G. Lactose and lactose derivatives as bioactive ingredients in human nutrition [J]. International Dairy Journal, 2008, 18(5): 458-465

[5] 胡长利,陈历俊,宋小红,等.乳清蛋白在发酵乳制品中的应用[J].食品研究与开发,2011,32(8):174-177
HU Chang-li, CHEN Li-jun, SONG Xiao-hong, et al. The application of whey protein in the fermented dairy product [J]. Food Research and Development, 2011, 32(8): 174-177

[6] Kim C S, Walker C E. Effects of sugars and emulsifiers on starch gelatinization evaluated by differential scanning calorimetry [J]. Cereal Chemistry, 1992, 69(2): 212-217

[7] Sopade P A, Halley P J, Junming L L. Gelatinisation of starch in mixtures of sugars. II. Application of differential scanning calorimetry [J]. Carbohydrate Polymers, 2004, 58(3): 311-321

[8] Perry P A, Donald A M. The effect of sugars on the gelatinisation of starch [J]. Carbohydrate Polymers, 2002, 49(2): 155-165

[9] Sarabhai S, Prabhasankar P. Influence of whey protein concentrate and potato starch on rheological propertiesand baking performance of Indian water chestnut flour based gluten free cookie dough [J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 63(2): 1301-1308

[10] Bao J S. Accurate measurement of pasting temperature by the rapid visco-analyser: a case study using rice flour [J]. Rice Science, 2008, 15(1): 69-72

[11] Van Riemsdijk L E, Van der Goot A J, Hamer R J. The use of whey protein particles in gluten-free bread production, the effect of particle stability [J]. Food Hydrocolloids, 2011, 25(7): 1744-1750

[12] 杨铭铎,张玲,韩春然,等.乳清粉对冷冻面团的流变学特性及发酵能力的影响[J].现代农业科技,2009,23:349-350
YANG Ming-duo, ZHANG Ling, HAN Chun-ran, et al. Effects of whey on rheological properties and fermentation capacity of frozen dough [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2009, 23: 349-350

[13] Indrani D, Prabhasankar P, Rajiv J, et al. Influence of whey protein concentrate on the rheological characteristics of dough, microstructure and quality of unleavened flat bread (parotta) [J]. Food Research International, 2007, 40(10): 1254-1260

[14] Bilgin B, Daglioglu O, Konyali M. Functionality of bread made with pasteurized whey and/or buttermilk [J]. Italian Journal of Food Science, 2006, 18(3): 277-286