科研与开发

热管生物反应器温度场的研究

王 煜 许 克 李冰峰 张赣道
(南京工业大学制药与生命科学学院,江苏 南京 210009)

摘要:进行了以水和羧甲基纤维素为模拟介质,在不同操作条件下热管生物反应器内单相流、两相流温度场的研究。实验表明热管生物反应器具有良好的等温性能,消除了传统生物反应器中温度差异大对反应的不良影响,为热管生物反应器数学模型的建立及反应器放大提供了基础数据。

关键词:生物反应器;热管;温度场
中图分类号:TQ033 **文献标识码**:A **文章编号**:0253-4320(2003)01-0024-05

Research on temperature field in heat pipe bioreactors

WANG Yu, XU Ke, LI Bing-feng, ZHANG Gan-dao
(College of Life Science and Pharmacy, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China)

Abstract: The temperature field of single-phase and two-phase media in a heat pipe bioreactor under different operation conditions are studied with H_2O and CMC as the simulative media. Results proves that the heat pipe bioreactor has isotemperature properties under the generic ferment operation, and has no disadvantages of variance of temperature distribution for reaction in traditional bioreactors. The study also provides some basic data for the establishment of mathematic model and the magnification of heat pipe bioreactors.

Key words: bioreactor; heat pipe; temperature field

传统生物反应器在传热方面存在着温度分布不均匀等缺点。在发酵过程中细胞和酶对温度极为敏感,虽然传统生物反应器内温度探头所测量的周围温度能达到细胞和酶生长和反应要求,但其他区域温度的可能偏高或偏低,仍可导致菌体活性的破坏以至死亡,反应器的温度场均匀性对发酵至关重要。热管是一种新型、高效、等温的传热和节能元件[1],热管生物反应器是用热管作传热装置的生物反应设备[2],具有温度控制灵敏、传热效率高、冷却水用量少、温度分布均匀等优点。其工作原理是:当处在反应器中的热管换热器的蒸发端受热达到起动温度时,毛细材料中的液体吸热蒸发,蒸汽流向冷凝端,冷凝端由于受到冷却使蒸汽放热冷凝成液体,液体回流到蒸发端,热量便从一端传至另一端,从而保证了发酵热的驱除。

笔者采用不同操作条件,对两种有代表性的模拟反应介质,用稳态法测定热管生物反应器内轴径向点的温度分布,结果表明通过设计热管的结构型式和正确的热管排列,可保证热管生物反应器在一般发酵操作条件下温度场均匀[2]。

1 实验装置及方法

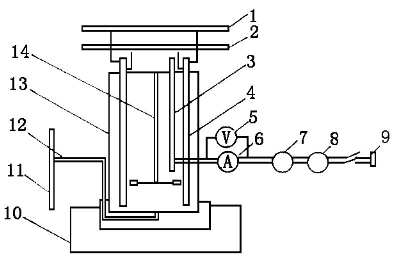
1.1 热管生物反应器

实验采用高径比(H/D)为2的5 L的硼硅玻璃热管生物反应器,搅拌桨为标准六叶透平桨,桨叶的横截面距反应器内底壁为$\frac{1}{3}D$,热管内径为20 mm,工质为丙酮,热管互呈120°,装置如图1、图2。

1.2 热电偶设置

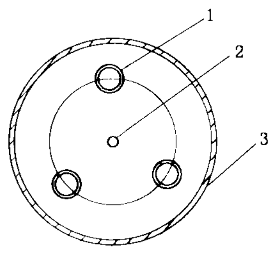
用自制铜-康铜热电偶测量反应器内轴径向各点的温度[3](见图3)。第1~4点热电偶测量热管壁的温度,第5~8点热电偶测量边界层流体的温

收稿日期:2002-10-22
基金项目:江苏省科委资助项目(BJ99025)
作者简介:王煜(1976-),男,博士生;张赣道(1943-),男,硕士,教授,博导,主要研究方向为生化工程与化学工程,通讯联系人,025-3587346,zgd7346@163.com。



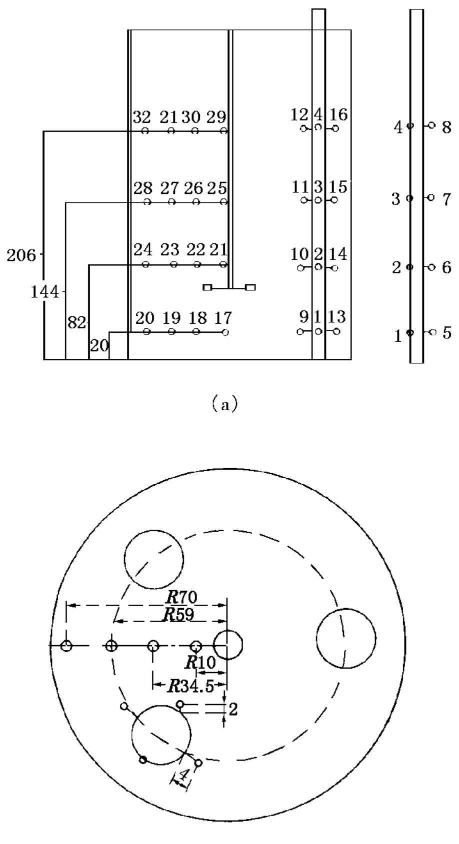
1—冷凝水进口管;2—冷凝水出口管;3—电热棒;4—热管(3 根);5—电压表;6—电流表;7—调压器;8—稳压器;9—电源;10—釜体支撑台;11—压缩空气管;12—进口通气管;13—釜体;14—搅拌器

图 1　热管生物反应器传热装置



1—热管;2—搅拌轴;3—釜体

图 2　三根热管的分布图



(a)

(b)

图 3　测量温度场热电偶的布置图

度,第 9 ~ 32 点热电偶测量反应器主体流轴径向有代表性点的温度。

1.3　操作条件

模拟介质采用 H_2O 和质量分数为 2% 的羧甲基纤维素(CMC)溶液[4],填料系数为 0.8。一般地,细菌或酵母等发酵液黏度较低、流动性好、热量传递速率较快,水的流体性质与此相似,同属于牛顿流体。多种抗生素、有机酸等发酵液的黏度高、流动性差、传热困难,呈现非牛顿流体的特征,2% CMC 溶液的流体性质(如黏度)与此相似,对 CMC 溶液的温度场研究可以代表高黏度发酵液的温度场研究。

搅拌的目的首先是增加气液接触界面,以提高气液面的传质速率;其次是为了使发酵液充分混合[5]。搅拌的转速影响反应液的流动状态,在实验中搅拌转速(n)为 50 r/min(雷诺数小于 2 100)时,代表的流动状态是层流;搅拌转速取 200、400 r/min 时(雷诺数大于 2 100),代表的流动状态是湍流(一般发酵时的流动状态)[6]。

主体流温度(T)取 30、40℃左右(一般发酵时的温度);而 T 取 50、60、70、80℃左右时(少数嗜热菌的发酵温度[7]),也是尽可能增加温度差,便于研究温度场。

通气量(U_g)为零,代表厌氧菌的发酵要求;取 1 L/min[5],代表发酵时好氧菌对氧的一般要求。本实验使用的气体为压缩空气。

热管的冷却方式分两种:自然冷却和水冷却,分别用于满足调整不同菌体的发酵温度。

1.4　实验步骤

实验用稳态法进行,搅拌转速由数学显示仪控制及读取。通气量由 LZB - 4 转子流量计控制。菌体产生的发酵热由电热棒加热模拟产生,由 TDGC2J 型接触式调压器调整不同的加热量。冷却水用量由 LZB - 4 转子流量计控制。温度由所设置的热电偶测量。

以 H_2O 为介质时,在自然冷却与水冷却两种方式下,分别调整 n = 50、200、400 r/min 和 U_g = 0、1 L/min及加热量和冷却水用量,使得主体流温度(T)分别达到 30、40、50、60、70、80℃左右稳态时,记录各热电偶所测量的温度值。

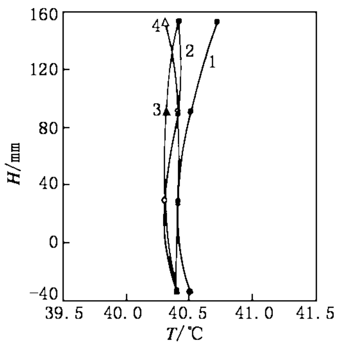
以 CMC 溶液为介质时,在自然冷却与水冷却两种方式下,分别调整 n = 50、200、400 r/min 和 U_g = 0、1 L/min 和冷却水用量,使得主体流温度分别达到 T = 30、40、50、60、70、80℃左右时,记录各热电偶所测量的温度值。

2 结果与讨论

2.1 H_2O 为介质时的温度场

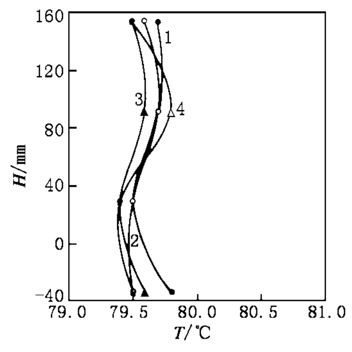
2.1.1 自然冷却

热管生物反应器在非通气状态、一般发酵条件（$T=30$、40℃，$n=200$、400 r/min 的组合）下，所测主体流轴径向点最大温差为0.4℃，这里仅选取图4代表此状态下主体流轴径向温度分布图；在其他操作条件（$T=50$、60、70、80℃，$n=50$、200、400 r/min 的组合）下，层流状态时温度一般随着 H、r 增加而减小（H 为热电偶距搅拌桨横截面的轴向距离，r 为热电偶距搅拌轴中心的径向距离[8]），湍流状态时温度分布没有明显的规律性，两种情况下所测主体流轴径向点最大温差均为1.0℃。



r/mm：1—10；2—34.5；3—50；4—70

图4 $U_g=0$，40℃，400 r/min，H_2O 为介质，自然冷却时反应器温度分布



r/mm：1—10；2—34.5；3—50；4—70

图5 $U_g=1$ L/min，80℃，50 r/min，H_2O 为介质，自然冷却时反应器温度分布

在通气状态、一般发酵条件下，所测轴径向点最大温差为0.3℃，有代表性轴径向温度分布如图5所示；在其他操作条件时，所测轴径向点最大温差为0.6℃。与非通气状态相比，温差进一步减小，这是由于气流加强了流体湍流，使介质传热性能良好。

表1表示反应器以 H_2O 为介质，冷却方式为自然冷却时，各操作条件下所测轴径向点的最大温差。最大温差为0.2～1.0℃，温差随着主体流温度的降低、转速的提高而减小，此外，通气也可减小温差。

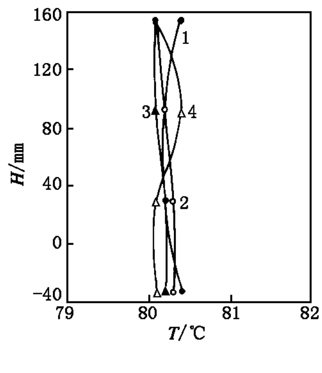
表1 热管生物反应器温度场中最大温差

T/℃	30			40			50		
n/r·min^{-1}	50	200	400	50	200	400	50	200	400
ΔT_{max}/℃									
$U_g=0$	0.8	0.4	0.4	0.8	0.4	0.5	1.0	0.5	0.4
$U_g=1$ L/min	0.3	0.2	0.2	0.3	0.3	0.4	0.3	0.3	0.4
T/℃	60			70			80		
n/r·min^{-1}	50	200	400	50	200	400	50	200	400
ΔT_{max}/℃									
$U_g=0$	0.5	0.2	0.2	0.6	0.3	0.4	0.7	0.3	0.4
$U_g=1$ L/min	0.6	0.4	0.4	0.5	0.5	0.4	0.6	0.5	0.4

注：介质为水，自然冷却。

2.1.2 水冷却

热管生物反应器在非通气状态、一般发酵条件下，温度随着 H、r 的增加而减小，所测轴径向点最大温差为0.3～0.5℃；在其他操作条件，所测轴径向点最大温差为0.3～1.0℃，有代表性轴径向温度分布如图6所示。

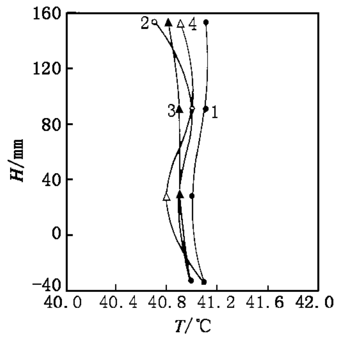


r/mm：1—10；2—34.5；3—50；4—70

图6 $U_g=0$，80℃，400 r/min，H_2O 为介质，水冷时反应器温度分布

在通气状态下，在一般发酵条件下，所测轴径向点最大温差为0.3～0.5℃，有代表性轴径向温度分布如图7所示。在其他操作条件下，所测轴径向点最大温差为0.5～0.7℃。

表2为热管生物反应器以 H_2O 为介质，冷却方式为水冷却时，各操作条件下所测轴径向点的最大温差。最大温差为0.3～1.0℃，温差随着主体流温度的降低、转速的提高而减小。



r/mm:1—10;2—34.5;3—50;4—70

图 7　U_g = 1 L/min,40℃,400 r/min,H_2O 为介质,水冷时反应器温度分布

表 2　热管生物反应器温度场中最大温差

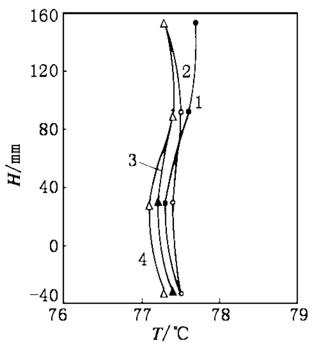
T/℃	30			40			50		
n/r·min⁻¹	50	200	400	50	200	400	50	200	400
ΔT_{max}/℃									
U_g = 0	0.3	0.4	0.4	0.9	0.4	0.3	0.9	0.4	0.4
U_g = 1 L/min	0.3	0.3	0.3	0.6	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4
T/℃	60			70			80		
n/r·min⁻¹	50	200	400	50	200	400	50	200	400
ΔT_{max}/℃									
U_g = 0	1.0	0.5	0.4	1.0	0.4	0.3	1.0	0.5	0.4
U_g = 1 L/min	0.6	0.6	0.3	0.6	0.6	0.4	0.7	0.7	0.3

注:介质为水,水冷却。

2.2　CMC 为介质时的温度场

2.2.1　自然冷却

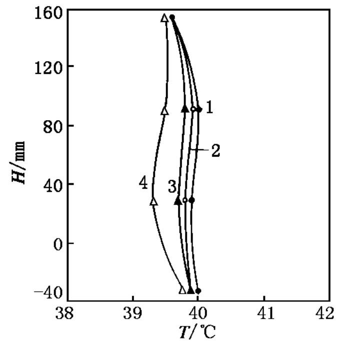
热管生物反应器在非通气状态、一般发酵条件下,所测轴径向点最大温差为 0.3～0.4℃;在其他操作条件,所测轴径向点最大温差为 0.4～2.0℃,温差最大时的操作条件为 80℃、50 r/min。有代表性轴径向温度分布如图 8。



r/mm:1—10;2—34.5;3—50;4—70

图 8　U_g = 0,80℃,400 r/min,CMC 为介质,自然冷却时反应器温度分布

在通气状态、一般发酵条件下,所测轴径向点最大温差为 0.4℃,有代表性轴径向温度分布如图 9;在其他操作条件下,所测轴径向点最大温差为 1.2℃,通气时温差有所减小。



r/mm:1—10;2—34.5;3—50;4—70

图 9　U_g = 1 L/min,40℃,400 r/min,CMC 为介质,自然冷却时反应器温度分布

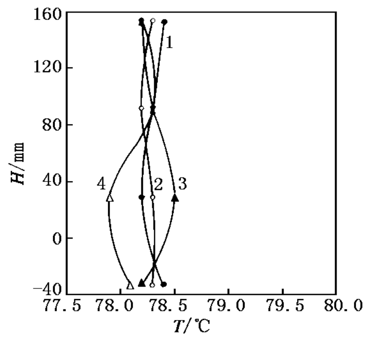
表 3 为反应器以 CMC 为介质、冷却方式为自然冷却时,各操作条件下所测轴径向点的最大温差。最大温差为 0.2～1.2℃,与以水为介质相比,各操作条件下的最大温差有所增加,这是由于 CMC 的传热性能较差。

表 3　热管生物反应器温度场中最大温差

T/℃	30			40			50		
n/r·min⁻¹	50	200	400	50	200	400	50	200	400
ΔT_{max}/℃									
U_g = 0	0.3	0.3	0.3	0.5	0.4	0.4	0.4	0.5	0.3
U_g = 1 L/min	0.2	0.3	0.3	0.5	0.4	0.4	0.5	0.4	0.5
T/℃	60			70			80		
n/r·min⁻¹	50	200	400	50	200	400	50	200	400
ΔT_{max}/℃									
U_g = 0 时	0.6	0.5	0.6	1.2	0.7	0.5	1.2	1.0	0.6
U_g = 1 L/min	0.6	0.5	0.6	1.0	0.8	0.5	1.1	1.0	0.6

注:介质为 CMC,自然冷却。

2.2.2　水冷却

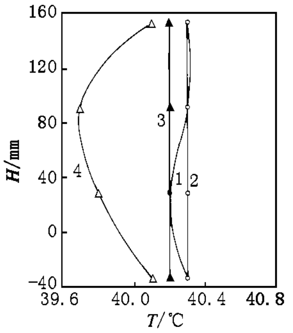


r/mm:1—10;2—34.5;3—50;4—70

图 10　U_g = 0,80℃,400 r/min,CMC 为介质,水冷时反应器温度分布

热管生物反应器在非通气状态、一般发酵条件下,所测轴径向点最大温差为0.5~0.7℃;在其他操作条件,所测轴径向点最大温差为0.6~1.6℃,温差最大时的操作条件为80℃、50 r/min,有代表性轴径向温度分布如图10。

在通气状态、一般发酵条件下,所测轴径向点最大温差为0.3~0.8℃,这里仅选取图11代表此状态下主体流轴径向温度分布图;在其他操作条件时,所测轴径向点最大温差为1.5℃,温差有所减小。



r/mm:1—10;2—34.5;3—50;4—70

图11　U_g = 1 L/min,40℃,200 r/min,CMC为介质,水冷时反应器温度分布

表4为反应器以CMC为介质,冷却方式为水冷却时,各操作条件下所测轴径向点的最大温差。与自然冷却相比,由于通热量的增加导致了最大温差的增大[9-10]。

表4　热管生物反应器温度场中最大温差

T/℃	30			40			50		
n/r·min^{-1}	50	200	400	50	200	400	50	200	400
ΔT_{max}/℃									
U_g = 0	0.5	0.6	0.5	1.0	0.7	0.6	1.2	0.8	0.5
U_g = 1 L/min	0.4	0.3	0.3	0.8	0.7	0.5	1.0	0.7	0.6
T/℃	60			70			80		
n/r·min^{-1}	50	200	400	50	200	400	50	200	400
ΔT_{max}/℃									
U_g = 0	1.4	1.0	0.6	1.3	0.9	0.6	1.6	1.0	0.6
U_g = 1 L/min	1.0	0.6	0.6	1.2	0.7	0.6	1.5	0.8	0.7

注:介质为CMC,水冷却。

3　结论

(1)热管生物反应器以H_2O为介质时,在自然冷却与水冷却方式下,一般发酵操作条件时,单相流、两相流流体的温度场均匀,最大温差为0.3~0.5℃;在所选定的其他操作条件下,温度差有所增加,最大温差为0.2~1.0℃,热管的等温性能良好。

(2)热管生物反应器以CMC为介质时,在自然冷却与水冷却方式下,一般发酵操作条件时,单相流、两相流流体的温度场均匀,最大温差为0.3~0.7℃;在所选定的其他操作条件下,温度差有所增加,最大温差为0.2~1.6℃,热管的等温性能较好。

(3)热管生物反应器具体操作参数(模拟介质、搅拌速度、主体流温度、通气量、冷却方式等)影响流体的温度场。以H_2O为介质的温差比以CMC为介质的小,温差随着主体温度的升高而增加,湍流状态时的温差比层流状态时的小,通气时的温差比不通气时的小,自然冷却时的温差比水冷却时的小。热管生物反应器在此冷模实验中表现出良好等温性。

参考文献

[1] 黄问盈.热管与热管换热器设计基础[M].北京:中国铁道出版社,1995.1-4.

[2] 王煜,张赣道.[J].医药工程设计,2000,1(5):231.

[3] 欧阳平凯,朱华杰,裘元焘.[J].南京化工学院学报,1989,11(4):15-16.

[4] Ouyang P K,Moo Yang.[J].Chem Eng Res Des,1989,67(4):451-459.

[5] 戚以政,汪叔雄.生化反应动力学与反应器[M].北京:化学工业出版社,1999.300-320.

[6] Khare A S,Moo Young.[J].Chem Eng Comm,1986,40(1):67-72.

[7] 陈华癸.微生物学[M].北京:农业出版社,1982.80-84.

[8] 渠川谨.反应釜[M].北京:高等教育出版社,1992.5-7.

[9] 曹玉璋.传热学[M].北京:北京航空航天大学出版社,2001.45-60.

[10] 王凯,俞生尧.[J].化工学报,1988,39(4):469-473.

[11] 俞俊棠,等.生物工艺学[M].上海:华东化工学院出版社,1994.78-96.