

## 表面热功能结构制造领域的发展及关键技术\*

汤 勇, 潘敏强, 汤兴贤

(华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广州 510640)

**摘 要:** 表面热功能结构是指在固体表面加工出具有不同形貌、不同尺度、不同维数, 并具有散热或传热功能的结构。复杂表面热功能结构在高集成度芯片热控制方面有着广阔的应用前景。如何根据热功能需求主动设计表面结构并提出适合高效率低成本的制造方法是解决高热流密度问题的核心所在。在对当前表面热功能结构的发展现状分析基础上, 较详细论述了表面热功能结构制造领域的关键技术, 指出未来表面热功能结构研究的重点应集中在结构的微细化和复杂化、表面热功能结构的高效低成本制造方法等方面。

**关键词:** 表面功能结构; 热流密度; 微热管; 亚结构; 微结构

中图分类号: TH16

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2010)01-0001-08

### Development and Key Manufacture Technique of Functional Surface Structures for Heat Transfer

TANG Yong, PAN Min-qiang, TANG Xing-Xian

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

**Abstract:** Functional surface structures for heat transfer refers to the structures with different morphology, scales and dimensions processing on a solid surface for heat transfer. The complex functional surface structures have wide application prospects on the thermal control of highly-integrated chip. How to actively design the functional surface structures according to heat requirements and propose suitable high-efficiency low-cost manufacture method is the key issue for solving the problem of high heat flux. Based on analyzing the research on present state of functional surface structures for heat transfer, the key manufacture techniques of functional surface structures are discussed in detail. Furthermore, the priority research areas for the future study of functional surface structures are brought forward, which aim to the micronization and complication of surface structures, and high-performance low-cost manufacture methods.

**Key words:** functional surface structure; heat flux; micro heat pipe; substructure; microstructure

### 0 引 言

随着微电子芯片及其应用系统不断向轻、薄、小的方向发展, 芯片集成度不断提高, 且许多场合散热空间是封闭或半封闭的, 从而导致散热空间狭小及高热流密度等致命问题, 如高性能微处理器的热流密度已达到 $100 \text{ W/cm}^{2[1]}$ ; 大功率照明用LED芯片热流密度已达到 $200 \text{ W/cm}^{2[2]}$ ; 半导体激光器热流密度已达到 $500 \sim 1000 \text{ W/cm}^{2[3]}$ 。高热流密度导致电子产品中的热控制成本急剧上升, 产品的热失效

越来越严重, 占产品失效率的55%以上, 且随着温度增加呈几何级数增长, 已成为影响当今电子工业发展的一个瓶颈<sup>[4]</sup>。

当前, 高集成度芯片热控制的首要共性技术问题仍然是复杂表面热功能结构的设计及制造。所谓表面热功能结构是指在固体表面加工出具有不同形貌、不同尺度、不同维数, 并具有散热或传热功能的结构。合理的表面热功能结构不仅增加换热面积和诱发湍流增加湍流掺混, 还可以合理组织外部对流结构形式, 达到在同样冷气流条件下实现最高冷却效果的目的。如何根据热功能需求主动设计表面结构并提出适合高效率低成本的表面热功能结构制造方法是解决高热流密度问题的核心问题所在。在

收稿日期: 2009-11-22; 修回日期: 2009-11-28

基金项目: \*国家自然科学基金-广东省联合基金重点项目(U0834002); 国家自然科学基金项目(50905119)

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

对当前表面热功能结构的发展现状分析基础上,详细论述表面热功能结构设计和制造的关键技术,并进一步分析表面热功能结构未来的发展趋势。

## 1 表面热功能结构的发展概况

### 1.1 表面热功能结构的分类

表面热功能结构按尺度来分,可分为表面宏观结构<sup>[5-7]</sup>、表面亚结构<sup>[8-10]</sup>和表面微结构<sup>[11]</sup>。表面宏观结构尺度在1.0 mm以上,其作用是增大比表面积和组织换热气流的宏观流动;表面亚结构尺度在0.1 mm量级,其作用是进一步增大比表面积,同时通过诱发附面层湍流实现强化传热;表面微结构尺度范围是0.01~0.03 mm,该结构对气液相变传热具有显著的强化作用。

表面宏观结构又分为连续结构<sup>[5-7]</sup>和独立结构<sup>[12-16]</sup>,主要采用各种形式的肋片(横肋、斜肋、V型肋、交叉肋等)和扰流柱(圆柱型和滴型等)。随着芯片功耗的快速增加,并且受散热空间的限制,迫使高热流密度芯片采用的表面热功能结构呈现出从传统光滑表面或简单结构表面向多尺度多维结构发展的趋势,图1所示的SONY公司CPU单一宏观散热结构的发展变化过程可以说明这一点。

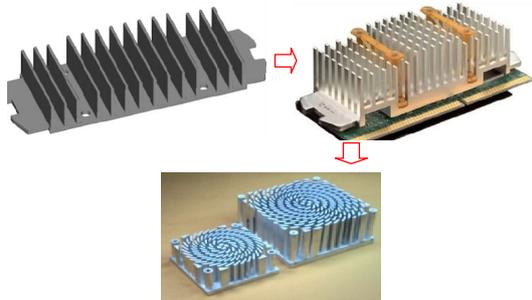


图1 单一宏观散热结构的发展变化

Fig.1 Trend of macro structure for thermal-emissive

散热表面上光滑翅片的排列方向、间距、分布密度及翅片高度均影响散热效果<sup>[17-18]</sup>,这些几何参数的优化设计<sup>[18]</sup>以及表面宏观结构对流动和换热的影响,传热表面的功能化处理等高效对流冷却方式等都一直是传热学领域所关注的热点。Vierendeels等<sup>[5]</sup>对大温差矩形腔体中自然对流传热问题进行二维数值分析。Ali等<sup>[6]</sup>用二维模型研究了两平行平板间强制对流传热问题,结果表明在两平行平板间布置偏置平板有利于提高对流散热效果,并对若干偏

置板的布局进行了优化设计。Nonino和Comini<sup>[7]</sup>研究了有肋片的矩形散热通道的三维强制对流传热问题,用有限元法对散热通道中不同角度布置的肋片对旋涡形成的影响作了系统的分析和数值研究。

解决高热流密度问题不仅需要根据具体散热环境的要求结合外部对流形式的组织设计热功能表面的宏观结构,还要进一步采用表面亚结构甚至微结构来强化传热,同时按热功能需求设计宏观结构、亚结构乃至微结构形状和几何参数。佐治亚理工学院<sup>[19]</sup>列举并归纳了几种常见的表面亚结构和微结构,如图2所示,主要包括微孔道、柱状表面、微凸台和微槽道等。

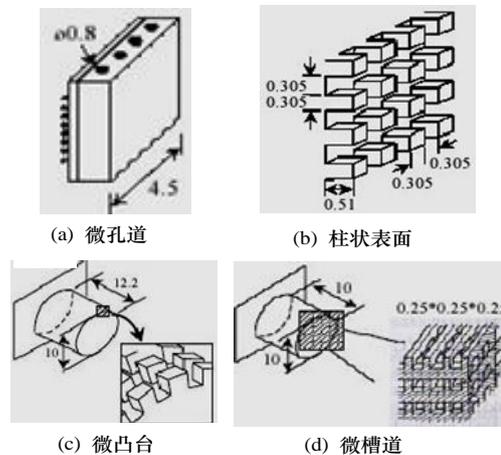


图2 常见的几种表面亚结构和微结构

Fig.2 Several common substructures and microstructures on the surface

### 1.2 用于相变传热的表面微结构

在狭小空间内热对流条件一定的情况下,单纯通过增大散热片体积、重量和比表面积来增加散热面积会导致热传输距离增大,使得导热系数一定的散热效率急剧下降,即使体积再增大也不能明显减少热阻。如何进一步提高空气强制对流散热效率是目前急待解决的关键问题。

另一方面,液体强制对流换热(如常规液体循环冷却、硅基微通道主动冷却、微喷射/雾冷却等)虽然具有很高的散热效率,但需要外加动力,系统结构复杂、体积大,成本较高且可靠性较低。制冷芯片等固体冷却方法也因其技术等原因难以大规模使用。相比较而言,具有相变传热微结构的传热元件具有极高导热率、体积小、重量轻且有良好的等温性、无需额外电力驱动等优点,可以有效的解

决狭小空间高热流密度芯片的热控制问题。

微热管是目前应用较为广泛的具有表面微结构的相变传热元件之一。微热管主要由三部分构成：毛细吸液芯结构、工质和壁壳。目前微沟槽和铜粉颗粒烧结是微热管毛细吸液芯最常用的两种表面微结构，如图3所示。沟槽式微热管主要适用于轻质价廉及重力影响小的场合；烧结式微热管主要应用于成本、重量要求不高及重力影响突出的高热流密度场合。

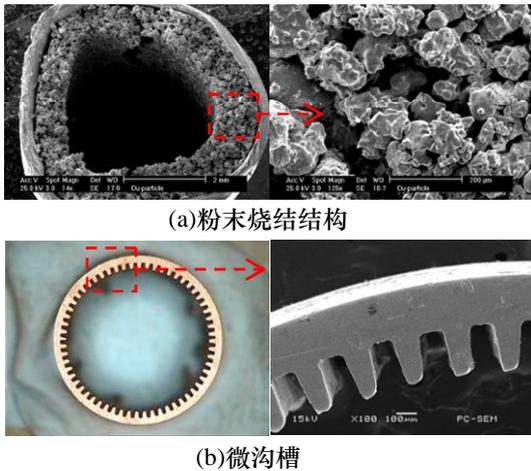


图 3 微热管两种常用的表面微结构

Fig.3 Two common microstructures in the micro heat pipe

## 2 表面热功能结构制造的关键技术

### 2.1 表面宏观结构的制造技术

表面宏观结构广泛应用于强化换热管和传统芯片翅片散热器。强化换热管主要分为螺纹管和翅片管两大类，前者一般采用冷轧<sup>[20]</sup>、滚轧<sup>[21]</sup>、胀形方法<sup>[22]</sup>等技术进行加工或成形，后者则一般采用切削加工或挤压成形。汤勇等<sup>[23]</sup>采用挤压-犁削方法在铜管的表面加工外螺纹翅片，主要是通过挤压产生塑性变形与劈切的作用以无屑加工方式形成外翅片，所形成的外翅片高度远大于吃刀深度。夏伟等<sup>[24]</sup>采用劈切挤压方法加工整体翅片管，如图4(a)所示，利用刀具将管表面金属劈切开后，随着挤压量的增加，金属沿径向和轴向流动，通过径向和轴向挤压使金属塑性变形形成翅片。袁启龙等<sup>[25]</sup>利用切削挤压成形方法来加工外翅片管，如图4(b)所示，通过刀具主切削刃切开表层金属，使切开的金属层在流动的过程中逐渐翻转直立起来，形成螺旋形式的外翅片管。

传统翅片式散热器翅片的加工有多种工艺，如冷挤压、焊接、冷轧和冷锻等。汤勇等<sup>[26-27]</sup>利用专

用刀具对整体式翅片散热器进行刨削加工。如图5所示，加工时工作台与水平面保持一倾角 $\theta$ ，工件沿图示方向进给，刀具沿水平方向往复运动，每刨削一翅片，工件进给一次。刨削成形的翅片并不与冷凝基体垂直，需要校正。在刀具前端附加一横梁推杆，在横梁推杆上附加一弹性阻尼，使其位于水平位置。刀具刨削翅片时，水平横梁推杆推动上一翅片使其与冷凝基体垂直。退刀时，横梁推杆克服弹性阻尼越过倾斜翅片重新回复至水平位置，进行下一翅片的刨削。

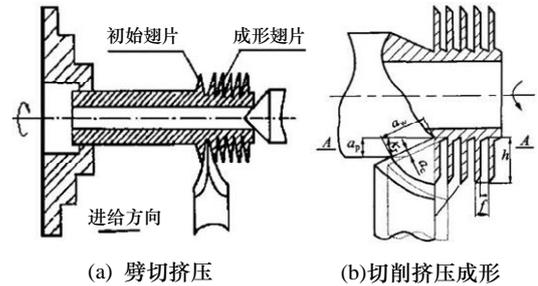


图 4 外翅片管切削加工或挤压成形

Fig.4 Cutting or extruding method for external-fin tubes

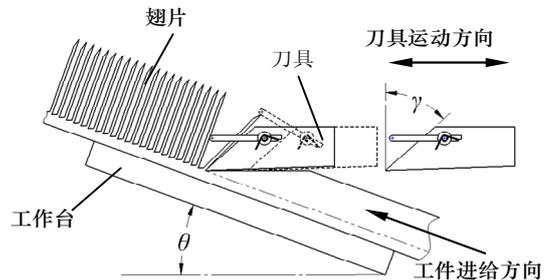


图 5 整体式翅片散热器刨削成形

Fig.5 Principle of planing for integral-fin heat sink

在生成连续带状切屑的基础上，通过控制切屑卷曲程度，获得产生和基座不分离的平直的整体式翅片。在刃倾角为 $0^\circ$ ，前角为 $55^\circ$ ，后角为 $3^\circ$ ，切削速度为 $48\text{ mm/s}$ ，切削厚度为 $0.3\text{ mm}$ 的条件下，可以得到理想的散热片翅片，如图6所示。

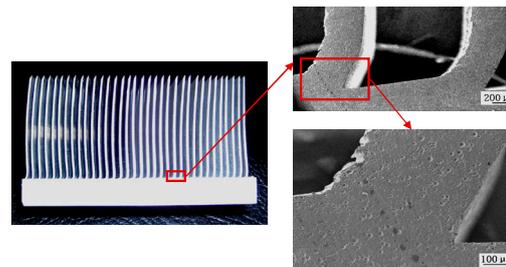


图 6 刨削成形散热片

Fig.6 Integral-fin heat sink by planing

## 2.2 表面亚结构和微结构的制造技术

表面亚结构和微结构目前主要采用拉削、犁切、挤压等技术进行加工。带有柱状翅片的散热结构是解决紧凑散热空间中高热流密度问题的一种新的途径<sup>[13-16]</sup>。汤勇等<sup>[28-29]</sup>采用犁削-拉削工艺在直径为2.5 mm的紫铜圆柱外表面加工出具有三维微翅结构,如图7所示,得到的翅片高度0.25 mm,翅化深度为柱子直径的10%,有效散热面积则增加了约50%,并进一步将其应用于柱状CPU散热中。其柱状宏观结构、表面亚结构和微结构叠加关系如图8所示。通过具有微翅结构的柱状CPU散热器与同等尺寸的光柱CPU散热器进行散热效果测试对比,发现相对于光柱CPU散热器,具有微翅结构的柱状散热器散热效率提高了近20%。

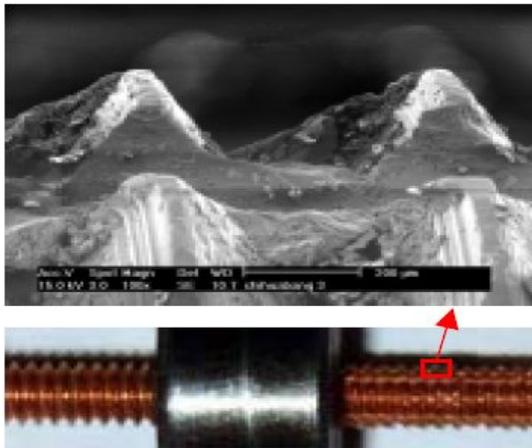


图7 犁削-拉削成形三维柱面微翅结构

Fig.7 Ploughing-broaching for three-dimensional cylindrical substructure

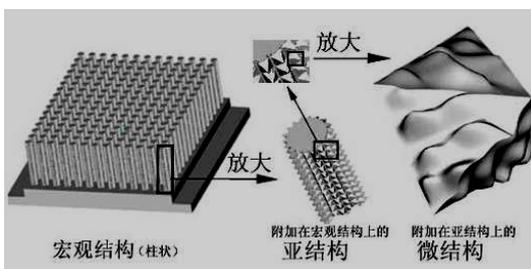


图8 柱状表面宏观结构、亚结构和微结构叠加关系

Fig.8 Relationship among macro structure, substructure, microstructure on the cylindrical surface

池勇等<sup>[27]</sup>在经过刨削成形的整体式散热器背面,采用犁切-挤压方法加工微沟槽和间歇微翅共同组成的复合式微沟槽翅冷凝结构,如图9所示,微沟槽深度为200  $\mu\text{m}$ ,槽宽100  $\mu\text{m}$ ,槽间距240  $\mu\text{m}$ ,

间歇微翅高度约为100  $\mu\text{m}$ ,间距约为500  $\mu\text{m}$ 。

犁切-挤压加工原理如图10所示,通过专用的犁切-挤压刀具沿水平方向犁削工件表面,使工件在犁切-挤压的作用下生成微沟槽翅结构。刀具每水平方向犁削一次,生成一组微沟槽翅结构。然后工件向外进给一次,刀具进行下一组微沟槽翅结构的犁切-挤压,同时对上一组翅片进行二次挤压,以增加翅片高度。在犁切-挤压成形刀具运动过程中发生犁切成槽、挤压成缘、堆积成翅和转移撕裂,四个阶段周而复始循环形成具有间歇微翅的微沟槽翅结构。

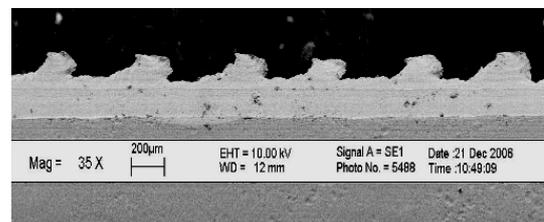


图9 犁切-挤压成形的微沟槽翅冷凝结构

Fig.9 Microgrooves for cooling by ploughing-extruding

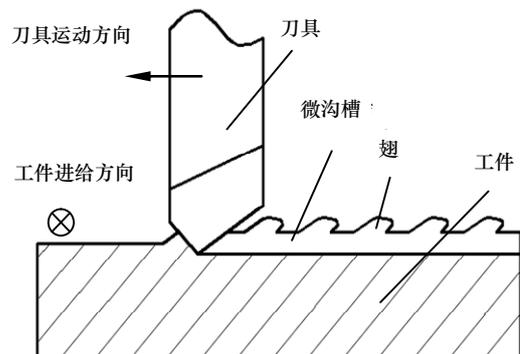


图10 微沟槽翅结构犁切-挤压加工示意图

Fig.10 Principle of ploughing-extruding for microgrooves

池勇等<sup>[30]</sup>采用犁切-挤压一次成形加工工艺在0.4 mm厚的铜带表面加工出V型毛细微沟槽结构,其原理如图11所示。铜带安装在刨床工作台上,刀具沿Y轴负方向犁削其表面,在铜带表面犁切-挤压出V型微沟槽。刀具沿Y方向犁削一次,工件沿X负方向进给一次,进行下一个V型微沟槽的犁切-挤压,同时对上一个V型微沟槽二次挤压修正,以增加翅片高度。当犁切深度为0.3 mm、槽距为0.24 mm时,得到V型毛细微沟槽结构槽宽约为200  $\mu\text{m}$ 、槽深超过400  $\mu\text{m}$ ,槽夹角小于30°。

如图11所示,在犁切-挤压出A面微沟槽结构的基础上,然后将铜带翻转,并旋转90°,使A面

微沟槽与犁切方向垂直,重复 A 面微沟槽加工过程犁切-挤压出 B 面微沟槽。在成形 B 面微沟槽过程中,刀具脱离 A 面微沟槽时,由于刀具表面的摩擦,滞留于刀具表面的部分金属继续发生塑性变形,跟随刀具凸出于 A 沟槽表面,容易形成端面鼓包。B 面不同的挤压-犁切深度对 A 面的沟槽结构会产生很大的影响,如图 12 所示。

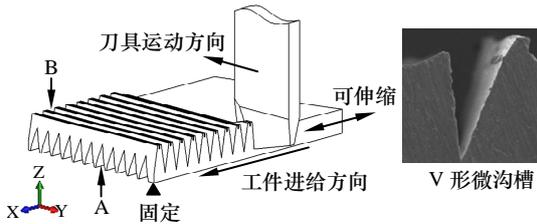


图 11 铜带表面犁切-挤压加工微沟槽原理图  
Fig.11 Formation of microgrooves on the surface of copper strips by ploughing-extruding process

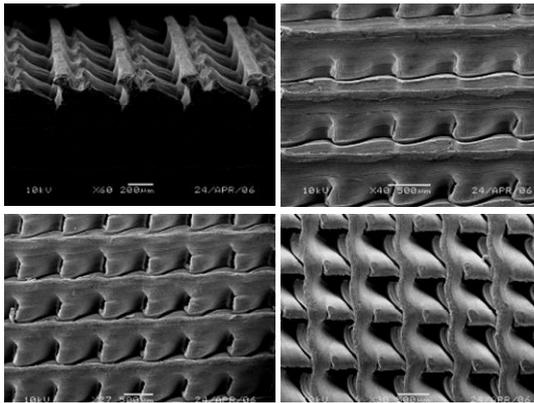


图 12 不同犁切-挤压深度对 A 面结构的影响  
Fig.12 Influences of ploughing-extruding depths on the structure of plate-A

### 2.3 微热管内表面微结构制造技术

微热管可以划分为平板热管、圆形热管和分离热管等几大类。目前关于微热管内表面沟槽制造方法的文献报道主要集中于平板式热管。Mallik 等<sup>[31]</sup>首先利用掩膜制造、氧化、光刻和刻蚀等步骤在硅晶片上加工出一系列沟槽,然后利用双重真空镀膜在沟槽上喷涂一层 25 μm 的金属薄层,从而产生了一系列的小三角形沟槽; Kang 等<sup>[32]</sup>在 4 英寸硅晶片上利用微加工和共晶粘合技术制造出 5 cm×5 cm<sup>2</sup>的具有三层结构的径向沟槽微热管; Gillot 等<sup>[33]</sup>制造出一种具有四边形沟槽扁平硅微热管,利用等离子刻蚀方法在硅晶片上加工出高和宽分别为 115 μm 和 90 μm 的微沟槽; Lee 等<sup>[34]</sup>首

次使用 CMOS 兼容性微加工技术制造集成微热管系统; Cao 和 Gao<sup>[35]</sup>利用电火花线切割制造出两种扁平轴向槽铜-水微热管。

对于圆形热管内部微沟槽,汤勇等<sup>[36-42]</sup>提出采用挤压-犁削和高速充液旋压成形两种方法加工。挤压-犁削工艺加工圆形微热管轴向微沟槽原理<sup>[36-39]</sup>如图 13 所示,在牵引力作用下通过拉杆带动多齿拉刀沿轴向方向前进,刀具上的切削刃在铜管内表面犁削出微沟槽毛细结构。该加工装置结构简单且更换刀具容易,但是也存在多齿刀具在犁削铜管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问题。

利用挤压-犁削所加工的微沟槽由主沟槽和次沟槽组成,如图 14(a)所示。Liu 等<sup>[39]</sup>将多齿刀具反向安装,在原来所形成的微沟槽基础上进行二次反向挤压-犁削成形,得到的微沟槽具有更加复杂的粗糙形貌,如图 14(b)所示。

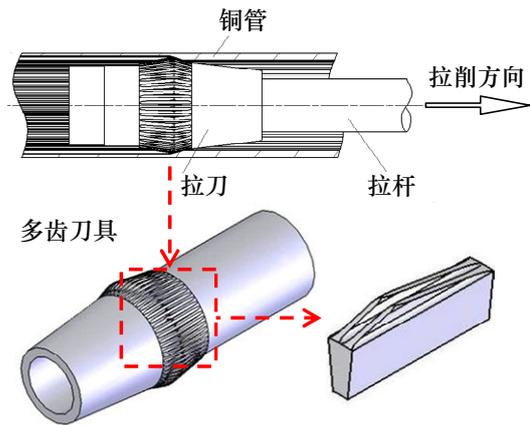


图 13 圆形微热管内表面沟槽挤压-犁削成形  
Fig.13 Ploughing-extruding process for fabricating microgrooves inside the circular micro heat pipe

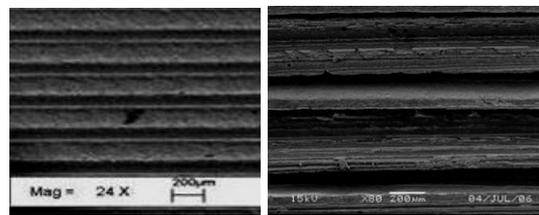


图 14 挤压-犁削成形的微沟槽形貌  
Fig.14 Pattern of microgrooves formed by ploughing-extruding process

高速充液旋压加工原理<sup>[40-42]</sup>如图 15 所示,通过旋压珠在充满润滑油的管坯内表面超高速旋转

挤压, 强迫旋压区发生塑性变形, 同时铜管在外力作用下匀速向前运动, 嵌在刀齿中的金属在轴向拉力作用下发生塑性变形, 在铜管的旋压和轴向拉伸共同作用下沿轴向生成与刀齿形状相匹配的微沟槽。充液油膜可以发挥冷却作用, 同时也使旋压珠和管壁之间存在一定的润滑以减少摩擦阻力。

在壁厚比 $\alpha=1.06$ 、转速为 $n=10000$  r/min、拉速 $8000$  mm/min、材料延伸率 $50\%$ 、旋压量 $\delta=0.20$  mm、入模口锥角 $13^\circ$ 的实验条件下, 高速充液旋压成形的圆热管内表面微沟槽SEM图如图16所示。

李西兵等<sup>[43]</sup>提出了一种微热管内表面铜粉颗粒烧结的方法, 先把铜管底端用堵头堵住, 并

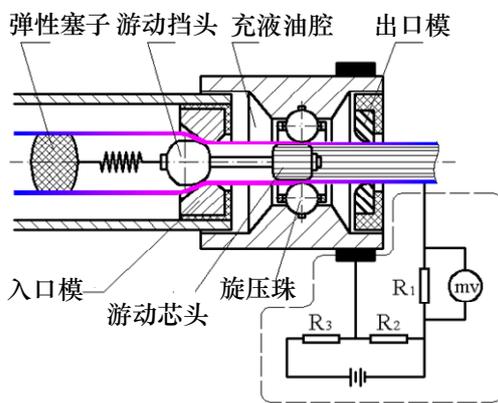


图 15 圆形微热管内表面沟槽高速充液旋压加工

Fig.15 Oil-filled high-speed spinning process of micro-grooves inside the circular micro heat pipe

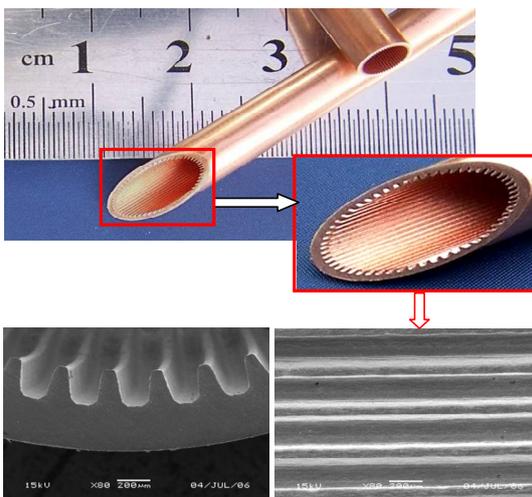
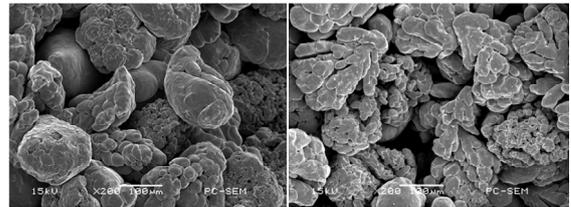


图 16 高速充液旋压成形的圆热管内表面微沟槽形貌

Fig.16 Pattern of microgrooves formed by oil-filled high-speed spinning process

插入不锈钢芯棒, 然后利用微型振动机来实现烧结铜粉颗粒的快速和均匀填入, 封堵好另外一段堵头后放入具有气氛保护式的烧结炉中, 在一定的烧结温度与烧结时间下进行烧结, 烧结完后采用专用工具取出芯棒与两个堵头即而形成铜粉颗粒烧结层。图17所示为 $850^\circ\text{C}$ 烧结温度下微热管内表面铜粉颗粒层结构。



(a)  $850^\circ\text{C}$ 时铜粉颗粒横截面 (b)  $850^\circ\text{C}$ 时铜粉颗粒轴向剖面

图 17  $850^\circ\text{C}$ 温度下微热管内表面铜粉颗粒烧结结构

Fig.17 Copper powders sintered inside the micro heat pipe at  $850^\circ\text{C}$

### 3 表面热功能结构的发展趋势

表面热功能结构的研究引发机械制造、工程热物理等学科交叉的科学问题。随着研究的不断深入, 表面热功能结构将在广度和深度方面进一步拓展, 并在以下几个方面取得进展:

(1) 表面热功能结构微细化。如国际上沟槽式微热管毛细吸液芯制造技术发展主要体现在进一步提高沟槽深宽比、优化几何形状等方面。目前世界知名的热管制造厂商提供的高性能微热管( $\Phi 6$  mm)内55个矩形沟槽的深度已经达到 $0.20\sim 0.22$  mm。华南理工大学利用高速充液旋压方法加工的微热管( $\Phi 6$  mm)内55个矩形沟槽的深度已经达到 $0.29$  mm。沟槽深宽比可达 $3:1$ 。

(2) 表面热功能结构趋向复杂化。如在铜管内表面铜粉颗粒烧结层, 采用多粒度铜粉分层或梯度式烧结毛细结构, 可以增加铜粉与壁面的接触强度, 减小热阻, 并且解决毛细压力提高的同时液体回流阻力增大的矛盾。有研究表明<sup>[44]</sup>, 微热管内表面的微沟槽在蒸发段采用槽数多和开口窄结构; 而冷凝段采用开槽数少和开口宽的分段复合结构时, 此热管的传热能力为常规设计热管的3倍。

(3) 表面热功能结构的制造向高效低成本加工技术倾斜。尽管复杂的表面热功能结构可以有效解决高热流密度的问题, 但是只有通过高效低成本

的制造技术才能发挥表面热功能结构在热控制的作用并实现其大规模应用。如何根据热功能需求提出复杂表面结构主动设计方法和行之有效的制造方法一直是当前的技术挑战。

#### 4 结 论

表面热功能结构的设计和制造在解决目前电子芯片或其它应用场合高热流密度问题方面有着广泛的应用前景。目前对表面热功能结构还需进行更深入的研究,建立起表面热功能结构机械、工程热物理、材料等多学科交叉融合的理论体系,并提出适合推广应用的主动功能结构设计方法和高效低成本制造方法,对促进电子芯片及化工等领域的热控制共性技术进一步发展具有重要的意义。

#### 参考文献:

- [1] McGlen R J, Jachuck R, Lin S. Integrated thermal management techniques for high power electronic devices [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2004, 24: 1143-1156.
- [2] 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.
- [3] Nishikawa Y. High optical intensity 2-D AlGaAs laser arrays [J]. *SPIE*, 2000, 3628: 71-79.
- [4] Markoff J. Intel's big shift after hitting technical wall [J]. *The New York Times*, 2004.
- [5] Vierendeels J, Merci B, Dick E. Numerical study of natural convective heat transfer with large temperature differences [J]. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 2001, 11(4): 329-341.
- [6] Ali A H, Kishinami K, Hanaoka Y, et al. Numerical study on laminar flow forced-convection heat transfer for air in a channel with offset plates heated by radiation heat flux [J]. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 1998, 8(5-6): 539-558.
- [7] Nonino C, Comini G. Convective heat transfer in ribbed square channels[J]. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 2002, 12(5): 610-628.
- [8] Tang Y, Xia W, Liu S, et al. Fin formation model during pre-roll ploughing of copper 3D outside fin tube [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2001, 11(5): 712-716.
- [9] Tang Y, Liu S, Xia W, et al. The establishment and analysis of fin formation model during ploughing process [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, 138: 390-393.
- [10] Quesnel N. A cleaner path to cool chips [J]. *Machine Design*, 2002, 74(12).
- [11] Goodson K E, Kurabayashi K, Pease R F W. Improved heat sinking for laser-diode arrays using microchannels in CVD diamond [J]. *IEEE Transaction On Components, Packaging, and Manufacturing Technology-Part B*, 1997, 20(1): 104-109.
- [12] Soule C. Heat sinks help electronic devices keep their cool [J]. *Machine Design*, 1999, 71(16).
- [13] Dagan B. Cooling the pin-fin way [J]. *Machine Design*, 2000, 72(20).
- [14] Ames B. B. More ways to beat the heat [J]. *Design News*, 2000, 55(1).
- [15] DeMeis R, Gels. Special sinks shed IC heat [J]. *Design News*, 1998, 53(10).
- [16] Narasimhan S. Characterization of compact heat sink models in natural convection [C]. *Proceedings of IPACK'01 The Pacific Rim/ASME International Electronic Packaging Technical Conference and Exhibition*, 2001, Hawaii, USA.
- [17] Guo Z Y, Li D Y, Wang B X. A novel concept for convective heat transfer enhancement[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1998, 41(140): 2221-2225.
- [18] Yazawa K. Value adaptive design of compact heat sinks-challenges in consumer electronics [C]. *JSME Project Meeting, 2003 Design and Manufacturing of High Performance Heat Sinks for Microelectronic Equipment*, 2003.
- [19] Joshi Y. Emerging thermal challenges in electronics driven by performance [J]. *Reliability and Energy Efficiency. Thermic* 2002.
- [20] 李敏孝. 波纹管冷轧工艺的研究和发展 [J]. *石油化工设备*, 2007, 36(02): 59-62.

- [21] 刘吉普, 唐春. 横纹槽管滚轧加工及强度研究 [J]. 化工装备技术, 1998, (3): 26-28.
- [22] 王玉, 黄乃宁, 杨彬如, 等. 高效橡胶胀形波纹管机构的研究 [J]. 锻压技术, 2000, 25(6): 35-36.
- [23] 汤勇, 张发英, 陈澄洲, 等. 挤压-犁削外翅片铜管加工机理的研究 [J]. 工具技术, 1997, 31(1): 7-10.
- [24] 夏伟, 吴斌, 汤勇, 等. 整体翅片管的劈切-挤压加工 [J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(1): 27-30.
- [25] 袁启龙, 李言, 郑建明, 等. 切削-挤压翅片管成形过程的研究 [J]. 中国机械工程, 2005, (17): 860-864.
- [26] Tang Y, Chi Y, Liu X, et al. Planing process of fin heat sinks [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2005, 15(4): 743-748
- [27] 池勇, 汤勇, 陈锦昌, 等. 微小型毛细泵环热控制系统及其制造技术 [J]. 机械工程学报, 2007, 43(12): 166-170.
- [28] Tang Y, Liu W, Wu Z, et al. Formation and flanging burrs control of three-dimensional substructure on copper surface [J]. Materials Science Forum, 2004, 471-472: 248-254.
- [29] 刘崴, 汤勇, 刘亚俊, 等. 柱面三维翅结构加工方法及毛刺生成分析 [J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2004, 32 (5): 9-13.
- [30] Chi Y, Tang Y, Chen J, et al. Forming process of cross-connected finned micro-grooves in copper strips [J]. Transaction of Nonferrous Metals Society of China, 2007, 17(4): 267-272.
- [31] Mallik A K, Peterson G P, Weichold M H. Fabrication of vapor-deposited micro heat Pipe arrays as an integral part of semiconductor devices [J]. Journal of Microelectromechanical systems, 1995(4): 119-131.
- [32] Kang S W, Tsai S H, Chen H C. Fabrication and test of radial grooved micro heat pipes [J]. Applied Thermal Engineering, 2002(22): 1559-1568.
- [33] Gillot C, Avenas Y, Cezac N, et al. Silicon heat pipes used as thermal spreaders [J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2003(2): 332-339.
- [34] Lee M, Wong M, Zohar Y. Integrated micro-heat-pipe fabrication technology [J]. Journal of microelectromechanical systems, 2003(2): 138-146.
- [35] Cao Y, Gao M. Experiments and analysis of flat miniatures heat pipes [C]. Proceedings of the intersociety Energy Conversion Engineering Conference, 1996, 2: 1402-140.
- [36] Tang Y, Chi Y, Wan Z, et al. A novel finned micro-groove array structure and forming process [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 203(1~3): 548-553.
- [37] 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.
- [38] Chen P, Tang Y, Liu X, et al. Formation of integral fins function-surface by extrusion-ploughing process [J]. Transactions Nonferrous Metals Society of China, 2006, 16 (5): 1029-1034.
- [39] Liu X, Tang Y, Pan M, Jiang L. Manufacturing heat pipe by combined ploughing-extrusion process [C]. Proceedings of the International Conference on Integration and Commercialization of Micro and Nanosystems, 2007: 1417-1422.
- [40] Li Y, Tang Y, Li X, et al. Study on inner micro-grooves of heat pipe spinning process and multi-tooth mandrel [J]. Key Engineering Materials, 2008, 375-376: 358-363.
- [41] 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.
- [42] 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.
- [43] 李西兵, 李勇, 汤勇, 等. 烧结式微热管吸液芯的成型方法 [J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2008, 36(10): 114-119.
- [44] 庄骏, 张红. 热管技术及其工程应用 [M]. 化学工业出版社, 2000(6): 236.

作者地址: 广州华南理工大学

510640

机械与汽车工程学院

Tel: (020) 85516947(潘敏强)

E-mail: mqpan@scut.edu.cn