

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.12.015

三关节机械鱼的动力学及运动研究

张德义¹, 赵鸿飞², 王 琪¹, 张 超¹

(1. 江苏科技大学 机电与动力工程学院, 江苏 张家港 215600; 2. 今创集团, 江苏 常州 213000)

摘要:针对仿生机械鱼水下运动控制问题,通过对鱼体外形和运动模式的研究,建立了仿生机械鱼的结构模型,将其简化为 3 根相连的连杆组成的连杆机构,进行了动力学分析,并对第 3 根连杆的水动力学运动规律进行了初步分析,发现机械鱼的游动阻力与鱼在水中的面积、摆动频率、连杆长度等因素有关,适当地选择 3 根连杆的质量和长度可以提高机械鱼的游动速度和加速度。根据“大摆幅细长体”理论获得舵机摆动角度,采用 Matlab 对鱼体游动和舵机摆动进行了仿真,并进行了实验研究。仿真结果和实验结果都表明:摆动频率越快,驱动动力就越大,但会使鱼体摆幅增大,进而影响游动速度以及运动的平稳性,存在一个合理的摆动频率范围使得游动速度达到最大。

关键词:机械鱼;动力学;摆动频率;游动速度

中图分类号:TH113

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)12-1441-05

Dynamics and motion for three joint robotic fish

ZHANG De-yi¹, ZHAO Hong-fei², WANG Qi¹, ZHANG Chao¹

(1. School of Mechatronic and Power Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhangjiagang 215600, China; 2. KTK Group, Changzhou 213000, China)

Abstract: In order to control the underwater movement of bio-robotic fish, through researching on the fish body shape and movement patterns, the model structure of the robotic fish and dynamics model was established. The wave theory of liquid was used to analyze hydrodynamic motion law for robotic fish third connecting rod preliminarily. The resistance of robotic fish related to the factors just as the area under the water, the oscillation frequency and the length of connecting rod was found. Moving velocity and acceleration cloud be improved by choosing quality and length of the connecting rod properly. Swing angle was got according to the theory of large swing of slender, and Matlab was used to simulate the motion of the fish. Experiment was also carried on. Both the results of simulation and experiment indicate that with the oscillation frequency increasing, the driving force will be increased, the fish swing will be increased, the moving velocity and the stability of the movement will be affected further. There is a reasonable oscillation frequency range makes the moving velocity reach the maximum.

Key words: robotic fish; dynamics; swing motion; moving velocity

0 引 言

由于水下作业环境的复杂化和作业内容的不断增加,研究具有能在复杂水域长期高效工作的水下机器人成为了当务之急。仿生机械鱼作为一种新型水下机器人,可以适应复杂环境和高效作业等要求所带来的挑战,因而得到了广泛的研究与开发^[1-3]。

对于仿生机械鱼的研究多集中于动力学分析及推动理论研究两方面。在动力学分析方面,刘英想^[4]以鲹科加新月形尾鳍的鱼类为研究对象,建立了该鱼类游动的动力学模型,运用 Bernoulli 方程对机器鱼鱼体水动力进行初步计算,并应用 Lagrange 方程,得出该鱼的动力学模型,研究了鱼体摆动幅度与质量分布之间的关系;肖洋^[5]以 3 关节机器鱼为研究对象,分析了机

器鱼在流体中的受力情况,建立了相应的动力学模型,讨论了相关的运动参数对进性能的影响。在机器鱼的推动理论研究上,“静态流体理论”、“细长体理论”、“大摆幅抗力理论”等理论被提出^[6-7],并且被用来分析不同鱼类游动时的水动力学问题。但是,如何将理论与仿生机器鱼的制作和运动控制结合起来,实现较强的灵活性还需要做大量工作。

本研究通过对鱼类的外形与运动模式的研究,建立仿生机械鱼的结构及运动模型。

1 机械鱼运动的实现

1.1 机械鱼的结构及驱动方式

仿生机械鱼结构示意图如图 1 所示。

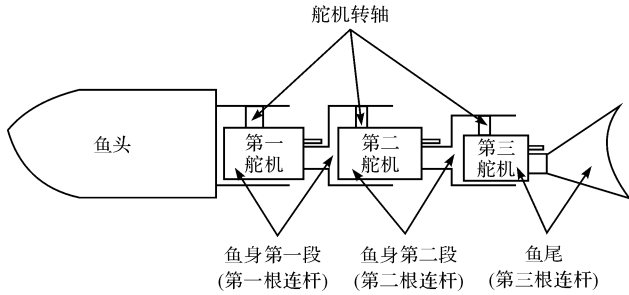


图 1 仿生机械鱼结构示意图

机械鱼结构模型由鱼头、鱼身和鱼尾 3 部分组成的。其中:鱼身部分包括 3 段,鱼身第一段是由第 1 个舵机和第 2 个舵机固定架组成;鱼身第 2 段由第 2 个舵机和第 3 个舵机固定架组成;鱼尾部分即鱼身第 3 段则是由第 3 个舵机和尾鳍组成。前两个舵机的转动带动机械鱼体的摆动,第 3 个舵机用来实现尾鳍的摆动。

1.2 机械鱼的运动模型简化

为了方便计算,假设机械鱼只能在水中同一平面内运动,因而可以将其简化成由 3 根相连的连杆组成的连杆机构^[9],3 根连杆的摆动使得仿生机械鱼游动。

机械鱼的运动模型简图如图 2 所示。

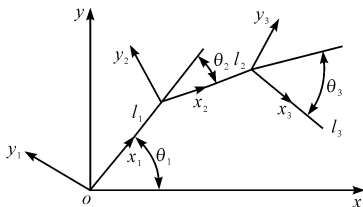


图 2 机械鱼的运动模型简图

本研究建立机械鱼每根连杆的坐标系, $O-XYZ$ 为仿生机械鱼的绝对坐标系, $O_i-X_iY_iZ_i (i=1,2,3)$ 分别为 3 根摆动连杆的相对坐标系, l_1, l_2, l_3 分别为的 3 根连杆长度, $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 分别为三根连杆的转动角度。通

过齐次坐标变换并采用拉格朗日动力学分析,可以得到 3 根连杆的力矩 T_1, T_2, T_3 。限于本文篇幅的原因,推导过程予以省略,只给出 3 根连杆转矩的计算公式:

$$T_1 = \left[\frac{1}{3}m_1l_1^2 + m_2(l_1^2 + l_2^2) + \frac{1}{2}m_2l_1l_2\cos\theta_2 + 4m_3l_1^2 \right] \ddot{\theta}_1 - \frac{1}{2}m_2l_1l_2(2\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)\dot{\theta}_2\sin\theta_2 + \frac{\rho b\pi}{3600}l_1^5(2\ddot{\theta}_1 + 2\dot{\theta}_1^2 - \dot{\theta}_1^3) + 2m_3l_1l_3\dot{\theta}_1\dot{\theta}_3\sin(\theta_1 + \theta_3) + 2m_3[l_1l_2\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2\sin(\theta_1 + \theta_2) + l_1l_3(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_3)\dot{\theta}_3\sin(\theta_1 + \theta_3) - l_1l_2(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)\dot{\theta}_2\sin(\theta_1 + \theta_2) + \left[m_2l_2^2 + \frac{1}{2}m_2l_1l_2\cos\theta_2 + 2m_3l_1l_2\cos(\theta_1 + \theta_2) \right] \ddot{\theta}_2 + 2m_3l_1l_3\cos(\theta_1 + \theta_3)\dot{\theta}_3 \quad (1)$$

$$T_2 = \left[m_2l_2^2 + \frac{1}{2}m_2l_1l_2\cos\theta_2 + 2m_3l_1l_2\cos(\theta_1 + \theta_2) \right] \ddot{\theta}_1 + \left(\frac{13}{12}m_2l_2^2 + 4m_3l_2^2 \right) \ddot{\theta}_2 - m_2l_1l_2\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2\sin\theta_2 + \frac{\rho b\pi}{1800}l_2^5(\ddot{\theta}_2 + \dot{\theta}_2^2 - \dot{\theta}_2^3) + 2m_3l_2l_3\ddot{\theta}_3\cos(\theta_2 + \theta_3) + 2m_3[l_1l_2\dot{\theta}_1^2\sin(\theta_1 + \theta_2) + l_2l_3\dot{\theta}_3^2\sin(\theta_2 + \theta_3) - l_1l_2(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)\dot{\theta}_1\sin(\theta_1 + \theta_2)] \quad (2)$$

$$T_3 = 2m_3l_1l_3\cos(\theta_1 + \theta_3)\ddot{\theta}_1 + 2m_3l_2l_3\cos(\theta_2 + \theta_3)\ddot{\theta}_2 + \frac{\rho b\pi}{1800}l_3^5(\ddot{\theta}_3 + \dot{\theta}_3^2 - \dot{\theta}_3^3) + \frac{49}{12}m_3l_3^2\ddot{\theta}_3 - 2m_3[l_1l_3\dot{\theta}_1^2\sin(\theta_1 + \theta_3) + l_2l_3\dot{\theta}_3^2\sin(\theta_2 + \theta_3)] \quad (3)$$

式中: m_1, m_2, m_3 —3 根连杆的质量; ρ —水的密度; b —每根连杆在水中的深度。

从式中可以发现:3 根连杆力矩的计算是相当复杂的,但机械鱼的转矩是由杆 1 ~ 杆 3 依次减小的,且与连杆质量和长度有关,适当地选择每个连杆的质量和长度可以提高机械鱼的游动速度和加速度。

1.3 机械鱼动力学分析

机械鱼在水中游动时,其周围的水场环境是时刻变化的并且非常复杂,因此要想得到准确的机械鱼受力情况是非常困难的^[10]。不考虑鱼体摆动时产生的涡旋对机械鱼游动的影响,采用液体的波动理论对机械鱼第 3 根连杆运动规律进行初步分析。假设仿生机械鱼本身是严格按照正弦波进行游动。根据动量守恒原理有:

$$m_f v_f = m_w v_w \quad (4)$$

式中: m_f —机械鱼质量; v_f —机械鱼的速度; m_w —排开水的质量; v_w —排开水的速度。

排开水的质量为:

$$m_w = \frac{3}{2}\rho b l^2 \sin 2\pi f t \tag{5}$$

式中: b —机械鱼在水中的深度; ρ —水的密度; f —机械鱼的频率。

由动量公式可得:

$$v_f = \frac{3}{2}\frac{\rho b l^3 \pi f}{m_f} \sin 2\pi f t \tag{6}$$

由公式(6)可以看出:机械鱼的速度与其舵机的摆动频率有关,和连杆长度的 3 次方、机械鱼浸入水中的深度成正比。

对机械鱼的速度公式求导可得其加速度,根据牛顿定律可得机械鱼驱动动力为:

$$F_f = m_f a = 3\rho b l^3 \pi^2 f^2 \cos 2\pi f t \tag{7}$$

根据流体力学相关知识^[11],可以认为仿生机械鱼在水中游动时所受游动阻力为:

$$F_r = \frac{3}{2}\frac{\mu \rho b l^3 \pi f}{m_f \sigma} S_a \sin 2\pi f t \tag{8}$$

式中: S_a —为仿生机械鱼浸入水中的整体面积; μ —为动力粘度; F_r —为仿生机械鱼游动阻力。

从公式(7 ~ 8)可以看出,机械鱼的摆动频率越快,其驱动动力就越大;机械鱼的游动阻力与鱼在水中的面积成正比、摆动频率、连杆长度的 3 次方成正比。

2 机械鱼的运动仿真

2.1 舵机摆动角度

机械鱼尾鳍的摆动提供了前进的动力,由于结构的原因该鱼的前 1/2 波动较小,后 1/2 有明显的波动,其中尾部波动幅度最大,鱼体波波幅可以近似的看成从鱼头末端至鱼尾逐渐增大。根据“大摆幅细长体理论”,鱼体

波曲线可由鱼体波幅包络线和正弦曲线合成^[12]。

结合本研究机械鱼的特点,可以得出鱼体波曲线的具体方程式为:

$$y_b(x,t) = (0.09x + 0.06x^2) \sin(0.62x + \omega t) \tag{9}$$

舵机的转动规律将直接影响该鱼的运动性能。根据实际 7:7:12 的连杆长度比算出拟合时直线的长度。结合机械鱼舵机的响应速度,并用直线拟合曲线来获得机械鱼 3 个舵机的转角规律。

为了得到更接近自然界鱼类的游动以及获取摆动角度的方便,本文将一个周期内的鱼体波离散成 18 份。根据鱼体波不同时刻的曲线方程,通过 Matlab 进行编程计算出 3 个舵机一个周期内的转动角度,给出一个周期内机械鱼 3 个舵机的部分转动角度,如表 1 所示。

表 1 舵机转动角度表

	0	2	4	6	8	10	12	14	16
$\theta_1/(^\circ)$	11.42	11.11	5.65	-2.56	-9.51	-11.97	-8.94	-1.67	6.42
$\theta_2/(^\circ)$	10.47	-14.04	-29.60	-31.82	-20.95	1.93	23.49	32.31	28.12
$\theta_3/(^\circ)$	-51.68	-51.77	-34.22	12.77	45.79	53.44	46.09	13.68	-33.65

仿生机械鱼的 3 个舵机依次循环执行转动角度,即可实现仿生机械鱼的前进运动。通过改变舵机执行这些角度的频率实现机械鱼游速的调节。

2.2 仿真结果分析

本研究根据得到的 3 个舵机转动角度表,并结合机械鱼的实际游动情况及舵机的性能,建立机械鱼仿真模型 3 个转动角度函数。考虑上一节进行的动力学分析所得到的结果,建立动力和阻力的函数,设置仿真时间为 1 s,迭代次数为 300,进行运动仿真,得出合力、加速度、速度等相关曲线。

机械鱼的合力与速度之间的关系如图 3 所示。

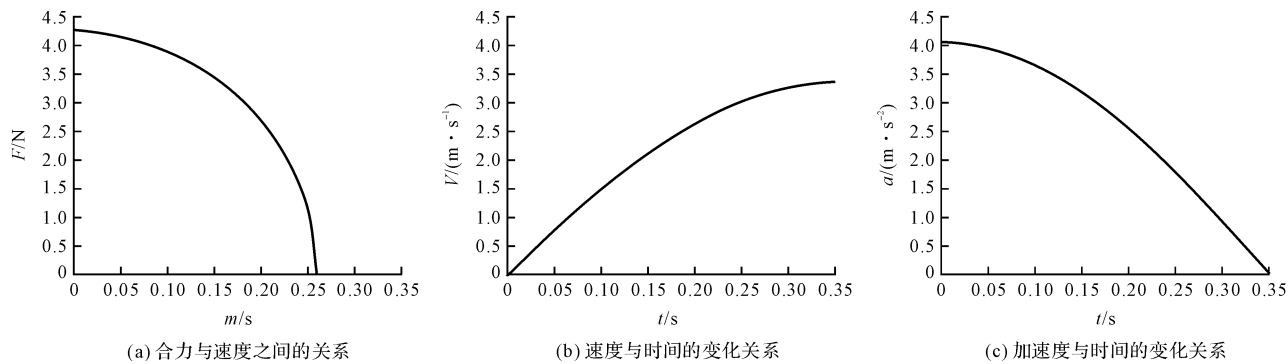
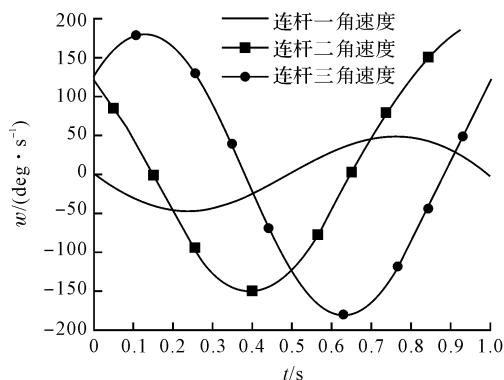


图 3 机械鱼游动仿真结果

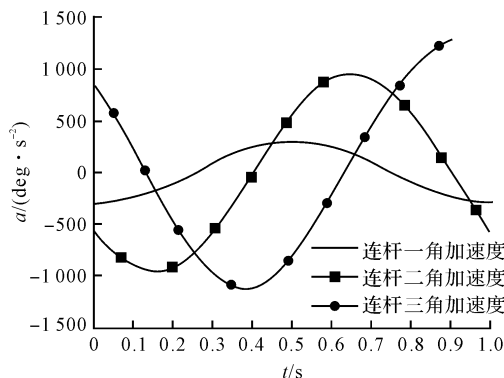
由图 3(a)可以看出:该机械鱼的速度越大,所受合力越小,游动阻力越大。当速度达到 0.26 m/s 时,其所受合力为零,游动阻力和驱动动力相等。图 3(b)为机械鱼的速度与时间的关系,由该图可以看出

鱼开始速度增加很快,几乎呈直线递增,当速度达到 0.24 m/s 时,其加速明显变慢。图 3(c)为机械鱼加速度图,其加速度随时间的增加而逐渐变小,0.3 s 以后其加速度呈直线下降直至零。

仿生机械鱼 3 个舵机摆动角速度及摆动角加速度随时间变化图如图 4 所示。



(a) 舵机转动角速度随时间变化规律



(b) 舵机转动角加速度随时间变化规律

图 4 机械鱼舵机摆动仿真结果

由图 4(a) 可以看出: 仿生机械鱼舵机摆动角速度幅值随着舵机距离鱼头的距离逐渐变大。1 号舵机的摆动幅度较小, 3 号舵机的摆动幅度最大, 且每个舵机的角速度都为正弦、余弦曲线, 符合所得舵机角度变化表及鱼体波曲线。由图 4(b) 可以看出: 舵机的摆动角加速度幅值逐渐变大, 说明 1 号舵机不需要较高的反应速度, 而 3 号舵机应具有较大的反应速度和加速度。因而该鱼舵机性能的要求是由 1 号到 3 号逐渐提高的。

对比图 3(a) 及图 4(b) 在 0.7 s 后的运动规律可以发现: 随着摆动角速度增大, 即摆动频率增大, 机械鱼的游动速度增大的趋势明显减缓, 这表明依靠增大频率来增大游动速度并不是十分合理, 因为当增大摆动频率时, 会使鱼体摆幅增大, 游动速度会因为鱼体摆幅增大而减小, 因而要获得较大的游动速度, 必须要选择合适的摆动频率。

3 实验验证

仿生机械鱼将在长 × 宽为 3 m × 2 m 的场地里进行相关实验研究。本研究通过记录机器鱼以不同频率游直线长度为 2.5 m 的时间来计算机器鱼的游动速

度, 机器鱼实验设备图如图 5 所示。



图 5 机器鱼实验设备图

游动时间随摆动频率的变化的实验结果如图 6 所示。

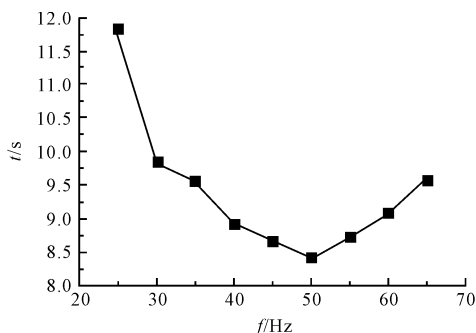


图 6 游动时间随摆动频率的变化的实验结果

从图 6 可以看出: 摆动频率 50 Times/s 时速度较快; 摆动次数在小于 40 Times/s 时, 其摆动次数越少, 机器鱼速度越慢; 在大于 55 Times/s 时, 摆动次数越多, 其速度越慢。这表明机器鱼游动速度随着摆动频率的下降和增大, 机器鱼的游动速度都会减小, 存在一个合理的摆动频率范围使得游动速度达到最大。

经过多次测量, 该鱼在摆动频率为 50 Times/s 的情况下游动时间约为 8.4 s, 计算可得该鱼的最高速度在 0.29 m/s 左右, 比仿真结果略大, 可能是由于计算推力时未考虑到鱼游动时产生的卡门涡街及尾流对鱼的影响。

4 结束语

本研究通过对鱼类的外形与运动模式的研究, 设计了一种 3 关节机械鱼, 建立机械鱼的结构模型及动力学模型, 初步分析了机械鱼运动过程中的游动阻力, 根据“大摆幅细长体理论”, 将鱼体波曲线进行离散化, 获取舵机摆动角度, 通过 Matlab 求解出舵机转动角度数组, 得到鱼体与舵机摆动相关运动规律。主要得出以下几点结论:

(1) 适当地选择 3 根连杆的质量和长度可以提高

机械鱼的游动速度和加速度;

(2)机械鱼的游动阻力与鱼在水中的面积成正比、与摆动频率、连杆长度的三次方成正比;

(3)机械鱼的摆动频率越大,其驱动动力就越大,机械鱼游动速度随着摆动频率的下降和增大,机器鱼的游动速度都会减小,存在一个合理的摆动频率范围使得游动速度达到最大。

参考文献(References):

- [1] 魏清平,王 硕,谭 民,等. 仿生机器鱼研究的进展与分析[J]. 系统科学与数学,2012,32(10):1274-1286.
- [2] 王安忆,刘贵杰,王新宝,等. 身体/尾鳍推进模式仿生机器鱼研究的进展与分析[J]. 机械工程学报,2016,52(17):137-146.
- [3] 杨 云,王浩南,李 辉,等. 一种改进的仿真机器鱼花样游泳策略[J]. 兵工自动化,2016,35(12):87-88.
- [4] 刘英想,刘军考,陈维山,等. 两关节机械鱼本体及动力学研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学机械工程学院,2007.
- [5] 肖 洋,蒋玉莲. 三关节机器鱼的动力学建模及其关键运动参数的研究[J]. 西南民族大学学报:自然科学版,2011,37(5):247-250.
- [6] 程建宇,庄礼贤,童秉纲. 三维变幅波板的游动[J]. 水动力学研究与进展,1991(A12):1-11.
- [7] Lighthill M J. Large amplitude elongated-body theory of fish locomotion[J]. **Proceedings of Royal Society of London**,1975(17):125-138.
- [8] 程健宇,庄礼贤,童秉纲. 鱼类鳗鲡目模式推进的游动性能分析[J]. 水动力学研究与进展,1988,3(3):87-97.
- [9] ZHU Q, WOLFGANG M J, YUE D, et al. Three-dimensional flow structures and vorticity control in fish-like swimming[J]. **Journal of Fluid Mechanics**,2002(468):1-28.
- [10] 陈 宏. 仿生机器鱼巡游和机动的运动机理研究[D]. 合肥:中国科学技术大学工程科学学院,2006.
- [11] FINNEMORE E J, FRANZINI J B. Fluid mechanics with engineering applications[M]. Beijing: China Machine Press,2006.
- [12] FABIEN C, FREDERIC B, ALBAN L. Three dimensional extension of lighthill's large-amplitude elongated-body theory of fish locomotion[J]. **Journal of Fluid Mechanics, Fluid. Mech.**,2011(674):196-226.

[编辑:张 豪]

本文引用格式:

张德义,赵鸿飞,王 琪,等. 三关节机械鱼的动力学及运动研究[J]. 机电工程,2017,34(12):1441-1445.

ZHANG De-yi, ZHAO Hong-fei, WANG Qi, et al. Dynamics and motion for three joint robotic fish[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2017, 34(12):1441-1445.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第1416页)

- [4] STAROSELSKY A, ANAND L. A constitutive model for hcp materials deforming by slip and twinning: application to magnesium alloy AZ31B[J]. **International Journal of Plasticity**,2003,19(10):1843-1864.
- [5] HE J J, LIU T M, ZHANG Y, et al. Deformation behavior of hot extruded Mg alloy AZ31 during compressive deformation[J]. **Materials Science and Technology**, 2013, 29(2):177-183.
- [6] JIANG L, JONAS J J, MISHRA R K, et al. Twinning and texture development in two Mg alloys subjected to loading along three different strain paths[J]. **Acta Materialia**, 2007;55(11):3899-3910.
- [7] XIONG Y, YU Q, JIANG Y Y. An experimental study of cyclic plastic deformation of extruded ZK60 magnesium alloy under uniaxial loading at room temperature[J]. **International Journal of Plasticity**,2014,53(1):107-124.
- [8] YU Q, ZHANG J X, JIANG Y Y. An experimental study on cyclic deformation and fatigue of extruded ZK60 magnesium alloy[J]. **International Journal of Fatigue**,2012,36(1):47-58.
- [9] DONG S, YU Q, JIANG Y Y, et al. Electron backscatter diffraction observations of twinning-detwinning evolution in a magnesium alloy subjected to large strain amplitude cyclic loading[J]. **Materials and Design**,2015(65):762-765.
- [10] YU Q, ZHANG J X, JIANG Y Y. Fatigue damage development in pure polycrystalline magnesium under cyclic tension-compression loading[J]. **Materials Science and Engineering A**,2011,528(25-26):7816-7826.
- [11] WU L, JAIN A, BROWN D W, et al. Twinning-detwinning behavior during the strain-controlled low-cycle fatigue testing of a wrought magnesium alloy, ZK60A[J]. **Acta Materialia**,2008,56(4):688-695.
- [12] XIONG Y, JIANG Y Y. Fatigue of ZK60 magnesium alloy under uniaxial loading[J]. **International Journal of Fatigue**,2014,64(7):74-83.

[编辑:李 辉]