

[新设备·新材料·新方法]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2017.02.012

# 新型涡流空化器的实验研究

张斌<sup>1,2</sup>, 陈银银<sup>1,2</sup>, 李育敏<sup>1,2</sup>, 计建炳<sup>1,2</sup>

(1. 浙江工业大学 化学工程学院, 浙江 杭州 310014;  
2. 浙江工业大学 浙江省生物燃料利用技术研究重点实验室, 浙江 杭州 310014)

**摘要:**目前利用空化释放出能量是充分利用能量的一种新方法,为此设计了一种新型的涡流空化器,定量分析了空化引发·OH(羟自由基)产量与空化强度的关系。文中以亚甲基蓝作为羟自由基的捕捉剂,使用紫外-可见分光光度计间接测定了水力空化产生的·OH产量,并利用该方法对涡流空化器空化效果进行了实验研究。分析了旋流腔直径、空化器出液管直径和空化器进液管流速等工艺参数对自由基产量的影响。力求寻出有利于空化发生以及提高空化作用强度的适宜空化器的设计工艺。结果表明:进液管流速越大,出液管直径越小,旋流腔直径越小,·OH摩尔浓度越大。与孔板水力空化器对比,涡流空化器单位压降的·OH的摩尔浓度是孔板水力空化器的13.99~68.19倍,说明涡流空化器能量利用率更高,空化效果更好。

**关键词:**涡流空化;亚甲基蓝;紫外-可见分光光度计;羟基自由基;孔板水利空化器

中图分类号:TQ02 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2017)02-0058-05

## Experimental Study on Vortex Cavitation Reactor

ZHANG Bin<sup>1,2</sup>, CHEN Yinyin<sup>1,2</sup>, LI Yumin<sup>1,2</sup>, JI Jianbing<sup>1,2</sup>

(1. College of Chemical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China;  
2. Zhejiang Province Key Laboratory of Biofuel, Hangzhou 310014, China)

**Abstract:** In view of a new method that the cavitation releases energy to make full use of the energy, a new type of vortex cavitation was designed. The quantitative analysis of ( $\cdot$ OH) production and the relationship between the cavitation intensity by cavitation was proceeded. The methylene blue as capture agent of hydroxyl radical, the ultraviolet-visible spectrophotometer was used to indirect determination of ( $\cdot$ OH) production generated by the hydraulic cavitation, and the experimental study of the vortex cavitation effect was carried on by the method. The influences of the vortex cavity diameter, cavitation produced liquid pipe diameter and cavitation in liquid flow rate etc. process parameters on the free radical production were analyzed. The appropriate design of cavitation process was looked for which benefit for cavitation occurring and cavitation effect adapting. The results show that the liquid pipe flow rate is more rapid, the produced liquid pipe diameter is smaller, and the vortex cavity diameter is smaller, and the concentration of ( $\cdot$ OH) is greater. Compared with the orifice hydraulic cavitation device, the  $\cdot$ OH molarity of vortex cavitation device is 13.99 ~ 68.19 times of the orifice hydraulic cavitation. It indicates that the vortex cavitation has higher energy utilization efficiency and better cavitation effect.

**Keywords:** swirling jet cavitation; methylene blue; ultraviolet-visible spectrophotometer; hydroxyl radical; orifice hydraulic cavitation

空化是由于液体中局部压强降低(低于相应温度下该液体的饱和蒸气压)使液体蒸发而引起的微气泡(或称气核)爆发性生长的现象。空化泡绝热压缩而

溃灭,在溃灭瞬间产生极短暂的强压力脉冲,气泡周围微小空间形成局部热点,产生极端的高温、高压<sup>[1]</sup>。空化一般有水力空化和超声空化。

收稿日期:2016-09-12;修回日期:2016-10-09

第一作者简介:张斌(1989),男,湖北浠水人,硕士研究生,主要研究方向为传质与分离。通信作者:李育敏(1973),男,浙江杭州人,副教授,主要研究方向为传质与分离。E-mail:liymin@zjut.edu.cn

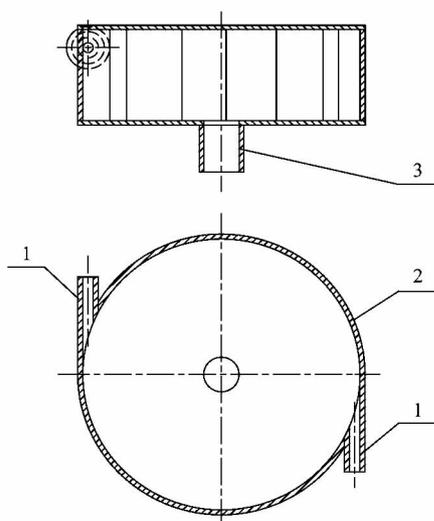
涡流空化是一种新的空化方式。王金刚等<sup>[24]</sup>利用涡流空化降解水中罗丹明 B, 涡流空化降解效率远大于超声空化。邢乃军等<sup>[5-6]</sup>通过涡流空化和 Fenton 试剂协同降解溶液中活性艳红 K-2BP, 涡流空化对活性艳红 K-2BP 有很好的降解作用, 活性艳红 K-2BP 的最高降解率能达 91.81%。

陈伟政等发明了一种涡流空化器<sup>[7]</sup>, 该装置利用液体在旋流腔中高速旋转而形成旋转中心的低压区, 产生空化; 然后液体通过旋流腔中心的收缩内孔和扩张筒, 液体压力突然升高, 空化泡溃灭, 提高空化强度。肖仲杰等发明了一种涡空化器单元<sup>[8]</sup>, 液体在锥形的旋流腔中旋转, 在旋流中心的低压区产生空化, 然后液体通过旋流腔中心的喉口进入高压釜, 在高压釜中空化泡溃灭, 空化强度得到很大的增强。

涡流空化具有设备简单、处理量大、空化强度高优点。本文对涡流空化进行深入研究, 并将涡流空化与孔板水力空化进行比较, 为涡流空化工业应用提供实验依据。

### 1 实验装置

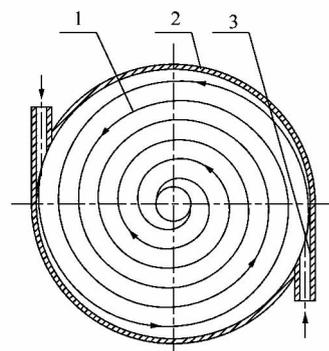
实验采用的涡流空化器如图 1 所示。该装置包括 2 个进液管、圆柱形旋流腔和位于旋流腔中心底部的出液管, 2 个进液管均与旋流腔壁切向连接<sup>[9-10]</sup>。液体分成等流量的 2 股, 分别通过 2 个进液管切向进入旋流腔。液体在旋流腔内高速旋转, 同时径向向心运动, 即液体做螺旋向心运动, 如图 2 所示。



1—进液管; 2—圆柱形旋流腔; 3—出液管。

图 1 涡流空化器示意图

Figure 1 Schematic diagram of vortex cavitation reactor



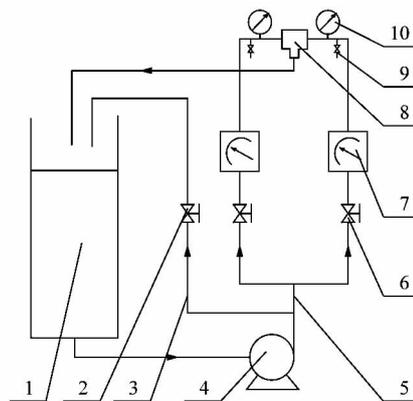
1—液体做螺旋向心运动; 2—旋流腔; 3—液体切向进入旋流腔。

图 2 液体在旋流腔中的运动

Figure 2 Fluid movement in swirl chamber

当液体到达旋流腔中心, 根据角动量定律和机械能衡算方程, 液体达到很高的旋转线速度和很低的压力, 由此产生空化。液体通过出液管流出, 液体恢复到常压, 空化泡溃灭, 形成空化效应。

实验流程图如图 3 所示, 实验的物系为常温下的水。该装置为循环系统, 储罐中的水经离心泵加压后分成 2 股: 一股经支路管流回储罐; 另一股进入主管路后再次分成 2 股, 分别经过阀门和流量计, 然后等流量从空化器的 2 个进液管切向进入空化器, 液体在空化器中发生涡流空化, 然后从空化器中心的出液管流出, 返回储罐。通过调节支路上的阀门, 控制进入主管路的水流量。在空化器的 2 个进液管处分别设有压力表, 测量涡流空化器的入口压力  $p_{v0}$ , 同时, 分别开设 2 个取样口, 取样测量羟基自由基的摩尔浓度  $c(\cdot\text{OH})$ 。



1—储罐; 2—支管路阀门; 3—支管路; 4—离心泵; 5—主管路; 6—阀门; 7—流量计; 8—涡流空化器; 9—取样口; 10—压力表。

图 3 涡流空化器实验流程图

Figure 3 Flow chart of experimental vortex cavitation reactor

水在空化器中空化被分解成  $\cdot\text{H}$  和  $\cdot\text{OH}$ 。在水中加入亚甲基蓝 (methylene blue, MB), 其摩尔浓度为

$c_{MB0}$ , 此时亚甲基蓝 (MB) 作为  $\cdot OH$  的捕捉剂。从取样口取样, 采用紫外可见分光光度计 (波长 665 nm 波峰处) 检测样品亚甲基蓝的吸光度<sup>[12-14]</sup>。预先配置亚甲基蓝 (MB) 标准溶液, 绘出亚甲基蓝的摩尔浓度  $c_{MB}$  与吸光度  $A$  的关系, 如图 4 所示。根据图 4 中的标准曲线, 拟合关联式为:

$$c_{MB} = A / 0.0786 \quad (1)$$

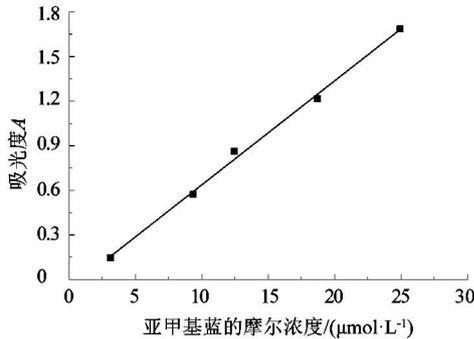


图 4 亚甲基蓝的标准工作曲线

Figure 4 Standard working curve of methylene blue

测量实验中所取样品亚甲基蓝 (MB) 的吸光度  $A$ , 由式 (1) 计算得到所取样品的摩尔浓度  $c_{MB}$ , 则所取样品的羟基自由基的摩尔浓度  $c_{(\cdot OH)}$  由下式计算:

$$c_{(\cdot OH)} = c_{MB0} - c_{MB} \quad (2)$$

式中  $c_{MB0}$  为实验开始前亚甲基蓝 (MB) 的初始摩尔浓度。

实验采用 6 个涡流空化器。空化器的旋流腔直径分别为 100 mm 和 150 mm; 进液管内径均为 25 mm; 出液管有 3 个规格, 内径分别为 25, 17 和 10 mm; 6 个涡流空化器的结构尺寸如表 1 所示。进液管的流速  $u_{v0}$  分别为 3, 4, 5, 6 和 7 m/s。每隔 5 min 从 2 个取样口取样, 空化时间为 30 min, 检测样品的吸光度并计算样品的摩尔浓度  $c_{(\cdot OH)}$ 。对 2 个取样口的摩尔浓度  $c_{(\cdot OH)}$  作算术平均值, 其值作为涡流空化器进液管处的摩尔浓度  $c_{(\cdot OH)}$ 。

表 1 6 个涡流空化器的尺寸

Table 1 Size of six vortex cavitation reactor mm

| 型号 | 旋流腔直径 | 出液管内径 | 进液管内径 |
|----|-------|-------|-------|
| A1 | 150   | 25    | 25    |
| A2 | 150   | 17    | 25    |
| A3 | 150   | 10    | 25    |
| B1 | 100   | 25    | 25    |
| B2 | 100   | 17    | 25    |
| B3 | 100   | 10    | 25    |

## 2 实验结果与分析

### 2.1 反应时间对涡流空化的影响

涡流空化器进液管处的  $c_{(\cdot OH)}$  与空化时间  $t$  的关系如图 5 所示。 $u_{v0}$  是进液管流速,  $c_{(\cdot OH)}$  随时间  $t$  而增大, 说明水流经涡流空化器确实产生空化, 不断生成  $\cdot OH$ 。随着时间的流逝,  $\cdot OH$  不断积累, 其摩尔浓度越来越高。

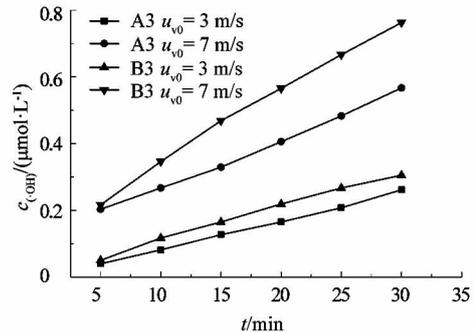


图 5 摩尔浓度与空化时间的关系

Figure 5 Relationship between molar concentration and cavitation time

### 2.2 涡流空化器的入口压力与流速的关系

涡流空化器入口压力  $p_{v0}$  与进液管流速  $u_{v0}$  的关系如图 6 所示。显然, 涡流空化器进液管流速  $u_{v0}$  越大, 阻力损失越大, 入口压力  $p_{v0}$  越大。出液管内径和旋流腔直径越小, 流动阻力越大, 则入口压力  $p_{v0}$  越大。

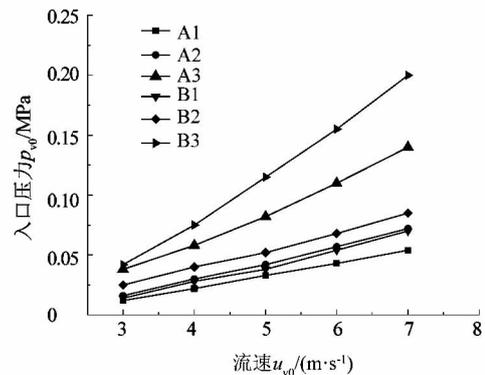


图 6 入口压力与流速的关系

Figure 6 Relationship between inlet pressure and velocity

### 2.3 进液管流速对涡流空化的影响

在 10 min 时取样得到的进液管处  $c_{(\cdot OH)}$  随进液管流速  $u_{v0}$  的变化如图 7 所示。

涡流空化器的空化数  $\sigma$  定义如下:

$$\sigma = \frac{p_{ve} - p_{vapor}}{0.5\rho_L u_{ve}^2} \quad (3)$$

式中: $p_{ve}$ 为出液管液体压力,Pa; $p_{vapor}$ 为液体的饱和蒸气压,Pa; $u_{ve}$ 为液体在涡流空化器出液管处的旋转线速度, $m \cdot s^{-1}$ ; $\rho_L$ 为液体密度, $kg \cdot m^{-3}$ 。

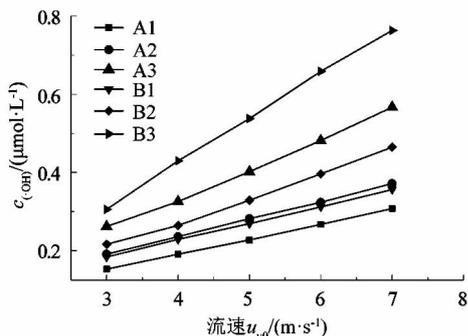


图7 流速  $u_{v0}$  与摩尔浓度  $c_{(.OH)}$  关系

Figure 7 Relationship between velocity  $u_{v0}$  and molar concentration  $c_{(.OH)}$

涡流空化器旋流腔的角动量方程为:

$$m_L u_{v0} r_0 - m_L u_{ve} r_i = M_0 \quad (4)$$

式中: $m_L$ 为液体质量流量, $kg \cdot s^{-1}$ ; $r_0$ 为旋流腔的半径,m; $r_i$ 为出液管内半径,m; $M$ 为液体螺旋向心流动所受力矩, $N \cdot m$ 。

由图7可知,涡流空化器进液管流速  $u_{v0}$  越大,  $c_{(.OH)}$  越大。根据式(4),  $u_{v0}$  增大,  $u_{ve}$  也增大,再根据式(3),空化数  $\sigma$  降低,有利于空化的发生,  $c_{(.OH)}$  增加。

由图7可知,出液管内径和旋流腔直径越小,则  $c_{(.OH)}$  越大。根据式(4),出液管内径越小,即  $r_i$  越小,则  $u_{ve}$  越大;再根据式(3),空化数  $\sigma$  减小,  $c_{(.OH)}$  增大。而旋流腔直径越小,即  $r_0$  越小,根据式(4),则  $u_{ve}$  越小;但旋流腔直径越小,液体流动阻力增大,导致液体温度升高,则液体饱和蒸气压  $p_{vapor}$  增大,根据式(3)空化数  $\sigma$  减小,  $c_{(.OH)}$  增大。

## 2.4 孔板水力空化

为将涡流空化与孔板水力空化进行比较,对单孔孔板进行水力空化实验。单孔孔板的厚度为4 mm,孔径  $d_0$  分别为1.5,2.0和3.0 mm,水流经单孔的速度  $u_0$  分别为25,30,35,40和45 m/s。在孔板上游设压力表和取样口,测量压力  $p_0$  并取样。每隔5 min 取样检测样品的吸光度并计算  $c_{(.OH)}$ 。用  $c_{(.OH)}$  除以压力  $p_0$  得到  $c_{(.OH)}/p_0$ ,  $c_{(.OH)}/p_0$  表示空化装置在单位能耗下产生的  $\cdot OH$  摩尔浓度。显然,  $c_{(.OH)}/p_0$  越大,空化装置的能量利用率越高。  $c_{(.OH)}/p_0$  随孔速  $u_0$  的变化如图8所示。  $c_{(.OH)}/p_0$  随孔速  $u_0$  的增大先上升后下降,且随孔板孔径  $d_0$  的减小而增大。这表明,该孔板水力空化

器存在一个最佳孔速,该孔速下,空化器能耗最低。

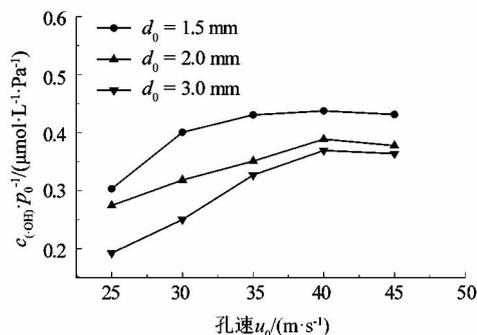


图8 孔板水力空化器单位压降的  $\cdot OH$  摩尔浓度  
Figure 8 Orifice hydraulic cavitation unit pressure drop of  $\cdot OH$  molar concentration

## 3 涡流空化与孔板水力空化比较

图9是涡流空化与孔板水力空化的  $c_{(.OH)}/p_0$  值的比较。

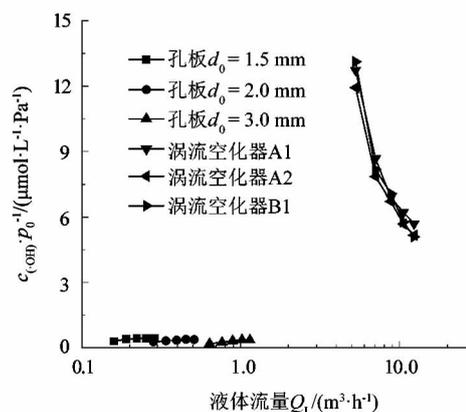


图9 涡流空化与孔板水力空化比较  
Figure 9 Vortex cavitation compared with orifice hydraulic cavitation

由图9可以看出,涡流空化器的  $c_{(.OH)}/p_0$  值和流量都远比孔板水力空化器高。涡流空化器的  $c_{(.OH)}/p_0$  值和流量分别是孔板水力空化器的13.99~68.19倍和10.83~33.28倍,说明涡流空化器的能量利用率比孔板水力空化器高,空化效果也更好,是一种优良的空化装置。

## 4 结论

- 1) 涡流空化器  $\cdot OH$  摩尔浓度随时间  $t$  增长而增大,进液管流速  $u_{v0}$  越大,入口压力  $p_{v0}$  越大;出液管内径越小和旋流腔直径越小,入口压力  $p_{v0}$  也越大。
- 2) 涡流空化器进液管流速  $u_{v0}$  越大,  $c_{(.OH)}$  越大;出液管内径越小,旋流腔直径越小,  $c_{(.OH)}$  越大。
- 3) 涡流空化器与孔板水力空化器比较中,涡流空

化器的  $c_{(·OH)}/p_0$  值和流量分别是孔板水力空化器的 13.99 ~ 68.19 倍和 10.83 ~ 33.28 倍,说明涡流空化器的能量利用率比孔板水力空化器高,空化效果也更好。

**参考文献:**

[1] 黄继汤. 空化与空蚀的原理及应用[M]. 北京:清华大学出版社, 1991.

[2] 王金刚,王西奎,郭培全,等. 利用涡流空化效应降解水中罗丹明B[J]. 中国环境科学,2007,27(1):129-131.

[3] WANG Xikui, WANG Jingang, GUO Peiquan, et al. Chemical effect of swirling jet-induced cavitation: degradation of rhodamine B in aqueous solution[J]. Ultrasonics sonochemistry, 2008, 15(4):357-363.

[4] WANG Xikui, WANG Jingang, GUO Peiquan, et al. Degradation of rhodamine B in aqueous solution by using swirling jet-induced cavitation combined with H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> [J]. Journal of hazardous materials, 2009, 169(1/2/3):486-491.

[5] 邢乃军,王金刚,国伟林,等. 涡流空化-Fenton 协同降解溶液中活性艳红 K-2BP[J]. 环境污染与防治,2010,32(5):26-29.

[6] WANG Jingang, WANG Xikui, GUO Peiquan, et al. Degradation of

reactive brilliant red K-2BP in aqueous solution using swirling jet-induced cavitation combined with H<sub>2</sub> O<sub>2</sub> [ J ]. Ultrasonics sonochemistry, 2011, 18(2):494-500.

[7] 陈伟政,颜开,潘森森,等. 一种涡流空化器:201220727321.8[P]. 2012-12-26.

[8] 肖仲杰,潘森森. 涡空化器单元:201120158026.0[P]. 2011-05-17.

[9] 李育敏,姚文,计建炳,等. 尾涡空化旋转发生器:201120324072.3 [P]. 2011-08-31.

[10] 王金刚,郭培全,王西奎,等. 空化效应在有机废水处理中的应用研究[J]. 化学进展,2005,17(3):550-553.

[11] 刘刚. 对称入口固液分离水力旋流器的数值模拟[D]. 成都:四川大学,2006:35-64.

[12] 张晓冬,杨会中,李志义. 水力空化强度与空化自由基产量的关系[J]. 化工学报,2007,58(1):27-32.

[13] 邓洁,许仕荣,张伟. 水力空化强化效应的实验研究[J]. 兰州理工大学学报,2008,34(5):73-74.

[14] 魏群,肖波. 水力空化技术在废水处理中的研究与应用进展[J]. 中国给水排水,2007,23(2):13-16.

(上接第 57 页)

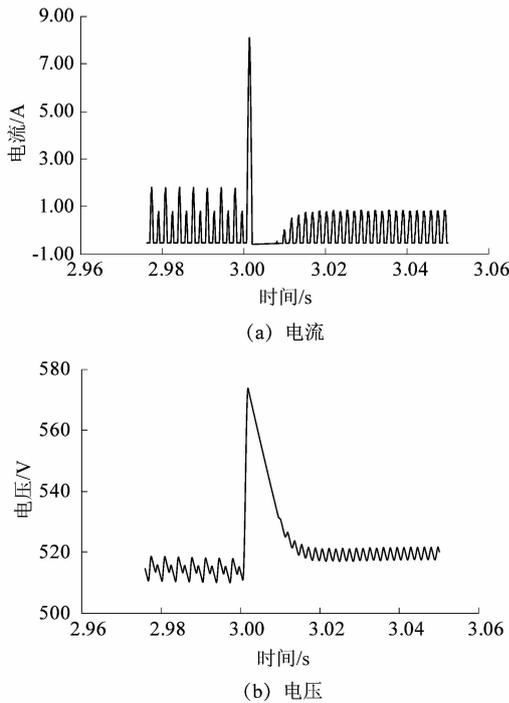


图 12 电容 C1 上的电压和电流波形  
Figure 12 Voltage and current waveforms of capacitor C1

**参考文献:**

[1] EHSANI M,GAO Yimin,EMADI A. 现代电动汽车、混合动力电动汽车和燃料电池车:基本原理、理论和设计[M]. 倪光正,倪培宏,熊素铭,译.2 版. 北京:机械工业出版社,2010:56-60.

[2] 罗宏浩,王福兴,姜红军. 三相绕组切换电路分析与设计[J]. 装甲兵工程学院学报,2012,26(6):56-59.

[3] 孙振杰,许东来,万梦,等. 双绕组切换型轮毂电机的结构设计及控制[J]. 电机与控制应用,2014,41(4):40-44.

[4] 徐衍亮,许家群,唐任远. 电动汽车用永磁同步电动机的绕组换接运行分析[J]. 电工技术学报,2002,17(5):21-25.

[5] KUME T, SWAMY M M. A quick transition electronic winding changeover technique for extended speed ranges [ C ]. IEEE Power Electronics Specialists Conference Records. Aachen, Germany:IEEE, 2004:3384-3389.

[6] SWAMY M M, KUME T, MAEMURA A, et al. Extended high-speed operation via electronic winding-change method for AC motors [ J ]. IEEE transaction on industry applications, 2006, 42(3):742-752.

[7] TAKATSUKA Y, HARA H, YAMADA K, et al. A wide speed range high efficiency EV drive system using winding changeover technique and SiC devices [ C ]. International Conference on Power Electronics. Hiroshima, Japan:IEEE, 2014:1898-1903.

[8] NOVOTNY D W. Vector control and dynamics of AC drives [ M ]. Oxford:Clarendon Press, 1996.

[9] SUL S. Control of electric machine drive systems [ M ]. Piscataway, NJ:John Wiley & Sons, Inc, 2011.