

淀粉基共混面团的流变表征及特性研究进展

密更¹, 王甜², 李学鹏², 励建荣², 谢晶^{1*}

(¹上海海洋大学食品学院 上海 201306

²渤海大学食品科学与工程学院 生鲜农产品贮藏加工及安全控制技术国家地方联合工程研究中心

辽宁省食品安全重点实验室 辽宁锦州 121013)

摘要 淀粉面团是以糊化淀粉为黏合剂与干淀粉混合揉制而成的一类特殊面团。基于淀粉面团制备的食品营养单一,不适合大量食用,而与其它营养物质复合而成的淀粉面团越来越受重视。流变特性是表征面团品质的重要性质,而共混物淀粉面团的流变特性的相关研究较少,部分机理不明确。文章归纳淀粉面团的流变特性表征方法和外源添加物包括蛋白质、水胶体、脂质和盐类物质对其的影响,分析共混物淀粉面团流变特性的影响规律,提出现有研究尚存的不足,旨在为后续研究提供参考。

关键词 淀粉面团; 流变; 结构; 外源添加物

文章编号 1009-7848(2022)03-0397-11 DOI: 10.16429/j.1009-7848.2022.03.043

制作和食用粉丝是典型的亚洲饮食文化特色之一。粉丝的制作工艺起源于中国,相关文字记载可追溯至北魏后期贾思勰所著的《齐民要术》中^[1]。最早规模化生产的粉丝为绿豆粉丝,之后经由山东省招远港流传至亚洲各地,进而衍生出各种具有地域特色的粉丝类食品,例如韩国的 Dang myun、日本的 Harusame、泰国的 Wún-sên 以及菲律宾的 Bihon 等^[2]。绿豆淀粉被认为是制作面条的最佳原料。与其它淀粉相比,它具有许多优良的蒸煮性能,如外观透明,抗拉强度高,蒸煮损失低等^[3-4]。近年来,世界各地尤其是亚洲各国对绿豆淀粉粉丝的需求逐年增加,然而绿豆淀粉产量有限,价格高于其它淀粉,难以填补市场需求的缺口。寻找其它材料替代绿豆,在一定程度上对降低生产成本具有重要意义。另外,纯淀粉食品的一些薄弱点限制了其发展,例如淀粉是一种多糖,当人们食用后,它会迅速释放大量的葡萄糖,这对肥胖人群及糖尿病患者非常不友好。此外,其缺乏蛋白质、微量元素、维生素等营养物质,营养成分较为单一。由多种高分子物质共混而成的淀粉基食品可以改善以上问题,近年来引起人们的重视。

水胶体是最常见,也是研究最多的添加物。大多数水胶体在室温下都具有良好的保水性和凝胶性。它们能很好地改善淀粉面条的质地和流变特性^[5-7]。然而,由于这类物质很多属于胶体类,在如今谈胶色变的市场中,消费者普遍认为其为人工食品,认可度相对较差^[8]。另外,壳聚糖、单硬脂酸甘油酯和其它变性淀粉也是不错的选择^[9-10]。天然蛋白质是另一个有较好发展前景的添加物,最常用及研究最多的是大豆蛋白、蛋清蛋白和乳清蛋白等^[11-13]。动物源蛋白的相关研究目前较少。

面团性质决定了淀粉基食品的品质。粉丝类食品的加工方法可以分为三大类:漏孔法(Dropping)、挤出法(Extruding)及切割法(Cutting)。不同的方法对淀粉面团的品质要求有很大差异。相比于普通的谷物面团,淀粉面团具有独特的品质和优点,主要体现在两个方面:首先是面团相结构不同:普通谷物面团含有大量的麦谷蛋白,可以形成连续的网络结构,而其它成分如淀粉在面团中为分散相,起到填充的作用;淀粉面团使用预糊化的淀粉作为黏合剂(binder)来代替麦谷蛋白作为网络连续相,而未糊化的淀粉颗粒作为分散相。其次是面团的触变性不同:用普通面团生产的面条主要采用的是挤出法和切割法,对面团的硬度有要求,而对触变性要求不高;现代化粉丝生产中,主要采用漏孔法,要求淀粉面团有较好的触变性^[14]。实际上,流变仪可以模拟多种实际加工中的工艺

收稿日期: 2021-03-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(31972107)

作者简介: 密更(1979—),男,博士,讲师

通信作者: 谢晶 E-mail: jxie@shou.edu.cn

方法。例如,采用稳态剪切试验模拟滴落阶段来表征其触变特性;采用高频率剪切模拟揉混阶段来表征其流动特性^[15];采用动态频率扫描模拟聚合物的高频振动来评价聚合物的相互作用强度。流变仪是表征其特性,研究其品质的有效手段。

1 淀粉面团的流变特性及表征方法

目前在淀粉面团流变特性的相关研究中,按照面团在测定时的形变程度分类主要有两种,一种是对面团施加大幅的振荡或搅拌,例如使用混合仪或快速黏度计来测定,主要用来表征面团在形成过程中的宏观流变特征,主要用来了解面团的加工特性^[16]。另一类是对面团施加小幅振荡或旋转,例如使用旋转流变仪来测定,主要用来表征面团在微观结构层面的流变特征^[17-18]。后一种更为常见,且相关研究较为集中,对于淀粉面团,其常用的流变特性主要有三类:稳态流变特性、动态流变特性以及瞬态流变特性。

稳态流变中,流变仪对样品在某一方向持续施加旋转剪切,主要提供扭矩和角速度。通过稳态流变,可以用于表征样品的流动特性。按照对时间的依附程度可以将淀粉面团分为非依时性流体(剪切变稠或剪切变稀)和依时性流体(触变或震凝)。对于淀粉面团来说除了震凝,其它3个流动现象均普遍存在。触变性是淀粉面团区别于其它面团的一个重要特征。触变亦称摇变,是指面团受到剪切时稠度变小,停止剪切时稠度又增加或受到剪切时稠度变大,停止剪切时稠度又变小的性质即一“触”即“变”的性质。用漏勺法制备淀粉面条时,用手拍打就是一个触变的诱导过程,从孔中漏出时,发生了剪切变稀的情况,然后紧接着会发生延伸流动(extensional flow),这一过程正是利用了淀粉面团的触变性。触变性的大小由剪切速率-黏度图谱中滞后环(hysteresis loop)的大小决定^[1]。一般来说,环的面积越大,则代表面团的触变性越好。不同的淀粉制备的面团,其触变性有很大区别,Wang等^[21]比较了红薯淀粉、木薯淀粉、绿豆淀粉等9种常见淀粉面团的触变性,发现红豆淀粉、绿豆淀粉等豆类淀粉的面团触变性较大,而木薯淀粉、土豆淀粉、小麦淀粉和小米等根茎和禾谷类淀粉的面团的触变性较小。这证实了豆类淀粉在

生产粉丝方面潜在的优势。一个适合生产淀粉面条的面团不仅要有较高的触变性,还要具有良好的流动性。几乎所有的淀粉面团都不是标准的牛顿流体,而是随着剪切速率不同表现出剪切变稠或者剪切变稀的特性。由于仪器的限制,对于无限大或无限小(零剪切)的面团的流动特性无法测出,另一方面仪器无法直接判定出面团的硬度、流体类型、面团稳定性等特征值,这就需要用模型进行拟合计算。对于淀粉面团,现有的常见拟合模型有从简单的Newtonian模型到较为复杂的Ellis模型共有接近10种,其中3种最为常用,分别为幂律模型^[19-21]、赫谢尔-巴尔克莱(Herschel-Bulkley)模型^[22-23]和卡森(Casson)模型^[24-25]。幂律方程表达式为: $\tau=K\cdot\dot{\gamma}^n$,其中: τ 为剪切应力; K 为稠度系数, K 值越大,黏度越高; $\dot{\gamma}$ 为剪切速率; n 为流变特征指数,当 $n<1$ 时,面团表现出剪切稀化特性。当 $n=1$ 时,面团为牛顿流体。当 $n>1$ 时,面团表现出剪切稠化特性。Wang等^[26]运用幂律模型分析了蜡质玉米淀粉和黄原胶在蔗糖存在下的流变行为,研究发现, K 值在剪切速率下降流动曲线中比剪切速率上升流动曲线中大,表明黄原胶在剪切速率下降阶段具有更显著的增稠效应。此外,剪切速率下降曲线的 n 值小于剪切速率上升曲线的相应值,表明流体的假塑性增加。赫谢尔-巴尔克莱(Herschel-Bulkley)模型^[27]表示为: $\tau=\tau_0+K\cdot\dot{\gamma}^n$,其中 τ_0 是屈服应力。Viturawong等^[28]运用赫谢尔-巴尔克莱模型分析了大米淀粉/黄原胶混合物的流变性能,结果表明,所有面团中都可以观察到一个滞后环区,表明样品结构被剪切场破坏之后结构改变或形成新结构。卡森(Casson)模型常用来表示连续剪切过程中流体的流动性趋势,表示为: $\eta=\eta_\infty+(\eta_0-\eta_\infty)(1+C\dot{\gamma}^m)$, η 是表观黏度, η_∞ 是无穷剪切黏度, η_0 是零剪切黏度, C 是稠度, m 是流变特征指数^[29]。Shi等^[30]运用卡森模型分析了NaCl对酸水解马铃薯淀粉流变特性的影响,结果表明,在零剪切速率和无限剪切速率下,加入NaCl可显著降低淀粉体系的黏度值,NaCl的存在可以削弱剪切变薄行为,并在一定程度上使悬浮液在剪切过程中更加稳定。

动态流变测试中,流变仪的马达对样品左右摆动进行剪切,主要提供扭矩和角位移,通过动态

流变,可以用来表征样品的黏弹性。这些黏弹性具体可以用动态复合黏度(η^*),储存模量(G')损耗模量(G''),复合模量($G^*=\sqrt{G'^2+G''^2}$),损失因子($\tan\delta=G''/G'$)等特征值来描述。淀粉面团是标准的黏弹体,兼具固液二性,其动态流变特征值是面团的品质特征最好的表征手段。对淀粉面团的动态应变扫描,可以间接了解淀粉基面团的内部结构区(junction zone)的相对强度(G'),以及面团对流动的相对阻抗(G'')。这些特征值一般是在面团的线性黏弹区间测得的,在此区间内,应力和应变呈线性关系,面团的结构尚未破坏。一般来说,淀粉面团的线性黏弹区要比含面筋的面团小很多。例如 Zhang 等^[31]测定了 5 种不同淀粉源的淀粉面团的线性黏弹区,发现它们均在 0.05%~0.1%之间,而有面筋存在时,线性黏弹区均介于 0.1%~0.25%^[32]。对于淀粉面团来说,除了淀粉自身的特点外,温度对其动态黏弹性有较大影响,在此期间面团将经历凝胶-网络瓦解-网络结构加强 3 个过程^[33]。面团在加热初期, G' 和 G'' 会逐步增加至峰值,而 $\tan\delta$ 会逐步降低,此时直连淀粉开始逐步从淀粉颗粒中渗出(leaking),互相缠绕形成三维网络,而支链淀粉和部分淀粉颗粒则充当了分散相^[34];继续加热至玻璃化转变温度以上, $\tan\delta$ 会呈降低趋势,此时淀粉颗粒中的结晶区会发生熔融,而支链淀粉分子链也会发生松懈舒展;继续加热,面团的 G' 、 G'' 和 $\tan\delta$ 则都会有一个小幅的增加,原因是部分支链淀粉中的短链也从基质中渗出,加强了之前直链淀粉形成的明胶网络的强度,而渗出同时也导致分散相的强度有所降低^[35]。

瞬态流变测试中,流变仪对面团施加一定大小的扭力并保持一段时间后突然撤去,是测量蠕变回复及应力松弛的主要方式。常用柔量(J, Pa^{-1})来表征面团的瞬态流变特征,它表示单位力产生的面团形变的大小。一般来说,淀粉面团在受到应力时,首先淀粉分子链内的键长和键角立刻发生变化,此时产生的形变很小,产生了一个可立即回复的普弹柔量,它是由于淀粉分子内部键长和键角发生变化所引起的,这个柔量和时间没有关系^[36];应力时间增加,淀粉单个分子的链段开始发生运动,由卷曲状向直链状拉伸,淀粉面团发生高弹形变,相对应的柔量为高弹柔量。高弹形变在除

去外力时也可以逐渐回复,对时间(应力施加时间 t 以及迟滞时间 λ)有依赖性。如果应力时间继续延长,淀粉面团会发生分子键的相对滑移,结构被破坏,宏观上表现为黏性流动,此类形变是不能回复的。实际面团的形变过程较为复杂,需要用 Maxwell 和 Kelvin 联合模型进行表征^[37]。最大蠕变柔量(J_{max})用来表征面团的硬度,该值越小表示面团的抗形变能力越好。研究表明,淀粉面团的 J_{max} 要远远大于面包面团以及硬质小麦面团^[38]。另外淀粉面团黏合剂的比例对于面团的 J_{max} 也有较大影响,Fu 等^[39]研究发现黏合剂比例越高的淀粉面团,其 J_{max} 越小,相对于柔量越大,Wang 等^[38]也有类似发现。另外一个特征指标为迟滞时间 λ ,该值越小,表明淀粉面团的回复时间越短、弹性越好。研究表明,面团中水分含量越高,迟滞时间可能越长^[40]。零剪切黏度(η_0)是另外一个面团蠕变特征值,可以用来表征面团在应力消失时的流动情况,该值越小,表明面团越难维持其原有形状(越易流动)。这一特性在淀粉面团漏勺加工时有一定优势, η_0 越小表明在打破流动时的能量越小,越易开始流动^[41]。

2 高分子物质对淀粉面团流变特性的影响

2.1 蛋白质

研究表明,蛋白质的添加对淀粉凝胶流变性质特别是动态流变性质影响较大^[42-43]。已有研究添加的蛋白有乳清蛋白、大豆蛋白、谷蛋白等。淀粉和蛋白质是普遍存在于食品中的重要生物大分子,而且淀粉和蛋白质都有形成凝胶的能力,当两种成分形成凝胶时,得到的体系通常称为复合凝胶,部分复合凝胶都因分子间热力学不相容可能形成分离相分离系统^[44](Segregative phase separation system)进而影响混合物的黏弹性。蛋白质-淀粉复合凝胶的凝胶结构取决于蛋白质和淀粉之间的相互作用。近几年,关于蛋白质对淀粉糊流变性的影响的研究已有报道,但研究蛋白质的酶解物对淀粉糊流变特性的影响较少,此外,改性蛋白对淀粉糊流变性质的影响机理尚不明确。

乳清蛋白因其具有的乳化特性、成胶特性等而广泛应用于食品工业^[45],刘成龙等^[46]研究了乳清

蛋白对玉米淀粉糊流变性的影响,结果发现,蛋白-淀粉体系呈现典型弱凝胶特点,乳清蛋白能够提高混合体系黏弹性。Kumar等^[47]将乳清蛋白浓缩物(Whey protein concentrate,WPC)和乳清白蛋白(Whey lactalbumin,WLAC)添加到燕麦淀粉中,研究发现,乳清蛋白-燕麦淀粉体系的黏度降低,添加或不添加WPC和WLAC的燕麦淀粉均是剪切变稀流体,其表观黏度随剪切速率的增加而减小。

大豆蛋白因其吸水能力较强而添加到面团中会增强其黏弹性,而且和添加量有一定的关系^[48-49]。Patrascu等^[50]研究了大豆蛋白对比蛋清蛋白、谷蛋白对马铃薯淀粉流变性的影响,频率扫描过程中黏弹性行为如图1所示。研究发现大豆蛋白和谷蛋白添加后的马铃薯淀粉混合体系的 G' 和 G'' 值均高于纯淀粉,而蛋清蛋白有减弱作用。这说明蛋清蛋白会弱化混合体系的结构特性,使其具有很强的频率依赖性,而大豆蛋白和谷蛋白的淀粉糊的结构交联度较高,频率依赖性相对较弱。

谷蛋白和醇溶蛋白是小麦胚乳中的两种主要贮藏蛋白,谷蛋白是一种高分子聚合物,主要决定面团的弹性,醇溶蛋白是一种单体蛋白,主要影响面团的延伸性。两种聚合物在中性水溶液中的不溶性限制了它们在食品加工中的应用,但是对谷蛋白和醇溶蛋白进行酶改性后,可以应用至淀粉共混面团中并有较好的品质改善作用。Ribotta等^[51]的相关研究表明,大豆蛋白水解物可以改变玉米和木薯淀粉的糊化和流变特性。Chen等^[52]研究蛋白质-谷氨酰胺(PG)酶修饰的谷蛋白(Glu)和醇溶蛋白(Gli)对马铃薯淀粉流变性的影响,结果发现,所有样品均是非牛顿流体,添加PG-Glu或PG-Gli可降低淀粉浆料的屈服应力和稠度系数(K 值),降低淀粉糊的黏度。Kumar等^[53]也取得了类似的结果,结果发现, K 值的降低是因为酪蛋白-多糖体系中大分子的相互作用减弱。

2.2 水胶体

近几年研究发现在淀粉中加入水胶体能够有效改善淀粉凝胶的流变特性从而改善产品的感官特性和凝胶品质,最常见的有黄原胶^[54]和瓜尔胶^[55-56],它们的添加可以起到保护产品以及在加工和储存过程中稳定质量的作用^[57]。Correa等^[58]研究了刺槐豆胶对米粉凝胶性的影响,结果发现只

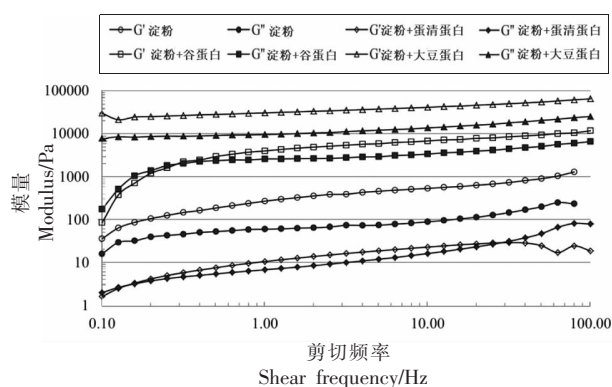


图1 淀粉-蛋白质混合体系在频率扫描中的黏弹性行为
Fig.1 Viscoelastic behavior of starch-protein mixtures during frequency sweep test

有样品是糯米淀粉时,添加的刺槐豆胶为2%,能对米粉凝胶性产生显著影响。糯米淀粉表现为弹性流体, G'' 的变化趋势类似于 G' 。目前,有关各种水胶体对淀粉面团的流变特性的影响的研究已有很多,但水胶体和淀粉的相互作用机理仍有待深入研究。

羧甲基纤维素钠(Sodium carboxymethyl cellulose,CMC)和羟丙基甲基纤维素(Hydroxypropyl methyl cellulose,HPMC)分别是纤维素的离子醚和非离子醚,通过分子间和分子内氢键形成超分子结构和凝胶网络,研究表明,添加CMC和HPMC可以有效增加淀粉凝胶的黏弹性和稳定性。Sun等^[59]研究了纤维素衍生物水胶体对大米淀粉(Rice starch,RS)凝胶黏弹性的影响,结果见图2和图3。图2结果表明和RS相比较,CMC和HPMC的加入显著提高了 G' 和 G'' 的值。结果表明,添加或者不添加CMC/HPMC的RS都是典型的弱凝胶结构。而且与RS相比,CMC降低了 $\tan\delta$ 值,相反HPMC有更高的 $\tan\delta$ 值,说明RS-CMC凝胶比RS和RS-HPMC共混物具有更强的凝胶网络结构。在HPMC和米粉之间的相互作用对无麸质面团流变学特性的影响的研究中也有相同的发现^[60]。图3结果表明,在蠕变阶段,RS在30 Pa恒定应力下的应变随CMC的加入而显著降低,但随HPMC的加入而略有增加。通过比较研究两种纤维素衍生物水胶体对RS凝胶黏弹性的影响,可以发现添加CMC的RS凝胶具有较高的抗应力性和较强的网状结构。

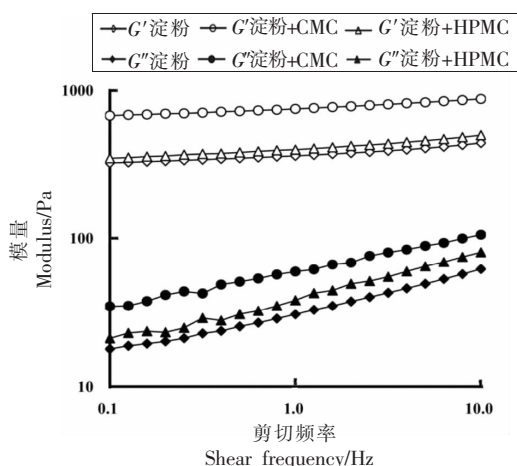


图 2 RS、RS-CMC 和 RS-HPMC 凝胶的模量随频率的变化

Fig.2 The variation of modulus with frequency for gels of RS, RS-CMC and RS-HPMC

结冷胶是一种线性亲水性阴离子胞外多糖，作为胶凝或增稠剂广泛应用于食品中^[61]。Fang 等^[62]研究低酰基和高酰基结冷胶对大米淀粉糊流变性能的影响，结果表明，高酰基结冷胶比低酰基结冷胶对淀粉糊的流变性有更大的影响。与低酰基结冷胶相比，高酰基结冷胶的加入显著增加了储存模量(G')的值，降低了 $\tan\delta$ 值。进行蠕变恢复测试时，高酰基结冷胶淀粉凝胶具有较高的抗应力特性，并产生较强的网络结构。

3 小分子物质对淀粉面团流变特性的影响

3.1 脂质

脂质可能和淀粉形成复合物，该复合物在食品中的应用很广泛，淀粉-脂质复合物不仅对淀粉的功能和营养特性有显著影响，也改变了淀粉糊的流变特性^[63-65]。研究表明，添加脂质及脂类衍生物，如单甘酯的双乙酰酒石酸酯、单硬脂酸甘油酯、卵磷脂、蔗糖酯和酪蛋白能够有效改善淀粉面团的流变和质量特性^[66-68]。据报道，与其它淀粉相比，脂类衍生物对大米淀粉的影响的相关研究较少^[69-70]。蔗糖脂肪酸酯又称糖酯，由于蔗糖有 8 个游离羟基，它可以与多达 8 个脂肪酸酯化，形成由亲水糖头和一个或多个亲脂脂肪酸尾组成的酯。Meng 等^[71]研究不同类型的蔗糖脂肪酸酯的加入对大米淀粉糊的流变性能有不同的影响，结果发现

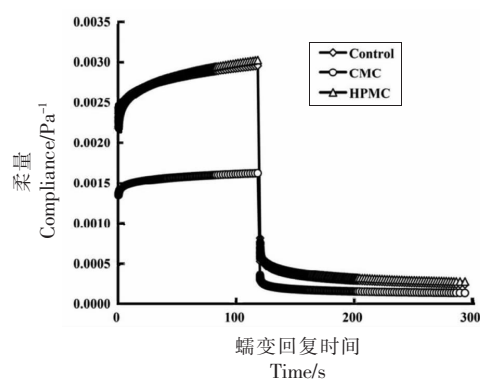


图 3 RS、RS-CMC 和 RS-HPMC 凝胶的蠕变曲线

Fig.3 Creep curves for gels of RS, RS-CMC and RS-HPMC

所有样品的流动曲线均表现出剪切稀化和假塑性特性。另外，淀粉中添加脂肪酸会显著改变混合体系的黏度和流动性。肉豆蔻酸酯和淀粉结合使得体系的黏度以较高的速率增大，这是因为肉豆蔻酸酯的分子长度较短，容易和糊化过程中浸出的较短的淀粉分子发生相互作用。Raphaelides 等^[72]研究了加热过程中脂肪酸对玉米淀粉流变行为的影响，研究结果如图 4 所示，和对照组相比，脂肪酸的加入极大增加了共混物的扭矩，脂肪酸链越长，共混物的凝胶化温度越高。另外，肉豆蔻酸明显加速了共混体系的凝胶速率。研究发现肉豆蔻酸 K 盐可以明显改变共混体系的黏度，这很大程度上取决于共混体系的温度。

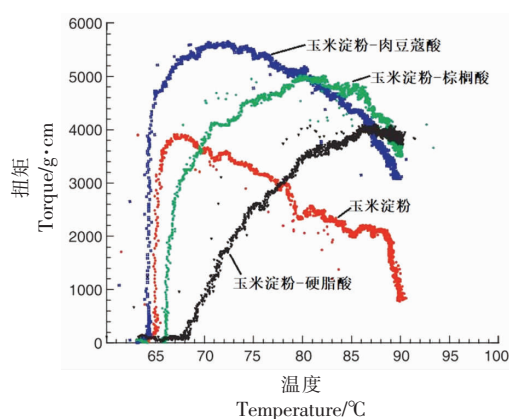


图 4 玉米淀粉-脂肪酸共混物在糊化过程中扭矩随温度的变化曲线

Fig.4 Torque development during pasting of maize starch-fatty acids blends, as a function of temperature of pasting

3.2 盐类物质

在淀粉面团中添加少量的盐类物质会使淀粉面团的弹性增加,例如 NaCl 可增加小麦面团的阻力、弹性和延展性^[73],但是较高的 NaCl 浓度会导致淀粉面团黏度增大。此外,体系中存在的盐类物质会竞争结合水分子,使得淀粉面团不能充分膨胀而黏度增大,最终导致面条的风味、颜色和质地发生改变。

淀粉面团中的外源性盐类物质(NaCl、KCl 和 CaCl₂)会削弱淀粉面团的假塑性,增强其流变性能。Zhang 等^[74]研究了盐对淀粉/亲水胶体混合物的流变性质的影响。结果表明,当 NaCl 浓度为 0.5 mol/L 时,tan δ 值最小,说明 0.5 mol/L NaCl 溶液可增加莲藕淀粉(LRS)/魔芋葡甘聚糖(KGM)混合物的弹性比例,这可能是由于 NaCl 可以诱导 KGM 分子聚集体形成。不同 NaCl 浓度对不同直链淀粉/支链淀粉流变特性的影响的研究中也有类似发现^[75]。此外,随着 KCl 浓度升高,tan δ 值不断增加,在 1 mol/L 时 tan δ 值超过了不加盐体系,因此体系的黏性增长幅度大于弹性增长幅度。因 CaCl₂ 具有独特的二价电荷,使其 tan δ 值始终高于不加盐体系,表明 CaCl₂ 显著提高了 LRS/KGM 混合物的黏度,并在 0.5 mol/L 达到峰值。

钾矾(KAl(SO₄)₂·12H₂O)是一种含有结晶水的硫酸钾和硫酸铝的复盐,是淀粉制品中常见的添加剂^[76]。Li 等^[77]研究了添加钾矾对马铃薯淀粉面团流变特性的影响。结果表明,与对照面团相比,钾矾的加入显著增加了淀粉面团的 G' 和 G'' 值,表明淀粉面团的弹性性能增强。添加钾矾后 G' 和 G'' 的增加可能是因为存在 Al³⁺ 和 SO₄²⁻, 这些盐析离子能够促进直链淀粉的洗脱并且会和溶解了的直链淀粉形成网络结构。

碱水是碳酸钠和碳酸钾的混合物,添加到面团中会改变面团的流变性,及会使面团类制品呈现黄色外观。Jia 等^[78]研究碱水对鹰嘴豆-小麦复合粉面团流变学的影响。结果表明,在所研究的频率范围内,与对照组(未添加)相比,随着碱水添加量(0.5%,1.0%,1.5%,2.0%)的增加,淀粉面团的 G' 和 G'' 均会增加,可能是因为碱性盐的存在会导致蛋白质网络增强,从而产生更坚实、更易伸展的面团。

4 展望

消费者对健康食品的不断追求实际上加深了人们对现有食品的认识,推动了对新型食品的研究。开发由多种营养成分复配而成的共混物主食逐步成为了食品科学研究的热点之一。已有的研究表明,这些复配后的淀粉共混类食品具有独特的品质特征和感官特征,消费者接受度较高,有较好的市场需求和应用发展空间。流变学研究的是力与形变的关系,用来表征淀粉面团的品质特性非常适合。前人对于普通谷物面团流变学特征的相关研究已经很多,相关机理的研究也比较清楚,但从实际上来看,由于淀粉面团组成和结构的特殊性,将普通面团的相关成果和理论套用至淀粉面团显然是不适合的,还有很多地方值得探索。对于淀粉面团流变学特性的研究,笔者认为未来的研究方向应该集中在以下几个方面:1) 通过探究淀粉的流变学性质,分析体系的结构特征,解释和预测淀粉面团在实际加工过程中的变化。2) 通过研究淀粉和其它物质的相互作用机制,明确淀粉面团的形成机理,找到各种因素对淀粉面团流变学性质的影响规律,从而改善产品的质量特性。3) 添加高分子化合物对淀粉基食品的消化特性的影响及作用机理。4) 蛋白较水胶体不管从营养性、安全性还是消费者认可度都是较为理想的添加物质,水产品来源的蛋白相应研究较少,其研究方兴未艾。5) 通过可控相分离来制备具有特殊结构的淀粉基食品具有很好的市场发展前景,对其的深入研究可满足人们在食品营养均衡的同时对食品口感的需求。

参 考 文 献

- [1] TAN H Z, LI Z G, TAN B. Starch noodles: History, classification, materials, processing, structure, nutrition, quality evaluating and improving[J]. Food Research International, 2009, 42(5/6): 551-576.
- [2] GE P, FAN D, DING M, et al. Characterization and nutritional quality evaluation of several starch noodles[J]. Starch - Stärke, 2014, 66(9/10): 880-886.
- [3] LII C, CHANG S. Characterization of red bean (Phaseolus radiatus var. Aurea) starch and its noo-

- dle quality[J]. *Journal of Food Science*, 1981, 46(1): 78–81.
- [4] KAUR A, SHEVKANI K, SINGH N, et al. Effect of guar gum and xanthan gum on pasting and noodle-making properties of potato, corn and mung bean starches[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2015, 52(12): 8113–8121.
- [5] SILVA E, BIRKENHAKKE M, SCHOLTEN E, et al. Controlling rheology and structure of sweet potato starch noodles with high broccoli powder content by hydrocolloids[J]. *Food Hydrocolloids*, 2013, 30(1): 42–52.
- [6] FUNAMI T, KATAOKA Y, OMOTO T, et al. Effects of non-ionic polysaccharides on the gelatinization and retrogradation behavior of wheat starch[J]. *Food Hydrocolloids*, 2005, 19(1): 1–13.
- [7] LEE M H, BAEK M, CHA D, et al. Freeze-thaw stabilization of sweet potato starch gel by polysaccharide gums[J]. *Food Hydrocolloids*, 2002, 16(4): 345–352.
- [8] MARTI A, PAGANI M A. What can play the role of gluten in gluten free pasta? [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2013, 31(1): 63–71.
- [9] SAITO H, TAMURA M, OGAWA Y, et al. Starch digestibility of various Japanese commercial noodles made from different starch sources[J]. *Food Chemistry*, 2019, 283(6): 390–396.
- [10] KAUR L, SINGH J, SINGH N, et al. Effect of glycerol monostearate on the physico-chemical, thermal, rheological and noodle making properties of corn and potato starches [J]. *Food Hydrocolloids*, 2005, 19(5): 839–849.
- [11] PHONGTHAI S, DAMICO S, SCHOENLECHNER R, et al. Effects of protein enrichment on the properties of rice flour based gluten-free pasta[J]. *Lwt – Food Science and Technology*, 2017, 80(7): 378–385.
- [12] RACHMAN A, BRENNAN M A, MORTON J, et al. Effect of egg white protein and soy protein fortification on physicochemical characteristics of banana pasta[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2019, 43(9): e14081.1–e14081.7.
- [13] MENON R, PADMAJA G, JYOTHI A N, et al. Gluten-free starch noodles from sweet potato with reduced starch digestibility and enhanced protein content[J]. *Journal of Food Science & Technology*, 2016, 53(9): 3532–3542.
- [14] COLLADOL, CORKE H. Properties of starch noodles as affected by sweet potato genotype[J]. *Cereal Chemistry*, 1997, 74(2): 192–187.
- [15] 王凤, 黄卫宁, 刘若诗, 等. 采用 Mixolab 和 Rheometer 研究含外源蛋白燕麦面团的热机械学和动态流变学特性[J]. *食品科学*, 2009, 6(13): 144–149.
- WANG F, HUANG W N, LIU R S, et al. Assessment of effects of extrogenous proteins on the thermomechanical and dynamic rheological properties of oat dough using mixolab and rheometer[J]. *Food Science*, 2009, 6(13): 144–149.
- [16] MOREIRA R, CHENLO F, TORRES M D. Rheology of commercial chestnut flour doughs incorporated with gelling agents[J]. *Food Hydrocolloids*, 2011, 25(5): 1361–1371.
- [17] 陈邈, 李黎仙, 孔祥焯. 基于 D-最优混料设计的膏霜基质优化及其流变学特征研究[J]. *广东化工*, 2020, 47(6): 77–80.
- CHEN M, LI L X, KONG X Y. Optimization of cream formulation and study of its rheology based on D-optimal mixture design[J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2020, 47(6): 77–80.
- [18] ZHANG C, KIM J Y, LIM S T. Relationship between pasting parameters and length of paste drop of various starches[J]. *LWT–Food Science and Technology*, 2017, 79(6): 655–658.
- [19] BERSKI W, PTASZEK A, PTASZEK P, et al. Pasting and rheological properties of oat starch and its derivatives[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2011, 83(2): 665–671.
- [20] ACHAYUTHAKAN P, SUPHANTHARIKA M. Pasting and rheological properties of waxy corn starch as affected by guar gum and xanthan gum[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2008, 71(1): 9–17.
- [21] WANG Y, WANG L, LI D, et al. Effect of flaxseed gum addition on rheological properties of native maize starch[J]. *Journal of Food Engineering*, 2008, 89(1): 87–92.
- [22] MAACHEREZZOUG Z, ZARGUILI I, LOISEL C, et al. Study of DIC hydrothermal treatment effect on rheological properties of standard maize (SMS), waxy maize (WMS), wheat (WTS) and potato (PTS) starches[J]. *Journal of Food Engineering*, 2010, 99(4): 452–458.

- [23] ZHANG X, TONG Q, ZHU W, et al. Pasting, rheological properties and gelatinization kinetics of tapioca starch with sucrose or glucose[J]. *Journal of Food Engineering*, 2013, 114(2): 255–261.
- [24] YOO D, YOO B. Rheology of rice starch–sucrose composites[J]. *Starch–starke*, 2005, 57(6): 254–261.
- [25] 原沙沙. 微波对马铃薯淀粉特性影响的研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2012.
YUAN S S. Research on the effect of the microwave on starch properties[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2012.
- [26] WANG B, WANG L, LI D, et al. Rheological properties of waxy maize starch and xanthan gum mixtures in the presence of sucrose[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2009, 77(3): 472–481.
- [27] NAYOUF M, LOISEL C, DOUBLIER J L, et al. Effect of thermomechanical treatment on the rheological properties of crosslinked waxy corn starch[J]. *Journal of Food Engineering*, 2003, 59(2): 209–219.
- [28] VITURAWONG Y, ACHAYUTHAKAN P, SUPHANTHARIKA M, et al. Gelatinization and rheological properties of rice starch/xanthan mixtures: Effects of molecular weight of xanthan and different salts[J]. *Food Chemistry*, 2008, 111(1): 106–114.
- [29] CORCIONE C E, CAVALLO A, PESCE E, et al. Evaluation of the degree of dispersion of nanofillers by mechanical, rheological, and permeability analysis[J]. *Polymer Engineering & Science*, 2011, 51(7): 1280–1285.
- [30] SHI A, LI D, WANG L, et al. The effect of NaCl on the rheological properties of suspension containing spray dried starch nanoparticles[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2012, 90(4): 1530–1537.
- [31] ZHANG D, MU T, SUN H. Comparative study of the effect of starches from five different sources on the rheological properties of gluten-free model doughs[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2017, 176(11): 345–355.
- [32] PHAN-THIEN N, SAFARI-ARDI M, MORALES-PATIÑO A. Oscillatory and simple shear flows of a flour–water dough: a constitutive model[J]. *Rheologica Acta*, 1997, 36(1): 38–48.
- [33] 吴其晔, 巫静安. 高分子材料流变学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002: 10, 65–75.
WU Q Y, WU J A. *Polymer Rheology*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2002: 10, 65–75.
- [34] SINGH J, SINGH N. Studies on the morphological, thermal and rheological properties of starch separated from some Indian potato cultivars[J]. *Food Chemistry*, 2001, 75(1): 67–77.
- [35] SINGH N, SINGH J, KAUR L, et al. Morphological, thermal and rheological properties of starches from different botanical sources[J]. *Food Chemistry*, 2003, 81(2): 219–231.
- [36] RAO M A, KASH S F, COOLEY H J, et al. Desktop computer based collection and analysis of creep–compliance data on fluid foods[J]. *Journal of Texture Studies*, 1987, 18(4): 405–413.
- [37] STEFFE J F. *Rheological methods in food process engineering* [M]. Michigan State University, U.S.A., Freeman press, 1996: 298–299.
- [38] WANG F C, SUN X S. Creep–recovery of wheat flour doughs and relationship to other physical dough tests and breadmaking performance[J]. *Cereal Chemistry*, 2002, 79(4): 567–571.
- [39] FU Z, CHE L, LI D, et al. Effect of partially gelatinized corn starch on the rheological properties of wheat dough[J]. *Lwt – Food Science and Technology*, 2016, 66(3): 324–331.
- [40] 杨玉玲, 关二旗, 李萌萌, 等. 不同和面方式对面团流变特性及面条品质的影响[J]. *河南工业大学学报(自然科学版)*, 2019, 40(5): 18–25.
YANG Y L, GUAN E Q, LI M M, et al. Effects of different mixing methods on rheological properties of dough and noodle quality[J]. *Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition)*, 2019, 40(5): 18–25.
- [41] TAN H Z, TAN B, GAO H, et al. Rheological behavior of mung bean starch dough[J]. *Food Science & Technology International Tokyo*, 2007, 13(2): 103–110.
- [42] SUN Q, XIONG C S. Functional and pasting properties of pea starch and peanut protein isolate blends[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2014, 101(1): 1134–1139.
- [43] YANG N, LIU Y, ASHTON J, et al. Phase behavior and in vitro hydrolysis of wheat starch in mixture with whey protein[J]. *Food Chemistry*, 2013, 137(14): 76–82.
- [44] GRINBERG V Y, TOLSTOGUZOV V B. Thermodynamic incompatibility of proteins and polysaccharides

- in solutions[J]. *Food Hydrocolloids*, 1997, 11(2): 145–158.
- [45] SHIROODI S G, RASCO B A, LO Y M. Influence of xanthan–curdian hydrogel complex on freeze–thaw stability and rheological properties of whey protein isolate gel over multiple freeze–thaw cycle[J]. *Journal of Food Science*, 2015, 80(7): E1498–E1505.
- [46] 刘成龙, 史彩燕, 武乔乔, 等. 蛋白质对玉米淀粉理化特性的影响[J]. *齐鲁工业大学学报*, 2018, 32(6): 29–33.
- LIU C L, SHI C Y, WU Q Q, et al. Effect of protein on physicochemical properties of corn starch[J]. *Journal of Qilu University of Technology*, 2018, 32(6): 29–33.
- [47] KUMAR L, BRENNAN M A, ZHENG H, et al. The effects of dairy ingredients on the pasting, textural, rheological, freeze–thaw properties and swelling behavior of oat starch[J]. *Food Chemistry*, 2018, 245(4): 518–524.
- [48] 黎芳, 滕文韶, 刘野, 等. 3种功能性蛋白对淀粉–面筋重组面团流变学特性及馒头品质的影响[J]. *中国食品学报*, 2020, 20(3): 103–111.
- LI F, TENG W S, LIU Y, et al. Effects of three functional proteins on rheological properties of starch–gluten dough and quality of steamed bread[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2020, 20(3): 103–111.
- [49] DOGAN S F, SAHIN S, SUMNU G. Effects of batters containing different protein types on the quality of deep–fat–fried chicken nuggets[J]. *European Food Research and Technology*, 2005, 220(5): 502–508.
- [50] PATRASCU L, BANU I, VASILEAN I, et al. Rheological and thermo–mechanical characterization of starch–protein mixtures[J]. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 2016, 245(4): 280–288.
- [51] RIBOTTA P D, COLOMBO A, ROSELL C M, et al. Enzymatic modifications of pea protein and its application in protein–cassava and corn starch gels[J]. *Food Hydrocolloids*, 2012, 27(1): 185–190.
- [52] CHEN B, ZHANG B, LI M, et al. Effects of glutenin and gliadin modified by protein–glutaminase on pasting, rheological properties and microstructure of potato starch[J]. *Food Chemistry*, 2018, 253(7): 148–155.
- [53] KUMAR P A, PUSHPADASS H A, FRANKLIN M E, et al. Effect of enzymatic hydrolysis of starch on pasting, rheological and viscoelastic properties of milk–barnyard millet (*Echinochloa frumentacea*) blends meant for spray drying[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2016, 91(10): 838–845.
- [54] HEYMAN B, DEVOS W H, DEPYPERE F, et al. Guar and xanthan gum differentially affect shear induced breakdown of native waxy maize starch[J]. *Food Hydrocolloids*, 2014, 35(3): 546–556.
- [55] PTASZEK P, PTASZEK A. The time evolution of the viscoelastic retardation in starch pastes with guar gum[J]. *Journal of Food Engineering*, 2011, 104(1): 14–22.
- [56] VON BORRIESMEDRANO E, JAIMEFONSECA M R, AGUILARMENDEZ M A, et al. Starch–guar gum extrudates: Microstructure, physicochemical properties and in–vitro digestion[J]. *Food Chemistry*, 2016, 194(3): 891–899.
- [57] VARELA M S, NAVARRO A S, YAMUL D K, et al. Effect of hydrocolloids on the properties of wheat/potato starch mixtures[J]. *Starch–starke*, 2016, 68(7/8): 753–761.
- [58] CORREA M J, FERRERO C, PUPPO C, et al. Rheological properties of rice–locust bean gum gels from different rice varieties[J]. *Food Hydrocolloids*, 2013, 31(2): 383–391.
- [59] SUN J, ZUO X, FANG S, et al. Effects of cellulose derivative hydrocolloids on pasting, viscoelastic, and morphological characteristics of rice starch gel[J]. *Journal of Texture Studies*, 2017, 48(3): 241–248.
- [60] MANCEBO C M, MIGUEL M A, MARTINEZ M M, et al. Optimization of rheological properties of gluten–free doughs with HPMC, psyllium and different levels of water[J]. *Journal of Cereal Science*, 2015, 61(1): 8–15.
- [61] VALÉRIA MARIA DE OLIVEIRA CARDOSO, CURY B S F, EVANGELISTA R C, et al. Development and characterization of cross–linked gellan gum and retrograded starch blend hydrogels for drug delivery applications[J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2017, 65(1): 317–333.
- [62] FANG S, WANG J, XU X, et al. Influence of low acyl and high acyl gellan gums on pasting and rhe-

- ological properties of rice starch gel[J]. *Food Biophysics*, 2018, 13(2): 116–123.
- [63] TIAN Y, YANG N, LI Y, et al. Potential interaction between β -cyclodextrin and amylose–lipid complex in retrograded rice starch[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2010, 80(2): 581–584.
- [64] KAWAI K, TAKATO S, SASAKI T, et al. Complex formation, thermal properties, and in-vitro digestibility of gelatinized potato starch–fatty acid mixtures[J]. *Food Hydrocolloids*, 2012, 27(1): 228–234.
- [65] RAPHAELIDES S N. Viscoelastic behavior of amylose–fatty acid gels[J]. *Journal of Texture Studies*, 2007, 23(3): 297–313.
- [66] ASHWINI A, JYOTSNA R, INDRANI D, et al. Effect of hydrocolloids and emulsifiers on the rheological, microstructural and quality characteristics of eggless cake[J]. *Food Hydrocolloids*, 2009, 23(3): 700–707.
- [67] DING S, YANG J. The influence of emulsifiers on the rheological properties of wheat flour dough and quality of fried instant noodles[J]. *Lwt – Food Science and Technology*, 2013, 53(1): 61–69.
- [68] TURABI E, SUMNU G, SAHIN S, et al. Rheological properties and quality of rice cakes formulated with different gums and an emulsifier blend[J]. *Food Hydrocolloids*, 2008, 22(2): 305–312.
- [69] BANCHATHANAKIJ R, SUPHANTHARIKA M. Effect of different β -glucans on the gelatinization and retrogradation of rice starch[J]. *Food Chemistry*, 2009, 114(1): 5–14.
- [70] HUANG M, KENNEDY J F, LI B, et al. Characters of rice starch gel modified by gellan, carrageenan, and glucomannan: A texture profile analysis study[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2007, 69(3): 411–418.
- [71] MENG Y C, SUN M H, FANG S, et al. Effect of sucrose fatty acid esters on pasting, rheological properties and freeze–thaw stability of rice flour[J]. *Food Hydrocolloids*, 2014, 40(10): 64–70.
- [72] RAPHAELIDES S N, GEORGIADIS N. Effect of fatty acids on the rheological behaviour of maize starch dispersions during heating [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2006, 65(1): 81–92.
- [73] FAN H, FU F, CHEN Y, et al. Effect of NaCl on rheological properties of dough and noodle quality[J]. *Journal of Cereal Science*, 2020, 93(5): 102936.
- [74] ZHANG F, LIU M, MO F, et al. Effects of acid and salt solutions on the pasting, rheology and texture of lotus root starch–konjac glucomannan mixture [J]. *Polymers*, 2017, 9(12): 695.
- [75] ZHANG X, GUO D, XUE J, et al. The effect of salt concentration on swelling power, rheological properties and saltiness perception of waxy, normal and high amylose maize starch[J]. *Food & Function*, 2017, 8(10): 3792–3802.
- [76] LI W, BAI Y, ZHANG Q, et al. Effects of potassium alum addition on physicochemical, pasting, thermal and gel texture properties of potato starch[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2011, 46(8): 1621–1627.
- [77] LI Z, ZHANG Y, AI Z, et al. Effect of potassium alum addition on the quality of potato starch noodles [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2019, 56(6): 2932–2939.
- [78] JIA F, MA Z, WANG X, et al. Effect of kansui addition on dough rheology and quality characteristics of chickpea–wheat composite flour–based noodles and the underlying mechanism[J]. *Food Chemistry*, 2019, 298(11): 125081.

Rheological Characterization and Properties of Starch–based Dough: A Review

Mi Geng¹, Wang Tian², Li Xuepeng², Li Jianrong², Xie Jing^{1*}

¹College of Food Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306)

²College of Food Science and Technology, Bohai University; National & Local Joint Engineering Research Center of Storage, Processing and Safety Control Technology for Fresh Agricultural and Aquatic Products;

Food Safety Key Lab of Liaoning Province, Jinzhou 121013, Liaoning

Abstract Starch dough is a special type of dough that is made by mixing and kneading gelatinized starch as a binder

with dry starch. Foods based on starch dough have a low and single nutrition and are not suitable for generous intake. Starch doughs which are compounded with other polymers attract more and more attention nowadays. Rheological properties are the most important method to characterize dough quality. There are relatively few studies on the rheological properties of starch doughs, and some of the mechanisms are still unclear. In this paper, the characterization methods of rheological properties of starch dough and the effects of exogenous additives including protein, hydrocolloid, lipid and salt on the rheological properties of starch dough were summarized and analyzed, and the existing deficiencies and problems in the research were summarized, which provide reference for the follow-up research.

Keywords starch dough; rheology; structure; exogenous additives