文章编号:1008-1542(2016)02-0124-06 doi:10.7535/hbkd.2016yx02003

微通道铣削加工工艺的实验研究

徐燕小[1],邱清富[2],周 伟[2]

(1.厦门工学院机械工程系,福建厦门 361021;2.厦门大学机电工程系,福建厦门 361005)

摘 要:为了实现微通道的高效加工,提出利用微细铣刀对铝合金薄板进行微通道阵列结构加工,并通过改变加工工艺参数的方法,系统研究了铣削加工参数(背吃刀量、进给速度和主轴转速)对微通道的几何尺寸的影响规律。研究结果表明:选用直径为0.4 mm铣刀的条件下,加工出微通道的宽度随着背吃刀量和进给速度的增大而逐渐增大,且背吃刀量的影响较为明显。在6 000~21 000 r/min的主轴转速范围内,随着主轴转速的增加,微通道的宽度尺寸变化不大。因此,通过选择优化的切削加工工艺参数,可以实现微通道阵列结构的加工。

关键词:切削加工工艺;微通道;微细铣削;加工参数;几何尺寸

中图分类号:TH162 **文献标志码:**A

Experimental study on the milling process of microchannel

XU Yanxiao[1], QIU Qingfu[2], ZHOU Wei[2]

(1. Department of Mechanical Engineering, Xiamen Institute of Technology, Xiamen, Fujian 361021, China; 2. Department of Mechanical & Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China)

Abstract: In order to improve the milling efficiency of microchannels, the micro milling cutter is proposed to fabricate the microchannel array structures on the aluminum alloy sheet. The processing parameters such as back engagement, feed speed and spindle speed are varied to study their influence on the geometry size of microchannels. The result shows that when using the milling cutter with diameter of 0.4 mm, the width of microchannels increases with the increasing of back engagement and feed speed, especially for the back engagement. When the cutting speed is in the range of 6 000~21 000 r/min, the width size of microchannels barely changes with the increasing of spindle speed. So microchannel array structures can be fabricated through selecting optimized processing parameters.

Keywords: cutting technology; microchannel; micromilling; process parameter; geometry size

微通道是一种借助特殊微加工技术以固体基质制造的二维或三维微细通道结构。由于微通道结构具有体积小、结构紧凑、高表面积-体积比等特点,在传质、传热方面表现出优越的性能[1-4]。迄今为止,微通道结构已经广泛应用于微通道换热器、微通道反应器、微通道混合器等设备中[5-7]。目前,微通道可在金属、硅、玻璃和陶瓷等材质表面加工制造成形[8-13]。其中,硅是半导体器件的主要材料,具有较高的热传导性,容易加工出高深宽比的微通道[8]。玻璃因为化学性能稳定,有利于观察内部反应,常被用作微通道反应器的基片材

收稿日期:2015-12-06;修回日期:2016-01-30;责任编辑:王海云
基金项目:国家自然科学基金(51105387);厦门大学中央高校基本科研业务费项目(20720160079)
作者简介:徐燕小(1987—),女,江西吉安人,助教,硕士,主要从事微细加工技术及工艺优化方面的研究。
通讯作者:周 伟副教授。E-mail:weizhou@xmu.edu.cn

徐燕小,邱清富,周 伟.微通道铣削加工工艺的实验研究[J].河北科技大学学报,2016,37(2):124-129.
XU Yanxiao, QIU Qingfu, ZHOU Wei. Experimental study on the milling process of microchannel [J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2016, 37(2): 124-129.

料[9]。陶瓷因化学性能稳定、抗腐蚀能力强、熔点高，可制成微通道反应器用于高温和强腐蚀的场合[10]。金属因具有较大的导热系数和良好的延展性，可制成微通道散热器或换热器用于强放/吸热[11-13]。

随着微通道研究及其应用领域的迅速发展，微通道加工技术得到了广泛关注和研究，目前常见的微通道的加工技术主要有以下几种：LIGA、湿法刻蚀、干法刻蚀、特种加工和微细铣削[14-20]。LIGA 技术可以获得高精度、高表面质量和高纵横比的微结构，LIGA 技术不仅适用于塑料等高分子材料，还适用于金属、陶瓷等材料，但该方法因需要昂贵的同步辐射光源和 X 光掩模版[14-15]，加工成本高；湿法刻蚀加工成本较低，可以实现加工过程的批量生产，但精度较低[16]；干法刻蚀精度高，临界尺寸和腐蚀速率易于控制，对环境污染小，但需要产生低压气体等离子体的设备和尾气抽出系统，设备投资费用较大[17]；微细电火花加工与激光加工等特种加工方法适用范围广泛，可用于钻孔、切削、刻划等，但一般耗时较长且生产成本较高，不适宜大批量的生产加工[18-21]。

微细铣削是微细切削加工微通道的方式之一，通过传统的铣削方式经济而又较为快速地加工出微通道结构[22]。最近 CRUZA 等[23]和 ALMEIDA 等[24]利用铣削加工技术在不锈钢薄板上实现 0.75 mm 微通道加工，并在化学反应和费托合成中获得广泛应用。ZENG 等[25]利用叠片铣刀加工技术实现 1 mm 宽度以下的微通道结构加工，并在甲醇重整制氢微反应器中获得应用。本文使用微细铣刀对铝合金板表面进行微通道结构加工，同时对切削参数对微通道形貌的影响规律进行实验研究，分析微通道微观结构成形机理，并获得优化的工艺参数，为微通道阵列结构的加工提供技术参考。

1 实验部分

选用 3 mm 厚的 6061 铝合金板为加工对象，其主要成分如表 1 所示，使用直径为 0.4 mm 的钨钢立铣刀在 CNC6040 数控雕刻机(如图 1 所示)上对铝合金板进行微通道加工，加工出长度为 10 mm，深度为 1 mm，间距为 1 mm的微通道阵列结构。为研究切削参数对微通道尺寸和表面形貌的影响规律，分别采用不同的背吃刀量 a_p、主轴转速 n 和进给速度 v_f 等切削加工参数进行微通道加工实验。使用日立 SU70 场发射扫描电镜观察微通道的形貌尺寸。

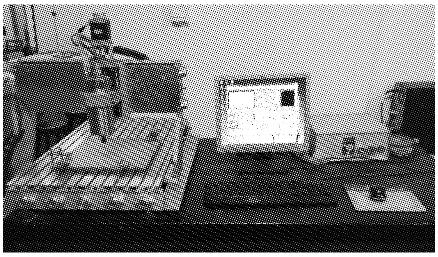


图 1 CNC6040 数控雕刻机

Fig. 1 CNC6040 engraving machine

表 1 6061 铝合金板主要化学成分

Tab. 1 Composition of the 6061 Aluminum alloy sheet

成分	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Others	Al
质量分数	0.4～0.8	0.7	0.15～0.4	0.15	0.8～1.2	0.04～0.35	0.25	0.15	0.15	其余

2 结果与讨论

2.1 微通道铣削加工成形机理

图 2 所示为微细铣刀铣削加工微通道示意图，微细铣刀为二刃的键槽铣刀。

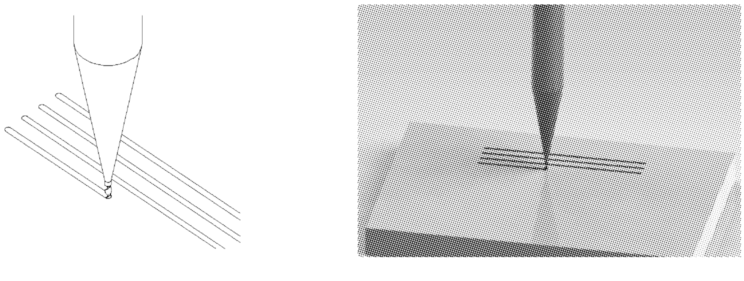


图 2 微细铣刀加工微通道示意图

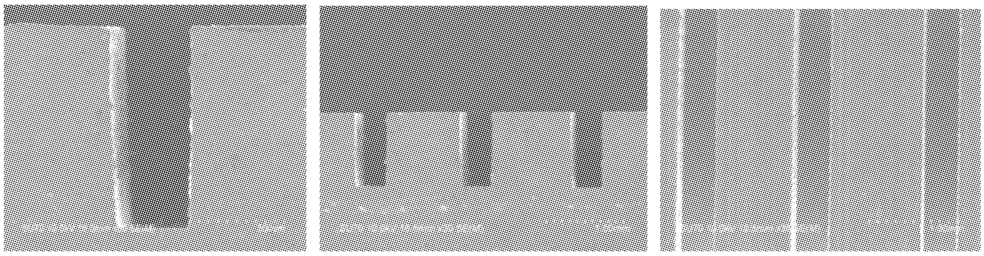
Fig. 2 Schematic of microchannel fabricated with micro milling cutter

微细铣刀铣削加工微通道过程的实质是：被切削的铝合金在微细铣刀切削刃和前刀面的挤压作用下，首先产生压缩弹性变形，当剪应力超过屈服极限后，产生剪切滑移的塑性变形，随着微细铣刀的继续前进，切削力增大，切削刃附近金属剪应力超过强度极限而被剥离，最终铣削出微通道结构。而剥离的金属层在刀具前刀面的挤推作用下，沿前刀面流出，产生切屑。在切屑排出的过程中，由于切屑从微细铣刀和已加工表面之间排出，因此会对已加工表面进行挤压，影响已加工表面形貌，从而导致了微通道尺寸误差和形貌误差的产生。

2.2 切削加工参数对微通道轮廓尺寸的影响

2.2.1 背吃刀量

图 3 为在背吃刀量为 0.08 mm 条件下微细铣刀加工的部分微通道截面的 SEM 图。实验切削条件为铣刀直径0.4 mm，主轴转速 n=18 000 r/min，进给速度 v_f=20 mm/min，背吃刀量 a_p 依次取值 0.02，0.04，0.06，0.08，0.10，0.12 mm，测得实验中加工的微通道上边缘宽度分别为 406，414，421，429，434，438 μm，如图 4 所示。



a) 单个微通道截面　b) 多个微通道截面　c) 多个微通道俯视

图 3 背吃刀量为 0.08 mm 条件下加工的微通道截面 SEM 图

Fig.3 SEM of the microchannel fabricated by using micro milling cutter with 0.08 mm back engagements

从图 3 和图 4 可以看出，当背吃刀量较小（a_p=0.02 mm）时，微通道宽度尺寸与微细铣刀直径（400 μm）相差不大；随着背吃刀量的不断增大，微通道宽度尺寸不断变大，当 a_p=0.12 mm 时，微通道宽度尺寸为 438 μm；当 a_p=0.14 mm 时，铣刀发生断刀情况，故最大背吃刀量选择为 0.12 mm（对应铣刀直径为 0.4 mm）。

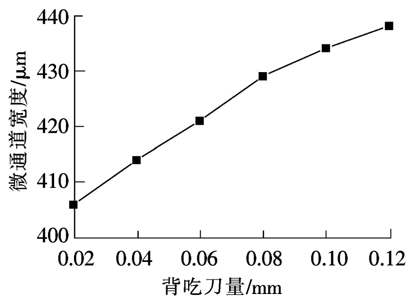


图 4 背吃刀量对微通道截面宽度尺寸的影响

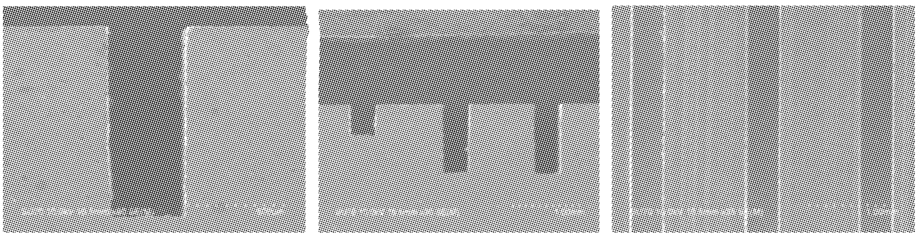
Fig.4 Influence of back engagement on the width size of the microchannel

原因分析：背吃刀量 a_p 决定了每刀进给加工时切屑量产生的大小。背吃刀量小，每刀进给产生的切屑量就小，加工排屑的过程中，切屑对已加工表面（微通道侧面）的挤压量小，变形小，因而加工出的微通道宽度尺寸误差较小；背吃刀量大，每刀进给产生的切屑量就大，在加工排屑的过程中，大量切屑对已加工表面（微通道侧面）的挤压量大，变形大，因而加工出的微通道宽度尺寸误差较大。因此，随着背吃刀量增大，加工出的微通道截面宽度尺寸也不断增大，即微通道宽度尺寸误差增大。

2.2.2 进给速度

实验切削条件为铣刀直径 0.4 mm，主轴转速 n=18 000 r/min，背吃刀量 a_p=0.05 mm，进给速度 v_f 依次取值 5，10，15，20，25，30 mm/min，测得实验中加工的微通道上边缘宽度分别为 404，410，414，417，421，424 μm。图 5 所示的是在进给速度为 15 mm/min 条件下微细铣刀加工的微通道截面 SEM 图，图 6 所示的是进给速度对微通道截面宽度尺寸影响图。

从图 5 和图 6 可以看出，随着进给速度的增加，微通道宽度尺寸逐渐增大。当选择较小的进给速度时，微通道宽度尺寸与微细铣刀直径（400 μm）相差不大；随着进给速度的不断增大，微通道宽度尺寸不断变大，当进给速度增大到 v_f=25 mm/min 时，微通道宽度尺寸约为 421 μm；当 v_f=30 mm/min 时，微通道宽度尺寸可以达到 424 μm，但铣刀加工过程中容易发生断刀情况。原因分析：由于背吃刀量 a_p 相同，进给速度不同，导致铣刀单位时间内产生的切屑量不同。进给速度小，单位时间内产生的切屑量小，排屑所需时间短，切



a) 单个微通道截面　　b) 多个微通道截面　　c) 多个微通道俯视

图 5　进给速度为 15 mm/min 条件下加工的微通道截面 SEM 图

Fig. 5　SEM of the microchannel fabricated by using micro milling cutter with 15 mm/min feed speed

屑对已加工表面（微通道侧面）的挤压时间短，变形小，因而加工出的微通道宽度尺寸误差较小；进给速度大，单位时间内产生的切屑量大，排屑所需时间长，切屑对已加工表面（微通道侧面）的挤压时间长，变形大，因而加工出的微通道宽度尺寸误差较大；因而，随着进给速度的增大，加工的微通道宽度尺寸误差增大。由于每刀进给产生切屑量是一定的，只是排屑时间稍有区别，因此相比背吃刀量，进给速度对微通道截面宽度尺寸的影响较小。

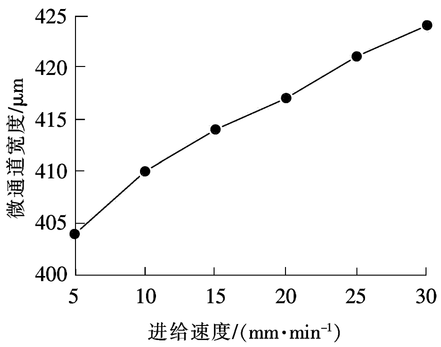
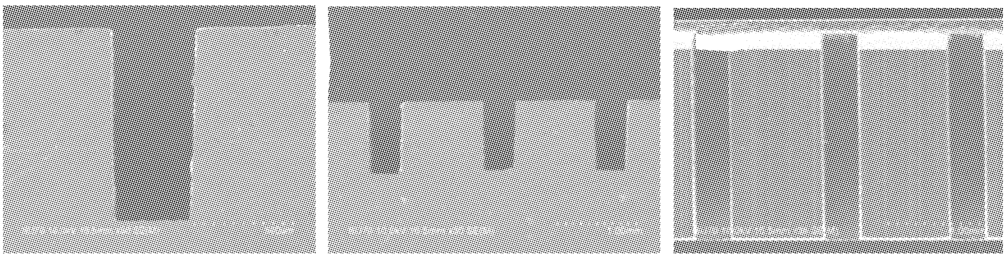


图 6　进给速度对微通道截面宽度尺寸的影响

Fig. 6　Influence of feed speed on the width size of the microchannel

2.2.3　主轴转速

当实验切削条件为铣刀直径 0.4 mm，进给速度 v_f=20 mm/min，背吃刀量 a_p=0.05 mm，主轴转速的取值范围在 6 000～21 000 r/min 之间，对应换算切削速度为 7.54～26.38 m/min。图 7 是在主轴转速为 15 000 r/min条件下微细铣刀加工微通道截面的 SEM 图，图 8 是主轴转速对微通道截面宽度尺寸的影响图。



a) 单个微通道截面　　b) 多个微通道截面　　c) 多个微通道俯视

图 7　主轴转速为 15 000 r/min 条件下加工的微通道截面 SEM 图

Fig. 7　SEM of the microchannel fabricated by using micro milling cutter with 15 000 r/min spindle speed

从图 8 可以看出，当主轴转速在 6 000～21 000 r/min 变化时，微通道宽度尺寸呈现出随主轴转速的增加而略微减小的趋势，但是整体上主轴转速对微通道截面宽度尺寸影响不大。这主要是由于背吃刀量和进给速度相同，每刀进给时产生的切屑量和排屑时间相差不大，对已加工表面（微通道侧面）的挤压量和时间基本一致，尽管主轴速度变化很大但是由于铣刀直径小，实际上的切削速度变化范围不大。因此，主轴速度对微通道截面宽度尺寸影响不显著。

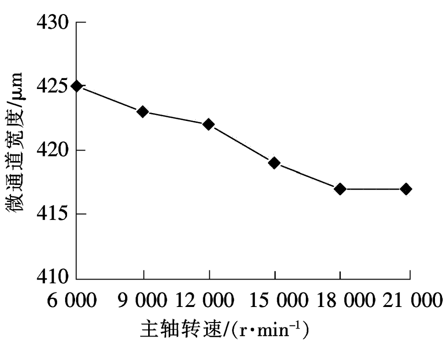
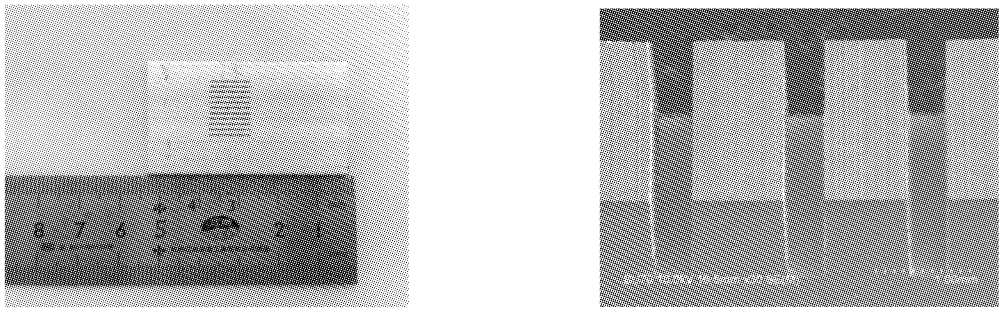


图 8　主轴转速与微通道截面宽度尺寸关系图

Fig. 8　Influence of cutting speed on the width size of the microchannel

2.3 微通道阵列结构

图 9 为采用直径 0.4 mm 的微细铣刀进行切削参数对微通道轮廓尺寸影响规律的实验而加工出的微通道结构图和 SEM 图。选择切削参数：背吃刀量 $a_p=0.05$ mm，进给速度 $v_f=20$ mm/min，主轴转速 $n=18\ 000$ r/min。因此，通过工艺参数的对比分析与优化，可以利用微细铣削加工工艺获得微通道阵列结构。



a) 外观图　　b) SEM 图

图 9　0.4 mm 微通道阵列结构

Fig. 9　Microchannel array fabricated by using the micro milling cutter with 0.4 mm diameter

3 结　论

利用直径 0.4 mm 的微细铣刀可以在铝合金板上实现微通道结构的加工，并重点研究了切削加工参数对微通道宽度及表面形貌的影响。结果表明：微通道截面宽度尺寸随着背吃刀量和进给速度的增加而增大，且背吃刀量对微通道截面宽度尺寸的影响较大；切削速度对微通道截面宽度尺寸的影响最小。选用直径 0.4 mm 的微细铣刀，在选择合适切削参数的条件下，可以实现微通道阵列结构的加工。

参考文献/References：

[1] KOLB G. Review: Microstructured reactors for distributed and renewable production of fuels and electrical energy[J]. Chemical Engineering and Processing, 2013,65:1-44.

[2] WORZ O, JACKEL K P, RICHTER T, et al. Microreactors-a new efficient tool for reactor development[J]. Chemical Engineering & Technology, 2001,24(2):1029-1033.

[3] 王桂芝，曲家波，魏军风，等. 国外甲醇制氢微通道反应器开发现状[J]. 化学工业，2011，29(6):21-26.
WANG Guizhi, QU Jiabo, WEI Junfeng, et al. Current development of micro-channel reactor for hydrogen production from methanol reforming in the world [J]. Chemical Industry, 2011,29(6):21-26.

[4] KIWI-MINSKER L, RENKEN A. Microstructured reactors for catalytic reactions[J]. Catalysis Today, 2005,110 (1/2): 2-14.

[5] 钟毅，尹建成，潘晟旻. 微通道换热器研究进展[J]. 制冷与空调，2009,9(5):1-4.
ZHONG Yi, YIN Jiancheng, PAN Shengmin. Research development of microchannel heat exchanger[J]. Refrigeration and Air-Conditioning, 2009,9(5):1-4.

[6] 韦广梅，曾尚红. 微反应器的发展现状[J]. 世界科技研究与发展，2005,27(5):45-50.
WEI Guangmei, ZENG Shanghong. State-of-the-art of microreactor[J]. World Science Technology Research & Development, 2005, 27(5):45-50.

[7] SU Yuanhai, CHEN Guangwen, KENIG E Y. An experimental study on the numbering-up of microchannels for liquid mixing[J]. Lab on a Chip, 2015,15(1):179-187.

[8] LOSEY M W, SCHMIDT M A, JENSEN K F. Microfabricated multiphase packed-bed reactors: Characterization of mass transfer and reactions[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2001,40(12):2555-2562.

[9] CHEIN R Y, CHEN Y C, CHANG C M, et al. Experimental study on the performance of hydrogen production from miniature methanol-steam reformer integrated with swiss-roll type combustor for PEMFC[J]. Applied Energy, 2013,105:86-98.

[10] MURPHY D M, MANERBINO A, PARKER M, et al. Methane steam reforming in a novel ceramic microchannel reactor[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013,38(21):8741-8750.

[11] MEI Deqing, QIAN Miao, LIU Binhong, et al. A micro-reactor with micro-pin-fin arrays for hydrogen production via methanol steam

reforming[J]. Journal of Power Sources,2012,205(5):367-376.

[12] REUSE P, RENKEN A, HASS-SANTO K, et al. Hydrogen production for fuel cell application in an autothermal micro-channel reactor [J]. Chemical Engineering Journal,2004,101(1/2/3):133-141.

[13] GANLEY J C, SEEBAUER E G,MASEL R I. Development of a microreactor for the production of hydrogen from ammonia[J]. Journal of Power Sources,2004, 137(1):53-61.

[14] 吕春华,殷学锋,刘东元,等.高深宽比 SU-8 微结构的简易加工技术[J]. 浙江大学学报(工学版),2006,40(8):1289-1292.
LYU Chunhua, YIN Xuefeng, LIU Dongyuan,et al. Simplified microfabrication technology for producing SU-8 microstructures with high aspect ratio[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science),2006,40(8):1289-1292.

[15] LORENZ H, DESPONTM, FAHRNI N, et al. High-aspect-ratio, ultrathick, negative-tone near-UV photoresist and its applications for MEMS[J]. Sensors and Actuators A,1998,64(1):33-39.

[16] KUNDU A,PARK J M, AHN J E, et al. Micro-channel reactor for steam reforming of methanol[J]. Fuel, 2007,86(9):1331-1336.

[17] RANGELOW I W. Dry etching-based silicon micro-machining for MEMS[J]. Vacuum,2001,62(2/3):279-291.

[18] GANLEY J C, RIECHMANN K L, SEEBAUER E G, et al. Porous anodic alumina optimized as a catalyst support for microreactors[J]. Journal of Catalysis,2004,227(1):26-32.

[19] LU B,CHEN K, MENG W J, et al. Fabrication, assembly and heat transfer testing of low-profile copper-based microchannel heat exchangers[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2010, 20(11): 115002.

[20] ZHOU Wei, DENG Wenjun, LU Longsheng, et al. Laser micro-milling of microchannel on copper sheet as catalyst support used in microreactor for hydrogen production [J]. International Journal of Hydrogen Energy,2014,39(10):4884-4894.

[21] PEEAL N R,MUBAYI A,KUNZRU D. Steam reforming of ethanol over $Rh/CeO_2/Al_2O_3$ catalysts in a microchannel reactor[J]. Chemical Engineering Journal,2011,167(2/3):578-587.

[22] DENKENA B, HOFFMEISTER H W, REICHSTEIN M, et al. Micro-machining processes for microsystem technology[J]. Microsystem Technology,2006,12(7):659-664.

[23] CRUZA S,SANZA O, POYATOA R, et al. Design and testing of a microchannel reactor for the PROX reaction[J]. Chemical Engineering Journal,2011,167(2/3):634-642.

[24] ALMEIDA L C, SANZ O, D'OLHABERRIAGUE J, et al. Microchannel reactor for Fischer-Tropsch synthesis: Adaptation of a commercial unit for testing microchannel block[J]. Fuel,2013,110:171-177.

[25] ZENG Dehuai, PAN Minqiang, WANG Liming, et al. Fabrication and characteristics of cube-post microreactors for methanol steam reforming[J]. Applied Energy,2012,91(1):208-213.

《河北科技大学学报》《河北工业科技》荣获“中国科技论文在线优秀期刊”

在教育部科技发展中心组织的 2014 年度“中国科技论文在线优秀期刊”暨“中国科技论文在线科技期刊优秀组织单位”评选活动中,《河北科技大学学报》和《河北工业科技》首次双双荣获“中国科技论文在线优秀期刊”二等奖,我校连续第 4 次当选“中国科技论文在线科技期刊优秀组织单位”。

本次评奖的参评对象为截至 2014 年 12 月 31 日收录在“中国科技论文在线”《科技期刊》栏目的教育部主管的 900 余种期刊,共评选出“中国科技论文在线优秀期刊”一等奖 111 项、二等奖 183 项,“中国科技论文在线科技期刊优秀组织单位”64 家。

(河北科技大学学报编辑部)