

微生物利用食品废物合成聚羟基烷酸酯

蔡萌萌¹, 蔡宏², 王爱玲³, 余海虎³, 单羿², 任洁², 何丹², 赵庆良¹

(1. 哈尔滨工业大学市政环境工程学院, 哈尔滨 150090; 2. 香港理工大学土木与结构工程系 香港; 3. 香港理工大学应用生物与化学技术系 香港)

摘要: 为了降低聚羟基烷酸酯 (PHAs) 的生产成本, 以麦芽、豆类、糖果、冰激凌、牛奶、芝麻油和食醋废物为底物, 研究了产碱弧菌 (*Alcaligenes latus*)、表皮葡萄球菌 (*Staphylococcus epidermidis*) 和活性污泥合成 PHAs 的工艺可行性和产物的物化性质。结果表明, 通过两段式间歇补料发酵, 3 类微生物利用麦芽废物合成的聚羟基丁酸酯 (PHB) 产量最大, 分别达细胞内含量的 70.1%、16.0% 和 43.3%。*A. latus* 适应食品废物开始细胞生长和 PHAs 合成的延迟短, 在缺氮阶段合成 PHB 的产量、产率高。微好氧时, 从芝麻油提取出的 *S. epidermidis* 可以合成分子量超过 1×10^6 的 PHB。活性污泥可利用豆类废物合成聚羟基丁酸-羟基戊酸酯 (PHBV) 共聚物, 其中羟基戊酸比例 (HV%) 占 21%。多数食品废物适合合成具有不同物化性质的 PHAs。PHAs 产物的组分及物化性质受微生物种类、底物类型、发酵条件的影响。

关键词: 活性污泥; 产碱弧菌; 食品废物; 聚羟基烷酸酯 (PHAs); 表皮葡萄球菌

中图分类号: X705; X505 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)09-2643-06

Polyhydroxyalkanoates Microbiological Synthesis from Food Wastes

CAI Meng-meng¹, CHUA Hong², WONG Ai-ling Phoeby³, YU Hoi-fu Peter³, SIN Ngai Shirley², REN Jie², HE Dan², ZHAO Qing-liang¹

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 2. Department of Civil and Structural Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China; 3. Department of Applied Biology and Chemical Technology, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China)

Abstract: To reduce the production cost of polyhydroxyalkanoates (PHAs), the process feasibility and physicochemical properties of PHAs synthesized by *Alcaligenes latus*, *Staphylococcus epidermidis* and activated sludge from malt waste, soy waste, confectionary waste, ice cream waste, milk waste, sesame oil and vinegar waste were analyzed. Results showed that through two-stage fed-batch fermentation, the maximum yield of PHAs accumulated by the three kinds of microorganisms from malt waste was 70.1%, 16.0% and 43.3%, separately. *A. latus* adapted itself to the food wastes in PHAs synthesis and new cell growth quickly. *A. latus* had higher PHAs yield and productivity under nitrogen limited condition. Micro-aerobically, *S. epidermidis* separated from sesame oil could produce polyhydroxybutyrate (PHB) with molecular weight of over 1×10^6 . From soy waste, activated sludge accumulated polyhydroxybutyrate-co-hydroxyvalerate (PHBV) copolymer which had hydroxyvaleryl content (HV%) of 21%. Most food wastes are suitable for synthesizing PHAs with different physicochemical properties. The composition and properties of PHAs are influenced by the character of microorganism, the selection of substrates and optimization of ferment conditions.

Key words: activated sludge; *Alcaligenes latus*; food wastes; polyhydroxyalkanoates (PHAs); *Staphylococcus epidermidis*

聚羟基烷酸酯 (polyhydroxyalkanoates, PHAs) 是一类生物合成的细胞内含物, 可完全生物降解, 其底物为可再生有机质, 是石油基塑料的理想替代品。2006 年, 香港食品废物、塑料垃圾和废水厂脱水污泥产生量分别为 3 200、1 709 和 1 395 t/d, 占城市固体废物总量的 35%、19% 和 15%, 废物循环利用率不到 1%^[1]。此外, 高昂的成本限制了 PHAs 的广泛应用^[2]。选择廉价的、可再生且来源广泛的废物作底物, 筛选出能够高产 PHAs 的微生物或利用活性污泥合成 PHAs, 优化 PHAs 合成工艺, 都有利于大幅降低 PHAs 成本, 也可实现废物减量化和资源化, 降低“白色污染”危害, 减少不可再生资源的消耗^[3]。

国外学者对微生物利用各种废物合成 PHAs 已

有研究 (表 1), 其 PHAs 碳源主要是挥发性有机酸, 且底物转化率普遍不高。为了降低 PHAs 合成成本, 本试验对比了缺氮条件下的 *Alcaligenes latus*、分离自油类的 *Staphylococcus epidermidis* 以及来自废水处理厂的活性污泥, 研究了以多种食品废物中的糖分为原料合成的 PHAs 的细胞内含量、合成速率、碳源转化率、PHAs 产物的组分及其物化性质, 从而为大规模生产廉价 PHAs 的工艺设计和工艺优化提供技术支持和理论依据。

收稿日期: 2007-09-11; 修订日期: 2007-12-03

作者简介: 蔡萌萌 (1980 ~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为 PHAs 合成、废水与污泥资源化, E-mail: cmm_hit@126.com

表 1 微生物利用废物合成 PHAs

Table 1 PHAs synthesis from wastes by microorganism

微生物	底物	发酵方式	PHAs 细胞内含量/%	底物转化率 (PHAs/废物) $\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$	HV/PHBV (摩尔比)	参考文献
<i>R. eutropha</i>	餐厅垃圾	批式	72.6	0.04	2.8	[4]
<i>A. vinelandii</i>	猪粪渗滤液	批式	58	0.023	7.9	[5]
<i>A. eutrophus</i>	污泥消化液	批式	34	0.78	17	[6]
<i>A. chroococcum</i>	淀粉水解物	间歇补料	46	0.435	54	[7]
活性污泥	纸浆废物	间歇补料	85	未知	未知	[8]
活性污泥	食品垃圾	间歇补料	51	0.086	12.8	[9]
活性污泥	橄榄油废物	批式	54	1.05	11	[10]
活性污泥	糖蜜发酵物	间歇补料	31	0.46	53	[2]

1 材料与方法

1.1 微生物

Alcaligenes latus DSM 1124 由清华大学陈国强教授提供; *Staphylococcus epidermidis* 是从芝麻油筛选分离出来的, 活性污泥来自香港大埔墟市政污水处理厂。微生物保存在 4℃ 的琼脂中, 每月定期分培。

1.2 底物

麦芽、豆类、糖果和冰激凌废物分别来自香港的 Carlsberg[®] 啤酒厂、维他[®] 豆奶厂、嘉顿[®] 公司和 Appolo[®] 公司, 食醋、牛奶和芝麻油废物来自超市过期产品。各食品废物的预处理过程为: 研磨后的麦芽干粉和半固态豆类废物在 105℃、36.5 g/L 的 HCl 溶液中消化 5 h, 液态的冰激凌和糖果废物在 HCl 溶液中煮沸 1 h, 以溶解固态物。上述消化液分别离心后取上清液加碱中和, 经高压灭菌后备用。消化后各食品废物组分含量见表 2。未经加酸消化的麦芽废物的成分为: 13% 不含氮萃取物、7% 蛋白质、6% 纤维素、3% 脂类、1% 无机盐和 70% 水分。加酸消化时, HCl 浓度从 0 g/L 增加到 73 g/L, 单位质量的麦芽消化液和豆类消化液中的 TOC 浓度和总凯氏氮 (Total Kjeldahl Nitrogen, TKN) 浓度均有所增加; HCl 浓度高于 18.25 g/L 后 2 种消化液的 TOC:TKN 比例分别为消化前的 0.35 和 0.50。浓缩的合成废水由蔗糖、 K_2HPO_4 、 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 和微量元素^[11] 配置而成, TOC: $\text{NH}_4^+:\text{PO}_4^{3-}$ 为 12:1:1.2 ~ 74:1:2; 发酵罐内糖浓度维持在 10 ~ 30 g/L。

1.3 发酵条件

采取 500 mL 摇瓶或有效容积 3.7 L 的发酵罐 (Wald, Bioengineering) 2 种方式合成 PHAs。摇瓶为批式发酵, pH 为 6.0 ~ 7.0, 35℃, 搅拌速度 200 r/min。发酵罐采用两段式培养, 前期投加碳氮磷比例均衡的底物 TOC: $\text{NH}_4^+:\text{PO}_4^{3-}$ 为 220:5:1 ~ 300:5:1, 适量

补充 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、 K_2HPO_4 , 其中 PO_4^{3-} 浓度为 0.1 g/L, 以利于新细胞增殖; 后期投加氮磷缺乏的底物 (只投加碳源, 不投加氮、磷, 溶液中残余的 NH_4^+ 很快被微生物耗尽), 细胞生长被抑制, PHAs 的产量和产率得到提高。2 个阶段里 3 类微生物投加的底物种类和浓度不同, 具体参见“结果与讨论”和表 2。采用间歇补料发酵方式。发酵罐中 pH 值和 DO 通过在线 pH 电极和 DO 电极监控。DO 为 10% ~ 20%, pH 为 7.0, 35℃, 搅拌速度 700 r/min。反应时间 36 ~ 72 h。

表 2 36.5 g/L 的 HCl 消化后各食品废物消化液组分

Table 2 Composition of food waste solution after digestion in 36.5 g/L HCl

废物名称	消化液组分	TOC/ $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	TKN/ $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	TOC:TKN
麦芽	麦芽糖、乳糖	22 ± 1.0	3.9 ± 0.10	5.64
豆类	果糖、乳糖、麦芽糖	27 ± 1.2	3.8 ± 0.08	7.11
糖果	未测	300 ± 2.8	0.75 ± 0.05	400
冰激凌	未测	3.5 ± 0.5	0.10 ± 0.01	35

1.4 分析方法

菌种筛选使用苏丹黑染色法和尼罗蓝染色法。微生物干重 (cell dry weight, CDW) TOC (ASTRO 2000 TOC 分析仪, 100 mg/L 的蔗糖溶液作参照物) TKN 的测定根据参考文献 [12]; 总糖和溶解性氮浓度均取样后即时分析, 分别采用苯酚-硫酸法^[11] 和配有膜电极氨氮探头 (cole-parmer) 的离子分析仪进行测定。

PHAs 的含量分析采用气相色谱 (Hewlett Packard 6890A GC, 30 m 长的 DB-5 毛细管柱), PHB 标准物和 PHBV 共聚物中 HB:HV 摩尔比为 79:21 的 PHBV 标准物购自 Fluka 公司; PHAs 组分分析分别采用 ^1H -和 ^{13}C -核磁共振仪 (Bruker DPX400 ^1H -和 ^{13}C -NMR 光度计, 三甲基硅烷作参照物) 和傅立叶红外光谱仪 (Bruker Vector 22 FTIR 光度计测定); PHAs 的分子量和分子量分布分析采用固有黏度测定法和凝胶渗透色谱仪 (Waters GPC V2000 测定); PHAs 的

热力学性质分析采用微分扫描热量计(Perkin-Elmer DSC-7 测定)和热重分析仪(Perkin-Elmer TG-7 测定);PHAs 产物提取采用氯仿-甲醇、旋转蒸发器萃取法;PHAs 的熔点测定采用数字熔点测定仪(Electrothermal 测定)。

2 结果与讨论

2.1 *Alcaligenes latus* 合成 PHAs

GC 和¹H-NMR 谱图分析显示,*A. latus* DSM 1124 利用麦芽、糖果和豆类废物合成的 PHAs 均为 PHB。利用两段式发酵,*A. latus* DSM 1124 合成 PHB 的 4 组对比试验见表 3、表 4。通过两段式间歇补料发酵,分别以蔗糖、麦芽或豆类消化液 3 种底物作营养均衡段基质(表 3),外加蔗糖或糖果消化液作氮磷缺乏段糖源,以提高 C:N(表 4)。

图 1 为 *A. latus* DSM 1124 通过两段式培养方式利用麦芽消化液和蔗糖合成 PHB 的典型情况。试验 B 中 *A. latus* 合成的 PHB 产量(70.1%)和表 1 中 *R. eutropha* 利用食品垃圾的 PHAs 产量(72.6%)

接近。实验 B 中,氮磷充足阶段 PHB 产率只有 0.162 g/(L·h),氮磷缺乏阶段 PHB 产率迅速加快,为 0.82 g/(L·h),接近此时的细胞生长速率 1.03 g/(L·h)。氮磷缺乏阶段的细胞产率[$m(\text{细胞})/m(\text{碳源})$]只有氮磷充足阶段的 40%。由于外加糖源使细胞产率加快了 3 倍,导致氮氮消耗速度加快,抑制了氮磷缺乏阶段的新细胞生长,使得 PHB 产量和产率的增幅超过细胞生长的。说明高 C:N 有利于增加碳源向 PHB 的转化率。氮磷充足阶段,麦芽消化液或蔗糖合成 PHB 的转化率[$m(\text{PHB})/m(\text{碳源})$]分别为 74.6% 和 72.0%,且 PHB 的最大产率发生在外加糖源之前。说明 *A. latus* 利用麦芽消化液中麦芽糖、乳糖合成 PHB 和蔗糖的效率一样高。PHB 产量[$m(\text{PHB})/m(\text{细胞})$]在氮磷充足阶段已有 49%,而外加糖源后只增加了 21%。这是因为 PHB 在细胞内的储存有一定的饱和度。PHB 和新细胞产量从第 20 h 就开始快速增加,PHB 产量达到最大发生在第 50 h 之后。说明 *A. latus* 对麦芽废物的适应期短,能够充分利用麦芽废物中的糖分合成 PHB 和细胞物质。

表 3 发酵罐中 *A. latus* DSM 1124 的两段式间歇补料发酵(前一段)

Table 3 Two-stage fed-batch fermentation of *A. latus* DSM 1124 in fermentor (The former stage)

主要底物(营养均衡段)	罐内浓度/g·L ⁻¹	C _{糖类} :NTKN(质量比)
(A)蔗糖	糖类:25(±0.5);氮氮:2.6(±0.2)	16.5(±1.5)
(B)麦芽消化液	TOC:21.5(±0.5);糖类:15.3(±0.5);TKN:3.8(±0.05)	5.5(±0.05)
(C)麦芽消化液	TOC:21.5(±0.5);糖类:15.3(±0.5);TKN:3.8(±0.05)	5.5(±0.05)
(D)豆类消化液	TOC:28.0(±0.5);糖类:19.5(±0.5);TKN:3.5(±0.05)	8.0(±0.05)

表 4 发酵罐中 *A. latus* DSM 1124 的两段式间歇补料发酵(后一段)

Table 4 Two-stage fed-batch fermentation of *A. latus* DSM 1124 in fermentor (The latter stage)

外加糖源(氮磷缺乏段)	罐内糖源浓度/g·L ⁻¹	瞬间糖源投加时间	PHAs 产量最大时刻
(A)蔗糖	第 1、2、3 次 90	第 22、26、46 h	第 63~69 h
(B)蔗糖	51	第 29 h	第 48~51 h
(C)糖果消化液	第 1、2 次 51;第 3 次 115	第 29、52、76 h	第 32~41 h
(D)蔗糖	38	第 44 h	第 49~51 h

碳源间歇投加状况下,活性污泥中可积累 PHAs 的菌群具有很强的生存竞争能力^[2]。外界碳源过量时,活性污泥来不及合成足够的用于生长的酶系统,PHAs 合成速率远远大于生长速率,大多数碳源被转化成作为碳源和能源储存物的 PHAs^[3]。积累 PHAs 成为活性污泥快速适应碳源过量环境、维持相对稳定的生长速率的有效手段^[13,14]。

图 2 比较了 *A. latus* DSM 1124 利用不同碳源合成 PHB 的效率。*A. latus* 利用麦芽废物合成 PHB 产量最大,达细胞干重的 70.1%,其中细胞产量 32.4 g/L,PHB 产量 22.7 g/L。豆类废物或蔗糖作基质,可

分别合成占细胞干重 33%和 36%的 PHB,细胞产量分别为 18 g/L和 28 g/L。可见,麦芽消化液为碳源,*A. latus* DSM 1124 合成的 PHB 产量、合成速率和碳源转化为 PHB 的效率均超过其它碳源,而豆类消化液转化为细胞物质的比例超过其它碳源。

图 3 显示了 *A. latus* DSM 1124 利用不同底物的 PHB 产率。4 组实验的最大 PHB 产率分别为 1.64、1.92、0.9 和 0.54 g/(L·h),分别发生在第 60、33、29 和 49 h。可见,麦芽消化液作底物,PHB 的比产率最大。*A. latus* DSM 1124 适应不同底物、开始积累 PHB 和细胞对数增殖的时间都较快。根据麦芽消化液

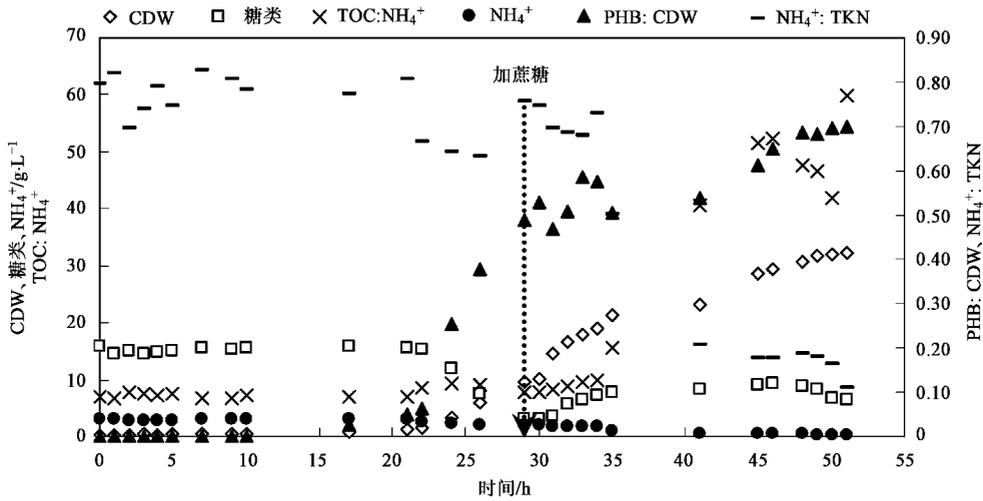


图1 A. latus DSM 1124 利用麦芽消化液和蔗糖合成 PHB(实验 B)

Fig.1 PHB synthesis by A. latus DSM 1124 from malt digest and sucrose(Experiment B)

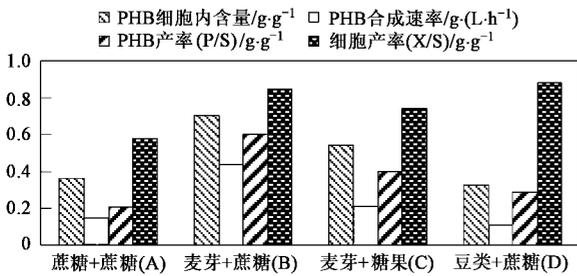


图2 A. latus 利用不同底物合成 PHB 的最大产量、合成速率和底物转化率

Fig.2 Maximum yield of PHB and cell , substrate conversion rate from different substrates by A. latus

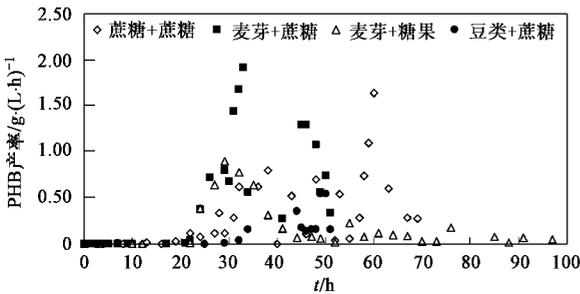


图3 A. latus 利用不同底物合成 PHB 的产率

Fig.3 PHB yield of A. latus from different substrates

33%的提取率和 PHB 产率[$m(\text{PHB})/m(\text{麦芽})$] = 0.598 麦芽,以啤酒厂产生 600 t/a 麦芽废物计算, PHAs 的年产量为 119.8 t.

2.2 Staphylococcus epidermidis 合成 PHAs

GC、¹³C-NMR、FTIR 和 DSC 谱图分析显示,批式发酵,S. epidermidis 利用麦芽、糖果、豆类、冰激凌、

牛奶废物和芝麻油合成的 PHAs 均为 PHB.固有黏度测定显示 S. epidermidis 利用蔗糖合成的 PHB 的分子量为 1×10^6 ,是 A. latus DSM 1124 合成 PHB 的 10 倍.S. epidermidis 合成的 PHB 呈片状,延展性更好而 A. latus DSM 1124 合成的 PHB 呈粉末状.相对于蔗糖作碳源,S. epidermidis 利用食品废物作底物合成 PHB 的分子量较小,而 A. latus 则相反.

批式发酵,以蔗糖为碳源,考察了溶液温度、pH 值、溶氧传导率(R_v)、TOC:TKN 对 S. epidermidis 细胞增殖和 PHB 细胞内含量的影响.发现 30 ~ 35℃ 时细胞增殖和 PHB 合成良好,25℃ 时细胞生长缓慢;pH 值为 6.0 ~ 7.0 利于细胞增殖,而 pH 值为 6.5 时 PHB 产量最大; R_v 从 0.2 增加到 0.5,PHB 细胞内含量下降了 43%,TOC:TKN 从 7 增长到 96 时,PHB 细胞内含量从 10% 上升到 30%.因此,S. epidermidis 利用蔗糖合成 PHB 的最佳条件是 35℃、pH = 6.5、 $R_v = 0.2$ 、TOC:TKN = 96.

批式发酵,S. epidermidis 利用麦芽消化液合成的 PHB 细胞内含量最大(14.99%),其次为牛奶废物(9.94%)和浓度为 2.5% 的糖果废物(8.65%).同样,S. epidermidis 利用麦芽糖、葡萄糖、半乳糖、果糖、蔗糖、木糖、甘露糖、乳糖合成 PHB,麦芽糖合成的 PHB 细胞内含量最大(22.7%),其次为半乳糖(21.3%).证明麦芽废物是 S. epidermidis 合成 PHB 的最佳底物.糖果废物作底物时,随着底物浓度的上升,细胞产量上升,PHB 产量却降低.可见提高糖类底物浓度不利于提高 PHAs 转化率,而有利于微生物生长.麦芽、豆类废物和芝麻油为底物时,合成的

PHB 细胞内含量依次为 16.0%、9.2% 和 14.8%。说明 *S. epidermidis* 可直接利用油类合成 PHB, 且以芝麻油为底物合成的 PHB 产量仅次于麦芽废物, 且该 PHB 产物的熔点高于麦芽、豆类、冰激凌废物作底物, 为 188℃。此外 *S. epidermidis* 利用食醋废物只能进行细胞生长而不能合成 PHB。

2.3 活性污泥合成 PHAs

两段式间歇补料发酵, 分别用麦芽、豆类消化液或葡萄糖作活性污泥生长段基质, 基质糖分低于 10 g/L 时, 补加葡萄糖或麦芽消化液作缺氮阶段基质。活性污泥的 PHAs 合成和细胞增殖开始于发酵初期, 提高 C:N 后, 活性污泥合成的 PHAs 细胞内含量为 28%, 比生长阶段的提高了 1 倍。高 C:N 有利于增加活性污泥合成 PHAs 产量。

麦芽消化液或葡萄糖作单一底物, PHAs 最大细胞内含量 [$m(\text{PHAs})/m(\text{细胞})$] 分别为 43.3% 和 26.0%, 其中细胞产量 15.1 g/L, PHB 产量 6.6 g/L; 碳源转化率 [$m(\text{PHAs})/m(\text{碳源})$] 分别为 16.9% 和 5.0%。与表 1 中活性污泥利用不用废物合成 PHAs 比较, 本试验活性污泥利用麦芽废物合成 PHB 的产量高, 但碳源转化率还有待提高。证明麦芽消化液是活性污泥合成 PHAs 的最佳底物。同样底物浓度下, 活性污泥利用豆类消化液废物合成 PHAs 的产量 (0.172 g/L) 是单纯以葡萄糖作碳源的 4.8 倍。这是因为活性污泥中菌群的酶系统的特异性多样化, 可充分利用麦芽和豆类废物中的多种糖类底物 (如麦芽糖、蔗糖、果糖) 合成不同产量的 PHAs。活性污泥利用不同底物合成 PHAs 的产率不同。麦芽消化液作基质, 随后外加葡萄糖, PHAs 产率 [0.292 g(L·h)] 提高了 4.5 倍, 细胞产率基本不变。葡萄糖作基质, 随后外加麦芽消化液, PHAs 的合成速率 [0.2 g(L·h)] 不变, 细胞产率下降了 38%。说明麦芽消化液作基质, 随后外加葡萄糖的底物投加顺序, 有利于提高 PHAs 产率, 增加碳源转化为 PHAs 的效率。

从活性污泥混合菌群中筛选分离出的 *Klebsiella pneumoniae* 利用麦芽或豆类消化液合成 PHAs 产物均为 PHBV, 其 HV (摩尔分数) 分别为 7% 和 21%, 而 *K. pneumoniae* 合成 PHAs 的最大产量低于活性污泥。

表 5 为活性污泥利用糖类合成 PHAs 的组成及其热力学性质。活性污泥可以利用不同底物合成含有不同组分的 PHAs。此外, 活性污泥合成 PHAs 的熔点介于 180℃ 和 83℃ 之间。而且根据 GC 和 ¹H-NMR

谱图分析, 活性污泥利用麦芽废物和豆类废物合成的 PHAs 为 PHBV 共聚物, 而非共混物。图 4 显示了活性污泥利用麦芽废物合成的 PHBV 的热力学稳定性优于豆类废物, 且 2 种 PHBV 产物的纯度高于 97%。由于并不是组成活性污泥的所有混合菌群都能合成 PHAs, 且各菌群利用相同底物合成的 PHAs 产量不同, 因此活性污泥合成的 PHAs 产量没有纯菌种 *A. latus* 的 PHAs 产量多。活性污泥合成 PHAs 的组分能根据食品废物类型而变化。

表 5 活性污泥合成 PHAs 的组成及其热力学性质

Table 5 Composition and thermo-properties of PHAs synthesized by activated sludge

底物	HB:HV (摩尔比)	熔点/℃
麦芽废物	93:7	162
豆类废物	75:25	157
葡萄糖	55:45	179
果糖	20:80	142
PHB 标准物	100:0	180
PHBV 标准物	71:29	83

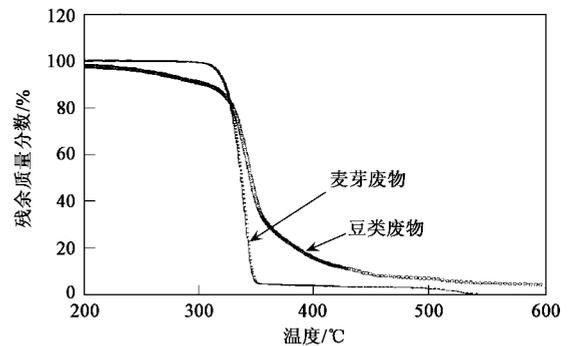


图 4 活性污泥利用不同废物合成 PHAs 的 TG 曲线

Fig.4 TG curves of PHAs produced from wastes by activated sludge

3 结论

(1) 绝大多数廉价的食物废物可以被微生物利用, 合成性质优良的 PHAs。降低 PHAs 生产成本的同时, 减少食品工业废物和剩余污泥的处理量。3 类微生物利用麦芽废物合成 PHAs 的产量最高。

(2) 两段式间歇补料发酵, 利用麦芽废物作基质, 蔗糖作外加糖源, *Alcaligenes latus* DSM 1124 合成 PHB 达细胞干重的 70.1%, PHB 产率达到最大, 为 0.82 g(L·h)。糖果废物作外加糖源, 可合成占细胞干重 54.1% 的 PHB。豆类废物或蔗糖作基质, 可分别合成占细胞干重 33% 和 36% 的 PHB。

(3) 芝麻油中分离出来的 *Staphylococcus epidermidis* 可以合成分子量高达 1×10^6 、占细胞干重

16.0%的 PHB,比 *A. latus* 合成的 PHB 延展性更好。*S. epidermidis* 合成 PHB 产量最大的工艺条件为: $R_v = 0.2$, TOC:TKN = 96.

(4)活性污泥在营养非均衡环境下 利用麦芽废物,可合成占细胞干重 43.3% 的 PHB. 利用豆类废物,可合成 PHBV 共聚物. 活性污泥利用麦芽废物合成的 PHBV 的热力学稳定性更好.

致谢 感谢香港理工大学、哈尔滨工业大学和香港研究资助局对本课题研究的科研资助.

参考文献:

- [1] 黄孔乐, 谭振强, 严可亮, 等. 香港固体废物监察报告 [R]. 香港 环境保护署, 2006. 2-11.
- [2] Dias J M L, Lemos P C, Serafim L S, *et al.* Recent advances in polyhydroxyalkanoate production by mixed aerobic cultures: From the substrate to the final product [J]. *Macromol Biosci*, 2006, **6**(11): 885-906.
- [3] Salehizadeh H, Van Loosdrecht M C M. Production of polyhydroxyalkanoates by mixed culture: recent trends and biotechnological importance [J]. *Biotechnol Adv*, 2004, **22**(3): 261-279.
- [4] Du G C, Yu J. Green technology for conversion of food scraps to biodegradable thermoplastic polyhydroxyalkanoates [J]. *Environ Sci Technol*, 2002, **36**(24): 5511-5516.
- [5] Cho K S, Ryu H W, Park C H, *et al.* Poly(hydroxybutyrate-co-hydroxy-valerate) from swine waste liquor by *Azotobacter vinelandii* UWD [J]. *Biotechnol Lett*, 1997, **19**(1): 7-10.
- [6] Lee S, Yu J. Production of biodegradable thermoplastics from municipal sludge by a two-stage bioprocess [J]. *Resources Conserv Recycl*, 1997, **19**(3): 151-164.
- [7] Kim B S, Chang H N. Production of poly(3-hydroxybutyrate) from starch by *Azotobacter chroococcum* [J]. *Biotechnol Lett*, 1998, **20**(2): 109-112.
- [8] Coats E R, Loge F J, Smith W A, *et al.* Functional stability of a mixed microbial consortium producing PHA from waste carbon sources [J]. *Appl Biochem Biotechnol*, 2007, **137**: 909-925.
- [9] Rhu D H, Lee W H, Kim J Y, *et al.* Polyhydroxyalkanoate (PHA) production from waste [J]. *Water Sci Technol*, 2003, **48**(8): 221-228.
- [10] Dionisi D, Carucci G, Papini M P, *et al.* Olive oil mill effluents as a feedstock for production of biodegradable polymers [J]. *Water Res*, 2005, **39**(10): 2076-2084.
- [11] Lee S Y. Plastic bacterias Progress and prospects for polyhydroxyalkanoate production in bacteria [J]. *Trends Biotechnol*, 1996, **14**(11): 431-438.
- [12] APHA. Stand methods for the examination of water and wastewater [M]. (19th edition). Washington. D.C. : American Public Health Association, 1995.
- [13] Majone M, Dircks K, Beun J J. Aerobic storage under dynamic conditions in activated sludge processes. The state of the art [J]. *Water Sci Technol*, 1999, **39**(1): 61-73.
- [14] van Loosdrecht M C M, Heijnen J J. Modelling of activated sludge processes with structured biomass [J]. *Water Sci Technol*, 2002, **45**(6): 13-23.