2019 年 7 月 第 40 卷第 13 期

93 \_

#### DOI: 10.3969/j.issn.1005-6521.2019.13.016

# 介质阻挡放电等离子体处理对香蕉粉理化和 流变学特性的影响

### 闫斯亮<sup>1</sup>,靳楠<sup>1</sup>,魏瑞<sup>1</sup>,陈野<sup>1</sup>,王维君<sup>2,\*</sup>

(1. 天津科技大学 食品工程与生物技术学院, 天津 300457; 2. 天津科技大学 科技处, 天津 300457)

摘 要:研究介质阻挡放电(dielectric barrier discharge, DBD)等离子体不同处理功率对香蕉粉理化及流变学特性的影响。随 DBD 处理强度的增加,香蕉粉的直链淀粉含量由 8.94 g/100 g 增至 27.26 g/100 g,溶解度由 1.23 g/100 g 增至 4.37 g/100 g;溶胀力由 3.47 g/g 降至 2.47 g/g,同时酸性显著增加,持油能力未发生明显变化。扫描电子显微镜观察, DBD 等离子体对香蕉淀粉颗粒有明显的刻蚀作用。此外,流变学试验结果表明:随着 DBD 处理强度的增加,香蕉粉凝 胶的储能模量(G')和损耗模量(G')均明显下降,黏弹性大幅降低;在整个糊化进程中的储能模量(G')显著降低, G'mm, G'sst, G'30t值均呈下降趋势。通过 DBD 处理能够有效影响香蕉粉的理化性质并改变其流变学特性,降低其凝胶 强度,拓展其在饮料、冷冻以及凝胶类食品中的应用。

关键词:香蕉粉;淀粉改性;介质阻挡放电;动态流变特性

### Effect of Dielectric Barrier Discharge Plasma Treatment on Physicochemical and Rheological Properties of Banana Powder

YAN Si-liang<sup>1</sup>, JIN Nan<sup>1</sup>, WEI Rui<sup>1</sup>, CHEN Ye<sup>1</sup>, WANG Wei-jun<sup>2,\*</sup>

(1. College of Food Engineering and Biotechnology, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin

300457, China; 2. Department of Science and Technology, Tianjin University of Science and Technology,

### Tianjin 300457, China)

**Abstract:** The effect of dielectric barrier discharge (DBD) plasma treatment intensity on the physicochemical and rheological properties of banana powder were investigated. As DBD treatment intensity, the amylose content of banana powder increased from 8.94 g/100 g to 27.26 g/100 g, the solubility of banana powder significantly increased from 1.23 g/100 g to 4.37 g/100 g, the swelling power of banana powder decreased from 3.47 g/g to 2.47 g/g. There were no significant changes in oil absorption capacity after DBD treatment, and the acidity of banana powder significantly increased. The plasma etching of banana starch granules caused by DBD treatment were observed using scanning electron microscope. The rheological properties of banana powder showed that the storage (G') and loss (G'') moduli decreased significantly with the increase of DBD treatment intensity, which significantly decreased its viscoelasticity. The storage (G') moduli of banana powder during whole gelatinization process decreased significantly with the increase of DBD treatment intensity, and the G'<sub>max</sub>, G'<sub>95℃</sub> and G'<sub>30℃</sub> value showed a decrease tendency. These results suggested that DBD treatment could effectively affect the physicochemical and rheological properties of banana powder during supplication in beverage, frozen food and jellies food.

**Key words**: banana powder; starch modification; dielectric barrier discharge (DBD); dynamic rheological properties

作者简介:闫斯亮(1993—),男(汉),硕士,研究方向:农产品物流保鲜与加工。

<sup>\*</sup>通信作者:王维君,男(汉),博士。

引文格式:

闫斯亮, 新楠, 魏瑞, 等. 介质阻挡放电等离子体处理对香蕉粉理化和流变学特性的影响[J]. 食品研究与开发, 2019, 40 (13):93-99

YAN Siliang, JIN Nan, WEI Rui, et al. Effect of Dielectric Barrier Discharge Plasma Treatment on Physicochemical and Rheological Properties of Banana Powder[J]. Food Research and Development, 2019, 40(13):93–99

香蕉是我国广泛种植的热带水果之一,有着巨大的经济效益<sup>11</sup>。然而,作为典型的呼吸越变型水果,香 蕉在采后的储藏和运输过程中极易腐烂,并由此造成 了大量的经济损失<sup>12</sup>。因此,对香蕉的进一步加工利用 将有利于避免香蕉在储运过程中的资源浪费和经济 损失,提高香蕉的产业价值。

香蕉粉作为香蕉深加工环节的重要产品,有着良 好的市场价值和应用前景<sup>[3]</sup>。香蕉粉中含有大量的香 蕉淀粉,是一种优质的天然抗性淀粉资源,其在降低 血糖指数、预防肠道癌症等方面对人体有着许多的保 健作用<sup>[4-5]</sup>。目前,传统热干燥工艺生产的香蕉粉,产品 溶解度普遍较低,且在相应的热加工过程中往往会形 成有着较高凝胶强度的淀粉糊,限制了其在食品工业 中的进一步应用。特别是在饮料、冷冻食品以及果冻 类制品中,香蕉粉的高凝胶强度和低溶解度限制了其 在相应产品中的添加量。因此,对香蕉粉进行改性,改 变其糊化后所成凝胶的流变特性,将有助于拓展香蕉 粉在食品工业中的应用,提高其产业价值。

介质阻挡放电等离子体(dielectric barrier discharge,DBD)作为低温等离子体的一种类型,是一种 新兴的绿色改性技术<sup>[6]</sup>。低温等离子体已被证明能够 有效的影响淀粉的理化性质,且不破坏淀粉颗粒的整 体特性<sup>[7]</sup>。Bie 等<sup>[8]</sup>发现,DBD等离子体处理能够降低玉 米淀粉糊的表观黏度,改善其流动性;Wu等<sup>[9]</sup>报道了, 电晕放电离子体能够降低香蕉粉在糊化进程中的黏 度。目前,鲜有利用 DBD 等离子体进行香蕉粉改性的 报道。本研究通过 DBD 等离子体处理香蕉粉悬浊液以 得到改性香蕉粉,旨在为香蕉粉的改性提供一种有效 方法,试验研究了 DBD 处理对香蕉粉直链淀粉含量、 溶解度、溶胀力、持油能力、pH 值以及动态流变学特性 的影响。

### 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

香蕉(Musa paradisiaca L):市售,成熟度 1~2(指示 卡等级);直链淀粉试剂盒(ZZK-K-AMYL):爱尔兰 Megazyme公司)。 1.2 主要仪器与设备

介质阻挡放电等离子体反应系统(DBD-50, CTP2000K):南京苏曼等离子科技有限公司;HAAKE流 变仪(Mars 60):德国 Thermo Fisher Scientific 有限公司; 扫描电子显微镜(JSM-IT300LV):日本电子株式会社。 1.3 方法

1.3.1 香蕉粉的制备

青香蕉洗净后去皮,切成 2 mm 厚的薄片,置于 5 mg/L 的柠檬酸溶液中浸泡 30 min 进行护色。护色后 的香蕉片以料水比 1:1(质量比)迅速进行打浆,浆液 经胶磨后过 100 目筛,弃去杂质。将过筛后所得浆液于 3 000 r/min 进行离心分离,离心时间 15 min,弃去上清 液,下层沉淀用蒸馏水清洗,再次离心。反复清洗、离 心分离 3 次后收集下层沉淀,即为香蕉粉。沉淀于电 热鼓风干燥箱中烘干(50 ℃,6 h)。干燥后的香蕉粉样 品经研磨过 100 目筛后,收集于塑料自封袋,置于干燥 器中备用。

1.3.2 介质阻挡放电(DBD)等离子体处理

将香蕉粉样品配置成 10%(质量分数)的悬浊液, 一次吸取 10 mL 悬浊液于石英介质板下板的凹槽中, 盖上上板。将盖好的石英介质板置于放电极板上,调 整上下两放电极板的间距为 8 mm,进行等离子放电处 理。介质阻挡放电于常压大气环境条件下进行,设置 放电电流(2±0.2) A,放电电压分别为 30、35、40、45 V, 放电处理时间 3 min。收集处理后所得的样品悬浊液于 玻璃平板中,冷冻干燥 24 h。干燥后的样品经研磨,过 筛(100 目),置于干燥器中备用。

1.3.3 香蕉粉溶解度、溶胀力及持油能力的测定 1.3.3.1 溶解度和溶胀力的测定

配置 1%(质量分数)的样品悬浊液 30 mL 于离心 管中,于 25 ℃下磁力搅拌 30 min,之后以 3 500 r/min 离心 15 min,小心分离上清液与沉淀。取 10 mL 上清液 于事先烘至恒重的蒸发皿中,于 105 ℃下烘至恒重。称 量,记录蒸发皿增加的质量为 A<sub>1</sub>,离心管中沉淀的质 量为 A<sub>2</sub>,淀粉样品的干基质量为 W。以下列公式计算 淀粉样品的溶解度 S(g/100 g)和溶胀力 SP(g/g):

$$S/(g/100 \text{ g}) = \frac{A_1 \times 13}{W} \times 100$$

## $SP/(g/g) = \frac{A_2}{W}$

式中:A<sub>1</sub>为蒸发皿增加的质量,g;A<sub>2</sub>为离心管中 剩余沉淀的质量,g;W 为 30 mL 样品悬浊液所对应固 体样品的干基质量,g。

1.3.3.2 持油能力的测定

常温(25 ℃)下测定样品的持油能力,参照 Esther 等<sup>[10]</sup>的方法进行。准确称取(200.0±0.2)mg 样品,置于 50 mL 离心管中,加入 2.0 mL 植物油,用细铁丝搅拌 1 min 使样品充分分散于油中,之后将样品离心管涡 旋振荡 30 min。漩涡混合结束后,样品离心管于 3 000 r/min,4 ℃下离心15 min。离心结束后,小心倒出上 层植物油并将离心管倾斜倒扣于滤纸上 30 min 以滤干 残余在管壁上的植物油。称量,记录离心管增加的质量 为  $W_0$ ,所称取样品的质量为  $W_T$ ,所称取样品对应的干 基质量为  $W_D$ ,其持油能力 OAC(g/g)以下列公式计算:

$$OAC/(g/g) = \frac{W_0 - W_T}{W_D}$$

式中: $W_o$ 为离心管增加的质量,g; $W_r$ 为离心管中 所称取样品的质量,g; $W_b$ 为所称取样品对应的干基质 量,g。

1.3.4 香蕉粉直链淀粉含量的测定

样品的直链淀粉含量参照直链淀粉试剂盒所说 明的方法进行测定。

### 1.3.5 香蕉粉酸性的测定

配置1%质量分数的样品悬浊液,与沸水浴下加 热并不断搅拌15min使其充分糊化。糊化后的样品糊 冷却至室温,以pH测定仪测定其pH值。

### 1.3.6 香蕉粉颗粒形态的观察

取 1.3.1 与 1.3.2 中所得样品,由扫描电子显微镜 观察其颗粒微观形态。将样品固定在导电胶上,喷金,

于加速电压 10 kV 下进行观察。

1.3.7 香蕉粉动态流变学特性的测定

采用 MARS 60 哈克流变仪测定 1.3.1 与 1.3.2 中 所得样品的动态流变学特性。

1.3.7.1 振荡模式下频率扫描

称取一定量的香蕉粉样品,加入8倍质量的蒸馏 水制成香蕉粉样品悬浊液,于沸水浴下加热并不断搅 拌15min使香蕉粉样品充分糊化。将制备好的香蕉粉 凝胶置于测试台中央,选取直径为20mm的平板模具 (P20/Ti转子)和振荡模式。频率扫描前,首先在应变为 0.1%~100.0%范围内进行了振荡幅度扫描,确定当应 变为1%时,样品香蕉粉糊处在线性黏弹区。设置模板 间隙为1.000mm,应变为1%,频率范围0.1Hz~10Hz, 测定样品香蕉粉糊的弹性模量G′、损耗模量G″和损耗 角正切值tan(δ)随振荡频率的变化。

1.3.7.2 振荡模式下温度扫描

称取一定量的香蕉粉样品,加人8倍质量的蒸馏 水制备样品悬浊液。选取直径为20mm的平板模具 (P20/Ti转子)和振荡模式,设置间隙1.000mm,应变 1%,频率1Hz。将样品悬浊液加到测试平台上,压下 上方转子盖板,盖上保温罩以防止水分蒸发,于设定 程序下进行测定。样品测试程序由30℃~95℃开始升 温过程,之后由95℃~30℃开始降温过程,升降温速率 均为5℃/min。测定升降和降温过程中香蕉粉糊的储 能模量(G'),损耗模量(G")以及损耗角正切值tan(δ) 的变化。

### 2 结果与分析

2.1 DBD 等离子处理对香蕉粉理化性质的影响 DBD 等离子处理对香蕉粉理化性质的影响见表 1。

样品	直链淀粉含量/(g/100 g)	pH 值	溶解度/(g/100 g)	溶胀力/(g/g)	持油能力/(g/g)
原香蕉粉	$8.94 \pm 0.72^{d}$	4.51±0.03ª	$1.23 \pm 0.14^{e}$	3.47±0.07 <sup>a</sup>	0.83±0.08ª
60W	$10.17{\pm}0.98^{\rm cd}$	$3.90 \pm 0.01^{\text{b}}$	$1.73 \pm 0.17^{d}$	$3.21 \pm 0.04^{b}$	0.84±0.02ª
70W	$12.94 \pm 1.39^{bc}$	3.63±0.04°	2.41±0.11°	3.03±0.11°	$0.82 \pm 0.06^{a}$
80W	15.51±2.34 <sup>b</sup>	$3.47 \pm 0.03^{d}$	$2.69 \pm 0.09^{\text{b}}$	$2.81 \pm 0.09^{d}$	$0.84{\pm}0.05^{a}$
90W	27.26±2.14ª	$3.30\pm0.05^{\circ}$	4.37±0.17ª	$2.47{\pm}0.07^{\rm e}$	0.83±0.03ª

表 1 DBD 等离子体处理对香蕉粉理化性质的影响 Table 1 Effect of DBD plasma treatment on the physicochemical properties of banana powder

注:数据采用3次重复测定,结果以平均值±标准差表示,同列中不同字母表示组间存在显著性差异(p<0.05)。

表1所示,香蕉粉的直链淀粉含量随 DBD 处理强 度的增加而显著增加。大量研究表明,低温等离子体 处理能够显著增加淀粉的直链淀粉含量。Lii 等<sup>111</sup>发 现,辉光放电等离子体能够导致多种淀粉发生不同程度的解聚,增加其直链淀粉含量;蒲华寅<sup>112</sup>的研究表明,介质阻挡放电等离子体造成了马铃薯淀粉的分

95\_\_\_\_

解,从而增加了其直链淀粉含量。由此,DBD 等离子体处理可能使香蕉粉发生了一定程度的分解和解聚, 从而在反应过程中生成了更多的直链淀粉。且高强度的 DBD 处理能够造成香蕉粉更为严重的分解和解 聚,从而表现为高强度下(90 W)较高的直链淀粉含 量(27.26 g/100 g)。

由表1可知,DBD处理后,香蕉粉糊的pH值明显低于未处理的样品,随着DBD处理强度的增加,香蕉粉糊的pH值逐渐降低,反映了香蕉粉酸性的逐渐增强。大量研究发现<sup>[11,13-14]</sup>,低温等离子体处理能够使其反应体系中生成大量的酸性物质,从而显著增强改性淀粉的酸性。由此,DBD处理可能使香蕉粉的悬浊液反应体系生成了大量小分子的酸性物质。这与于红等<sup>[15]</sup>报道的DBD等离子体与淀粉溶液反应导致的酸性增强是一致的。

试验测定了香蕉粉在 DBD 处理前后常温状态 (25℃)下的溶解度和溶胀力。如表1所示,香蕉粉的 溶解度随 DBD 处理强度的增加而显著增加,相应的, 其溶胀力则随 DBD 处理强度的增加而显著降低。这是 由于 DBD 处理使香蕉淀粉颗粒表面的淀粉链发生分 解或解聚导致的。香蕉淀粉颗粒由分解而生成了许多 分子量较小的、更易溶于水的淀粉链碎片,且其相应 的解聚反应也生成了大量易溶于水的单糖或寡糖分 子<sup>[16]</sup>,因此 DBD 处理能够有效的增加香蕉粉的溶解 度。此外,香蕉粉溶胀力的下降说明,DBD 处理造成的 分解和解聚也影响了香蕉淀粉颗粒表面的支链淀粉 分子,破坏了香蕉淀粉颗粒的表面结构,减少了香蕉 淀粉颗粒表面淀粉分子与水分子的氢键结合。

了解淀粉的持油能力,有助于确定其在相应工业 加工过程中的工艺参数。有研究认为<sup>III</sup>,淀粉颗粒的表 面吸附作用以及淀粉颗粒的粒径大小是决定其持油能 力的重要影响因素。由表1可知,随DBD处理强度的 增加,香蕉粉的持油能力在小范围内(0.82 g/g~0.84 g/g) 波动变化。由此可见,DBD处理没有对香蕉粉的持油 能力造成明显影响。相应的,DBD处理没有对香蕉淀 粉颗粒的表面形态以及其颗粒的粒径造成影响。

2.2 DBD 等离子处理对香蕉粉颗粒形态的影响 DBD 等离子处理对香蕉粉颗粒形态的影响见图 1。



图 1 不同 DBD 处理强度下香蕉粉的颗粒形态 Fig.1 Particle morphology of banana powder under different DBD treatment intensities

由图 1 所示,原香蕉粉的颗粒形态呈不规则的扁 平椭球形,颗粒表面光滑,部分淀粉颗粒的表面可以 观察到附着的不规则突起,这可能是香蕉粉在提取过 程中残留在其表面的纤维素等杂质。对比 DBD 处理前 后的香蕉粉,其整体颗粒形态没有发生明显变化,淀 粉颗粒仍为不规则的扁平椭球形。随着 DBD 处理强度 的增加,能够观察到香蕉粉的颗粒表面越来越粗糙, 出现了越来越多的裂纹、凹陷和突起。这些淀粉颗粒 表面出现的非贯穿性的损伤,被称为等离子体的刻蚀 作用<sup>[6,13]</sup>。由此,随着 DBD 处理强度的增加,其对香蕉 淀粉颗粒的刻蚀作用也表现的越来越明显,这反映了 DBD 处理能够确实的影响香蕉淀粉颗粒的表面结构 并由此改变香蕉粉的理化性质。

2.3 DBD 处理对香蕉粉动态流变学特性的影响

2.3.1 振荡频率扫描

以应变为1%进行动态频率扫描,图2~图4表示 香蕉粉糊储能模量(G')、损耗模量(G")及损耗角正切 值 tan(δ)随频率的变化关系。G',G",tan(δ)是反应体 系动态流变特征的重要参数,能够用来表征淀粉凝胶 的黏弹性<sup>[18-19]</sup>。其中,G'表示体系在形变过程中储存 的能量,代表了淀粉凝胶的弹性本质,反映凝胶体系 在形变后恢复原状的能力;G"表示体系在形变过程中 因黏性阻力而损失的能量,代表了淀粉凝胶的黏性本质,反映凝胶体系在形变时抵抗流动的能力<sup>[20]</sup>。因此, G'越大,淀粉凝胶的弹性越强;G"越大,淀粉凝胶的黏 性越强。tan(δ)代表凝胶体系 G"与 G'的比值。

DBD 等离子处理对香蕉粉动态流变学特性的影响见于图 2~图 4。



















由图 2~图 4 可见,在频率变化过程中,所有样品 凝胶的 G'值始终大于其 G"值,其损耗角正切值 tan(δ) 始终<1,即全部样品凝胶均表现为弹性高于黏性,为 典型的弱凝胶体系。全部样品凝胶的 G'及 G"值均呈 现出随频率增加而增大的变化趋势,表明样品凝胶体 系的模量值具有频率依赖性。不同处理强度的淀粉凝 胶,其 tan(δ)值均低于原淀粉样品,这表明经过 DBD 等离子体处理后,香蕉粉所形成凝胶体系的本质特性 更偏向于弹性本质。这说明 DBD 等离子体处理能够使 香蕉粉凝胶体系的整体黏性降低,降低凝胶体系中淀 粉链之间以及淀粉链与水分子之间的相互作用,进而 使凝胶体系更偏向于弹性本质。

2.3.2 振荡温度扫描

香蕉粉悬浊液的储能模量(G')值在升、降温过程 中的变化由图 5~图 6 所示。







图 6 香蕉粉悬浊液在降温过程中储能模量的动态振荡扫描曲线 Fig.6 Storage moduli (G') of banana powder suspension during cooling process

储能模量(G')作为反应体系动态流变特征的主要 参数,代表了体系的弹性特征,常用于表征淀粉糊的 凝胶强度和硬度<sup>[21]</sup>。G'值越大,标志着凝胶体系的弹性

97\_\_\_\_

越大,凝胶强度越大<sup>[21-22]</sup>。以5℃/min 的速率加热香蕉 粉悬浊液,加热初期,所有香蕉粉悬浊液的 G'值均没 有显示出明显的随温度升高而改变的变化趋势;当温 度上升至 75℃左右时,样品体系的 G'值开始随温度 的升高而增加,且在之后的升温过程中显现出了随温 度上升而迅速增加的变化趋势。这一现象表明,随着 温度的升高,样品体系中的香蕉粉逐渐开始糊化,并 最终导致样品体系由悬浊液转变为凝胶状态。升温过 程,样品体系中的香蕉淀粉颗粒逐渐吸水膨胀并析出 了大量的直链淀粉。进而体系中大量吸水膨胀的淀粉 颗粒,相互之间交联、缠绕形成了紧密的三维网络结 构,使整个体系的 G'值迅速增加。此外,淀粉糊化后所 形成的凝胶体系中,大量存在于其中的直链淀粉分子 也增加了凝胶体系的整体强度,导致了体系 G'值的迅 速增加。

DBD 等离子处理对香蕉粉悬浊液在升、降温过程 中储能模量(G')的影响见于图 5~图 6。

图5香蕉粉开始糊化后的升温过程中,样品凝胶 体系的 G'值整体上随处理功率的增加而减少。尤其在 较高的温度(95℃)下,样品凝胶体系的 G'值随处理强 度的增加表现出了十分明显的下降趋势。且经高强度 处理(80、90W)后的香蕉粉,其凝胶体系显示了相对 原香蕉粉而言极低的 G'值。这是由于 DBD 处理使香 蕉淀粉颗粒中的支链淀粉被分解导致的。随着 DBD 处 理功率的增加,香蕉淀粉颗粒中淀粉链的分解程度逐 渐加重,其中也包括大量的支链淀粉分子。在较高的 (80、90W)处理强度下,香蕉淀粉颗粒中支链淀粉的 严重分解降低了其所形成的凝胶体系中淀粉链之间 的相互交联程度,降低了凝胶体系的整体强度。此外, 凝胶体系中由 DBD 处理的分解作用所产生的大量直 链淀粉碎片,也降低了凝胶体系中淀粉链和水分子之 间的相互作用,减弱了凝胶体系的整体强度。由此,随 着 DBD 处理强度的增加, 糊化状态下香蕉粉凝胶体系 的 G'值表现出明显的下降,其凝胶体系抵抗形变的能 力下降、整体强度减弱、弹性降低。

其后的降温过程,由图 6 所示,香蕉粉凝胶体系的 G'值均呈先上升后下降的变化趋势。降温起始阶段, 凝胶体系仍处于较高的温度,香蕉粉仍处于糊化状态,其凝胶强度随糊化进程的继续而不断增加,表现 为 G'值继续上升。降温过程后期,随着凝胶体系温度 的下降,香蕉粉凝胶整体开始老化,凝胶体系中淀粉 链之间的相互交联缠绕减少,淀粉链与水分子之间的 相互作用降低,凝胶体系中大量的水分子随老化进程 析出。由此,凝胶体系的整体强度随老化进程而逐渐 降低,表现为G'值的减少。同样的,相应于升温过程, 降温过程中香蕉粉凝胶体系的G'值整体上也随处理 功率的增加而减少。

表 2 列出了振荡温度扫描过程中,香蕉粉凝胶体 系储能模量的最大值 G'<sub>max</sub>;95 ℃时香蕉粉凝胶体系的 储能模量 G'<sub>sov</sub>;降温过程中 30 ℃时香蕉粉凝胶体系 的储能模量 G'<sub>sov</sub>;降温过程中 30 ℃时香蕉粉凝胶体 系的损耗角正切值  $tan(\delta)$  30 ℃。

表 2 香蕉粉悬浊液在动态振荡温度扫描过程中的关键参数 Table 2 Key parameters of banana powder suspension during dynamic oscillation temperature scanning

样品	G′ <sub>max</sub> /Pa	G′ <sub>95 °C</sub> /Pa	G′ 30 °с/Ра	$tan(\delta)_{30{}^{\circ}\!C}$
原淀粉	2 371 000	122 800	39 990	0.373 9
60 W	2 275 000	112 300	25 850	0.407 7
70 W	807 900	21 610	25 940	0.531 2
80 W	267 100	16 550	17 630	0.140 5
90 W	116 100	14 950	17 370	0.112 6

由表2可知,随着DBD处理功率的增加,香蕉粉 凝胶体系的 G'mx, G'sst, G'att值均显示出下降趋势。G'mx 值代表了香蕉粉在整个升、降温过程中所形成凝胶体 系的最大强度;G'max 值的明显降低说明,DBD 处理对 香蕉淀粉的分解作用随着 DBD 处理强度的增加而显 著增强,进而降低香蕉粉在整个糊化进程中所形成凝 胶的最大强度。G'ssr值代表了香蕉粉在升温糊化进程 中所形成凝胶体系的最大强度;G'gr值的降低说明, DBD 处理导致的淀粉分解降低了香蕉粉的成糊能力, 使其在升温糊化进程形成了强度较低的淀粉糊。G'au 值,代表了香蕉粉在整个升、降温过程中所形成凝胶 体系的最终强度;G'art值的降低也说明,DBD 处理对 香蕉淀粉的分解作用使其在经历完整的糊化、老化过 程后,最终形成了强度较低的淀粉凝胶。由此可见, DBD 处理能够显著降低香蕉粉在升、降温过程中的成 糊能力和凝胶强度,并最终形成强度较低的淀粉凝 胶。这也意味着,DBD处理后的香蕉粉,在常规的升、 降温热加工过程中将有着更弱的凝胶结构和更好的 流动性并能够最终形成更弱、更柔软的香蕉粉凝胶。 由此,DBD处理是一种能够有效提高香蕉粉加工适应 性的淀粉改性方法。

### 3 结论

利用 DBD 等离子体处理香蕉粉悬浊液能够使香 蕉淀粉颗粒分解和解聚,从而有效地改变香蕉粉的理 化及流变学特性。随着 DBD 处理强度的增加,香蕉淀 粉颗粒表面呈现出更明显的刻蚀现象,香蕉粉的溶解

度得到明显改善,由 1.23 g/100 g 增加 4.37 g/100 g;直链 淀粉含量明显增加,由 8.94 g/100g 增至 27.26 g/100 g; 香蕉粉凝胶体系中淀粉链之间的相互交联程度降低, 形成了凝胶强度更低的、更加柔软的香蕉粉凝胶,进而 表现出了更好的流动性和加工适应性。由此 DBD 处理 是一种能够有效改善香蕉粉加工适应性的改性方法, 能够为传统香蕉粉的生产加工提供一种新的参考。

### 参考文献:

- [1] 赵国建,杨公明.香蕉的加工现状及发展对策[J].食品与机械, 2005, 21(2): 81-82
- [2] 袁德保,李芬芳,郑晓燕,等.香蕉深加工在香蕉产业中的作用、发 展现状与趋势及存在问题[J]. 热带农业科学, 2012, 32(8): 54-57
- [3] 张宏康,林小可,李蔼琪,等.香蕉加工研究进展[J].食品研究与开发, 2017, 38(12): 201-206
- [4] Kim J , Zhang C , Shin M . Forming rice starch gels by adding retrograded and cross – linked resistant starch prepared from rice starch[J]. Food Science and Biotechnology, 2015, 24(3): 835–841
- [5] Jiang H , Zhang Y , Hong Y , et al. Digestibility and changes to structural characteristics of green banana starch during in vitro digestion[J]. Food Hydrocolloids, 2015, 49: 192–199
- [6] Zhu F. Plasma modification of starch[J]. Food Chemistry, 2017: 476– 486
- [7] Sarangapani C, Devi Y, Thirumdas R, et al. Effect of low-pressure plasma on physico-chemical properties of parboiled rice[J]. LWT – Food Science and Technology, 2015, 63(1): 452–460
- [8] Bie P P , Pu H Y , Zhang B J , et al. Structural characteristics and rheological properties of plasma-treated starch[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2016, 34: 196–204
- [9] Wu T Y, Sun N N, Chau C F. Application of corona electrical discharge plasma on modifying the physicochemical properties of banana starch indigenous to Taiwan[J]. Journal of Food and Drug Anal-

ysis, 2018, 26(1): 244-251

- [10] Esther D L H, Gomez M, Rosell C M. Particle size distribution of rice flour affecting the starch enzymatic hydrolysis and hydration properties[J]. Carbohydrate Polymers, 2013, 98(1): 421–427
- [11] Lii C, Liao C D, Stobinski L, et al. Effects of hydrogen, oxygen, and ammonia low-pressure glow plasma on granular starches[J]. Carbohydrate Polymers, 2002, 49(4): 449–456
- [12] 蒲华寅.等离子体作用对淀粉结构及性质影响的研究[D]. 广州: 华南理工大学,2013
- [13] Thirumdas R , Trimukhe A , Deshmukh R R , et al. Functional and rheological properties of cold plasma treated rice starch[J]. Carbohy– drate Polymers, 2017, 157: 1723–1731
- [14] 刘昌俊,邹吉军.酸性等离子体作用下淀粉水解及其等离子体酸 定义[J].天津大学学报,37(3): 189–192
- [15] 于红,刘彦民,韩治德,等.介质阻挡放电等离子体与淀粉溶液的 反应[J].中国石油大学学报(自然科学版), 2008, 32(1): 108-112
- [16] Lii C Y, Liao C D, Stobinski L, et al. Behaviour of granular starches in low-pressure glow plasma [J]. Carbohydrate Polymers, 2002, 49(4): 499–507
- [17] Mahasukhonthachat K , Sopade P A , Gidley M J . Kinetics of starch digestion in *Sorghum* as affected by particle size[J]. Journal of Food Engineering, 2010, 96(1): 18–28
- [18] Dickinson E. Practical food rheology: an interpretive approach [J]. Food Hydrocolloids, 2011, 25(7): 1655
- [19] 裴晶莹,赵佳慧,李晓磊,等.刺槐豆胶与玉米淀粉混合物流变性 分析[J].食品研究与开发,2018,39(1): 1-4
- [20] 谢涛.三种回生抗性淀粉对米淀粉的冻融与流变性质的影响[J]. 中国粮油学报,2018,33(12): 28-34
- [21] 李棒棒,路源,于吉斌,等.浸泡处理对大米淀粉糊化特性及流变 特性的影响[J].食品工业科技,2018,39(18): 50-54,59
- [22] Mounsey J S, O'Riordan E D. Characteristics of imitation cheese containing native or modified rice starches[J]. Food Hydrocolloids, 2008, 22(6): 1160–1169

收稿日期:2019-04-07

99\_\_\_\_