

文章编号:1673-1689(2006)02-0120-07

食品(面团)体系表面胶粘性的流变学机理及其表征

黄卫宁¹, 贾春利¹, 李先玉¹, R. C. Hosoney²

(1. 江南大学食品科学与安全教育部重点实验室, 江苏无锡 214036; 2. 美国堪萨斯州立大学, 堪萨斯州曼哈顿市, 66502)

摘要:食品(面团)体系表面胶粘性的机理与表征一直是谷物化学和谷物生物技术领域备受关注的前沿科学问题。作者综述了面团体系表面胶粘性的流变学机理和相应的表征方法及影响因素, 着重介绍了关于面团表面胶粘性的剥离能理论、压力敏感型胶粘剂(PSA)理论和 Hosoney 理论, 并讨论了其相应的表征方法, 包括剥离法、动力机械流变法、表面张力法和探头法。

关键词:表面胶粘性; 面团; 表征; 剥离能; PSA; 探头

中图分类号:TS 213.2

文献标识码:A

Rheological Mechanisms and Measurements of Stickiness in Food/Dough System

HUANG Wei-ning¹, JIA Chun-li¹, LI Xian-yu¹, R. C. Hosoney²

(1. The Key Laboratory of Food Science and Safety, Ministry of Education, Southern Yangtze University, Wuxi 214036, China; 2. Kansas State University, Manhattan, Kansas 66502, USA)

Abstract: The studies of mechanism and measurement of food/dough stickiness have been one of the frontier areas with great concern in the field of cereal chemistry and biotechnology research during past decades. The rheological mechanisms of dough stickiness, their corresponding instrumental measurements, and influencing factors were reviewed in this paper. Three major theories elucidating dough stickiness were highlighted, including peeling energy theory, pressuresensitive adhesive (PSA) theory, and Hosoney theory. Instrumental measurements of dough stickiness discussed were peeling test, dynamic mechanical rheological test, surface tension test, and probe test.

Key words: stickiness; dough; measurement; peeling energy; PSA; probe

面团(dough system)^[1]是一个极为复杂的体系。一方面, 面团是一个具有粘弹特性的胶体(化学)及流变学体系; 另一方面, 面团是一个多组分的谷物化学及生物化学体系。面团包含多糖、蛋白质、酶类、脂质、水分子以及各种食品配料等众多食品大小分子, 在面团的形成过程中, 随着搅拌力的

作用, 这些分子间会发生复杂的相互作用, 面团体系及其表面的生物化学、物理化学、胶体化学以及流变学特性随着时间而发生变化。因此, 谷物化学家及流变学家将面团体系本身称为“微流变仪”和“生化反应器”^[1]。

早在 1936 年, Scott Blair 首先就面团体系表面

收稿日期: 2006-02-18; 修回日期: 2006-03-10.

基金项目: 国家自然科学基金项目(20476037).

作者简介: 黄卫宁(1963-), 男, 江苏南通人, 教授, 美国博士, 博士研究生导师, 太湖学者.

胶粘性(dough stickiness)的问题进行了报道^[2],表面胶粘的面团对于现代谷物食品(如面制品工业)和烘焙食品(如面包工业)生产加工有非常不利的影 响,这些面团不仅容易粘住加工设备而导致食品生产线受阻,而且造成产品质量下降和货架寿命缩短。因此,面团体系表面胶粘性的研究引起了以美国谷物化学家协会(AACC)为代表的国际谷物化学和烘焙科学界的兴趣。从 20 世纪 80 年代起,世界范围内的小麦遗传育种工程广泛采用一种高产量的 小麦品种——1B/1R 型转基因小麦。由于该小麦中的 1B 染色体部分由黑麦中的 1R 染色体部分所转换,其抗病能力大大提高,因而在国际玉米小麦改良中心(CIMMYT)的推广下在全球范围内特别在墨西哥及欧洲地区得到广泛应用^[3-7]。然而,由这种小麦粉所形成的面团具有严重的表面胶粘性,引入了在食品加工过程中无法控制的因素^[8-11]。由此,面团体系表面胶粘性的研究成为国际谷物化学和谷物生物技术领域的前沿科学问题和研究热点之一。

阐明面团表面胶粘性形成的机理,一方面,可以从分子水平上对现有的关于面团本身形成的二硫键理论做出有益的补充;另一方面,可以为谷物及烘焙食品工业中如何避免这一粘性因子提供基础理论信息;再一方面,将对现代食品及配料工业特别是面制品业和烘焙业工艺过程的自动化控制起有益的指导作用。

以美国、德国、英国、加拿大及澳大利亚为代表的一批谷物化学研究人员相继发表了他们的研究论文^[7,10-20]。在研究面团表面胶粘性的过程中,一直困扰着学术界以及工业界的问题之一是没有公认的客观的胶粘性表征方法。常常是通过触摸面团,来进行感官评定其胶粘性,这种方法主观性太强;而且,有些感觉发粘的面团在工业化生产的不同条件下可能就没有胶粘性。迄今为止,国内关于面团表面胶粘性方面的研究还未见报道。作者对面团体系表面胶粘性的流变学机理及其表征方法进行了综述。

1 面团表面胶粘性的剥离能理论及其表征

1.1 剥离能理论

Andrews 和 Kinloch(1982)^[21]认为,面团就是一种胶粘剂,其胶粘性可用剥离能 G_c 来表示,即表面能 G_0 与内部粘能 ψ 之和,用等式表示如下:

$$G_c = G_0 + \psi \quad (1)$$

表面能依赖于胶粘剂与底物结合的类型和强度,而内部粘能则代表胶粘剂在粘弹性形变和塑性形变中所损耗的能量。其中内部粘能能对剥离能起主要作用,并且内部粘能通常高度依赖于胶粘剂的粘弹特性。从这点来看,面团胶粘性与粘弹流变性质密切相关,同样会随着速率、温度和形变的改变而不断变化。Andrews 和 Kinloch(1982)指出,内部粘能在某种程度上也依赖于表面能,即 $\psi = G_0 \times f(a, T, \epsilon)$ 。在这里,函数 f 值的大小与速率 a ,温度 T 和应力 ϵ 有关。因而等式(1)就转换为 $G_c = G_0 + G_0 \times f(a, T, \epsilon)$,即

$$G_c = G_0 [1 + f(a, T, \epsilon)] \quad (2)$$

此关系式表明,如果内部粘能损耗忽略不计,那么所测得的剥离能就接近表面能 G_0 。因而可以考虑将胶粘层逐渐变薄进行测定,然后用数学方法外推出内部粘能损耗为零时的剥离能大小,即面团表面能。另一种方法就是通过直接测定面团和底物的表面张力来确定表面能。Kinloch(1987)^[22]认为, G_0 与热动力学表面能 W_A 有关。 W_A 是面团、底物二者的表面张力之和与面团—底物之间的界面张力的差值,即

$$W_A = \gamma_s + \gamma_A - \gamma_{SA} \quad (3)$$

此处, W_A 为热动力学表面能, γ_s 、 γ_A 为底物的表面张力和胶粘剂的表面张力, γ_{SA} 为胶粘剂—底物之间的界面张力。表面能为 0.1 J/m^2 ,说明胶粘机制是典型的次级键合作用。Andrews 和 Kinloch(1982)发现,从机械特性研究测得的 G_0 值与直接从表面能计算出的 W_A 值具有一致性,这表明了胶粘性是面团与底物相互作用界面形成了次级键的结果。

1.2 Dobraszczyk 对面团表面胶粘性的表征—剥离法和表面张力法

1.2.1 剥离法及其影响因素

B. J. Dobraszczyk 根据剥离能理论建立了剥离法,以表征面团的表面胶粘性^[20]。剥离法的示意图如图 1 所示。具体步骤为:将面团在不锈钢板上展开,辊压至 6 mm 厚,然后用维可牢带(Velcro tape)(一侧有钉)压入面团,直至厚度达到 1.6 mm,此时维可牢钉将与钢带接触。除去多余的面团,使样品宽厚均一。并将暴露在外的面团表面涂上硅油,以防变干。面团试样松弛 5 min 即可进行剥离试验。将试样放置于一种拉力测试仪(Instron Universal Testing Machine, 型号 1122)中,于室温条件下以 10 mm/s 的速率丁字形拉动,即一个夹子夹住移动钢带,另一个夹子夹住移动维可牢带,使面团与钢带逐渐分离。剥离

过程中,计算机则自动绘制剥离力—位移曲线,并计算出平均剥离力的大小,结果见图2。

剥离能 G_c ,也就是单位面积上胶粘剂的离层能,用以下公式来计算:

$$G_c = F_p(1 - \cos\theta/W)$$

其中 F_p 为剥离力, θ (剥离角) = 180° , W (剥离厚度) = 25 mm,因此当剥离角为 180° 时,则 G_c 可化简为 $2 F_p/W$ 。

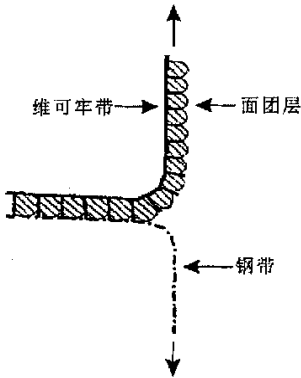


图1 剥离法的示意图(180° 剥离法)

Fig. 1 Peel Test Geometry (180° peel test)

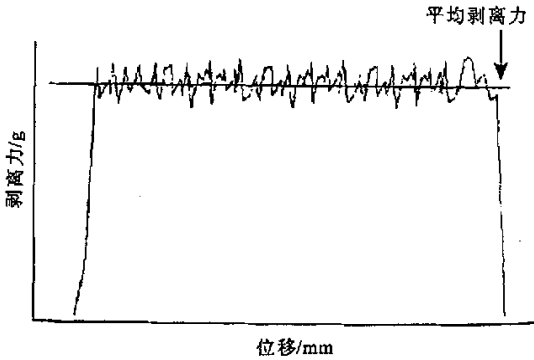


图2 典型的剥离力—位移曲线

Fig. 2 Typical Force-Distance Trace Dobraszczyk

测定了一种转基因面粉(Apollo)所形成的面团在不同加水量条件下剥离力与剥离速率之间的关系。图3表明,随着剥离速率增大,剥离力快速增加。如果面团粘连底物就是发粘,面团与底物完全分离则视为不粘。在高速剥离条件下,随着加水量增加,出现了一个从发粘到不粘的转变。基于面团表面胶粘性对剥离速率的高度依赖性,Dobraszczyk推断出面团流变学特性对面团的表面胶粘性起着主导作用。

同时也计算了不同面粉在不同加水量条件下制成的面团的剥离能。结果显示:随着加水量增大,剥离能逐渐减小;而且面团越粘,剥离能越大。在布拉班德粉质曲线上稠度达到320 BU单位时的

加水量条件下,测得的剥离能和胶粘性感官评分具有良好的正相关性。同时发现面团剥离厚度(即应力)也是影响胶粘性的一个重要因素,增加面团的厚度,也会使剥离能增大,尤其是在厚度小于1 mm范围内,剥离能增加较快,随着厚度继续增大,剥离能变化逐渐趋于平缓。

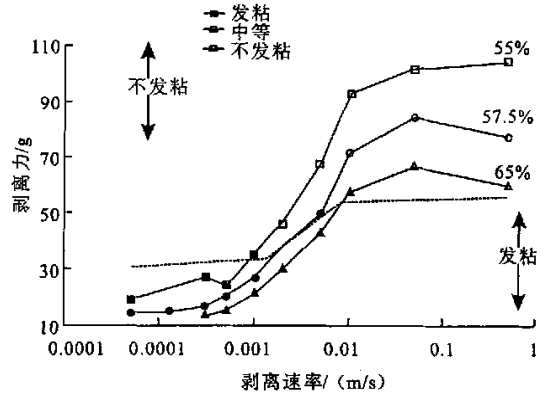


图3 不同加水量条件下 Apollo 面团的剥离力与速率(Apollo 面团)之间的关系

Fig. 3 Peel Force Versus log. Peel Rate For Apollo Flour Dough at Several Water Additions, Showing a Transition From Sticky to Nonsticky Behaviour

1.2.2 表面张力法 Andrews 理论认为:根据机械特性测得的表面能 G_0 值与直接从表面张力计算出的热力学表面能 W_A 值具有一致性, W_A 是面团、底物二者的表面张力之和与面团-底物之间界面张力的差值。因而 Dobraszczyk 通过测定面团表面张力来表征面团表面胶粘性^[20]。

Dobraszczyk 选择用 Cahn DCA 张力仪直接测定面团表面张力。这种仪器装有一个 Wilhelmy 金属平板,可以测出固/液/气各相之间的弯月形界面的表面张力,并且能够计算出接触角和表面能。一般的表面张力测定方法经过改进后就可用于测定面团的表面张力。在测定面团表面张力前,面团表面必须形成液/气界面。因此需要在面团表面涂上一层液体,使得表面活性剂能够分散到液/气界面。将 40 g 面团试样压入 DCS 样品皿底部,并尽可能保持面团表面平整,加入 15 mL 食盐溶液,并使整个体系在 30°C 下平衡 1 h,最后在 30°C 条件下以 $94 \mu\text{m/s}$ 的平板速度匀速进行测定。

测定结果为胶粘性面团(Hornet)与液体界面之间的表面张力为 $(43.9 \pm 1.2) \text{ mN/m}$;非胶粘性面团(CBP)与液体界面之间的表面张力为 $(44.6 \pm 1.4) \text{ mN/m}$,两者并无显著差异,且均是典型的蛋白质溶液表面张力值。

对等式(3)进行改写就可去除界面张力值 γ_{SA} :

$$W_A = 2(\gamma_A^D \gamma_S^D)^{1/2} + 2(\gamma_A^P \gamma_S^P)^{1/2}$$

$$\gamma_A = \gamma_A^D + \gamma_A^P, \gamma_S = \gamma_S^D + \gamma_S^P$$

此处 γ^D, γ^P 分别是表面能的两个组分。将 $\gamma_A = 44 \text{ mJ/m}^2$ (mN/m) (测得的平均表面张力值) 和 $\gamma_S = 70 \text{ mJ/m}^2$ (不锈钢底物表面能) 代入上述等式, 得出表面能 W_A 约为 100 mJ/m^2 。这是典型的次级键, 如范德华力的能量值。由胶粘性面团 (Hornet) 和非胶粘性面团 (CBP) 所得出的结果相差不大, 这也从另一个侧面说明了面团流变学特性对于其表面胶粘性有着主要的贡献。

综上所述, Andrews 剥离能理论将面团看作是一种胶粘剂, 而在此基础上, Heddleson 等则更进一步的将面团看作是一种压力敏感型胶粘剂来研究。

2 面团表面胶粘性的压力敏感型胶粘剂 (PSA) 理论及其表征

2.1 Dahlquist 标准

C. A. Dahlquist (1959)^[23] 发现, 压力敏感型胶粘剂 (Pressure-Sensitive Adhesive, 简称 PSA) 的胶粘性依赖于决定粘弹松弛时间的分子运动。他认为, 胶粘性的产生是一个模量控制过程, 在此期间胶粘剂完全“润湿”了被粘附物或称底物 (完全“润湿”发生在胶粘剂表面能小于底物表面能时, 比如面团粘附在底物为金属的表面), 并且由此发现了胶粘性的流变学标准, 即当胶粘剂的贮能模量大于 10^5 Pa 时, 胶粘性就会消失。Dahlquist 标准是最早的胶粘性的流变学标准, 并且成为研究 PSA 的流变学控制机理。

2.2 压力敏感型胶粘剂 (PSA) 理论

Saunders (1992)^[17] 等研究人员认为当面团粘附加工设备时, 它们之间形成了粘合键, 这类类似于 PSA 与底物之间的相互作用。面团是一种粘弹性物质, PSA 也是一种粘弹性物质, 当温度高于其玻璃化温度时, 两者都可看作是线性无定形聚合物 (Sperling 1992)^[24], 即当温度高于玻璃化温度时, 无定形聚合物会变柔软。Chu (1989)^[25] 和 Schlademan (1989)^[26] 则发现橡胶树脂体系控制 PSA 的粘弹性: 大分子橡胶体提供弹性, 而小分子树脂提供粘性。小麦粉面团体系与此相似, Levine 和 Slade (1990)^[27] 鉴定出了面筋中橡胶体成分是高分子麦谷蛋白, 树脂成分是低分子麦醇溶蛋白。事实上, 低相对分子质量的麦醇溶蛋白 (树脂部分) 是起粘性作用的成分, 而高相对分子质量的麦谷蛋白 (橡胶部分) 是决定面筋蛋白质弹性的成分 (Ram

和 Nigam 1983)^[28]。

A. Z. Casey (1989)^[29] 发现, 较宽的相对分子质量分布可提高胶粘剂与底物之间的胶粘强度。在相对分子质量分布最佳的情况下, 低频率扫描 (即键合时段) 时, 贮能模量 (G') 下降, 这有利于胶粘键合作用。同时, 低相对分子质量树脂本身较高的玻璃态相变温度提升了整个胶粘剂体系的玻璃态相变温度, 从而增加了高频率扫描 (即胶粘键的破坏时段) 时体系的贮能模量, 此时需要较高的力才能破坏键合 (Chu 1989)^[25]。Navickis 等 (1982)^[30] 研究发现, 面团体系的贮能模量在键合时段 (0.01 rad/s) 较低, 但在键破坏时段 (100 rad/s) 较高。Wriglery (1972)^[31] 也指出相对分子质量分布是影响面团粘弹性的重要因素。Kasarda (1978) 认为, 面筋蛋白质的橡胶部分通常相对分子质量分布较宽^[32], 因此使得它天然具有 PSA 的优良特性。如果面筋蛋白质在控制面团粘弹性方面具有重要作用, 那么作为一种多组分体系, 面团也应该具有 PSA 的良好特性。

在此基础上, 1993 年 Heddleson 等^[16] 经过实验证明了适用于压力敏感型胶粘剂 (PSA) 体系的 Dahlquist 标准也适用于面团体系, 由此形成了面团体系表面胶粘性的 PSA 理论。Dobraszczyk 将此理论应用于实践。

2.3 Dobraszczyk 对面团表面胶粘性的表征—动态机械流变法

在室温条件下, Dobraszczyk 运用动态机械流变仪 (RDS-7700) 测定了面团的粘弹性模量^[20]。将面团试样放置于直径为 25 mm 的两平行板中间, 然后将两板间距调为 6 mm , 刮除多余面团, 将暴露在外的面团表面涂上硅油, 以防变干。面团试样静置 5 min 或静置至压力达到预设水平时, 即可测定面团的贮能模量 G' 和损耗模量 G'' , 损耗角正切值以 G''/G' 计算。

Dobraszczyk 发现随着加水量增大, 贮能模量逐渐减小, 胶粘性面团的贮能模量较非胶粘性面团的贮能模量减小的快, 在有限加水量 ($40\% \sim 60\%$) 的条件下, 各种面粉的贮能模量都是下降的, 但当加水量增加时, Hornet 面团的贮能模量增加速度明显小于 CBP 面团贮能模量的增加速度。当加水量超过 60% 时, CBP 面团贮能模量的增加速度趋于平缓, 而胶粘性面团 (Apollo 和 Hornet) 的贮能模量仍然持续下降, 结果见图 4。

同时, Dobraszczyk 还发现随着加水量增加, 损耗模量也逐渐减小, 但在加水量较高时, 损耗模量

较贮能模量减小的速度慢,这可以从图5中损耗角正切值(G''/G')随加水量增加而增大推断出来。换句话说,随着加水量增加面团弹性模量比粘性模量减小的更快。同时 Hornet 粉的损耗角正切值比 CBP 粉的增加的快。

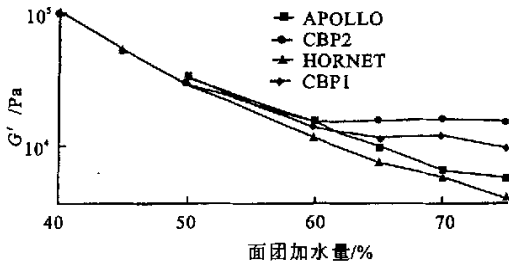


图4 不同面团的动力学贮能模量· G' 与加水量之间的关系(频率=1 Hz,应力=0.1%)

Fig. 4 Dynamic Storage Modulus (G') as Function of Water Addition for Various Doughs (strain = 0.1%, frequency = 1 Hz)

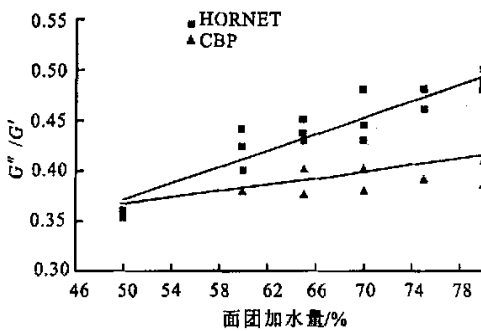


图5 Hornet 和 CBP 面团的损耗角正切值随加水量的变化

Fig. 5 Loss Tangent (G''/G') as a Function of Water Addition for Hornet and CBP Dough

Dobraszczyk 还将各种面团在特定加水量(布拉班德粉质曲线上稠度达到 320 BU 单位时的加水量)时的贮能模量与它们的胶粘性感官评分相比较,结果说明二者呈良好的负相关性(图6),这证明面团的表面胶粘性主要受其流变学特性控制。

3 面团表面胶粘性的 Hoseney 胶粘因子理论及其表征

3.1 Hoseney 胶粘因子理论

如前所述,Andrews 的剥离能理论和 Heddleson 的 PSA 理论都认为面团是一种胶粘剂体系,而 Hoseney 对面团表面胶粘性的形成机理却有完全不同的观点。Chen 和 Hoseney(1995)^[33]指出面团中某种特定成分即胶粘因子的存在是引发其表面

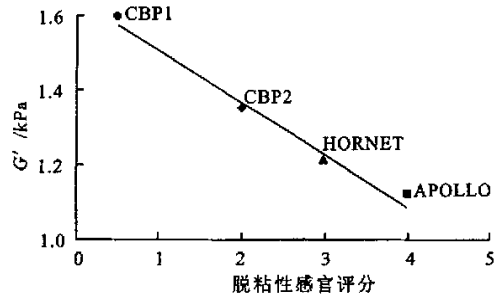


图6 在预定水分添加量下面团的贮能模量(G' , 1 Hz)与胶粘性感官评分的对比(0=不粘,5=很粘)

Fig. 6 Storage Modulus (G' , 1 Hz) at Predicted Water Addition Versus Bakery Stickiness Score for Several Flour Doughs (0 = not sticky, 5 = very sticky)

胶粘性的主要因素。

他们研究发现面团表面胶粘性是一种难于表征的特性,可以将其简单地定义为:两个表面相互接触时所产生的胶粘力大小。在大多数食品体系(如面团)中,胶粘性是表面粘附力和内部粘结力的复合。当表面粘附力较高、而内部粘结力较低时,面团就呈现出表面胶粘性。内部粘结力可以通过流变学技术测定,但要表征表面胶粘性必须使面团一探头(底物)界面完全分离^[34]。

3.2 Hoseney 对面团表面胶粘性的表征—探头法

Hoseney 等研究人员于 1990^[16]年采用平面探头压缩面团来测定面团表面胶粘性,并测定了使探头和面团完全分离所需的力。非胶粘性面团可以彻底地与探头分离,而胶粘性面团粘附在探头上,经拉伸呈长丝状,强力拉伸后通常会在中间断裂。胶粘性面团所发生的这种直至断裂的变化,称为面团的“颈缩”效应示意图见图7。为了解决这一问题,Hoseney 和 Chen 在 1994 年发明了一种能够使面团表面胶粘性与内部粘结性分离的特殊的测试盒装置^[35]。试验中先用探头将球型面团压平,然后撤离探头,再测定分离时所需的力。为了比较不同面团的胶粘性,必须保持压力和接触面积恒定。

质构仪(TA, XT2, Stable Micro Systems Ltd.)可以使压缩面团表面的力保持不变,而放在面团表面上的一块有开口(面积已知)的板可以保持接触面积恒定。有关参数设定条件是:压力为 40 g,有机玻璃探头直径为 25 mm,触发力大小设定在 5 g,探头的压缩速率为 2 mm/s,返回速率为 10 mm/s(质构分析仪的最大返回速率),保持时间为 0.1 s;探头位移选择 4 mm。

在小型的面团混合仪(见图8)中加入 10 g 面粉(水分质量分数 14%)和适量的水制备面团。然

后翻转器皿 F 使面团挤压通过 14 目筛网 B, 用刀片刮去多余的面团。在测试盒上放一盖子, 以减少面团表面水分的损失。进一步挤压面团, 直到筛面以上面团厚度大约为 1 mm 时, 旋开杯 F, 停止挤压。在杯 F 中很容易滑动的杯 E 起着很关键的作用, 如果面团直接放在 F 中, 在翻转器皿挤压时, 面团将会扭曲变形, 这样就会增加额外应力, 影响测定结果。制备好的面团表面静置 30 s, 用以松弛挤压时所产生的应力。然后移走盖子, 驱动安装在质构仪上的探头, 使其与面团表面接触, 并记录探头撤离面团表面时所需的力, 即为面团表面胶粘性的

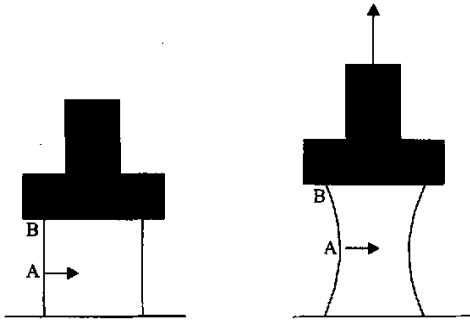


图7 面团的“颈缩”效应

Fig.7 Necking of a Dough Piece

基于 Hosoney 胶粘因子理论的探头法与前述的剥离法和动态机械流变法相比较, 具有简单、重复性好、结果更为直观等优点, 测定结果与感官评定结果也呈良好的相关性。这种面团表面胶粘性测试盒的设计于 1994 年获得了美国专利^[35], 它不仅适用于面团体系, 而且适用于糖浆、奶油、调味酱等可流动食品配料的表面胶粘性的表征。

4 结论与展望

虽然在过去的 30 多年的时间里, 世界各国的科学家们面团表面胶粘性进行了大量的研究, 但由于面团体系本身多组分的复杂性, 以及形成过程中存在着外界能量和空气的输入、水分的分布和迁移、面团三相体系的形成与破坏的平衡、表面化学及流变学特性的变化, 所以面团体系表面胶粘性的形成机理还没有完全阐明。它包括引发面团表面胶粘性的主要因素、参与表面胶粘作用的化学键及主要键合基团、起关键作用的蛋白质组分(或亚基)与多糖活性物质之间的相互作用、体系内部粘结性对表面胶粘性的贡献等等。

现代面制品业和烘焙业正朝着自动化、规模化、标准化方向发展。现有的仪器表征方法, 虽然在一定程度上为研究面团的表面胶粘性形成机理提供了手段, 但仍然需要进一步完善, 开发出更为简便快速的、准确的、重复性好的、客观的表征方法, 以更好地研究食品加工过程中面团与加工设备(金属)表面之间的胶粘性, 以及多种食品配料的表面胶粘性等等。

总之, 攻克面团体系表面胶粘性形成机理及表征方法的研究——这一困扰了国际谷物化学界 60 多年的科学难题, 不仅需要谷物科学与聚合物科学、流变学、物理化学、表面化学和粘附学等多学科的交叉融合, 而且需要利用全球资源, 进行跨越国界的交流与合作。

图8 测试盒的内部结构

Fig.8 Elements of the Cell Structure

参考文献:

- [1] Hosoney R C. Principles of Cereal Science and Technology [M]. St Paul, AACC, 1994.
- [2] Scott Blair. Thesis: Viscous and Elastic Properties of Plastic Bodies[D]. London, Univ of Fac Sci, 1936.
- [3] CIMMYT. CIMMYT Report on Wheat Improvement, 1985[C]. Mexico City; International Maize and Wheat Improvement Center, 1985.
- [4] Mettin D, Bluthner W O, Schiegel G. Additional evidence on spontaneous 1B/1R wheat-rye substitutions and translocations. //In Proceedings 4th International Wheat Genetics Symposium[C]. Columbia: Missouri Agricultural Experimental Station, 1973.
- [5] Zeller F J. 1B/1R wheat-rye chromosome substitutions and translocations. //In Proceedings 4th International Wheat Genetics Symposium[C]. Columbia: Missouri Agricultural Experimental Station, 1973.

- [6] Moonen J H E, Zeven A C. SDS-PAGE of the high-molecular-weight subunits of wheat glutenin and the characterization of 1R(1B) substitution and 1BL/1RS translocation lines [J]. *Euphytica*, 1984, 33: 3-10.
- [7] Zeller F J, Gunzel G, Fischbeck G, et al. Veränderungen der backeigenschaften des weizens durch die weizenroggen-chromosomentranslokation 1B/1R[J]. *Getreide Mehl Brot*, 1982, 36: 141-143.
- [8] Martin D J, Stewart B G. Dough mixing properties of a wheat-rye derived cultivar[J]. *Euphytica*, 1986, 35: 225-232.
- [9] Martin D J, Stewart B G. Contrasting dough surface properties of selected wheats[J]. *Cereals Foods World*, 1991, 36: 502-504.
- [10] Gore P J. An update on sticky doughs. In *Cereals International Proceedings*[C]. Brisbane; Cereals International Conference, 1991.
- [11] Dhaliwal A S, Mares D J, Marshall D R. Protein composition and pentosan content in relation to dough stickiness of 1B/1R translocation wheats [J]. *Cereal Chem*, 1988, 65: 143-149.
- [12] Noguchi G, Shinya M, Tanaka K. Correlation of dough stickiness with texturometer reading and with various quality parameters [J]. *Cereal Chem*, 1976, 53: 72-77.
- [13] Ranhotra G S, Loewe R J, Lehmann T A. Breadmaking quality and nutritive value of sprouted wheat [J]. *J Food Sci*, 1977, 42: 1373-1375.
- [14] Hwang P, Bushuk W. Some changes in the endosperm proteins during sprouting of wheat [J]. *Cereal Chem*, 1973, 50: 147-160.
- [15] Ibrahim Y, D'Appolonia B L. Sprouting in hard red spring wheat [J]. *Baker's Digest*, 1979, 53(5), 17-19.
- [16] Hosoney R C, Rogers P F, Krishnarau L. Fifth International Symposium on Pre-Harvest Sprouting in Cereals[M]. Boulder; Westview Press, 1990.
- [17] Saunders S R, Hamann D D, Lineback D R. A system approach to food material adhesion [J]. *Lebenam*, 1992, 25:309.
- [18] Heddleson S S, Hamann D D, Lineback D R. The Dahlquist criterion: applicability of a rheological criterion to the loss of pressure-sensitive tack in flour-water dough [J]. *Cereal Chem*, 1993, 70(6): 744-747.
- [19] Chen W Z, Hosoney R C. Development of an objective method for dough stickiness[J]. *Lebensm Technol*, 1995, 28: 467-473.
- [20] Dobraszczyk B J. The rheological basis of dough stickiness [J]. *Journal of Texture Studies*, 1997, 28: 139-162.
- [21] Andrews E H, Kinloch A J. Mechanics and mechanisms of failure [J]. *Journal of Materials Science*, 1982, 17: 617-651.
- [22] Kinloch A J. *Adhesion and Adhesives*[M]. London: Chapman and Hall, 1987.
- [23] Dahlquist C A. An investigation into the nature of tack[J]. *Adhes Age*, 1959, 2: 25.
- [24] Sperling L H. *Introduction to Physical Polymer Science*[M]. New York: John Wiley & Sons, 1992.
- [25] Chu S G. *Viscoelastic Properties of Pressure Sensitive Adhesives*[M]. New York: Van Nostrand Reinhold, 1989.
- [26] Schlademan J A. *Handbook of Pressure Sensitive Adhesive Technology*[M]. New York: Van Nostrand Reinhold, 1989.
- [27] Levine H, Slade L. *Dough Rheology and Baked Product Texture*[M]. New York: Van Nostrand Reinhold, 1990.
- [28] Ram B P, Nigam S N. Texturometer as a tool for studying varietal differences in wheat flour doughs and gluten proteins [J]. *J Texture Stud*, 1983, 14:245.
- [29] Casey A Z. *Handbook of Pressure Sensitive Adhesive Technology*[M]. New York: Van Nostrand Reinhold, 1989.
- [30] Navickis L L, Anseron R A, Bagley E B. Viscoelastic properties of wheat flour doughs; Variation of dynamic moduli with water and protein content [J]. *J Texture Stud*, 1982, 13:249.
- [31] Wrigley C W. The biochemistry of the wheat protein complex and its genetic control[J]. *Cereal Sci Today*, 1972, 17: 370.
- [32] Kasarda D D, Nimmo C C, Kohler G O. *Wheat Chemistry and Technology*[M]. ST. Paul; Am. Assoc. Cereal Chem, 1978.
- [33] Chen W Z, Hosoney R C. Wheat flour compound that produces sticky dough; isolation and identification [J]. *Journal of Food Science*, 1995(b), 60: 434-437.
- [34] Hosoney R C, Smewing J O. Instrumental measurement of stickiness of doughs and other foods[J]. *J Texture Studies*, 1999, 30: 123-136.
- [35] Hosoney R C, Chen W Z. Adhesion testing apparatus and method for flowable materials such as wheat dough[P]. 美国专利; USP 5 280 717, 1994-06-30.

(责任编辑:朱明)