

高速微铣削构建疏水性铝合金表面^{*}

弯艳玲^{1,2}, 张学蕊¹, 张留新¹, 于占江¹

(1. 长春理工大学 机电工程学院, 长春 130022; 2. 吉林大学 工程仿生教育部重点实验室, 长春 130022)

摘要: 以蝉翅表面疏水结构为仿生对象, 利用高速精密微铣削机床在铝合金表面构建柱状微阵列结构, 对构建的柱状微阵列结构的微观结构、疏水性能和表面粗糙度进行观测, 并对其疏水机理进行分析。结果表明: 在本征接触角约为 51° 的光滑铝合金表面上加工微米级柱状微阵列结构可有效提高材料表面的疏水性能, 未经化学修饰的表面接触角最高可达 115°, 实现了基于高速精密微铣削技术在金属材料表面上构建微观结构阵列, 使材料表面润湿性由亲水向疏水的转变。

关键词: 仿生; 疏水性能; 微铣削; 微观结构

中图分类号: TG174.4; TG54 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9289(2013)05-0037-06

Hydrophobic Aluminum Alloy Surface Fabricated by High Speed Micro-milling Technology

WAN Yan-ling^{1,2}, ZHANG Xue-rui¹, ZHANG Liu-xin¹, YU Zhan-jiang¹

(1. College of Mechanical and Electric Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, 130022; 2. Key Laboratory of Engineering Bionics Ministry of Education, Jilin University, Changchun, 130022)

Abstract: To simulate the hydrophobic microstructure of cicada wing surface, a high speed precise micro-milling machine was used to fabricate columnar microstructure arrays on aluminum alloy substrate. Microstructure, hydrophobicity and surface roughness of bionic specimen were investigated, and the hydrophobic mechanism of bionic specimen was analyzed. The results show that the columnar microstructure arrays can effectively improve the hydrophobic properties of aluminum alloy, and the contact angle value is improved from 51° up to 115°. Using the high speed precise micro-milling machine to fabricate microstructure arrays on metal surface, the change of surface wettability from hydrophilic to hydrophobic is realized.

Key words: bionic; hydrophobicity; micro-milling; microstructure

0 引言

表面润湿性是指液体在固体材料表面的铺展能力, 是固体材料表面的一个重要的物理化学性质。材料表面的润湿性是材料本身的一种固有属性, 它既与材料表面的组成有关, 又与材料表面的微观结构有关^[1]。自 20 世纪 70 年代“荷叶效应”的发现, 在荷叶表面微纳米结构的启发下, 研究者对通过在固体材料表面构建微纳米结构来实现超

疏水性能表现出极大的兴趣。目前, 在材料表面构建微观结构实现超疏水性能的方法层出不穷, 其中有物理化学沉积、刻蚀^[2]、自组装方法^[3]和激光刻蚀法^[4]等。尽管制备仿生超疏水表面的方法已取得了突破性进展, 但这些方法大都存在需要特殊的设备, 试验条件苛刻, 试验成本高, 需要二次化学物质修饰, 不易大规模制备等缺点^[5-6], 严重限制了超疏水性表面在工农业生产以及日常生活

收稿日期: 2013-08-14; **修回日期:** 2013-09-23; **基金项目:** * 吉林省发展计划资助项目(201201123); 长春理工大学青年科研基金(202000490); 吉林大学工程仿生教育部重点实验室开放基金(K201103)

作者简介: 弯艳玲(1979-), 女(汉), 河南舞阳人, 讲师, 博士; **研究方向:** 工程仿生

网络出版日期: 2013-09-25 16:35; **网络出版地址:** <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20130925.1635.001.html>

引文格式: 弯艳玲, 张学蕊, 张留新, 等. 高速微铣削构建疏水性铝合金表面 [J]. 中国表面工程, 2013, 26(5): 37-42.

活中的应用。近年来,随着科技的飞速发展,超精密微细加工技术在光学领域、机械电子领域、生物医学领域和军事领域都显示出越来越重要的应用价值^[7-8]。高速微铣削技术以其加工精度高、加工效率高、制备工艺简单、制备费用相对较低、对加工材料约束少、避免加工材料的单一化、可实现大面积、任意形状三维结构的加工等优势备受人们关注^[9]。然而,利用高速微铣削技术制备疏水表面,研究其加工结构对表面疏水性的影响,以及加工方法对其疏水表面粗糙度的影响鲜有报道。

昆虫是地球上数量最多的物种之一,大多数昆虫生活在阴凉潮湿的树木林里,恶劣的环境造就了它们非凡的技巧和本领。例如,蜻蜓和蝉翅表面具有超强的疏水性能^[10],蝴蝶翅膀表面具有隐身效果^[11]。如何利用现代技术实现并有效地模仿生物功能是研究者的追求之一。

文中以蝉翅表面柱状结构为仿生对象,利用自制的高速微铣削机床在 6061 铝合金表面构建柱状微阵列结构,以期达到提高材料表面的疏水性能,为功能性材料的发展和应用提供技术支持。

1 试验仪器及方法

1.1 试验仪器

采用 VHX-1000 超景深三维显微镜和 JSM-6700F1 冷场发射扫描电子显微镜进行微观形貌和尺寸的观测。电镜观测之前,对试件进行喷金,喷金设备为 JFC-1600 自动喷射器。试样表面的接触角采用 OCA20 型视频光学接触角测量仪(德国)进行测量,液滴大小为 $3 \mu\text{L}$,试验测试温度为室温(约 25°C),测试液体为去离子水。表面粗糙度的测量设备为 MarSurf LD120 二合一高精度轮廓与粗糙度测量系统。

1.2 试验方法

蝉翅表面由于纳米级乳突结构以及其表面的物质成分而具备疏水性能(见图 1)。研究表明,单一尺度的微米突起要想在表面形成超疏水表面,需要高的纵横比^[12]。对于具备单尺寸粗糙结构的表面来说,在液滴尺度较大时可以表现出超疏水性,但是,当液滴尺度很小却不能形成稳定的超疏水性时,此时液滴可能被捕获到微米突起之间而形成亚稳定状态^[13]。因此,文中基于蝉翅表面疏水的思路,并结合高速微铣削加工特点,实现了微米级疏水性结构的制备。简化蝉翅表面的圆

柱体为方柱状微阵列结构,如图 2 所示。其中, $a \times a$ 、 b 和 h 分别表示柱体长度 \times 宽度、间距和柱体高度。试验材料采用广泛应用于自动化机械零件、电子及精密仪器和航空工业领域的铝合金 6061。根据加工方法采用规格为 $80 \text{ mm} \times 80 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 的铝合金试样,试样表面经过抛光处理后,利用自制的高速微铣削机床加工微米级柱状结构阵列。加工后的试件分别依次采用丙酮、无水乙醇(均为分析纯)、纯净水进行超声波清洗,在室温条件下自然风干后待用。

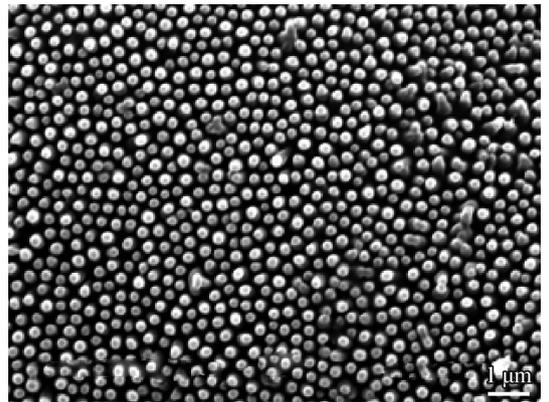


图 1 蝉翅表面微观结构

Fig. 1 Microstructure of cicada wings

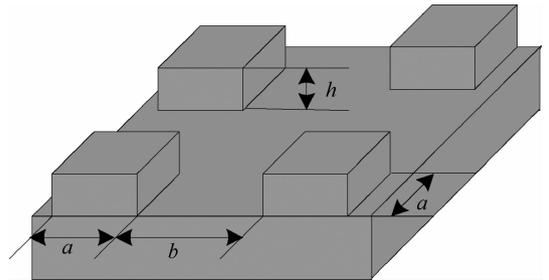


图 2 柱状微阵列结构示意图

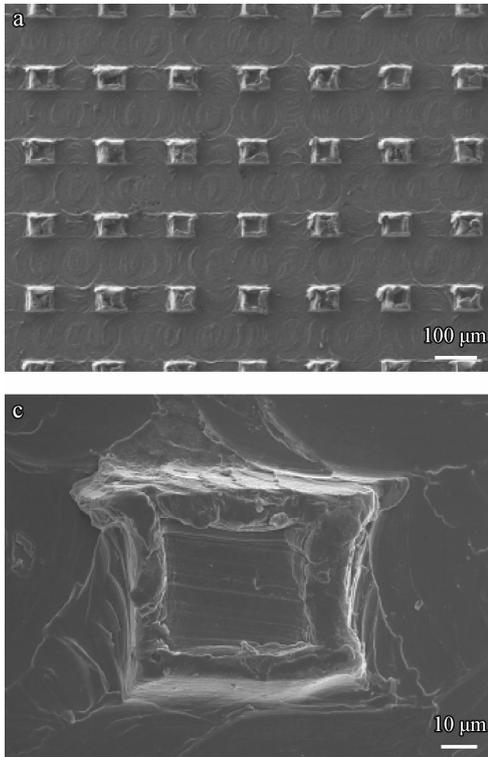
Fig. 2 Diagram of columnar micro-array structure

2 试验结果及分析

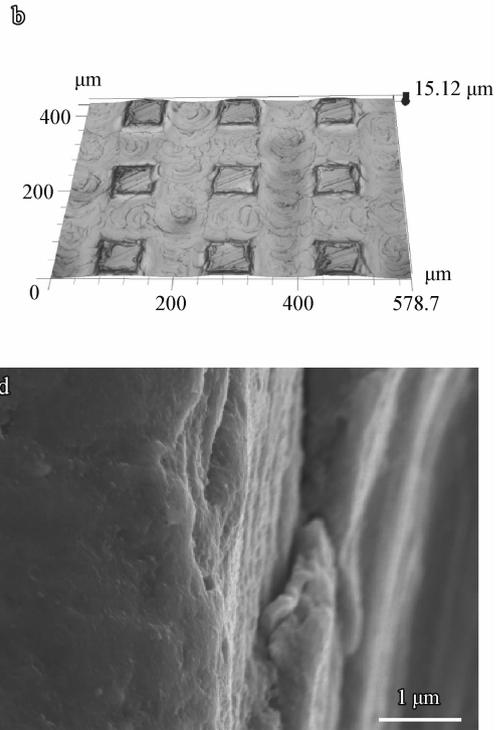
2.1 表面微观结构和疏水性能

图 3 为铝合金表面构建的柱状微阵列结构形貌图,由图可知,加工的微柱体仿生结构形状较为整齐(图 3(a)),高度均一(图 3(b)),柱体上表面成凹坑形状或倾斜状态(图 3(c)),这是因为铝合金材料硬度较低,且加工后残余应力较大,很容易变形,柱体高度越大则需要加大相应的加大轴向切削深度,切削力也随之增大,对微凸体的侧面挤压力加

大,在微柱体侧棱形成卷边切屑,从而使微柱体上表面形成凹坑状、凸起或倾斜状结构。此外,由于刀具的耕犁作用使原来形成峰的部分金属材料向两边流动,从而形成材料堆积现象。如继续放大试件表面的光滑部位,可知由于刀具的耕犁作用,在材料表面可形成凸凹不平的纳米甚至更微小的结构(图 3(d))。试验加工的柱状微阵列结构尺寸见表 1。对加工后的试件表面的疏水性能进行检测,



并与光滑铝合金表面的接触角进行对比试验,试验结果也见表 1。光滑铝合金表面的接触角为 51° (图 4(a))。由表 1 可知,接触角的大小受相对柱高和相对柱间距的共同作用,变化整体趋势为,随着相对柱间距的减少,相对柱高的增大,试件表面的接触角逐渐增大。微铣削加工的铝合金表面,除试件 1 外,均达到了疏水性能,其中最高可到 115° (图 4(b))。



(a)Columnar micro-array structure(b)Three-dimensional picture of columnar micro-array structure(c)Single columnar micro-array structure(d)Fractional enlargement of columnar micro-array structure

图 3 柱状微阵列结构的微观形貌

Fig. 3 Morphologies of columnar micro-array structure

2.2 表面粗糙度

在微加工过程中,材料表面的加工质量相对其微观尺寸不容忽视,评定零部件表面加工质量的重要参数之一就是表面粗糙度。由柱状微阵列的微观结构可知(图 3),在微切削过程中,材料表面由于受刀具的挤压、剪切作用,在柱体侧棱顶部形成向内隆起的卷边毛刺,即在柱体顶部形成一定的堆积坑,而在柱体根部,由于刀具形状及刀具刃口钝圆半径的限制,根部材料未能被全部切除,在底部形成一定的坡度。在沟槽中部,由于微铣削加工特性、刀具形状和外界振动的影响,加工

后的试件表面有划痕。由此可知,由于切削用量、刀具几何参数和外界环境的影响,加工后的铝合金表面存在一定数量的不规则毛刺,表面粗糙度测量值较大。粗糙度值越大,其表面结构起伏越大,当液滴与固体接触时,由于表面凹坑的存在,减小了液体与固体的实际接触面积。因此,表面粗糙度对接触角的大小具有一定的影响。利用轮廓与粗糙度测量系统分别对加工前、后试样柱体表面的粗糙度 R_a 值进行测量,加工前试样表面的粗糙度 R_a 值为 $27\sim 36$ nm,加工后试样表面的粗糙度 R_a 值为 $190\sim 270$ nm。由此可见,周期性排列的微柱体阵列提高了铝合金表面的粗糙度。

表 1 柱状微阵列结构的几何参数与接触角统计表

Table 1 Geometric parameters and contact angles (CA) of columnar micro-array structure

Sample	Width $a/\mu\text{m}$	Height $h/\mu\text{m}$	Spacing $b/\mu\text{m}$	Relative height $h/(a+b)$	Relative spacing $b/(a+b)$	CA/ $^\circ$	Wenzel's CA/ $^\circ$	Cassie's CA/ $^\circ$
1	26	17	272	0.057	0.913	88	50.07	170.96
2	26	9	262	0.031	0.910	90	50.47	170.65
3	16	30	219	0.128	0.932	95	49.37	172.95
4	34	39	262	0.132	0.885	96	48.13	168.10
5	52	45	249	0.150	0.827	100	46.03	162.06
6	43	40	240	0.141	0.848	100	46.89	164.24
7	34	21	256	0.072	0.883	102	49.41	167.85
8	28	30	260	0.104	0.903	103	49.10	169.93
9	42	60	193	0.255	0.821	104	41.91	161.43
10	48	35	177	0.155	0.787	106	44.53	157.80
11	48	80	177	0.356	0.787	107	34.89	157.80
12	50	50	240	0.172	0.828	109	45.24	162.09
13	48	107	177	0.476	0.787	110	27.79	157.80
14	34	44	266	0.147	0.887	111	47.84	168.26
15	42	105	183	0.467	0.813	115	31.94	160.60

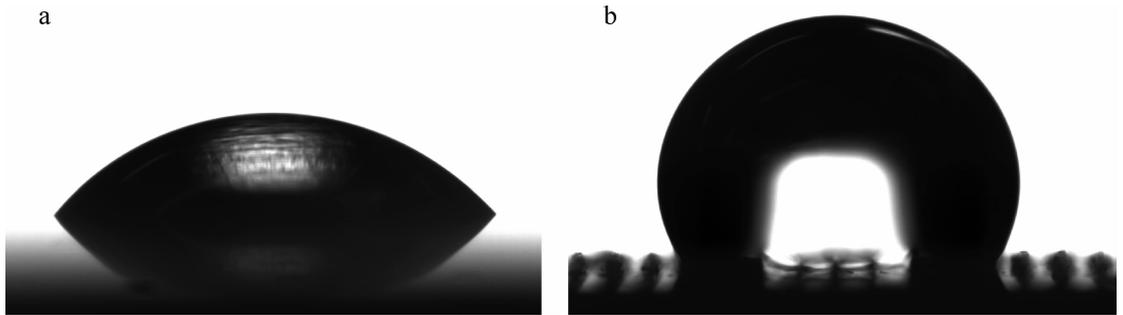
(a) Drop on flat surface ($\theta=51^\circ$) (b) Drop on rough surface ($\theta=115^\circ$)

图 4 水滴在铝合金表面的微观形貌

Fig. 4 Morphologies of drops on aluminum alloy surface

2.3 疏水性机理分析

Patankar N A 认为,在同一粗糙表面上可以同时存在两种接触状态,即 Wenzel 模式和 Cassie 模式,且两者都可以处在稳定的平衡位置^[14]。为鉴别水滴在铝合金表面的接触状态,将加工后柱状微阵列结构的实际测量尺寸分别代入 Wenzel 模型(式 1)和 Cassie 模型(式 2)进行非复合接触状态和复合接触状态下的理论接触角计算,计算

结果见表 1。

$$\cos\theta = r\cos\theta_e \quad (1)$$

式中, θ 为静态接触角, θ_e 为本征接触角, r 为接触面上固/液实际接触表面积与表观接触面积之比。

$$\cos\theta = -1 + f_s(1 + \cos\theta_e) \quad (2)$$

式中, f_s 为接触面上固/液实际接触表面积

与投影面积之比。

由铝合金表面的实际接触角和理论接触角对比可知(表1),水滴在已加工试件表面的接触角与 Wenzel 模型和 Cassie 模型的理论计算值相差较大,这说明水滴与铝合金表面的接触状态既不属于复合接触,又不属于非复合接触状态,而是非复合润湿状态向复合润湿状态转换的一种混合状态。这主要是由于粗糙度即表面微结构的变化可以导致非复合与复合润湿状态之间的转变。能量的高低是润湿模式转换可能性的决定性要素,微结构表面的润湿模式转换有自发转换和被动转换。自发转换是指液滴在改变微结构几何参数或受自身重力作用时发生的转换,而被动转换是指液滴在受外压作用或被迫振动等外界干扰时发生的转换^[15]。要阻止非复合与复合润湿状态之间的模式转变,应当选择适当的表面微结构几何参数。此外,基于高速微铣削技术加工的微结构阵列,由于其表面存在凹坑或凸起等挤压变形,以及碎颗粒犁沟等表面缺陷结构,形成了类似生物表面的二级微结构,液滴与其表面的接触已不仅仅是单纯的 Wenzel 或是 Cassie-Baxter 模型。

在固体表面构建超疏水表面结构,其本征接触角不能太小。其次,需要在制备过程中使水滴与表面的接触状态满足 Cassie 模型。对于柱形阵列的粗糙表面,要得到具有较大表观接触角的超疏水表面需要有较小的柱宽度和较大的柱高度^[16]。在较小的相对柱间距下,如果增加相对柱高,可产生较大的静态接触角,由表1的测量结果可知,试样10、11和13的相对柱间距均为0.787,随着相对柱高的增加,其接触角也由 106° 增大至 110° 。试样5和12也表现出相同的趋势。由此证明,相对柱高在润湿状态的转换过程中起一定作用,当相对柱间距一定时,随着相对柱高的增加,润湿性由非复合润湿状态向复合润湿状态转换,其静态接触角随之增大。但柱体宽度和柱体高度的比值仍需大量的试验进行确定和验证。此外,由于高速微铣削过程中形成的切屑对金属表面的润湿性测量具有一定的影响,其影响效应及机理需要进一步分析。

此外,由表1可知,试件表面的接触角与加工的柱状结构参数没有规律性的变化趋势,这是因为铣削后的表面是挤压与撕裂、弹性变形与塑性变形、热与力等综合作用的结果,其微观形貌往往

是极其不规则的。铣削后的粗糙表面能观察到纳米级甚至更小的粗糙度不断增加的细节^[17]。此外,在铣削过程中,很多复杂因素对加工表面质量具有随机性、无序性影响,因此,对加工结构的几何参数很难控制,但由试验可知,与光滑铝合金表面的亲水性能相比,构建微结构阵列后的铝合金表面的接触角最大提高至 115° ,达到了疏水效应。由此可知,周期性排列的微柱体阵列提高了铝合金表面的粗糙度,刀具耕犁形成的微纳米结构使液滴在铝合金表面的铺展受阻,从而提高了金属表面的疏水性,初步实现了利用高速精密微铣削技术无需修饰直接在亲水材料上制备出具有疏水性能的金属表面。

3 结 论

以蝉翅表面微观结构为仿生对象,利用高速精密微铣削机床在6061铝合金表面构建柱状微阵列结构,对其微观结构、疏水性能和表面粗糙度进行了观测,并对试件表面的疏水机理进行了分析,发现周期性排列的微柱体阵列提高了铝合金表面的粗糙度,耕犁作用形成的微纳米结构使液滴在铝合金表面的铺展受阻,提高了金属表面的疏水性,初步实现了高速精密微铣削技术不经化学方法修饰,直接在亲水材料制备出具有疏水性能的金属表面。疏水机理分析,液滴与铝合金表面的接触状态不是单纯的 Wenzel 模型或是 Cassie 模型,而是非复合润湿向复合润湿转换的一种混合状态。

参 考 文 献

- [1] Wang J D, Yu Y, Chen D R. Research progress on the ultra hydrophobic surface topography effect [J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(19): 2297-2300.
- [2] 赵坤, 杨保平, 张俊彦. 铝合金基体上超疏水表面的制备及其性能 [J]. 材料科学与工程学报, 2010, 28(3): 448-452.
- [3] 连峰, 张会臣, 庞连云, 等. 超疏水 Ti6Al4V 表面的制备及其润湿性 [J]. 纳米技术与精密工程, 2011, 9(1): 6-10.
- [4] 蒋雄, 乔生儒, 张程煜, 等. 铝合金表面各向异性 A 型条纹的疏水性 [J]. 材料导报, 2008, 22(9): 125-127.
- [5] 崔晓松, 姚希, 刘海华, 等. 超疏水表面微纳结构设计及润湿行为调控(II) [J]. 中国材料进展, 2010, 29(2): 31-44.
- [6] 刘圣, 耿兴国, 周晓峰, 等. 铝及铝合金表面超疏水协和涂层的制备与性能研究 [J]. 中国表面工程, 2008, 21(3): 30-34.
- [7] Wang S J, To S, Cheung C F. Effect of workpiece material on surface roughness in ultraprecision raster milling [J]. Materials and Manufacturing Processes, 2012, 27: 1022-8.

- [8] Yan J. Ultraprecision cutting of photoresist/gold composite microstructures [J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2011, 60(1): 133-136.
- [9] 袁哲俊, 王先逵. 精密和超精密加工技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [10] 弯艳玲, 丛茜, 金敬福, 等. 蜻蜓翅膀微观结构及其润湿性 [J]. 吉林大学学报(工学版), 2009, 39(3): 732-736.
- [11] Wu L Y, Han Z W, Song Y Q, et al. Replication of papilio maackii Ménériés butterfly scale structural color using a magnetron sputtering method [J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(34): 4525-8.
- [12] 王奔, 念敬妍, 铁路, 等. 稳定疏水性表面的理论进展 [J]. 物理学报, 2013, 62(14): 146801-15.
- [13] Furstner R, Barthlott W, Neinhuis C, et al. Wetting and self-cleaning properties of artificial superhydrophobic surfaces [J]. Langmuir, 2005, 21(3): 956-961.
- [14] Patankar N A. Transition between superhydrophobic states on rough surfaces [J]. Langmuir, 2004, 20: 7097-102.
- [15] 李保家. 仿生周期微结构表面设计制备及其润湿性能研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2007.
- [16] 潘光, 黄桥高, 胡海豹, 等. 微观结构对超疏水表面润湿性的影响 [J]. 高分子材料科学与工程, 2010, 26(7): 163-166.
- [17] 胡家国. 高速铣削铝合金表面微观形貌分形机理研究 [J]. 工具技术, 2005, 39(3): 20-24.

作者地址: 吉林省长春市卫星路 7089 号 130022
 长春理工大学机电工程学院
 Tel:(0431) 8558 2428
 E-mail:wanyanling@cust.edu.cn

• 学术动态 •

2013 年中国机械工程学会年会将于合肥召开

2013 年中国机械工程学会年会将于 11 月 5~7 日在安徽省合肥市召开。安徽省位于长江下游, 淮河流域, 是我国中部经济区的重要板块。精彩灿烂的“徽文化”是我国三大地域文化之一, 数千年来, 盛久不衰。2010 年 1 月 12 日, 国务院正式批复《皖江城市带承接产业转移示范区规划》, 标志着以合肥、芜湖双城为核心的安徽沿江城市带承接产业转移示范区建设纳入国家发展战略。这是迄今全国唯一以产业转移为主题的区域发展规划。

“十二五”期间, 安徽省将围绕提升全省装备制造业整体水平, 加快煤炭、水泥、煤化工、冶金、环保等产业的重大成套装备研发制造, 重点发展工程机械、电工电器、重型矿山机械、石化通用机械、机床工具、农业机械等六大行业。2013 年中国机械工程学会年会选址安徽省合肥市举行, 年会期间, 将结合区域经济发展特别是安徽省机械制造相关行业, 邀请国内著名专家举行主旨报告会和专题活动, 为推进安徽参与泛长三角区域发展分工, 探索中西部地区承接产业转移新模式贡献力量。

该次年会的主要活动有: ①主旨报告大会及颁奖仪式; ②中日韩机械工程技术论坛; ③上银优秀机械博士论文颁奖典礼; ④绿色制造科技成果交流会; ⑤青年学术论坛; ⑥科普大讲堂; ⑦专家座谈及研讨会; ⑧2013 工程机械液压技术论坛; ⑨其他专题活动。

此外, 同期还将举行中国机械工程学会十届三次理事会和十届五次常务理事会议。

(摘自中国机械工程学会表面工程分会网)