

表面反应功能结构制造领域的研究现状及发展趋势*

汤 勇, 潘敏强, 王清辉

(华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广州 510640)

摘 要: 表面反应功能结构是指在反应载体表面加工出具有不同形貌、不同尺度、不同维数, 并具有反应功能的结构。表面反应功能结构设计和制造是微反应器大规模推广应用的核心技术。文中在对当前表面反应功能结构的表现形式和主动设计方法分析基础上, 较详细论述了表面反应功能结构新的制造技术, 指出未来表面反应功能结构研究的重点应集中在不同功能结构的优选、特定功能结构的主动设计以及适合不同反应功能结构的高效、低成本制造方法探索等方面。

关键词: 表面功能结构; 微反应器; 微通道; 微结构

中图分类号: TQ051

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2010)02-0007-08

Research State and Development Trend of Functional Surface Structures for Reaction in Manufacture Field

TANG Yong, PAN Min-qiang, WANG Qing-hui

(School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640)

Abstract: Functional surface structures for reaction refer to the structures with different morphology, scales and dimensions processing on the support surface for reaction. The design and manufacture of functional surface structures for reaction are one of the key issues for wide application. Based on analyzing the category and active-design method of functional surface structures for reaction, the new manufacture techniques of functional surface structures are discussed in detail. Furthermore, the priority research areas for the future study of functional surface structures for reaction are brought forward, which aim to the optimization and active design of surface structures, high-performance low-cost manufacture methods for different functional surface structures.

Key words: functional surface structure; micro-reactor; microchannel; microstructure

0 引 言

微加工技术的不断进步使得微反应器未来几年内在化学、化工、生物、材料和能源等领域逐渐应用成为可能。所谓微反应器是指一种借助微加工技术在固体基质表面制造出各种形状微通道或微结构并用于进行化学反应的三维结构单元。微通道一般是指当量直径小于500 μm 的流体通道。广义的微反应器是指以反应为主要目的, 以一个或多个微

反应器为主, 同时还可能包括有微混合、微换热、微分离、微萃取等辅助装置以及微传感器和微执行器等关键组件的一个微反应系统^[1]。

在微反应器内, 微通道或微结构的引入不仅可以有效强化热量和质量传递过程, 优化复杂的反应过程, 有效提高反应效率, 还可以大大提高流体与通道接触的比表面积, 使得整个反应器的体积比常规反应器的体积小一个数量级以上^[2]。但是, 如何在有限反应空间实现高反应效率是当前微反应器推广应用的共性难题, 其技术关键是表面反应功能结构的设计和制造。文中将微反应器内的微通道和微结构归纳为表面反应功能结构范畴, 其定义概括为: 在反应载体表面加工出具有不同形貌、不同尺度、

收稿日期: 2009-12-07

基金项目: *国家自然科学基金重点项目(50930005); 国家自然科学基金项目(50805052, 50975092); 广东省自然科学基金项目(8451064101000320)

作者简介: 汤勇(1962—), 男(汉), 安徽霍邱人, 教授, 博士生导师。

不同维数,并具有反应功能的结构。在微反应器内采用何种功能结构形式的反应载体是取决催化剂附着效果和反应效率的关键,提出适合高效率低成本表面反应功能结构制造方法则是微反应器推广的根本前提。文中在对当前表面反应功能结构的表现形式和主动设计方法分析的基础上,进而详细论述了一些表面功能结构新的制造技术,并进一步分析表面反应功能结构未来的发展趋势。

1 表面反应功能结构的发展概况

1.1 表面反应功能结构的表现形式

当前,微反应器主要采用整体结构和层叠结构两种构造方式,而微通道和微结构是该两种微反应器构造方式中应用最为广泛的表面反应功能结构。微通道包括单一微通道、平行微通道阵列、蛇型微通道、多孔材料形成的微流道等多种形式,而微结构则主要包括微柱体、烧结结构、纤维表面茸状结构等。

1.1.1 整体结构中的表现形式

整体结构是通过微加工方法在单一的金属块或硅晶片表面制造出微通道^[3-4]或者微结构^[5-6],让流体在微通道内进行气化、换热或反应。该种构造方式制造相对简单,但局限于实现单一功能的反应,难以整合含有复杂结构和多重反应的反应系统。Pattekar等^[3]研究了一种微通道反应器,如图1(a)所示,整合了加热器、传感器和反应室,在硅芯片加工出一些平行微通道,其深度为200~400 μm ,用于涂染反应催化剂。Pattekar等^[7]利用微加工技术在一块36 mm×36 mm的硅片上加工出横截面积为

1000 μm ×230 μm 的微通道,在表面附着有33 nm的铜层作为催化剂,通过两个不锈钢端盖压紧微通道片形成反应物和产物所需要的通道进行甲醇重整制氢反应,如图1(b)所示。Kikas^[4-8]等提出了一款逆流微通道反应器,如图1(c)所示,上下盖板各加工出一个环形微通道,分别用于气体混合和反应。两个盖板合起来形成气体逆流流道,利用甲醇部分氧化重整反应所放出的热量来预热进入混合通道中的气体。

Shannon1等^[9]研究了一种整合了反应器和燃烧器的氨气分解产氢微反应系统,反应部分采用微柱体结构,利用电火花在1100棒状铝合金上加工出到基板深3 mm的沟槽而形成方形柱的阵列,每个柱宽度都是300 μm ,每个柱之间的距离为260 μm ,在25 mm×50 mm区域上加工出3350个柱状结构,如图3所示。试验结果表明,在600 $^{\circ}\text{C}$ 下该反应系统能够将99 %的氨气转化来输出60 W的功率。

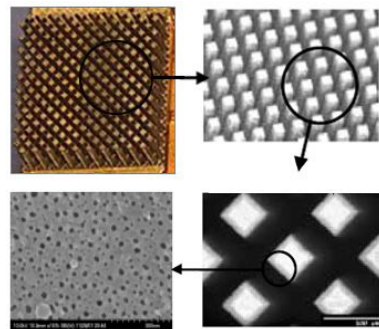


图2 整体结构中所采用的微柱体结构

Fig.2 Microstructures used in the monolithic construction

1.1.2 层叠结构中的表现形式

层叠结构^[10-11]则是在很薄的硅片、金属或其他材料的薄板表面加工出微通道或微结构,然后将多片具有反应功能结构的薄板相互层叠在一起,经焊接或其他紧固方式连接成单一的反应单元。层叠结构使吸热和放热反应整合在一个部件内成为可能,并且可以根据反应需求增加或减少薄板的数量。

平行微通道是层叠结构中应用较广泛的表面反应功能结构,其中在燃料电池、微换热器和制氢燃料处理系统中得到广泛的应用。当前,燃料电池双极板的流道主要包括平行微通道、蛇形微通道等形式^[12],如图3所示。其中蛇型微通道是比较流行的一种流场结构,分单通道和多通道两种,该种流道可以使电池内部气体和水分布较均匀,并且可以

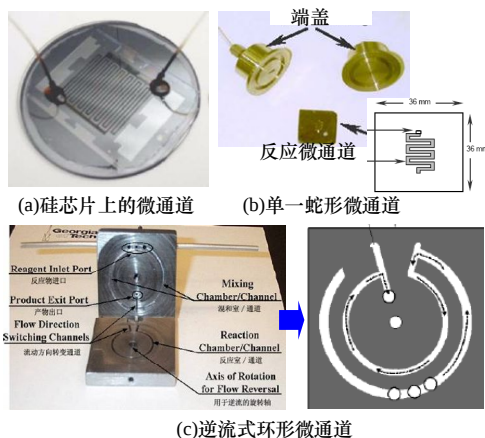


图1 整体结构中所采用的微通道

Fig.1 Trend of macro-structure for thermal-emissive

获取较好的传热传质效果。

微换热器一般采用层叠构造方式, 由多片含有平行微通道的薄板交错叠合而成^[13], 用于两种冷流体之间的换热, 可以形成错流、逆流和顺流等多种方式, 如图4(a)所示。Henning等^[14]提出一种电加热微通道换热器, 采用薄片堆叠结构, 由3个用来放置电加热棒的块、6个表面刻有微通道的金属薄片和2块盖板共同组成, 如图4(b)所示, 并且对平行微通道和正弦曲线微通道的性能进行了试验对比。

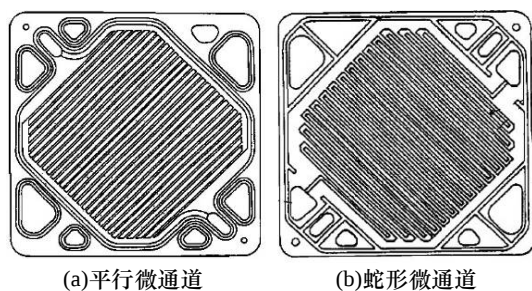


图3 双极板采用的微通道结构
Fig.3 Microchannels used in bipolar plate

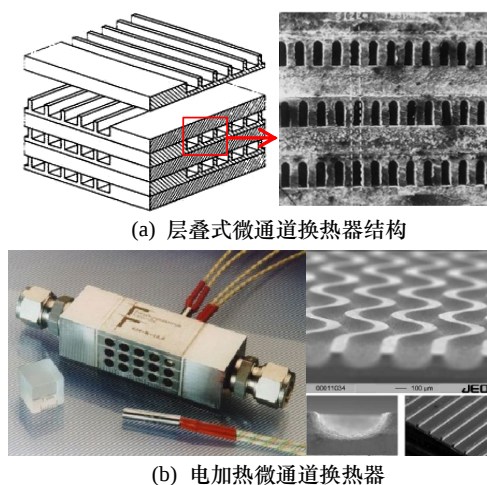


图4 微换热器采用的微通道结构
Fig.4 Microchannels used in micro heat exchanger

在制氢燃料处理系统方面, Tonkovich等^[15]研发了一种基于不锈钢薄片层叠原理的甲烷部分氧化反应系统, 由9块具有不同微结构的不锈钢片层叠而成, 如图5所示, 分别实现燃烧、反应、预热、淬火和间隔等不同的功能。实现反应功能的薄片采用双面微通道结构, 在薄片双面分别加工出37条平行微通道: 长3500 μm 、深1500 μm 、宽254 μm , 微通道之间的肋宽为254 μm 。

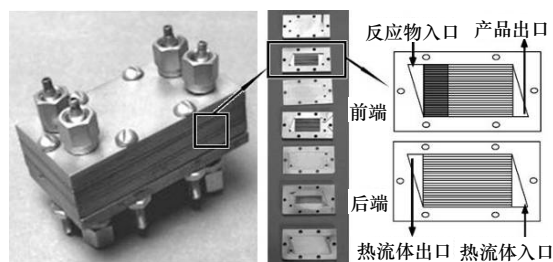


图5 微反应器采用的平行微通道结构
Fig.5 Parallel microchannels used in microreactor

1.2 表面反应功能结构的主动设计

微反应器内采用何种表面反应功能结构才能使得在有效反应体积内获取高反应效率, 一直是工程和技术人员亟待解决的难题。过去研究人员主要通过试验方法对若干种表面反应功能结构进行性能对比, 从而优选当中的最佳值, 这属于一种“被动式”的功能结构设计方法, 缺乏有效的理论指导。近年来, 研究人员尝试通过对表面反应功能结构进行数字化建模, 综合考虑各种表面反应功能结构, 试图实现功能结构的“主动设计”。

在燃料电池方面, Boersma等^[16]通过建立一个水力阻力模型来分析固态氧化物燃料电池堆内气体流动, 该水力阻力模型对逆流通网络建立了方程式, 可以通过层叠堆的平均流量与最顶端的流量之间的比值求解。Koh等^[17]通过建立一个系统算法对燃料电池内置型气体分配管道的压降和流量分布进行分析。

在微通道反应器方面, Commerge等^[18]通过建立一个近似压降模型对微通道阵列的流体速度和滞留时间分布进行优化, 并且对微通道几何形状和特征尺寸对微通道内流体分布的影响进行定性分析。Amador等^[19]利用电阻网络模型对连续型和分枝型两种微通道模型进行了分析, 并提出在分流和合流腔降低压降或者采用非均匀横截面腔室结构两种方法来实现微通道阵列流量的均匀分布。Chen等^[20]对分枝型微通道网络的热传递和压降进行了分析, 并对分枝型微通道网络 and 传统平行微通道网络进行了对比。Pan等^[21]建立了具有三角形分布腔微通道流速分布模型, 在Fluent分析流动特性基础上, 将三角形分布腔划分为多个近似矩形流道, 提出了一个等价简化阻力网络模型, 并建立微通道和近似矩形流道之间速度和压降关系。

2 表面反应功能结构的制造技术

当前,表面反应功能结构(包括微通道和微结构)的加工方法主要包括:LIGA技术、化学蚀刻技术、反应离子刻蚀、电火花和激光加工等。各种微加工技术有各自的特点,所加工的尺度范围也有所不同,但也存在某些缺点。如LIGA技术尽管可以获得高精度、高表面质量和高纵横比的微通道或微结构,并且适合于很宽的材料范围,如金属、金属合金、陶瓷和高分子材料等,但昂贵的同步辐射光源和X光掩模版限制了其广泛应用^[22-23]。反应离子刻蚀加工高深宽比微通道时,高各向异性依靠反应离子在通道底表面的刻蚀和活性离子在侧壁的抑止作用相结合以保证获得深高宽比结构。但随着通道刻蚀深度的增加,等离子体中反应离子在其中的传输过程中接触刻蚀表面越来越困难,刻蚀表面反应的生成物也越来越难以从孔或槽里出来,因此与低深高宽比的刻蚀相比较,一般会出现刻蚀滞后、刻蚀停止、侧壁弯曲和开槽效应等现象^[24],目前硅的刻蚀速率一般不大于 $22\text{ }\mu\text{m}/\text{min}$ ^[25]。

因此,研究者一直试图寻找适合不同表面反应功能结构的高效低成本制造技术,下面将对部分表面反应功能结构制造技术作详细论述。

2.1 表面微通道的制造技术

2.1.1 微细切削

利用微细切削加工技术在金属薄片上加工微通道,可以获得较大的加工效率和表面质量,目前主要包括微细车削和微细铣削加工两种方式。在微细车床上实现金属薄片上加工微通道的原理如图6所示^[26]。金属薄片被绕在一个安装在微细车床主轴端的圆盘上,然后借助弹簧拉力拉紧,可调整式的微刀具被安

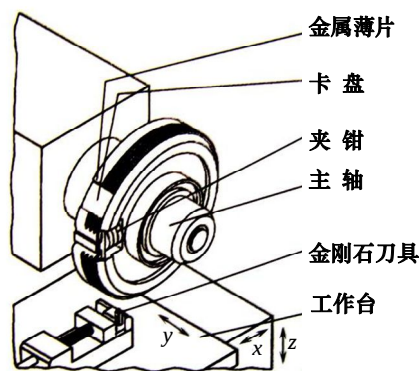


图6 微车削在金属薄片加工微通道原理

Fig.6 The principle of fabricating microchannels on the metal sheets by micro-turning

装在圆盘下面可滑动的支撑架上,使用CNC装置控制支撑架和主轴,沿着平行于通道的方向,以微刀具的形状切入金属薄片表面。

德国FZK研究中心采用高精密微细铣削加工方法制造金属薄片上的微通道^[26],如图7所示。金属薄片固定在高精度真空吸盘上,真空吸盘安装在X-Z工作台上,金刚石微刀具安装在高速旋转的主轴上,金刚石微刀具的切削速度可以通过改变主轴转速调整,通过旋转工作台可以改变微通道的加工方向,通过改变金刚石微刀具的形状可实现矩形、三角形和半圆形通道的微加工。

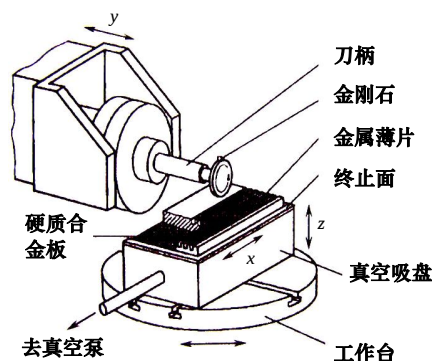


图7 微铣削在金属薄片加工微通道原理图

Fig.7 The principle of fabricating microchannels on the metal sheets by micro-milling

Pan等^[27-28]提出一种高深宽比微矩形通道多刀铣削加工工艺,通过多把薄片铣刀的叠合实现具有分布腔结构的多个高深宽比微通道的同时加工,如图8所示。加工时,通过4个固定螺栓将薄板锁紧在固定板上,然后利用虎钳夹固定板,通过固定在主轴上的薄片铣刀的主运动和z方向运动,配合工作台x和y方向两个运动,可以实现微通道三个方向的加工。

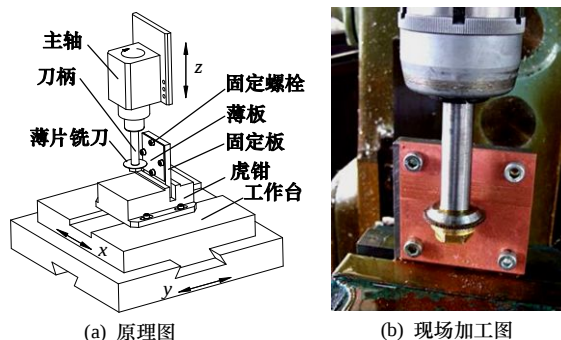


图8 薄片铣刀加工高深宽比微通道

Fig.8 Milling high-aspect-ratio microchannels by slotting cutters

2.1.2 微细薄板成形工艺

传统燃料电池双极板一般采用石墨作为基板材料,存在制造成本高和效率低等问题。采用金属双极板并提出高效率的制造方法是目前燃料电池双极板一个重要发展方向。Peng和Lai等^[29-31]提出微细薄板成形方法来加工不锈钢板的微流道,如图9所示,并对燃料电池极板几何构形设计对极板成形质量的影响进行了仿真建模分析和试验研究。结果表明,对于燃料电池极板这样复杂,高密度流道的微细薄板成形工艺,变形过程是一个非常不均匀的过程,变形主要集中在凸凹模的圆角处,材料流动不畅,变形是典型的小变形大应变的微细成形。

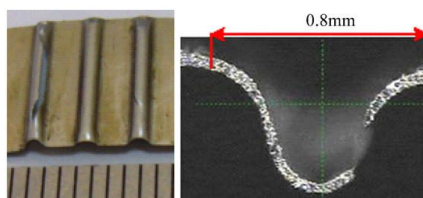


图9 微薄板成形的微流道

Fig.9 Micro flow channels formed by micro sheet forming

2.1.3 热压成型

Koç等^[32]利用热压成型方法在薄板表面加工多孔微细特征结构,通过在一定加热温度下和压力下,将铜粉颗粒压紧在薄板表面,可以形成用于燃料电池和其他传热传质装置的微通道结构,如图10所示。试验中所制造的微通道高度和宽度在200~400 μm之间,孔隙率在30%~50%之间。试验结果表明,压力和加热温度对孔隙率有着重要影响,粗糙基板表面则有助于形成强有力的粘结力和孔隙率,均匀的粉末颗粒尺寸有利于获取高孔隙率。

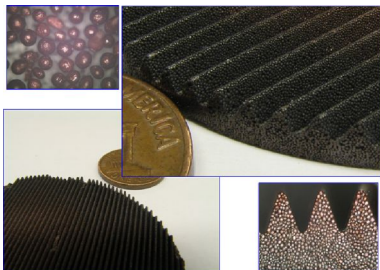


图10 表面多孔微细特征结构所形成的微通道

Fig.10 Microchannels formed by porous micro-feature surface structure

2.2 表面微结构的制造技术

2.2.1 烧结成形

Schuessler等^[33]利用粉末冶金技术(如压制和烧结)来固定催化剂粉末并形成复杂的功能结构,并成功研制出一种基于粉末烧结结构的制氢微反应系统,如图11所示。反应系统中重整区域选用CuZnO催化剂和铜粉颗粒,选择铜作为母体材料是因为铜本身具有较高的热传递能力和较低的熔点(1083℃),使在合适的温度(500~700℃)下烧结铜粉颗粒变得可能。所选用的CuZnO催化剂粒径在100~300 μm之间,铜或者铝颗粒单独插入母体材料中用于形成其它功能部分,如反应通道和扩散层。颗粒填充到基板上分离区域,并且在100 MPa压力和室温下压紧,压紧以后,某些区域需要填充Pt催化层用于放热氧化反应。在蒸发处固定有不锈钢或陶瓷制成的多孔预成型的圆柱体,直径为7 mm,高度为1 mm。

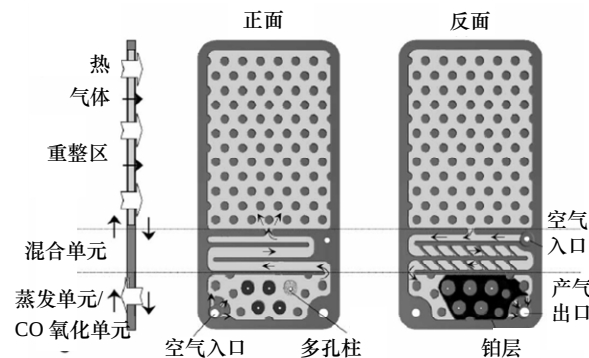


图11 粉末烧结的微反应系统

Fig.11 Micro reaction system with sintered structures

2.2.2 纤维烧结成形

多孔泡沫金属作为微反应器反应载体是一个新的选择^[34-35],相对于传统微通道结构,多孔泡沫金属具有三维网状孔隙结构、孔隙率高和比表面积大等特点。李剑锋等^[36]提出一种薄层烧结微纤结构材料作为静态混合和强化传热微构件,并研制了集混合、反应和换热于一体的微反应器,以苯硝化反应考察了微反应器在进行快速、强放热和液-液两相混合反应时的性能。

汤勇等^[37-39]利用特有的大刀倾角刀具实现多条连续的铜纤维的切削加工,如图12所示,金属纤维切削过程中,纤维表面伴随生成了茸状粗糙形貌,可以提供高比表面积,有利于增强催化剂黏结力的同时还增加单位反应体积内催化剂的附着量。通过将金属纤维烧结所形成的催化剂反应载体板,具有良好的通透性、大比表面积、良好的机械性能等特点。通过与传

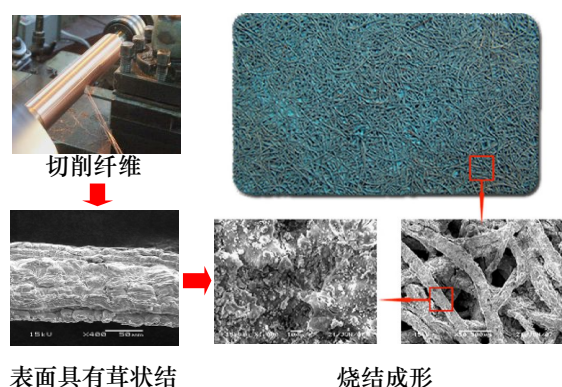


图12 金属纤维烧结反应载体

Fig.12 Fiber sintered felt as catalyst support

统多孔纤维毡内甲醇水蒸气重整反应试验对比发现,具有多尺度特征的金属纤维烧结反应载体内甲醇水蒸气重整反应性能更好。

2.2.3 半固态微触变成形

Kim等^[40-41]提出采用半固态微触变成形方法在特征尺寸为 $\Phi 800 \times 1000 \mu\text{m}$ 区域加工出微凸台阵列微结构。所加工的微凸台表面具有多尺度特征,如图13所示,并考虑微成形过程中的特征尺度效应及晶粒尺度效应对尺度效应的影响进行了量化评估^[42]。在此基础上,梅德庆等^[43]提出采用超声振动辅助加工的方法,利用超声振动的导引作用改善微成形效果。

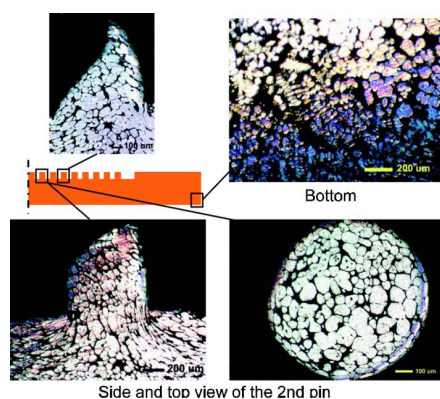


图 13 半固态微触变成形制造的微凸台结构

Fig.13 Micro columns formed by semi-solid forming technology

3 表面反应功能结构的发展趋势

近年来,各国研究者对微反应器进行了深入的研究,在层叠结构连接和密封技术等关键问题上已经取得突破性进展^[44]。但是,微反应器的大规模推

广应用还需要解决很多技术问题,尤其是表面反应功能结构的设计和制造。表面反应功能结构的研究引发机械制造、化学、传热传质、材料等学科的交叉,展望未来,表面功能结构的设计和制造预计能在以下几个方面取得突破:

(1) 通过表面反应功能结构在不同化学反应中传热传质以及反应机理的研究,深入了解表面反应功能结构与催化剂附着的关系,探索微通道和微结构提高反应效率的内在原因,并提出适合不同反应的功能结构选择方案。

(2) 针对某一特定反应,在表面反应功能结构选定的前提条件下,进一步完善特定功能结构的主动设计方法和理论,提出直接面向工程应用的表面反应功能结构评价标准和优化算法。

(3) 针对不同表面反应功能结构,提出相对应的高效、低成本制造技术,这是微反应器推广应用的根本前提。通过不断深入的研究,最终实现通过控制加工参数使表面反应功能结构及其形貌按照反应需求来生成。

4 结 论

相对于传统大尺度反应器,微反应器由于表面反应功能结构的引入具有一系列显著优点,在移动能源装置、便携式装置等方面有着广泛的应用前景。表面反应功能结构的设计和制造是目前微反应器广泛应用的核心技术所在。随着各国研究者对表面功能结构机械加工、优化设计、反应机理、传热传质过程等关键技术的不断深入研究,微反应器的广泛大规模推广应用必将逐步实现。

参考文献:

- [1] 姚华堂, 于新海, 王正东, 等. 微反应器中的微制作技术 [J]. 微细加工技术, 2006, 2: 54-60.
- [2] 胡林会, 胡鸣若, 朱新坚, 等. 燃料电池用微通道反应器的研究现状 [J]. 电源技术, 2003, 27(6): 545-548.
- [3] Pattekar A V, Kothare M V. A microreactor for hydrogen production in micro fuel cell applications [J]. Journal of microelectromechanical systems, 2004, 13(1): 7-18.
- [4] Kikas T, Zhang H, Bardenshteyn I, et al. Feedstock for micro fuel cells: efficient hydrogen production in

- the reverse-flow autothermal catalytic microreactors [C]. International Symposium on Micro/Nanoscale Energy Conversion, Turkey, 2002.
- [5] Zheng N, Seebauer E G, Masel R I. Effects of microreactor geometry on performance: differences between posted reactors and channel reactors [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2005, 44: 4267-4271.
- [6] 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: 53-61.
- [7] Pattekar A V, Kothare M V. A microreactor for in-situ hydrogen production by catalytic methanol reforming [C]. Proceedings of the 5th International Conference on Microreaction Technology, France, 2001.
- [8] Kikas T, Bardenshteyn I, Williamson C, et al. Hydrogen production in a reverse-flow autothermal catalytic microreactor: from evidence of performance enhancement to innovative reactor design [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2003, 42: 6273-6279.
- [9] Shannon M A, Moore G V, Ganley J, et al. High-temperature microcombustion-based ammonia microchemical hydrogen generator reactors for PEM fuel cells [C]. Proceedings of Workshop on Solid State Sensors, Actuators, and Microsystems, 2002.
- [10] Martin P M, Matson D W, Bennett W D, et al. Laser micromachined and laminated microfluidic components for miniaturized thermal, chemical and biological systems [C]. SPIE Conference Proceedings, Design, Test, and Micro-fabrication of MEMS and MOEMS, 1999, 3680: 826-833.
- [11] Park G G, Yima S D, Yoon Y G, et al. Hydrogen production with integrated microchannel fuel processor for portable fuel cell systems [J]. Journal of Power Sources, 2005, 145: 702-706.
- [12] Li X, Sabir I. Review of bipolar plates in PEM fuel cells: flow-field designs [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2005, 30: 359-371.
- [13] Jiang P, Fan M, Si G, et al. Thermal-hydraulic performance of small scale micro-channel and porous-media heat-exchangers [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2001, 44: 1039-1051.
- [14] Henning T, Brandner J J, Schubert K. Characterisation of electrically powered micro-heat exchangers [J]. Chemical Engineering Journal, 2004, 101: 339-345.
- [15] Tonkovich A L Y, Zilka J L, Powell M R, et al. The catalytic partial oxidation of methane in a micro-channel chemical reactor [C]. 2nd International Conference on Microreaction Technology, New Orleans, USA, 1998: 45-53.
- [16] Boersma R J, Sammes N M. Distribution of gas flow in internally manifolded solid oxide fuel-cell stacks [J]. Journal of Power Sources, 1997, 66: 41-45.
- [17] Koh J H, Seo H K, Lee C G, et al. Pressure and flow distribution in internal gas manifolds of a fuel-cell stack [J]. Journal of Power Sources, 2003, 115: 54-65.
- [18] Commenge J M, Falk L, Corriou J P, et al. Optimal design for flow uniformity in microchannel reactors [J]. AIChE Journal, 2002, 48: 345-357.
- [19] Amador C, Gavrilidis A, Angeli P. Flow distribution in different microreactor scale-out geometries and the effect of manufacturing tolerances and channel blockage [J]. Chemical Engineering Journal, 2004, 101: 379-390.
- [20] Chen Y, Cheng P. Heat transfer and pressure drop in fractal tree-like microchannel nets [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, 45: 2643-2648.
- [21] Pan M, Tang Y, Yu H, et al. Modeling of velocity distribution among microchannels with triangle manifolds [J]. AIChE Journal, 2009, 55(8): 1969-1982.
- [22] 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.
- [23] Lorenz H, Despont M, 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: 33-39.
- [24] 王旭迪, 张永胜, 胡焕林, 等. 深高宽比微结构的干法刻蚀 [J]. 真空, 2004, 41(5): 32-34.
- [25] 林日乐, 谢佳维, 蔡萍, 等. 体微加工技术在MEMS中的应用 [J]. 压电与声光, 2005, 27(3): 324-327.

- [26] 王振龙. 微细加工技术 [M]. 国防工业出版社, 2005: 58-65.
- [27] Pan M, Zeng D, Tang Y. Feasibility investigations on multi-cutter milling process: A novel fabrication method for microreactors with multiple microchannels [J]. Journal of Power Sources, 2009, 192: 562-572.
- [28] Pan M, Li J, Tang Y. Development of high-aspect-ratio microchannel heat exchanger based on multi-tool milling process [J]. Journal of Central South University of Technology, 2008, 15(s2): 228-234.
- [29] Peng L, Hu P, Lai X, et al. Investigation of micro/meso sheet soft punch stamping process—simulation and experiments [J]. Materials & Design, 2009, 30(3): 783-790.
- [30] Peng L, Lai X, Dong'an Liu, et al. Flow channel shape optimum design for hydroformed metal bipolar plate in PEM fuel cell [J]. Journal of Power Sources, 2008, 178: 223-230.
- [31] Liu D, Peng L, Lai X. Effect of dimensional error of metallic bipolar plate on the GDL pressure distribution in the PEM fuel cell [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2009, 34: 990-997.
- [32] Koç M, Usta Y, Karakoc A. Investigations on thermo-mechanical fabrication of micro-scale porous surface features [J]. Journal of Power Sources, 2008, 179: 592-602.
- [33] Schuessler M, Portscher M, Limbeck U. Monolithic integrated fuel processor for the conversion of liquid methanol [J]. Catalysis Today, 2003, 79-80: 511-520.
- [34] Yu H, Chen H, Pan M, et al. Effect of the metal foam materials on the performance of methanol steam micro-reformer for fuel cells [J]. Applied Catalysis A: General, 2007, 327(1): 106-113.
- [35] Bae J, Ahmed S, Kumar R, et al. Microchannel development for autothermal reforming of hydrocarbon fuels [J]. Journal of Power Sources, 2005, 139: 91-95.
- [36] 李剑锋, 杨九龙, 王苗苗, 等. 基于烧结微纤多孔结构材料的微反应器中的苯硝化反应 [J]. 催化学报, 2007, 28(11): 931-933.
- [37] Tang Y, Zhou W, Pan M, et al. Porous copper fiber sintered felts: An innovative catalyst support of methanol steam reformer for hydrogen production [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2008, 33: 2950-2956.
- [38] Zhou W, Tang Y, Pan M, et al. A performance study of methanol steam reforming microreactor with porous copper fiber sintered felt as catalyst support for fuel cells [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2009, 34(24): 9745-9753.
- [39] Zhou W, Tang Y, Pan M, et al. Experimental investigation on uniaxial tensile properties of high-porosity metal fiber sintered sheet [J]. Materials Science and Engineering: A, 2009, 525(1-2): 133-137.
- [40] Kim G Y, Ni J, Mayor R, et al. An experimental investigation on semi-solid forming of microMeso-scale features [J]. Transactions of the ASME, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2007, 129(2): 246-251.
- [41] Kim G Y, Koc M, Mayor R, et al. Modeling of the semi-solid material behavior and analysis of micro-mesoscale feature forming [J]. Transactions of the ASME, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2007, 129(2): 237-245.
- [42] Kim G Y, Ni J, Koc M. Modeling of the size effects on the behavior of metals in microscale deformation processes [J]. Transactions of the ASME, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2007, 129(3): 470-476.
- [43] 梅德庆, 姚喆赫, 周红华, 等. 超声振动辅助半固态金属微触变成形方法及装置 [p]. 申请号: 200820168237.0
- [44] 潘敏强, 汤勇, 陆龙生, 等. 基于薄片层叠技术的制氢燃料处理系统研究进展 [J]. 化工进展, 2006, 25(9): 1011-1017.
- 作者地址: 广州华南理工大学 510640
机械与汽车工程学院 机械制造及自动化研究所
Tel: (020) 87114634
E-mail: ytang@scut.edu.cn

- 欢迎订阅《中国表面工程》杂志
欢迎访问《中国表面工程》期刊网
——<http://www.csejournal.com>