

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2019.03.018

# 模具用弓形架结构拓扑优化及疲劳分析

Topological optimization and fatigue analysis of  
arch frame structure used for mould

邱海飞<sup>1</sup> 韩斌斌<sup>2</sup>

QIU Hai-fei<sup>1</sup> HAN Bin-bin<sup>2</sup>

(1. 西京学院机械工程学院, 陕西 西安 710123; 2. 北京星航机电装备有限公司, 北京 100074)

(1. College of Mechanical Engineering of Xijing University, Xi'an, Shaanxi 710123, China;

2. Beijing Xinghang Electro-mechanical Equipment Co., Ltd., Beijing 100074, China)

**摘要:** 为了克服现有非标模具夹紧机构的缺陷和不足, 采用变密度法对其承载基体弓形架进行结构拓扑优化。通过分析比较 3 种制造约束方案的拓扑优化结果, 发现采用“对称和拔模约束”时, 弓形架拓扑结构具有较好的形貌特征和可制造性, 而且其质量较之前减轻了约 55.5%, 在提高材料利用率的同时, 实现了夹紧机构的轻量化。有限元静力学分析结果表明, 经拓扑优化的弓形架符合结构强度和刚度设计要求。通过疲劳和损伤分析可知, 该夹紧机构具有 2 年以上的安全使用寿命, 而且在实际使用过程中损伤较小, 有利于延长使用寿命、节省成本。

**关键词:** 夹紧力; 弓形架; 有限元; 拓扑优化; 疲劳寿命; 损伤

**Abstract:** In order to overcome faultiness and shortcomings of the existing clamping mechanism on non-standard mould, as a basis of load bearing on the mechanism, the arch frame structure was topological optimization designed with variable density method. Through analyzing and comparing the results of topology optimization from three manufacturing constraints, the adopted time of the “symmetrical and draft constraints” was finally found, and the arch frame had better morphological characteristics and manufacturability. moreover, its quality was reduced by about 55.5% compared with the original structure. the lightweight design of the mechanism was realized while improving material utilization ratio. The results of finite element static analysis showed that the arch frame optimized by topology was accorded with requirements of structural strength and stiffness design. In conclusion, the clamping mechanism could service two more years, and the dam-

age of it was also less in the actual use process.

**Keywords:** clamping force; arch frame; finite element; topological optimization; fatigue life; damage

现代食品加工会用到各种模具。对于批量食品加工, 可通过固定模具进行高效生产, 如挤出模、发泡成型模、冲压成型模、网格食品刀模等; 而对于非标模食品加工, 则需要根据食品形状、体量等对不同规格的模板进行手工卡位和连接。常用的非标模具连接方式有 2 种, 即螺栓连接和弓形架夹紧<sup>[1]</sup>。螺栓连接存在拆装不便, 且螺纹易磨损等缺点; 弓形架夹紧存在的主要问题为: 小规格弓形架往往夹紧力不够, 难以实现非标食品模具的紧固连接, 而大规格弓形架虽夹紧力足够, 但占据空间较大、使用不方便<sup>[2]</sup>。

为了提高非标食品模具的生产效率, 减轻模具定位与夹紧的作业劳力, 设计了一种可同时满足操作定位和夹紧要求的机械装置。相对于传统的结构建模和机械设计方法, 拓扑优化可在改进形貌特征的同时, 有效提高结构性能和材料利用率, 因此, 在技术层面上具有更强的实用性和先进性。通过拓扑优化确定了弓形架的结构建模方案, 并结合实际工况分析了夹紧机构的疲劳寿命和损伤情况, 以为食品用模具夹紧机构的设计与技术改进提供参考。

## 1 夹紧机构设计

### 1.1 结构原理

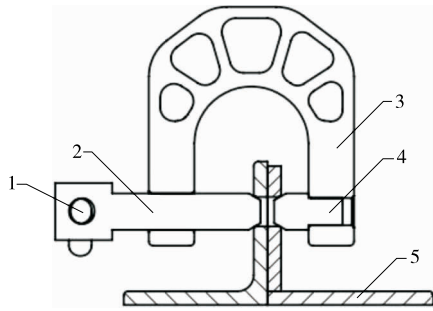
在食品模具生产过程中, 夹紧机构主要用于不同规格模板的锁定, 如图 1 所示, 其结构主要由弓形架、螺杆、铰杆和固定座组成。该机构具有夹紧和定位两大功能, 在作业过程中, 将 2 个模板贴面对齐置于螺杆和固定座之间, 一只手握着弓形架, 另一只手转动铰杆使螺杆沿轴

**基金项目:** 陕西省教育厅科研计划项目(编号: 15JK2177); 西京学院科研基金项目(编号: XJ150216)

**作者简介:** 邱海飞(1983—), 男, 西京学院副教授, 硕士。

E-mail: qhf8386@163.com

**收稿日期:** 2019-10-09



1. 铰杆 2. 螺杆 3. 弓形架 4. 固定座 5. 模板

图 1 模具夹紧机构示意图

Figure 1 Sketch map of clamping mechanism on mould

向递进,直至压紧模板。

### 1.2 夹紧力计算

非标模具夹紧机构需要人工拆装,在使用过程中约有 80% 的载荷作用于弓形架之上。根据作用力与反作用力关系,螺杆端部作用于模板连接孔上的轴向压力等于弓形架上螺纹孔所承受的轴向力,此力即为校核弓形架强度的外载荷。如图 2 所示,其计算方法见式(1)。

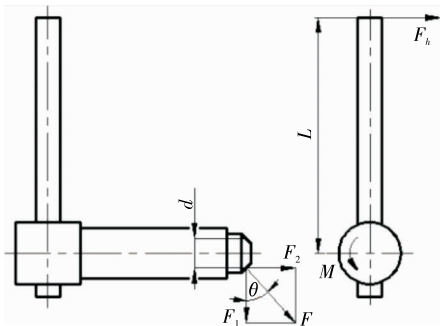


图 2 螺杆受力图

Figure 2 Force diagram of the screw

$$M = F_h L \quad (1)$$

模具在夹紧过程中,扭矩  $M$  在克服螺杆转动时会产生一个与之相等的反向阻力矩  $M_r$ ,而该阻力矩主要由螺杆端部与模具之间的阻力  $F_r$  产生,如式(2)、(3)所示。

$$M_r = F_r \frac{d}{2}, \quad (2)$$

$$F_r = \mu F \quad (3)$$

综合以上各式可得螺杆夹紧力计算方法如式(4)所示,代入相关参数求解得出  $F_1 = F_2 = 10\ 833.42\ \text{N}$ 。

$$F_1 = F_2 = \frac{\sqrt{2} F_h L}{d \mu}, \quad (4)$$

式中:

$M$ ——人手在铰杆末端搬动螺杆时产生的扭矩,  $\text{N} \cdot \text{m}$ ;

$L$ ——铰杆末端距螺杆轴心线的距离,  $60\ \text{mm}$ ;

$F_h$ ——成年男子的手握力,  $250\ \text{N}$ ;

$M_r$ ——反向阻力矩 ( $M = M_r$ ),  $\text{N} \cdot \text{m}$ ;

$F_r$ ——反向阻力,  $\text{N}$ ;

$d$ ——螺杆端部与模具接触部位的圆环直径,  $13\ \text{mm}$ ;

$\mu$ ——螺杆端部与模具接触部位的摩擦系数,  $0.15$ ;

$\theta$ ——分解力夹角,  $45^\circ$ ;

$F$ ——螺杆端部与模具接触部位的正压力,  $\text{N}$ ;

$F_1$ ——螺杆径向夹紧力 ( $F_1 = F \cos \theta$ ),  $\text{N}$ ;

$F_2$ ——螺杆轴向夹紧力 ( $F_2 = F \sin \theta$ ),  $\text{N}$ 。

## 2 弓形架拓扑优化

### 2.1 拓扑优化理论

拓扑优化是指在给定设计空间内找到最佳的材料分布或传递路径,从而在满足各种性能要求的条件下,实现优化对象的轻量化设计<sup>[3]</sup>。弓形架为连续实体结构,目前比较成熟的连续体拓扑优化方法有变密度法、均匀化法、结构渐进法等。其中,变密度法能够更为准确地反映拓扑优化的本质特征,其基本思想是:在有限元模型设计空间中,以取值范围在  $[0, 1]$  的单元密度为设计变量,在此基础上将优化目标定义为单元密度的显函数,然后定义边界条件或制造约束,并通过相关数学算法或优化准则进行求解<sup>[4-5]</sup>。

拓扑优化是选取结构单元的有无作为设计变量。采用变密度法对弓形架进行结构拓扑优化,以弓形架结构柔度最小(刚度最大)为优化目标,以质量保留百分比为约束的变密度拓扑优化数学模型如式(5)所示。

$$\text{Find: } \rho_i (i = 1, 2, \dots, n), 0 \leq \rho_i \leq 1;$$

$$\text{Min: } \text{Max } C_j, 0 \leq j \leq p;$$

$$\text{s.t: } \frac{\sum_{i=1}^n \rho_i \rho_0 V_{0i}}{m_0} \leq \delta, \quad (5)$$

式中:

$\rho_i$ ——第  $i$  个单元的相对密度;

$\rho_0$ ——单元初始密度,  $\text{g}/\text{m}^3$ ;

$V_{0i}$ ——第  $i$  个单元的体积,  $\text{m}^3$ ;

$m_0$ ——结构初始质量,  $\text{kg}$ ;

$\delta$ ——质量保留百分比即优化结果的质量与结构初始质量的比值;

$C_j$ ——结构总柔顺度即总应变能,  $\text{J}$ ;

$P$ ——工况总数, 个。

### 2.2 制造约束方案

结构的可制造性在一定程度上制约了拓扑优化的自由度,因此,在拓扑优化过程中,需要根据结构自身特点设计与之匹配的制造约束。采用不同的制造约束会得到

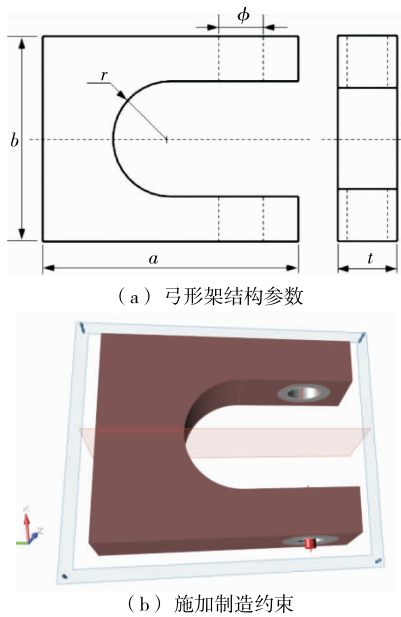


图3 弓形架实体建模与约束设计

Figure 3 Solid modeling and constraint design of the arch frame

不同的结构形状,而结构形状又在很大程度上决定了优化对象的力学性能和可加工性<sup>[6-7]</sup>。

为了获得较好的加工工艺,本研究根据弓形架结构特点设计了3种制造约束方案,分别为:无对称和拔模约束;对称约束;对称和拔模约束。在HyperWorks平台上设计建立弓形架初始模型,其结构尺寸包括:长度 $a=200\text{ mm}$ ;宽度 $b=160\text{ mm}$ ;厚度 $t=40\text{ mm}$ ;U形面半径 $r=45\text{ mm}$ ;圆孔直径 $\Phi=20\text{ mm}$ ,如图3(a)所示。将3种制造约束分别施加于弓形架三维实体模型之上,如图3(b)所示,为“对称和拔模约束”状态下的弓形架实体结构。

### 2.3 优化结果

拓扑优化结果可快速有效地确定材料分布状态,从而为结构的形貌特征设计提供有力指导<sup>[8]</sup>。弓形架拓扑优化结果如图4所示,总体来看,3种制造约束方案在弓形架上需要去除材料的位置基本相似,但也存在不同之处,具体表现在U形面结构的材料分布,方案1[图4(a)]和方案2[图4(b)]在U形面上会产生相应的凹槽,并在边缘位置出现对称薄壁结构,而方案3[图4(c)]的U形面则是实体结构,其表面整体形貌特征更为简洁、光滑。

就实用性而言,方案3较其他2种方案更为合理,此时弓形架U形边缘更为光滑,有利于作业过程中手的握持,并且在厚度方向也可保证具有较充足的刚度与强度;从可制造性方面来看,不管是采用机加工、铸造成型或是3D打印,方案3的弓形架拓扑结构在工艺流程方面显然

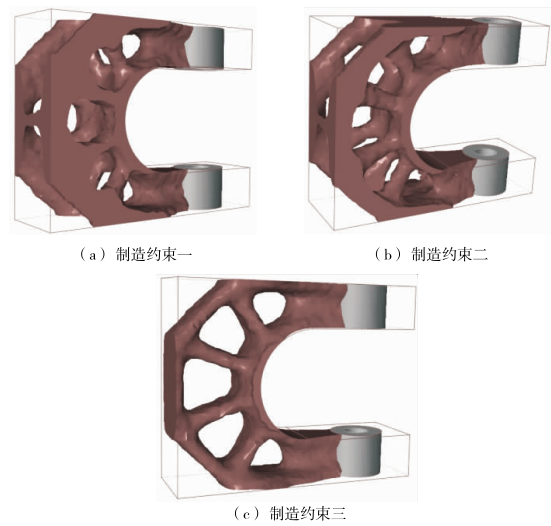


图4 拓扑优化形态

Figure 4 The shape of topological optimization

更为简单。因此,本研究采用方案3作为弓形架的结构设计依据。

## 3 静力学分析

分别建立弓形架初始结构和拓扑优化结构的有限元模型,根据夹紧力计算结果施加相应的边界条件和静力载荷,即完全约束弓形架上的2个安装孔内圆面,并在螺杆安装孔内圆面施加径向夹紧力 $F_1$ 和轴向夹紧力 $F_2$ 。采用Solid 186单元对弓形架结构进行网格离散。弓形架材质采用45钢,其质量密度为 $7\ 850\text{ kg/m}^3$ ,弹性模量为 $210\text{ GPa}$ ,泊松比为 $0.3$ ,屈服强度 $\geq 355\text{ MPa}$ 。

拓扑优化前后静力学分析结果如图5、6所示。由云图形态及数值分布可知,弓形架在经过拓扑优化改变结构后,其应力、形变及质量等均发生了明显变化,具体数值如表1所示。比较优化前后数据可知,拓扑优化使弓形架质量从之前的 $1.714\ 10\text{ kg}$ 减少到了 $0.761\ 85\text{ kg}$ ,结构质量减轻了约 $55.5\%$ ,可见弓形架轻量化设计效果十分明显。

由工程材料理论可知,经热处理后的45钢屈服强度 $\geq 355\text{ MPa}$ 。根据结构强度设计要求,45钢在最低屈服强度下应有 $1.1\sim 1.2$ 倍的安全系数,因此,与之匹配的安全等效应力范围为 $295.83\sim 322.73\text{ MPa}$ ,而弓形架在

表1 优化前后数据对比

Table 1 Data comparison of the optimization and before

项目	质量/kg	等效应力值/MPa	变形量/mm
优化前	1.714 10	194.45	0.591 96
优化后	0.761 85	304.15	0.935 05
设计值		295.83~322.73	$\leq 1$

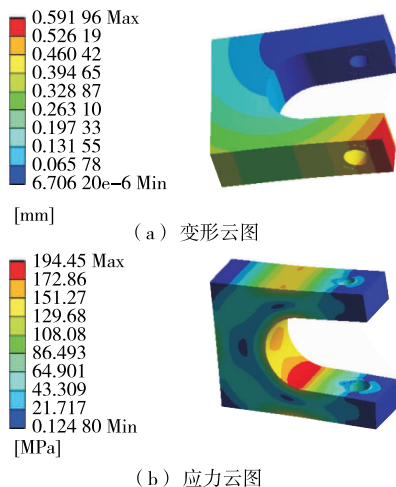


图 5 初始结构静力学分析图解

Figure 5 Static analysis graphics of initial structures

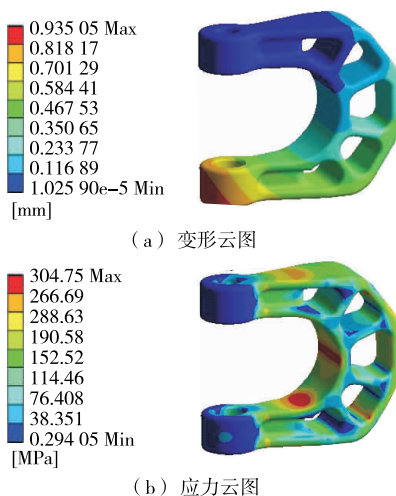


图 6 拓扑优化结构静力学分析图解

Figure 6 Static analysis graphics of topological optimization

拓扑优化后的最大等效应力约为 304.15 MPa,符合强度设计要求。拓扑优化后的弓形架形变量虽然有所增大,但其值<1 mm,符合刚度设计要求。综上所述,弓形架的拓扑优化结果达到了预期目标,使其在满足结构强度、刚度的要求下获得了较大的材料利用率。

## 4 疲劳分析

### 4.1 疲劳寿命

弓形架的疲劳分析主要用来确定夹紧机构在反复拆卸过程中失效的循环次数,对于验证结构是否满足使用寿命和及时更换零部件具有较大的参考价值。疲劳寿命,即在循环载荷作用下,结构由于疲劳破坏导致失效的应力或应变循环次数<sup>[9-10]</sup>。根据疲劳寿命分析理论,可通过 Manson-Coffin 公式来描述材料的疲劳寿命特性,如

式(6)所示

$$\epsilon_a = \frac{\sigma_f}{E} (2N)^b + \epsilon_f (2N)^c, \quad (6)$$

式中:

- $\epsilon_a$ ——总应变,J;
- $E$ ——弹性模量, GPa;
- $N$ ——疲劳寿命,次;
- $\sigma_f$ ——疲劳强度因子;
- $\epsilon_f$ ——疲劳延续因子;
- $b$ ——疲劳强度指数;
- $c$ ——疲劳延续指数<sup>[11]</sup>。

考虑到实际材料缺陷和结构表面质量等影响,在 HyperWorks 环境下需要对疲劳强度因子  $\sigma_f$  进行修正,根据 Goodman 平均应力理论,定义修正疲劳强度因子为 0.85。参考模具预制件实际生产工况,假设每 12 min 生产 1 块非标食品,则 1 h 生产 5 块,1 天按 24 h 计,1 年按 300 d 算工作日,则每年可生产 36 000 块。每生产 1 块非标食品需要装拆 1 次夹紧机构,也就是非标食品生产的块数等于夹紧机构拆装载荷的循环次数。

弓形架疲劳寿命分析结果如图 7 所示。分析可知,U 形结构内表面存在两处最易发生疲劳失效的区域,此处的失效循环次数为 91 716,由此可知,在模具拆装使用过程中,弓形架结构至少可安全承受 90 000 次循环载荷作用。为更精确地评估弓形架疲劳寿命,将其失效循环次数与年均载荷循环次数(36 000)作商,计算结果为 2.55。因此,方案 3 的拓扑优化结果可以保证弓形架具有 2 年以上的使用寿命。

### 4.2 损伤分析

疲劳损伤即设计寿命与可用寿命的比值。在模具装

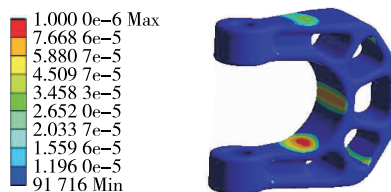


图 7 疲劳寿命云图

Figure 7 Nephogram of the fatigue life

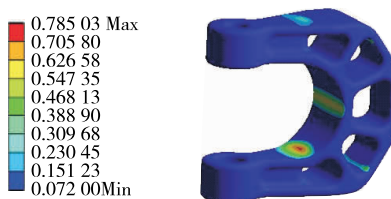


图 8 损伤云图

Figure 8 Nephogram of the damage

卸过程中,弓形架会受到反复的交变应力作用。在循环载荷影响下,弓形架结构将形成损伤累积。由线性疲劳损伤理论可知,在变幅载荷作用下,由  $n$  个循环造成的结构损伤可通过 Miner 理论来表述,如式(7)所示,

$$D = \sum_{i=1}^n \frac{1}{N_i}, \quad (7)$$

式中:

$D$ ——损伤变量;

$N$ ——当前载荷水平所对应的疲劳寿命<sup>[11-12]</sup>,次。

设该模具夹紧机构的使用寿命为 2 年,与之对应的使用循环次数为 72 000 次。运行损伤分析计算过程,在达到 72 000 次使用循环次数后,弓形架最大损伤位置主要分布于 U 形表面内侧,如图 8 所示,该区域损伤因子为 0.785 03。根据线性疲劳损伤理论,当临界损伤变量  $D_{CR}=1$ (该变量为损伤变量的临界值)时试验样件将被破坏<sup>[11]</sup>。由分析结果可知,弓形架损伤因子  $D < 1$ ,因此损伤程度符合使用寿命设计要求。

## 5 结论

通过弓形架力学计算、结构建模、拓扑优化及疲劳寿命分析,确定了一种更为合理的制造约束方案(即对称和拔模约束),实现了弓形架的轻量化设计和结构改进,验证了变密度法在弓形架结构拓扑优化设计中的可行性和有效性;同时结合相关设计准则,评估了弓形架的疲劳寿命及损伤程度,从理论层面为模具夹紧机构的设计和使用提供了重要参考。本文主要针对弓形架结构进行相关仿真分析,在后续研究工作中,可考虑以螺杆和固定座为仿真对象,通过研究其力学性能和疲劳特性等,以期为模

具夹紧机构的改进提供更为全面的理论支撑和技术借鉴。

## 参考文献

- [1] 邓奕,丁科,付宏,等. 基于 VERICUT 的模具数控加工仿真及加工路线优化[J]. 食品与机械, 2016, 32(11): 85-89.
- [2] 潘志达. 模块化设计和预制装配式技术的应用研究[J]. 建筑技术开发, 2017, 44(20): 19-20.
- [3] 赵灵. 食品罐内盖注塑模具设计[J]. 制造技术与机床, 2016(1): 138-140.
- [4] 王平,张国玉,刘家燕,等. 机载光电平台内框架拓扑优化设计[J]. 机械工程学报, 2014, 50(13): 135-141.
- [5] 寇鑫,葛文杰. 基于多点驱动式柔性机构的变形翼后缘拓扑优化[J]. 机械强度, 2018, 40(4): 983-986.
- [6] 林瑞,匡兵,周峰,等. 基于变密度法的发动机支架性能优化[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2018(11): 123-126.
- [7] 张宪民,胡凯,王念峰,等. 基于并行策略的多材料柔顺机构多目标拓扑优化[J]. 机械工程学报, 2016, 52(19): 1-8.
- [8] 赵海鸣,蒋彬彬,李密. 基于拓扑优化与多目标优化的机床底座结构设计[J]. 机械设计与研究, 2018, 34(4): 100-105.
- [9] 杨福芹,蒋典兵. 三叉杆滑块式万向联轴器的疲劳寿命分析[J]. 机械强度, 2018, 40(6): 1 501-1 505.
- [10] 聂文武,肖雨,毛洪海,等. 某重型商用车传动轴强度与疲劳寿命分析[J]. 机械设计, 2018, 35(1): 166-168.
- [11] 李静,张显余,张乐迪. 基于 ANSYS Workbench 某型起落架疲劳寿命分析[J]. 兵器装备工程学报, 2017, 38(10): 171-174, 180.
- [12] 郑战光,蔡敢为,李兆军,等. 基于损伤力学阐释 Manson-Coffin 低周疲劳模型[J]. 中国机械工程, 2011, 22(7): 812-814.
- [7] CHENNI F Z, TACHÉ, NAUD N, et al. Heme-induced Biomarkers associated with red meat promotion of colon Cancer Are Not Modulated by the intake of nitrite[J]. Nutrition and Cancer, 2013, 65(2): 227-233.
- [8] BOUVARD V, LOOMIS D, GUYTON K Z, et al. Carcinogenicity of consumption of red and processed meat[J]. The Lancet Oncology, 2015, 16(16): 1 599-1 600.
- [9] HYLDGAARD M, MYGIND T, VAD B S, et al. The Antimicrobial Mechanism of Action of Epsilon-Poly-L-Lysine[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2014, 80(24): 7 758-7 770.
- [10] 刘韵昕. 苯乳酸的抑菌活性及抑菌机理研究[D]. 临汾: 山西师范大学, 2017: 21.
- [11] LIN lin, GU Yu-lei, LI Chang-zhu, et al. Antibacterial mechanism of  $\epsilon$ -Poly-lysine against *Listeria monocytogenes* and its application on cheese[J]. Food Control, 2018, 91(9): 76-84.
- [12] 王佶. 大肠杆菌积累丙酮酸的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008: 23-25.
- [13] 翟培,韩晋辉,侯丽霞. 家蝇抗菌肽的抑菌动力学研究及其机理初探[J]. 中国生物工程, 2006, 26(11): 33-39.
- [14] 刘蔚,周涛.  $\epsilon$ -聚赖氨酸抑菌机理研究[J]. 食品科学, 2009, 30(9): 15-20.
- [15] CHEN C Z, COOPER S L. Interactions between dendrimer biocides and bacterial membranes[J]. Biomaterials, 2002, 23(16): 3 359-3 368.
- [16] PAPARELLA A, TACCOGNA L, AGUZZI I, et al. Flow cytometric assessment of the antimicrobial activity of essential oils against *Listeria monocytogenes*[J]. Food Control, 2008, 19(12): 1 174-1 182.
- [17] WICZLING P, KRZYZANSKI W. Flow cytometric assessment of homeostatic aging of reticulocytes in rats[J]. Experimental Hematology, 2008, 36(2): 119-127.

(上接第 19 页)