

内壁表面微结构加工技术的发展与应用*

孙涛涛,于兆勤,吴明,王冠
(广东工业大学机电学院,广州 510006)

摘要: 针对现有的内壁表面微结构加工方法进行论述,分析了各种工艺方法的优点及其存在的问题,对内壁表面微结构的应用进行了简要说明。在此基础上提出了用微细电解加工技术对微管内壁表面进行微结构加工,并且分析了内壁表面微结构的发展趋势。

关键词: 微细电解;微结构;螺旋电极

中图分类号: TH16 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671—3133(2015)12—0147—06

Development and application of wall surface micro-machining technology

Sun Taotao, Yu Zhaoqin, Wu Ming, Wang Guan

(Institute of Mechatronics, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Conducted for an existing wall surface micro-machining methods discussed, analyzed the merits of various processes and problems of the method, the applications of the inner wall surface microstructure are briefly described. On this basis proposed by electrochemical micromachining technology for micro-tube wall surface micro-machining, and analyzes the development trend of the inner wall surface microstructure.

Key words: micro electrolysis; microstructure; spiral electrode

0 引言

表面功能结构广泛应用于机械、电力、化工、航空和国防工业等领域^[1],是近年来新兴的多学科交叉领域研究的热点。国内外学者对表面功能结构的制造方法、工艺和应用做了大量的研究^[2-5],而对于内壁微结构的研究还缺乏系统的理论指导。内壁微结构就是在管道内壁用不同于传统的方法加工出肋槽^[6]、凹坑或凸台^[7]等微结构^[8],这样有利于增大流体与内壁的接触面积。目前人们主要是在小尺寸微管内壁加工出不同形状的微结构,并广泛应用于制冷、石油、核能、化工、新能源和国防工业等领域。例如具有内壁微翅构造的微热管,将其阵列应用在太阳能热水器中,对其传热性能测试结果表明,热水器每天有效热量均高于国家标准,每天平均集热效率也均高于国家标准的 60%^[9];华南理工大学研制的在铜管内壁加工出微沟槽结构,其单根管的传热功率达 80W,传热效率是光管的四倍^[2]。另一类是在大尺寸机械动密封中加工出一定的微结构,能够减少摩擦,延长使用寿命。

例如在汽车发动机的缸套内壁,合理的微结构不但能产生流体动压的效果,而且可以储存润滑油,防止汽缸/活塞擦伤和咬死现象的发生。

正是内壁微结构越来越广泛的应用,使得如何实现微热管内壁非连续微结构加工成为人们研究的热点,并越来越受到重视。

1 微热管内壁非连续微结构加工技术

目前微热管内壁非连续微结构加工技术主要分为以下几类:机械加工、激光珩磨加工、超声加工以及微细电解加工等几大类。

1.1 机械加工

机械加工是传统的加工方法,主要包括:微坑振动加工法、挤压-拉削法以及高速充液旋压成形法。

图 1 所示为低频振动微坑加工原理图。被加工件安装在机床主轴上并以一定的转速 n 旋转,加工装置装在机床的中拖板上,可沿 X 向和 Y 向进给。通过横向(Y 向)进给控制微坑的深度,在轴向进给的同时通过偏心机构在工具头上施加低频振动,依靠振动冲

* 国家青年科学基金资助项目(51205066);广东省自然科学基金资助项目(s2012010009022)

击 在缸套内表面形成具有一定分布规律和一定尺寸的微坑^[10]。

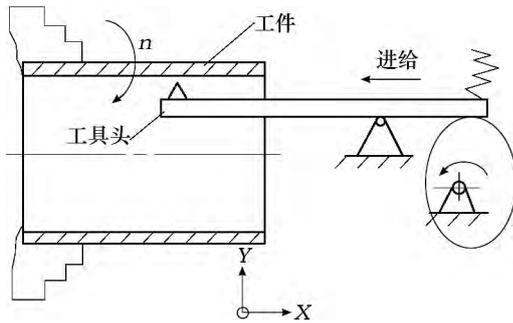


图1 低频振动微坑加工原理图

国外从 20 世纪 70 年代开始对气缸套内壁表面的加工有了新的突破,在内壁光滑的气缸套内利用加工时的振动在内壁加工出沿螺旋线分布的均匀凹坑,如图 2 所示。图 2 中每个圆代表一个凹坑,凹坑径向之间距离与切削振动频率有关,而凹坑的轴向间距等于螺距 S 。螺距取决于机床的转速和纵向进给量,横向进给量决定微坑的深度和分布,这样可保证柴油机在工作状态中不会产生漏气的现象^[11]。

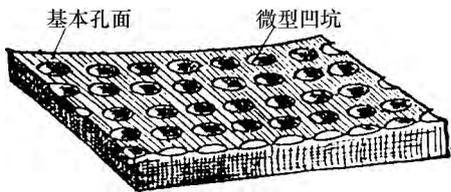


图2 气缸套内壁表面加工的凹坑

国内戚墅堰机车车辆工艺研究所的周明刚等人^[12]用自激振动的方法在缸套内壁加工出波纹形孔面,如图 3 所示。

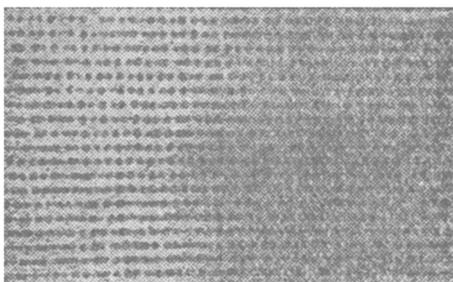


图3 振动加工的波纹形孔面

李勇等人^[13-19]采用挤压-拉削法和高速充液旋压成形两种方法加工微结构。挤压-拉削法成形原理图如图 4 所示,在牵引力作用下通过拉杆带动多齿拉刀沿轴向(X 向)前进实现管壁内凹槽的加工。该加工装置结构简单且容易换刀,但多齿刀具在加工过程中

受到极大的摩擦力和挤压力而容易出现刀刃断裂的情况。高速充液旋压拉削原理图如图 5 所示,是通过旋压珠在充满润滑油的管道内部做高速旋转并且挤压,迫使旋压区发生塑性变形,同时铜管受外力作用而匀速向前运动,嵌入刀齿内的金属在轴向力的作用下发生塑性变形,在铜管的旋压和轴向拉伸的作用下就会沿轴向生成与刀齿形状相匹配的微沟槽。图 6 和图 7 所示为微沟槽挤压-拉削及高速充液旋压拉削加工方法所加工的微结构。

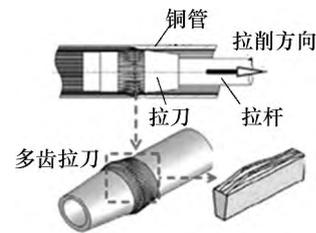


图4 挤压-拉削法成形原理图

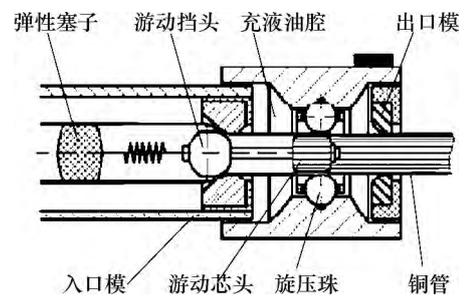
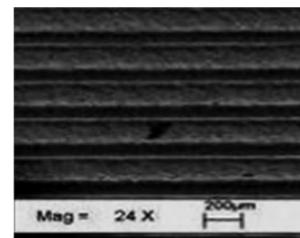
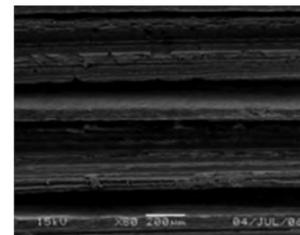


图5 高速充液旋压拉削原理图



a) 一次犁削成形



b) 二次犁削成形

6 微沟槽挤压-拉削法加工的微结构

机械加工虽然效率高,但加工过程中工具与工件直接接触,存在强大的机械力作用,产生工具损耗、残

余应力和变形,而且工件表面易发生塑性变形还存在加工部位周围材料隆起、需要二次加工、周期长以及加工不稳定等问题。加工性能受材料硬度和强度的影响,不适用于脆性材料、薄壁零件和弹性元器件的加工,难以加工形状复杂的零件。

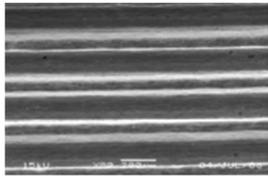


图 7 高速充液旋压成形铜管内表面微结构

1.2 激光珩磨加工

激光珩磨是激光技术与珩磨技术的复合,由粗珩、激光造型和精珩三道工序组成。粗珩时,确定宏观形状。根据零件性能要求选择激光造型类型确定原始表面。激光造型能实现内壁微结构的交叉形网纹结构或螺旋形凹腔结构。最后一道工序精珩用于除去加工时产生的毛刺。激光珩磨机床有三个主要部件:激光器、光导系统和激光输出头,具有往复运动和螺旋运动。光学系统将光束聚焦到孔壁上,采用数控系统可以保证激光造型结构灵活以适应不同的加工条件。图 8 所示为激光珩磨加工示意图,图 9 所示为珩磨后的缸套成形表面。

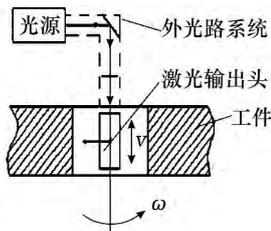


图 8 激光珩磨加工示意图

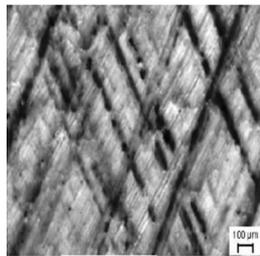
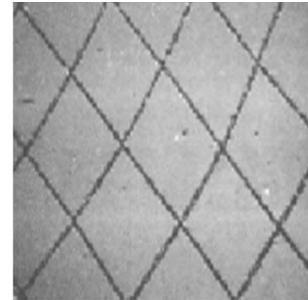


图 9 珩磨后的缸套成形表面

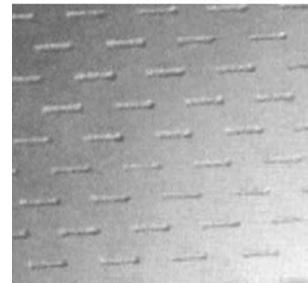
格林(Gehring)公司^[20]采用激光珩磨技术对气缸内壁进行加工,李斯特内燃机及测试设备公司(AVL List GmbH)在 FM528 型发动机上用激光珩磨的方法在气缸内壁加工交叉形结构。1984 年日本的成濑芳

夫提出在发动机缸体的内表面用非传统的螺旋线状、环状或点状的激光淬火方式加工出微凸体。

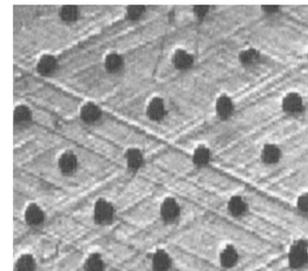
李树林等人^[21]采用激光造型加工技术在气缸套内表面加工出不同形状的微结构,如图 10 所示。图 10d 所示为激光加工存在的翻边现象。



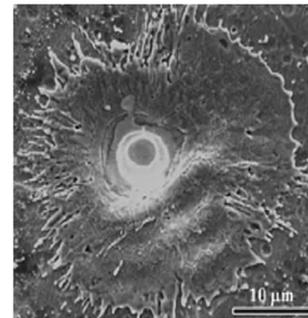
a) 网纹造型沟槽



b) 带状造型沟槽



c) 杯状造型沟槽



d) 翻边现象

图 10 激光造型加工的微结构

1.3 超声加工技术

超声加工技术^[22-24]原理与振动冲击加工的原理类似,主要区别在于驱动装置的不同,该装置刀头振动是靠由超声换能器和变幅杆组成的超声装置提

供的原动力,保证刀头按照一定频率沿微热管径向上下振动,微热管安装在机床卡盘上做高速旋转,然后在机床的驱动下做轴向运动,即可在内表面加工出微结构,而且可以通过控制机床主轴的转速、轴向和径向的进给速度以及超声振动的频率,加工出不同尺寸和有规律分布的微结构。

杭州电子工业学院^[25-26]用超声技术在缸套表面加工出微坑结构。

范红梅等人^[27]采用轴向振动超声珩磨装置对汽缸套内壁进行珩磨加工,该装置如图11所示。

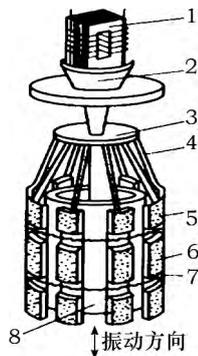


图11 轴向振动超声珩磨装置

1. 轴向振动换能器 2. 变幅杆 3. 弯曲振动盘 4. 挠性杆
5. 6. 油石 7. 油石座 8. 珩磨头体

1.4 微细电解加工

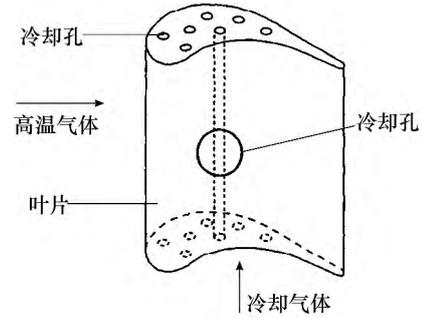
电解加工中材料去除过程是以离子的形式进行的,这使其在微细制造领域乃至纳米制造领域有着很大的发展潜力,得到国内外广泛关注^[28],近年来国内外对微细电解加工技术进行了广泛深入的研究。

GE公司利用电解加工方法,通过在光滑直孔孔壁涂覆绝缘胶,然后结合电化学腐蚀法在孔内壁面加工出了凹槽微结构^[29]。

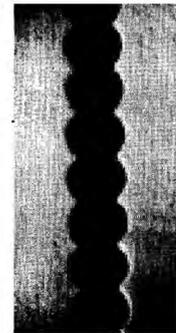
荷兰科学家利用外壁面绝缘的管电极在涡轮机叶片内成功地加工出如图12所示的具有表面连续微结构的冷却孔^[30]。

南京航空航天大学的研究人员提出一种新的竹节孔电解加工方法,工具阴极加工方法为:用电解加工的方法将金属管侧壁加工出若干凹槽,然后将绝缘胶均匀地涂在凹槽中,绝缘胶厚度不高于金属管外径,在工具末端安装定位支架,制作出成型工具阴极^[31]。使用所制作的管状工具阴极进行电极加工实验,成功加工出如图13所示的孔径为 $\phi 3\text{mm}$ 的竹节孔。

浙江工业大学利用紫外光掩膜固化技术制作了螺旋形工具电极,在直径为 $\phi 1.5\text{mm}$ 的光管内加工出了如图14所示的内螺旋散热孔^[32]微结构。



a) 叶片上的冷却孔



b) 冷却孔放大图

图12 叶片上具有表面连续微结构的冷却孔

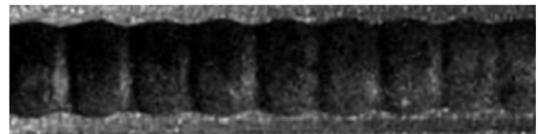


图13 电解加工的竹节孔



图14 掩膜电解加工的内螺旋散热孔微结构

2 多线螺旋微细电解加工技术

随着电子技术的飞速发展,电子产品越来越向着轻、短、薄和小的趋势发展,集成电路中电子器件的集成化程度越来越高,新型微电子器件的散热技术^[33-35]已成为其发展的瓶颈^[36]。研究表明^[37-38],超过55%的电子设备的失效形式是由温度过高引起的^[39],现在装备的军用电子设备产生的故障有20%是由于电子元件过热导致的^[40]。实验表明,用强化表面的微热管取代现有的普通金属光滑管,不仅节约金属管材,降低设备费用,而且可显著提高其传热效率,降低能耗^[41-42]。强化表面指在管内壁表面加工出一些具有粗糙肋的连续或非连续的紊流结构,如肋槽^[6]、凹坑或凸台等,这些结构的尺寸大多在几十微米至几百微米之间,均属微细加工尺度范围。强化传热技术是能

显著改善传热性能的节能新技术,此技术具有高导热率、热响应快、良好的等温性、结构简单及无需额外电力驱动等优点。微型热管已成为高热流密度微电子芯片导热的理想元件,有强大的冷却效果。微型热管内壁的制造技术需要进一步的研究,选择合理的制造方法和工艺是关键所在。

每一种制造技术都有自己的特点,但也有一定的局限性。机械加工法、激光珩磨法和超声加工法由于受加工工艺限制,只适合于较大孔径内壁微结构的加工,对于孔径尺寸较小、难加工材料等内壁微结构的加工难以实现。而微细电解加工不受上述限制,因此笔者提出了用多线螺旋电极对管内壁表面非连续微结构进行微细电解加工的新方法,该方法与传统成形电解加工方法最大的不同之处就是,可以通过调整电极的进给速度、螺旋线角度和凹槽尺寸等来获得不同尺寸形貌的非连续表面微结构。多线螺旋微细电解加工原理图如图 15 所示,工具电极(阴极)设计成圆锥形,这样不仅能使其进行轴向进给,而且也实现了其横向进给,更有利于电场、流场的均匀形成。工具电极制造成左旋和右旋两种形状。

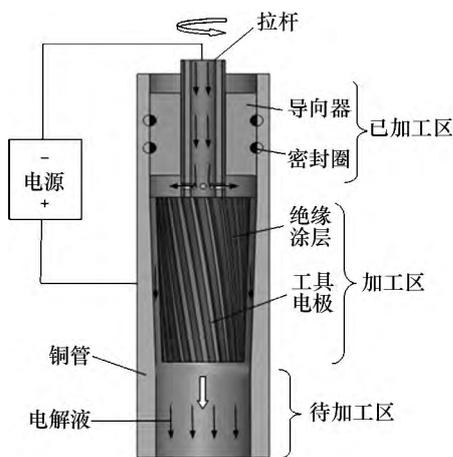


图 15 多线螺旋微细电解加工原理图

图 15 所示的工具电极为右旋,该电极按设计好的螺旋线进行有选择的涂胶,侧面为加工面,凹槽对应的工件内壁表面部分即为待加工的表面。

右旋工具电极在预制工件中旋转加工,然后左旋工具电极再次对工件进行旋转加工,得到管内壁表面微观形貌如图 16 所示。

3 结语

内壁微结构以其良好的传热性能在电子冷却、新能源等领域得到了初步应用,已显示出它巨大的优越

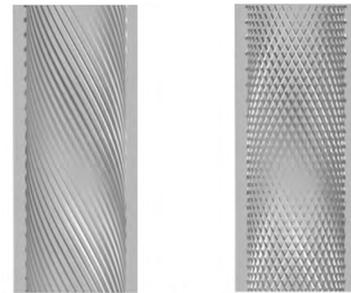


图 16 管内壁表面微观形貌

性,因此还应该做进一步的深入研究,使其更好地为未来的经济发展服务。深入研究和发内微结构是发展强化技术的关键,也是强化传热领域的发展方向之一。如何高效低成本地批量加工内微结构是其得以广泛应用的关键,能够设计和制造出合理的微结构实现特殊的传热功能是未来内微结构发展的方向之一,随着科技的不断发展,内微结构将会被越来越多地关注,其应用范围也会进一步扩大。

参考文献:

- [1] 汤勇,潘敏强,王清辉.表面反应功能结构制造领域的研究现状及发展趋势[J].中国表面工程,2010(2):7-14.
- [2] 汤勇,潘敏强,汤兴贤.表面热功能结构制造领域的发展及关键技术[J].中国表面工程,2010(1):1-8.
- [3] 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.
- [4] Kikas T, Bardenshteyn I, Williamson C, et al. Hydrogen production in a reverse-flow autothermal catalytic micro-reactor: from evidence of performance enhancement to innovative reactor design [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2003(42):6273-6279.
- [5] Kim G Y, Ni J, Mayor R, et al. An experimental investigation on semi-solid forming of micro Meso-scale features [J]. Transactions of the ASME, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2007, 129(2):246-251.
- [6] PAISARN N, MANACHAI N. Tube side heat transfer coefficient and friction factor characteristics of horizontal tubes with helical rib [J]. Energy Conversion and Management, 2006, 47(18):3031-3044.
- [7] Ridouane E H, Antonio Campo. Heat transfer and pressure drop characteristics of laminar air flows moving in a parallel-plate channel with transverse hemi-cylindrical cavities [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2007(50):3913-3924.
- [8] 雷源忠,吴锡兴,盛晓敏,等.机械工程学科发展报告

- (2008-2009) [M]. 北京: 中国科学技术出版社 2009.
- [9] 邓月超, 全贞花, 赵耀华, 等. 基于微热管阵列的平板太阳能热水器的性能试验 [J]. 农业工程学报, 2013(4): 222 - 228.
- [10] 钟美鹏, 张云电. 振动冲击微坑加工原理及微坑结构参数的确定 [J]. 内燃机工程 2004 25(2): 81 - 83.
- [11] 钟美鹏. 数控加工缸套工作表面微坑的方法研究 [J]. 制造技术与机床 2006(4): 98 - 99, 103.
- [12] 周明刚, 周月秀, 朱梅珍. 用自激振动的方法加工缸套波纹形孔面 [J]. 机械工艺师(现《现代制造工程》), 1983(9): 4 - 5.
- [13] 李勇, 汤勇, 肖博武, 等. 加工沟槽式微热管的微型多齿刀具研究 [J]. 中国机械工程 2008 19(3): 258 - 261.
- [14] 赵小林, 邓晖. 微小型沟槽式热管制造的新方法——犁削/拉拔法 [J]. 邵阳学院学报: 自然科学版, 2011(4): 38 - 42.
- [15] Chen P, Liu X, Tang Y et al. Research on ploughing-extrusion process mechanism of multi/micro dimensional grooves inside cylindrical micro heat pipe [J]. Journal of Harbin Institute of Technology 2005 12(2): 1 - 4.
- [16] 赵小林, 牛莉, 邓中伟. 微热管拉拔的成型实验研究 [J]. 邵阳学院学报: 自然科学版 2012(4): 40 - 45.
- [17] 方晓明, 万珍平, 汤勇. 微热管轴向微沟槽高速充液旋压成形实验研究 [J]. 机械科学与技术, 2011(5): 727 - 731.
- [18] 李勇, 汤勇, 肖博武, 等. 铜热管内壁微沟槽的高速充液旋压加工 [J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2007, 35(3): 1 - 5.
- [19] 何中坚, 谢添锦, 潘亮, 等. 微沟槽热管充液旋压成形实验研究 [J]. 机械设计与制造 2009(11): 104 - 106.
- [20] Klink U. 气缸工作表面的激光珩磨 [J]. 国外内燃机, 1988(2): 50 - 52.
- [21] 李树林, 殷建祥. 发动机气缸套内表面激光造型加工技术 [J]. 河南科技大学学报: 自然科学版 2009(2): 26 - 28, 31.
- [22] 张云电. 超声加工及其应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1995: 60 - 67.
- [23] 郑书友, 冯平法, 徐西鹏. 旋转超声加工技术研究进展 [J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2009(11): 1800 - 1804.
- [24] 杨晓辉, 增泽隆久. 采用工件加振方式的微细超声加工特性的研究 [J]. 电加工与模具 2000(3): 29 - 32.
- [25] 张云电, 赵峰, 黄文剑. 摩擦副工作表面微坑超声加工方法的研究 [J]. 中国机械工程 2004(14): 1280 - 1286.
- [26] 张云电, 喻家英. 钢质薄壁气缸套超声珩磨的研究 [J]. 应用声学, 1996(1): 26 - 29.
- [27] 范红梅, 芮延年. 薄壁内燃机缸套内壁表面超声珩磨加工理论与实验 [J]. 苏州大学学报: 工科版 2008(4): 26 - 30.
- [28] Ricciardi G, Cantello M, Mariotti F, et al. Micro-machining with Excimer Laser [J]. Annals of the CIRP, 1998 47(1): 145 - 148.
- [29] Shaw J S, Falls H, Fleck J N. Striated cooling hole: USA, No. 6254347 [P].
- [30] Noot M J, Telea A C, Jansen J K M et al. Numerical Analysis of Turbine Blade Cooling Ducts [J]. Mathematical and Computer Modelling 2000(31): 77 - 98.
- [31] 王明环. 微细电解加工实验研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学 2007.
- [32] 陈明, 王明环, 彭伟. 不同流场构型对微细螺旋孔电解加工的影响 [J]. 机电工程 2009(10): 87 - 89.
- [33] Mc Glen R J, Jachuck R, Lin S. Integrated thermal management techniques for high power electronic devices [J]. Applied Thermal Engineering 2004(24): 1143 - 1156.
- [34] 李炳乾. 基于金属线路板的新型大功率 LED 及其光电特性研究 [J]. 光子学报 2005 34(3): 372 - 374.
- [35] Nishikawa Y. High optical intensity 2-D AlGaAs laser arrays [J]. SPIE 2000(3628): 71 - 79.
- [36] Markoff J. Intel's big shift after hitting technical wall [M]. New York: The New York Times 2004.
- [37] Janicki M, Napieralski A. Modelling electronic circuit radiation cooling using analytical thermal model [J]. Micro-electronics Journal 2000(31): 781 - 785.
- [38] 刘益才. 电子芯片冷却技术发展综述 [J]. 电子器件, 2006 29(1): 296 - 300.
- [39] 曹业玲. 矩形通道空芯冷板换热特性研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学 2003.
- [40] 李腾, 刘静. 芯片冷却技术的最新研究进展及其评价 [J]. 制冷学报 2004(3): 22 - 32.
- [41] Schiele R, Wittig S. Gas turbine heat transfer: past and future challenges [J]. ASME Journal of Propulsion and Power 2000(16): 583 - 589.
- [42] 刘大响, 程荣辉. 世界航空动力技术的现状及发展动向 [J]. 北京航空航天大学学报 2002(5): 490 - 496.

作者简介: 孙涛涛, 硕士研究生, 研究方向: 特种加工工艺。

E-mail: 1067879007@qq.com

收稿日期: 2014-04-26