

磁控减肥胶囊反应机理及结构研究

栾佳欣¹, 李 筠¹, 杨海马¹, 廖 专², 张大伟¹,
胡 兴¹, 刘 莹¹, 潘 骏²

(1. 上海理工大学 光电信息与计算机工程学院 上海 200093; 2. 海军军医大学附属长海医院 上海 200433)

摘要: 针对肥胖且不宜剧烈运动人群的减肥需求, 提出了一种可以在胃内完成充放气过程的磁控减肥胶囊模型。胶囊内通过酸碱盐反应使气囊充气, 充气后的气囊在胃中通过占据胃内容积以达到减重的目的。该化学反应的发生由内部小磁铁控制, 并且小磁铁的驱动可由外部磁体控制; 在治疗结束后通过外部磁铁使气囊放气, 胶囊可从消化道自然排出。结合化学实验确定了采用一水合柠檬酸饱和溶液与碳酸氢钠粉末反应的方案, 并将溶液体积控制在 2 mL 内; 通过 COMSOL Multiphysics 软件对磁铁模型进行有限元仿真分析, 估算了胶囊外部磁铁的体积。研究结果揭示了磁控减肥胶囊的反应机理, 也证明了该胶囊结构模型的可行性。

关键词: 胶囊; 磁控制; 酸碱盐反应; 仿真

中图分类号: TP 391.9; O 6-31 **文献标志码:** A

Reaction mechanism and structure of magnetic control slimming capsule

LUAN Jiaxin¹, LI Jun¹, YANG Haima¹, LIAO Zhuan², ZHANG Dawei¹, HU Xing¹, LIU Ying¹, PAN Jun²

(1. School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. Changhai Hospital Affiliated to the Naval Military Medical University, Shanghai 200433, China)

Abstract: For obese people who were not suitable for strenuous exercise, a magnetic control slimming capsule model that could complete the process of inflating and deflating in the stomach was proposed. The capsule was inflated by the acid-base salt reaction, and the inflated balloon occupied the internal gastric volume in the stomach to achieve the purpose of weight loss. The occurrence of the chemical reaction was controlled by small magnets inside, and the driving of small magnets could be controlled by an external magnet. After the treatment was over, the balloon was deflated by the external magnet and the capsule could be discharged naturally from the digestive tract. Combined with chemical experiments, the reaction scheme was determined as a saturated solution of citric acid monohydrate reacting with sodium bicarbonate powder, and the volume of the solution was controlled at 2 mL. The finite element simulation analysis of the magnet model was carried out by COMSOL Multiphysics

收稿日期: 2020-09-20

基金项目: 国家自然科学基金天文联合基金资助项目 (U1831133); 上海理工大学医工交叉项目 (2019GD10)

第一作者: 栾佳欣 (1997-), 女, 硕士研究生. 研究方向: 三维重构与医工交叉领域的研究. E-mail: 193730619@st.usst.edu.cn

通信作者: 李 筠 (1974-), 女, 副教授. 研究方向: 信号分析与处理、误差分析以及光电测量等. E-mail: lijuny@usst.edu.cn

software, and the volume of the magnet outside the capsule was estimated. The results revealed the reaction mechanism of the proposed capsule structure model and proved its feasibility.

Keywords: capsule; magnetic control; acid-base salt reaction; simulation

肥胖是一种复杂的代谢疾病，是许多疾病的危险因素。目前美国食品药品监督管理局(FDA)将减重方式分为6类^[1]：非手术治疗、胃束带术、迷走神经阻滞治疗、胃排空治疗、肥胖手术和胃内球囊扩张术。有关各种方式的优缺点，在后续的实践中逐渐显现。如锻炼、节食等方式受多种因素制约难以长期坚持或合理控制范围，甚至导致运动损伤、神经性厌食症等；减肥药物种类繁多，对于宣传疗效的安全性真实性难以分辨；一些减肥手术术后恢复期可能较长，存在术后并发症以及对人体的不可逆影响^[2]。因此，通过胃内球囊(IGB)控制体重是一种具有潜力的减肥方式。IGB的减重原理目前主要有3个方面^[3]：a. 通过占据一部分胃容积以减少食物摄入，同时增加进食后的饱腹感；b. 使胃体扩张引起迷走神经兴奋，神经冲动传导至大脑产生饱腹感；c. 减慢胃内食物排空速率，降低患者进食欲望。

目前已经商业化的胃内球囊中，多数产品的置入方式和排出方式是通过内窥镜的手段，填充物主要为盐水，少量产品使用空气填充球囊^[4]。经过FDA批准的一款球囊Orbera，通过内窥镜的方式置入和移除，使用400~700 mL生理盐水填充，推荐使用6个月。另一款经FDA批准的球囊Obalon通过口服置入、内窥镜的方式移除，由一根导管连接，确定在胃中的位置后，通过导管充气250 mL，随后移除导管，推荐使用3~6个月。与之类似的是Eclipse球囊^[5]，胶囊连接着导管被吞下，从导管输送进450~550 mL填充液之后撤去导管。不同的是4个月后球囊内可降解材料降解完毕，打开释放阀使球囊排气，随后球囊可以从消化道自然排出。由此可见，常规的胃内球囊，因其填充物选用生理盐水或空气的缘故，使开发者不能舍弃导管连接球囊的设计，这就为患者的使用不可避免地造成了一些不便。因此，一些新型的胃内球囊转而考虑在胃中实现充放气，从而达到吞咽置入、自然外排的目的。

通过酸碱盐反应产生二氧化碳是胶囊在体内实现充放气的主要方式。Gorlewicz等^[6]研究的胶

囊内窥镜通过使用碳酸氢钾和柠檬酸溶液使肠道充气，以便拍摄肠道图像。反应的通道由两个球形磁铁来控制，在外部磁铁作用下可以打开通道引发反应，产生二氧化碳。但由于该胶囊的用途与减重无关，气体产生之后直接排入肠道中，结构中没有关于气体存储的考虑。Kencana等^[7]开发的用于治疗肥胖的胶囊采用电机控制醋酸与碳酸氢钠的反应，但胶囊模型的尺寸还需要进一步简化和缩小。在2007年有关Ullorex球囊的研究已证实使用柠檬酸与碳酸氢盐反应生成的二氧化碳作为填充气体的安全性^[8]。碳酸氢钠颗粒被可降解材料包裹于球囊中，整个球囊被包装成1.25 cm×4.30 cm的明胶胶囊；向其中注入柠檬酸溶液，吞服后胶囊外壳溶解并且气囊充气；球囊的塞子在胃酸环境下25~30 d可降解，降解使气囊放气，放气结束后气囊可以从消化道自然排出。测试结果显示，参与者体重减少较少，可能与球囊留置时间短有关。

目前含有磁控结构的胶囊主要应用于各类胶囊内窥镜，在疾病诊断领域具有突出的无创、安全简便、无需麻醉等优点^[9]。通过外部磁场控制胶囊，不仅方便驱动和控制胶囊在消化道中的运动位姿，同时也是许多研究者对胶囊定位的常用手段^[10-11]。根据不同体外磁引导系统的需要，应用于胃肠道检查的胶囊内窥镜中的磁结构主要有磁铁外壳、磁扭矩结构以及内置永磁铁等方式^[12]。除胃肠道检查外，内窥镜胶囊也被广泛研究以实现各种功能，例如活检、药物输送、肥胖治疗、出血检测等^[13]。Simi等^[14]设计的用于从胃肠道组织上提取活检物的微型胶囊，其驱动与活检钳夹取的过程均通过外部磁场对内部磁扭转弹簧产生作用来完成。Hoang等^[13]设计的用于胃肠道病灶定位的染色胶囊，利用外部磁铁控制内部电磁系统，引导胶囊姿态并控制染色针的工作状态。

本文介绍了一种由外部磁场控制胶囊运动及其气囊缩放的胶囊结构模型，旨在提供一种操作简便、对人体无创的物理减肥方式。采用磁驱动的方案相比胶囊内部包含有源器件的方案更加安全，通过磁力控制胶囊内阀门开闭、试剂反应，

从而控制胶囊在胃中完成充放气, 增加饱腹感并达到安全外排的目的。与 Do 等^[15]设计的结构相比, 所提出的胶囊在密封性方面更良好, 通过在气孔内侧覆盖透气防水膜保证胶囊内部溶液不会渗入胃中。对于提出的胶囊控制方式, 研究了其磁场控制原理, 并进行了相应的电磁场仿真分析; 通过化学实验分析了反应物用量比和生成的气体量, 并验证了该胶囊模型的密封性。

1 磁控减肥胶囊结构设计

1.1 磁控减肥胶囊的结构

本文设计的磁控减肥胶囊在使用过程中主要分为口服、充气、放气、排遗等 4 个阶段。使用者口服后, 在医生指导下控制体外磁铁对胃中胶囊进行充气操作, 气囊膨胀状态的持续时间需经过医生确认。治疗结束时, 在医生指导下通过体外磁铁对胃内胶囊进行放气操作, 确认气囊排气完成后, 胶囊恢复初始体积, 可以从消化道排出体外。

磁控胶囊的完整结构如图 1 所示, 绿色的胶囊外壳包含有 3 个空间, 由一根深灰色长轴连接, 并能够分隔酸和碱。在长轴两端分别有一个内嵌有棕色磁铁的阀门结构, 通过磁阀带动长轴的运动来控制酸碱盐反应过程。紫色部分为待释放的气囊。阀门上内嵌的磁铁轴向磁化, 相对的两端极性相反。胶囊两端均有排气孔, 其内部由透气防水膜覆盖, 以保证内部溶液不渗出。

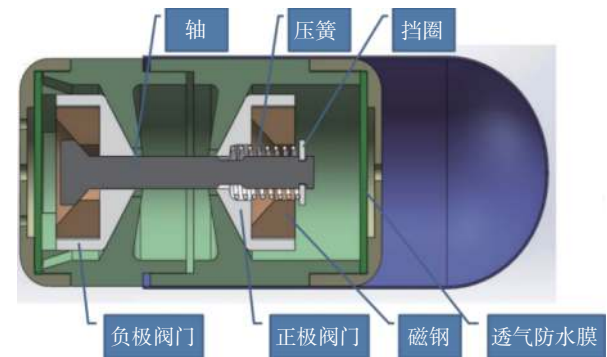


图 1 磁控胶囊结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of magnetic control capsule structure

- 关于磁控胶囊的详细工作过程如下:
- a. 常态下, 正负极阀门相互吸引, 酸室与盐室不连通, 如图 1 所示。
 - b. 充气过程中, 在外部磁场作用下, 正极阀

门压缩弹簧并沿长轴向外侧移动至挡圈位置, 此时正极阀门打开。通过凹形轴的部分与中间的酸液仓形成具有小孔的空隙, 使仓室之间连通发生酸碱盐反应, 产生的气体经右侧气孔进入到气囊中使其充气膨胀, 如图 2 所示。

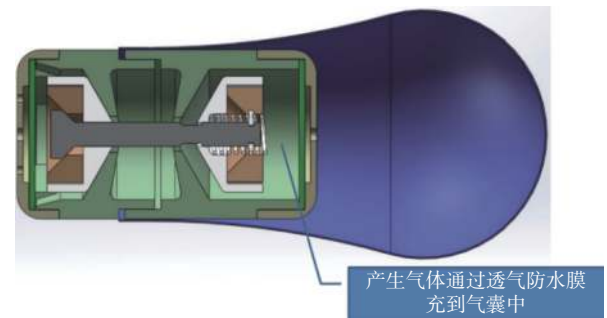


图 2 胶囊充气过程

Fig.2 Capsule inflation process

- c. 撤去外界磁力, 正极阀门关闭, 气囊维持膨胀状态。
- d. 排气过程中, 在外部磁场作用下, 负极通磁阀门打开, 左端轴带动负极阀门一起向外移动, 弹簧被压缩, 右侧阀门关闭。气囊内的气体依次经过右侧气孔、压簧空隙、凹形轴面小孔、酸液仓、左阀门空隙、左侧气孔后排出胶囊。

1.2 磁控减肥胶囊的模型尺寸

有关胶囊内部部分结构尺寸如表 1 所示。

表 1 胶囊部分结构尺寸

Tab.1 Part of the capsule structure size

胶囊结构	尺寸/mm
胶囊壳直径	14
胶囊壳长度	25
内部磁铁外径	8
内部磁铁大/小内径	6/3
内部磁铁厚度	3
内部磁铁间距	16

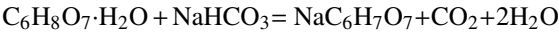
除上述胶囊初始状态的尺寸数据外, 由于胃正常的消化功能, 膨胀状态的胶囊可能会被推向肠道, 因此需要考虑气囊膨胀的体积。在正常情况下, 人体胃部末端的幽门括约肌处于收缩状态, 直径约为 15 mm。当有食物通过幽门时, 括约肌可以舒张帮助食物通过, 可以达到 (16 ± 8) mm 的直径^[16], 因此胶囊膨胀体积不应小于幽门直径。同时, 胃部宽度一般为 250 mm, 胃内容积约为 0.1~4.0 L^[17], 进食后可达到 1 500~2 000 mL。

出于为胶囊使用者的安全性和舒适度考虑,为了保证正常的营养摄入,同时胶囊体积膨胀以后也应给胃部留有一定的运动空间,以免对胃部造成损伤,胶囊体积将被控制在 300 mL 左右。假设气囊膨胀状态为球体,当气囊体积为 300 mL 时,根据球体体积公式得到球体直径约为 83.1 mm,可以看到该尺寸能够满足气囊停留在胃中的条件,即空腹时产生一定饱腹感的同时不占据过多体积阻碍营养摄入。

2 原理

2.1 化学反应原理

磁控减肥胶囊使用充气气囊占据胃部一定的体积来治疗肥胖,已经被证明是一种有效的方法^[18]。虽然气囊内的气体不会直接接触人体,但考虑到使用安全,用于制备该种气体的反应物也需具备生物相容性。为了让使用者感受到一定的饱腹感,反应物发生反应后必须产生足够气体量,使充气气球达到理想体积。本文选用了二氧化碳(CO₂)作为充气气囊内的安全气体,并通过酸碱盐反应获得。实验中使用的酸碱盐组合为一水合柠檬酸溶液与碳酸氢钠粉末,其化学反应方程式为



在上述反应中水既作为生成物,也作为溶剂以解离离子,为反应发生提供介质。然而添加过量的水不仅不会增加产气量,反而会占用囊体的有限空间。在化学反应进行的过程中,一定量反应物产生的气体量会受到诸多因素的影响。本文通过不同溶液浓度进行实验,以确定在胶囊内部初始体积较小的情况下能够产生最多二氧化碳气体量的反应物方案。

2.2 磁控原理与仿真分析

有关胶囊工作的磁力分为两个部分,分别为内部磁阀之间的吸引力和外部磁场对其中一个磁阀的吸引力。根据 Aziz 等^[19]的研究,通过使用氯化钠与氯化钾的混合溶液、水、空气 3 种介质进行磁场衰减测试,其中前两种液体用于模拟人体组织的电学特性,得到的 3 组实验结果非常接近。研究表明,静磁场在模拟的人体环境传播过程中没有衰减,因此在仿真场景中没有考虑人体组织对磁场强度的影响。

由于静磁场中不存在电流,因此对于磁场周

围的磁场分布可以通过应用 $\nabla\cdot\boldsymbol{B}=0$ 来解决,其中 $\boldsymbol{B}$ 为磁通密度。对于胶囊内部的两个磁阀来说,它们之间的作用距离是固定的,其间的磁通密度 $\boldsymbol{B}$ 可以表示为

$$\boldsymbol{B}=\mu_r\mu_0\boldsymbol{H}+\boldsymbol{B}_r\tag{1}$$

式中: μ_0 为真空磁导率; μ_r 为钕的相对磁导率; $\boldsymbol{B}_r$ 为 N52 永磁体的剩磁; $\boldsymbol{H}$ 为磁场强度。

磁铁表面受到的磁力 $\boldsymbol{F}$ 可以通过麦克斯韦应力张量^[20] 计算,即

$$\boldsymbol{F}=\boldsymbol{B}\boldsymbol{H}-P_m\boldsymbol{I}\tag{2}$$

式中: $\boldsymbol{I}=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$; $P_m=(\boldsymbol{B}\cdot\boldsymbol{H})/2$ 是磁铁所受磁压力。

考虑将 $\boldsymbol{B}$ 分解为磁力线方向和与其垂直的方向,则 $\boldsymbol{B}=(B,0,0)$ 。磁铁受力 $\boldsymbol{F}$ 通过麦克斯韦应力张量表示为

$$\boldsymbol{F}=\frac{1}{\mu_r\mu_0}\left[\boldsymbol{B}\boldsymbol{B}-\boldsymbol{B}\boldsymbol{B}_r-\frac{1}{2}\left(B^2-\boldsymbol{B}\cdot\boldsymbol{B}_r\right)\boldsymbol{I}\right]\tag{3}$$

为了研究可能使用的外部磁铁对胶囊内磁阀的影响,本文使用 COMSOL Multiphysics 5.5 软件进行有限元仿真模拟。仿真中使用的磁铁参数参考了磁性最强的钕铁硼永磁体(NdFeB / N52),该类磁铁剩磁 $\boldsymbol{B}_r$ 范围为 1.42~1.47 T,仿真中剩磁选用了上限即 1.47 T,相对磁导率 μ_r 被设置为 1.05,所有磁铁均沿 x 轴向磁化,各向同性。

首先对无外部磁场存在下的胶囊内部磁铁情况进行模拟,如图 3 所示。使用了两个半径为 4 mm、厚度为 3 mm 的圆柱体磁铁分别对两个不规则形状磁阀进行替代,距离为 16 mm,得到其间相互作用力约为 0.071 N。

由于打开磁阀的磁场作用力应明显大于磁阀

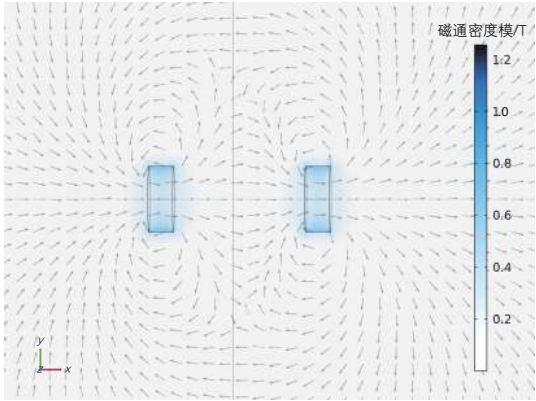


图 3 两磁阀间磁通密度

Fig. 3 Flux density between two magnetic valves

间相互作用力, 因此选择能够产生 10 倍相互作用力的外部磁体进行模拟, 以此作为选取外部磁体的参考。将半径为 200 mm 的球体体积作为外部圆柱体磁铁的固定体积, 即 0.033 51 m³。设圆柱体半径为 r , 高度为 h , 内外磁铁间距为 d , 当 $r=150$ mm, $d=100$ mm 时, 磁铁周围磁通密度示意图如图 4 所示。

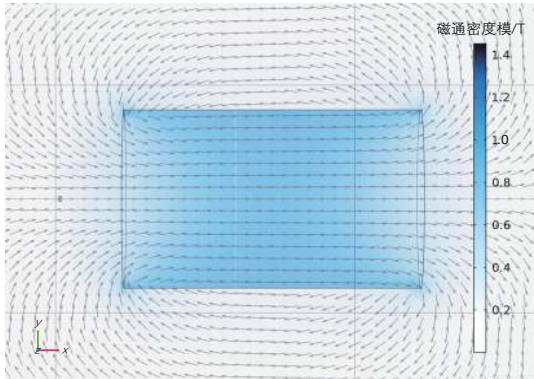
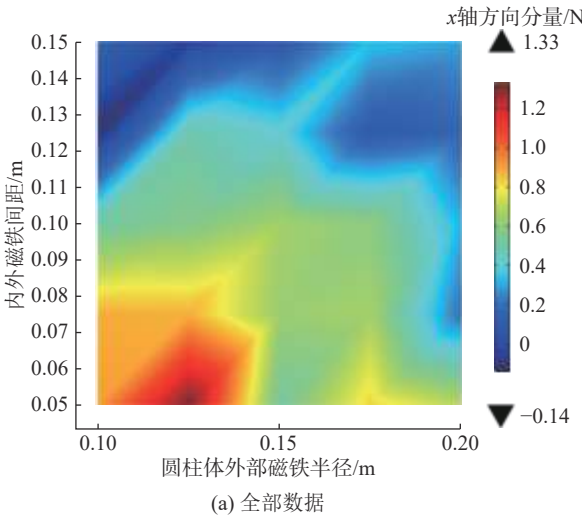


图 4 外部磁体与磁阀作用时的磁通密度示意图
Fig.4 Schematic diagram of magnetic flux density when external magnet interacts with magnetic valve



对外部磁铁使用不同横纵比的情况进行仿真, 分别对 $r=100, 125, 150, 175, 200$ mm 和 $d=50, 75, 100, 125, 150$ mm 的情况进行参数化扫描得到电磁力 F 大小如表 2 所示。将所得的电磁力数据绘制成二维图表如图 5(a) 所示, 并将其中 F 在 0.6~0.8 N 之间的区域划分出来如图 5(b) 所示。

表 2 外部磁体对工作磁阀产生的吸引力
Tab.2 Attraction of the external magnet to the working magnetic valve

圆柱体参数		电磁力 F /N				
r /mm	h /mm	d /mm				
		50	75	100	125	150
100	1067	0.905	0.878	0.508	-0.142	0.166
125	683	1.326	0.874	0.568	0.491	-0.055
150	474	0.525	0.628	0.654	0.409	0.091
175	348	0.822	0.656	0.600	0.096	0.341
200	267	0.691	0.202	0.314	0.153	0.297

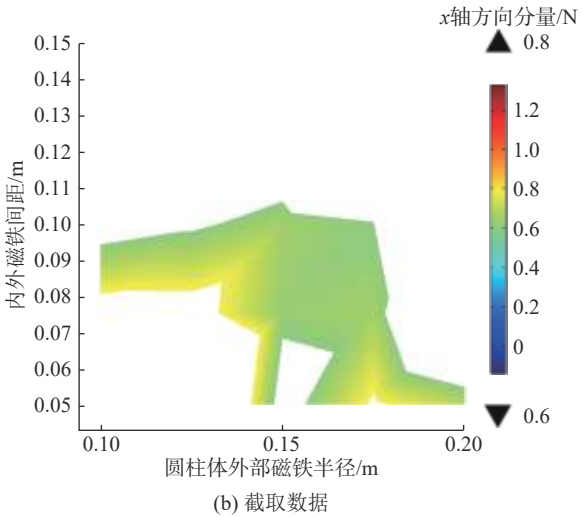


图 5 由磁力绘制的二维图表
Fig.5 Two-dimensional diagram based on magnetic force

根据图 5(b)可以得到电磁力在 0.6 ~ 0.8 N 之间的圆柱形外部磁铁半径大致集中在 0.13 ~ 0.18 m 之间。因此, 上述所得范围可供实际工作中选择外部磁铁尺寸进行参考, 并假设外部磁铁与胶囊磁铁工作距离在 100 mm 以内。

3 实验与结果分析

根据上文所描述的设计方案及原理, 使用

COMSOL 软件对磁阀受力进行分析, 设计化学反应方案, 最终通过 3D 打印技术制作出了磁控胶囊的模型; 并通过酸碱盐反应实验, 检验胶囊模型的性能。具体流程如图 6 所示。

3.1 酸碱盐反应实验

首先进行酸碱盐制气反应, 确定化学药品大致用量及气体大致生成量。实验选用了 1.5 g 碳酸氢钠和 1.5 g 柠檬酸作为反应物, 与 20 mL 水进行混合反应。由于二氧化碳在水中溶解度很小, 实



图6 磁控胶囊模型设计模拟过程

Fig. 6 Simulation process of magnetic control capsule model design

验使用排水法对产生的二氧化碳气体进行收集。观察到反应在 10 min 之内基本完成，原锥形瓶中存在有 320 mL 水，反应结束后剩余 90 mL 水，即得到 230 mL 二氧化碳气体。

经过酸碱盐制气实验以后，根据胶囊容积及膨胀体积需要的气体量，设计实验探究所需药品用量及其与气体生成量和气体生成速率的关系。一般商用胶囊体积不超过 3 mL，因此，本实验选用 2 mL 作为实验反应物与水的总体积，并控制其不变。由于常温下无水柠檬酸粉末的溶解度为 145 g，即其饱和溶液质量分数约为 59.2%，因此，本实验中使用的一水合柠檬酸溶液的最大质量分数为 61.3%，并且选择质量分数为 50%，42.9% 的柠檬酸溶液作为对比参考，保持了反应物的用量比。实验中化学药品的用量如表 3 所示。

表 3 化学药品用量表
Tab.3 Chemical dosage table

实验序号	碳酸氢钠/g	一水合柠檬酸/g	水/mL	酸溶液质量分数/%
1	0.6	1.5	2.0	42.9
2	0.8	2.0	2.0	50.0
3	1.2	3.0	2.0	61.3
4	1.2	3.0	2.0	61.3

实验开始时，将搅拌均匀的柠檬酸溶液倒入装有碱粉的试管中并立即塞紧橡胶塞，以一定的频率摇晃该试管模拟真人的呼吸状态，同时使酸碱充分混合，产生的气体通过橡胶管进入窄口瓶中，推动窄口瓶中的水通过长导管进入量杯。在 600 s 内，每 30 s 对量筒读取一次读数。根据液体

体积随时间的变化情况，绘制液体收集速率图，即气体产出速率图。

3.2 实验结果分析

按照表 3 的药品用量进行实验，在 600 s 的时间段内，每组实验需记录共计 20 次读数，得到二氧化碳气体体积 V 在该 600 s 内的变化曲线如图 7 所示，其中 4 条曲线按照序号分别对应 4 个实验。

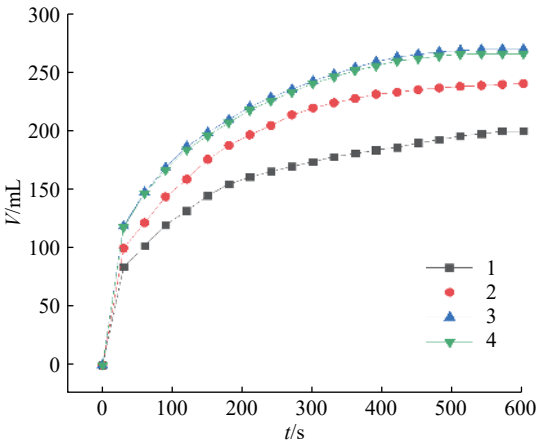


图7 二氧化碳生成量随时间变化曲线

Fig.7 Curve of CO₂ production over time

由表 3 与图 7 得到的数据可以看出，反应物总体积不变时，酸溶液的质量分数不同对产生的气体量和反应速率均有影响。实验生成气体的速率随反应时间的增加而减小，在 500 s 以后反应生成气体的量变化趋势较为平缓。在溶解度内酸的质量分数越高，反应速率越快。实验表明一水合柠檬酸饱和溶液与足量碳酸氢钠粉末能够得到最多的二氧化碳气体，其反应速率最快，是实验中反应的最佳配比。因此，本文最终选择了质量分数为 61.3% 的柠檬酸溶液与足量碳酸氢钠粉末在磁控胶囊中混合产生二氧化碳气体的方案。

实验中使用药品量相同的实验组，得到的 CO₂ 气体量并不完全相等。分析可能导致这种情况的原因是，实验中反应物的质量是通过化学反应方程式计算出的理论数值，在称量过程或转移过程中可能存在少量误差，导致实际参与反应的两组反应物质量不完全相等。

按照图 6 所示的操作流程对胶囊模型性能进行评估，使用乳胶气球包裹内含小磁铁的树脂胶囊模型，填充化学药品进行胶囊充放气实验。结果显示，胶囊模型可以实现充放气过程，且充放气效果均明显。整个过程中没有发生漏液渗液的现象，显示胶囊模型密闭性良好。

4 结 论

减肥胶囊作为一种新型的物理减肥方式,可以有效地方便肥胖人群在时间、饮食、运动等多方面进行体重控制。本文针对提出的磁控充放气减肥胶囊,探讨了胶囊充放气过程的化学反应原理与方案,详细描述了胶囊的结构设计;结合3D打印技术,制作实验模型,并通过磁力仿真与化学反应实验验证了方案的可行性,对减肥胶囊的设计具有一定的参考意义。关于后续的工作可以考虑以下几个方面:a.对胶囊内磁阀结构进行优化。由于磁铁材质本身性脆易碎,为保证磁阀多次开合后不损坏,还需要进行实验验证。b.有关胶囊所附气囊材料的实验。目前胶囊模型在使用乳胶气球的情况下效果良好,但乳胶材料不耐腐蚀,在胃酸环境中还需要使用更加耐腐蚀且安全的材料。由于大部分被用作胃内球囊且具有一定的生物相容性的材料如聚氨酯、硅胶等虽具备一定的弹性,但不具备类似气球材料的超弹性,因此安全可靠的气囊材料还需进一步研究。c.对胶囊进行体内实验。考虑到胃的不规则形状以及胃内复杂的物理环境,胶囊的充放气过程还需体内实验进一步验证。

参考文献:

- [1] SHAHNAZARIAN V, RAMAI D, SARKAR A. Endoscopic bariatric therapies for treating obesity: a learning curve for gastroenterologists[J]. *Translational Gastroenterology and Hepatology*, 2019, 4: 16.
- [2] NGUYEN N T, VU S, KIM E, et al. Trends in utilization of bariatric surgery, 2009–2012[J]. *Surgical Endoscopy*, 2016, 30(7): 2723–2727.
- [3] 吴良平,戴晓江,赵为国,等.胃内水球的理性认识与合理选择[J].*南方医科大学学报*, 2020, 40(10): 1525–1529.
- [4] CHOI S J, CHOI H S. Various intragastric balloons under clinical investigation[J]. *Clinical Endoscopy*, 2018, 51(5): 407–415.
- [5] MACHYTKA E, CHUTTANI R, BOJKOVA M, et al. Elipse™, a procedureless gastric balloon for weight loss: a proof-of-concept pilot study[J]. *Obesity Surgery*, 2016, 26(3): 512–516.
- [6] GORLEWICZ J L, BATTAGLIA S, SMITH B F, et al. Wireless insufflation of the gastrointestinal tract[J]. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2013, 60(5): 1225–1233.

- [7] KENCANA A P, RASOULI M, HUYNH V A, et al. An ingestible wireless capsule for treatment of obesity [C]// *Proceedings of 2010 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology*. Buenos Aires, Argentina: IEEE, 2010: 963–966.
- [8] MARTIN C K, BELLANGER D E, RAU K K, et al. Safety of the Ullorex® oral intragastric balloon for the treatment of obesity[J]. *Journal of Diabetes Science and Technology*, 2007, 1(4): 574–581.
- [9] 邹文斌,廖专,李兆申.磁控胶囊胃镜研发及临床应用进展[J].*中国实用内科杂志*, 2018, 38(4): 265–270.
- [10] 刘畅,刘修泉,黄平.胶囊内窥镜弱磁场测量系统设计与实验研究[J].*现代制造工程*, 2016(7): 95–100.
- [11] 何文辉,颜国正,郭旭东.基于磁阻传感器的消化道诊查胶囊的位置检测[J].*仪器仪表学报*, 2006, 27(10): 1187–1190.
- [12] SHAMSUDHIN N, ZVEREV V I, KELLER H, et al. Magnetically guided capsule endoscopy[J]. *Medical Physics*, 2017, 44(8): e91–e111.
- [13] HOANG M C, LE V H, KIM J, et al. A wireless tattooing capsule endoscope using external electromagnetic actuation and chemical reaction pressure[J]. *PLoS One*, 2019, 14(7): e0219740.
- [14] SIMI M, GERBONI G, MENCIASSI A, et al. Magnetic torsion spring mechanism for a wireless biopsy capsule[J]. *Journal of Medical Devices*, 2013, 7(4): 041009.
- [15] DO T N, SEAH T E T, YU H K, et al. Development and testing of a magnetically actuated capsule endoscopy for obesity treatment[J]. *PLoS One*, 2016, 11(1): e0148035.
- [16] LIU L J, TOWFIGHIAN S, HILA A. A review of locomotion systems for capsule endoscopy[J]. *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*, 2015, 8: 138–151.
- [17] VALDASTRI P, SIMI M, WEBSTER III R J. Advanced technologies for gastrointestinal endoscopy[J]. *Annual Review of Biomedical Engineering*, 2012, 14: 397–429.
- [18] GIARDIELLO C, BORRELLI A, SILVESTRI E, et al. Air-filled vs water-filled intragastric balloon: a prospective randomized study[J]. *Obesity Surgery*, 2012, 22(12): 1916–1919.
- [19] AZIZ S M, GRCIC M, VAITHIANATHAN T. A real-time tracking system for an endoscopic capsule using multiple magnetic sensors [M]// MUKHOPADHYAY S C, GUPTA G S. *Smart Sensors and Sensing Technology*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008: 201–218.
- [20] 韩至成. *电磁冶金学* [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2001.