Y形构形微通道流动换热特性的数值分析

徐国强 王 梦 吴 宏 陶 智

(北京航空航天大学 航空发动机气动热力重点实验室, 北京 100191)

摘 要: 针对矩形芯片提出了Y形构形微通道的芯片内部冷却结构,通过三维数值计算比较了Y形构形微通道与传统直微通道中的流体层流流动和换热特性,并对Y形构形微通道的重要结构参数进行了优化.研究表明:在相同对流换热面积和水利直径的条件下,Y形构形微通道具有比直微通道更高的传热效率和更低的进出口压降,可以满足高热负荷需求.在研究范围内通道级数为3级、分叉角度为60°、分支个数为2时,散热器的综合换热性能最好.以上结论为Y形构形微通道的结构设计提供了重要依据.

关 键 词: 微通道; 散热器; 构形; 强化换热

中图分类号: V 231.1

文献标识码: A 文章编号: 1001-5965(2009)03-0313-05

Numerical analysis of flow and heat transfer characteristics of Y-fractal-link micro channel networks

Xu Guoqiang Wang Meng Wu Hong Tao Zhi

(National Key Lab on Air Engine, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract A new fractal structure, Y-fractal-link micro channel network, was proposed for cooling the inside of cubic chip. Numerical simulations of laminar heat and flow transfer were conducted for both Y-fractal-link micro channel network and straight parallel micro channel network. In addition, the optimization of this new structure was discussed with some important parameters. Results reveal that with the same convective surface area and hydraulic diameter, Y-fractal-link micro channel network could significantly improve the heat transfer performance of the heat sink and decrease the pressure drop through the micro channel, so this new structure will be useful for cooling devices with high thermal load. In the range of study, the best integrative performance of Y-fractal-link micro channel heat sink is obtained when the number of branching levels is 3, the bifurcation angle is 60° and the number of branches at each level is 2. These results are beneficial to the design and improvement of heat sink configuration.

Key words micro channel; heat sink; fractal; enhancement heat transfer

随着计算机技术的不断发展,电子设备的体积越来越小,而功率和集成度却大幅度提高,高热流密度的产生成为了一种不可抗拒的趋势,于是电子设备的冷却问题就越来越突出.资料显示,目前55%的电子芯片失效问题都是由于过热引起的[1],因此,研究有效可行的电子芯片冷却方案已经成为迫在眉睫的问题.自从参考文献[2]开创性地提出了微通道散热器这一实用高效的芯片内部冷却方式,微通道技术就被广泛地应用于电子设备散热领域.虽然微通道能够有效提高散热器的局部对流换热系数和换热面积,但在实际应用中,平行的直微通道存在着两个致命的缺点:①微小的通道尺寸引起了通道两侧过高的压差.②直微通道使得散热器表面温度场极不均匀,容易破坏设备的电力特性.为此,许多对散热器中直微通道的改进技术应运而生.通过研究自然界中

收稿日期: 2008-04-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50436010)

作者简介: 徐国强(1964-),男,河北承德人,教授, guoqiang_xu@buaa.edu.cn.

生物体极其高效的物质传输结构, 参考文献 [3] 提出了构形理论来指导最优微通道结构的设计. 参考文献 [4]将构形微通道应用于圆盘形芯片的内部冷却用散热器中, 并研究了流体在构形微通道中的流动换热特性.

到目前为止, 构形微通道大多应用于圆盘形芯片内部冷却用散热器中, 并且没有对一些重要的几何参数进行优化研究. 本文针对于常见的矩形芯片提出了 Y 形构形微通道的芯片内部冷却结构, 通过与传统微通道结构作对比, 分析了该结构的流动换热特性, 并对其流道级数、分叉角度、分支个数这些重要几何参数进行了优化, 从中得出了一些有助于设计的重要结论.

1 数学模型

本文所提出的典型 Y 形构形微通道结构如图 1所示: 底部为尺寸是 30mm × 30mm × 1mm 的硅制散热器, 黑色阴影部分为嵌在矩形散热器内的 Y 形构形微通道, 通道深为 0. 4mm, 截面形状为矩形; 紧贴在散热器上部的透明部分为 30mm × 30mm × 1mm 的矩形芯片的主体.

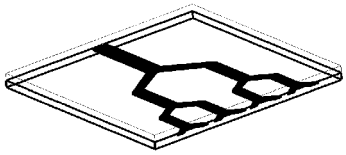


图 1 芯片内部 Y 形构形微通道结构

图 2为计算区域的二维剖面图, 其中 L_{la}为 Y 形构形微通道第 l级的水平段, L_{lb}为第 l级的分叉段, D_l为第 l级的水力直径, θ为 Y 形构形微通道的分叉角度. 参考文献 [5]通过对血液循环系统的研究发现, 当构形微通道的尺寸达到最佳比例关系时可以使通道的流动阻力达到最小, 参考文献 [6]依据此理论针对于圆盘形芯片的构形内部冷却结构提出了微通道尺寸的最佳比例关系:

$$\left.\begin{aligned}\frac{D_{l+1}}{D_l} &= n^{-1/3}\\ \frac{L_{l+1}}{L_l} &= n^{-1/2}\end{aligned}\right\} \tag{1}$$

式中, D 为通道的水利直径; L 为通道长度; n 为通道分叉后的分支个数; 下标 l为分叉处上一级的通道级数; 下标 $l+1$为分叉处下一级的通道级数. 本文通过对构形微通道结构的几何分析, 将继续采用这一微通道最佳比例关系, 并且针对于新型的 Y 形构形微通道结构作出了以下扩展:

$$\frac{L_{la}}{L_{lb}} = n^{-1/2} \tag{2}$$

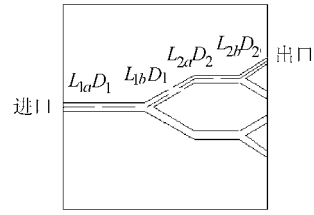


图 2 计算区域剖面图

$$\frac{L_{(l+1)a} + L_{(l+1)b}}{L_{la} + L_{lb}} = n^{-1/2} \tag{3}$$

数值计算中选取的流体工质为水, 在进口流速为 5m / s的情况下, 雷诺数 Re为 1118, 流动属于层流范围. 为了得到通道中流体的温度和压力特性, 对三维不可压情况下的层流流动进行稳态求解.

计算中采用有限容积法对控制方程进行离散, 对流项的离散格式采用二阶迎风格式, 扩散项则采用中心差分格式. 压力与速度的耦合问题用 SIMPLE方法来处理. 边界条件选取为: 进口边界给定流体的进口平均速度为 5m / s, 并取等温边界条件, 温度为 293K; 出口为标准大气压条件; 散热器表面为恒热流密度边界条件; 其它壁面均为绝热无滑移表面.

数值模拟中采用了非结构网格, 并对边界层附近的网格进行了加密. 将此次计算网格与沿流向网格数量为其 1. 5倍的网格进行计算比较, 流道内最大温差在 ±1% 左右. 结果表明, 这样的网格密度已经可以得出与网格无关的数值解.

为了比较不同结构散热器的散热量 Q 和所需泵功 P 的综合特性, 定义了无量纲参数 J:

$$J = Q/P \tag{4}$$

$$P = m\Delta p/\rho \tag{5}$$

$$Q = m c_p (T_{out} - T_{in}) \tag{6}$$

式中, m 为流体的质量流量, kg / s; Δp 为通道两侧的总压差, Pa; ρ为流体工质的密度, kg/m^3; c_p为流体的比热容, J/(kg• K); T_{out}为通道出口流体的温度, K; T_{in}为通道进口流体的温度, K. 无量纲参数 J 体现了散热器的综合散热性能, 其数值越大则换热效果越好.

2 计算结果分析

2. 1 与传统微通道的对比

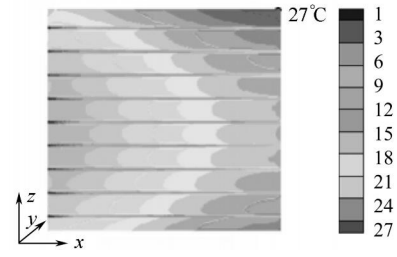
表 1为计算中 Y 形构形微通道的几何尺寸, 与其进行比较的是平行直微通道, 由 9 组 30mm × 0. 4mm × 0. 4mm 的平行微通道组成, 这样保证了两种散热器具有相同的通道总长、通道

对流换热面积和水利直径.

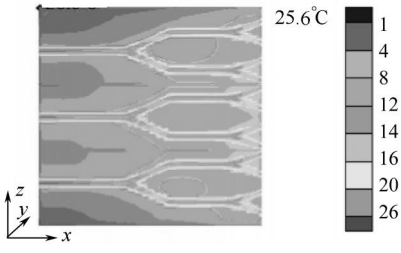
表 1　Y形构形微通道几何尺寸　　mm

l	H_l	L_{la}	L_{lb}	D_l
1	0.4	11.67	8.24	0.5
2	0.4	8.33	5.89	0.4

图 3为两种散热器沿微通道中截面的温度场分布图. 如图所示, 直微通道散热器中截面的最高温度为 27℃, 而 Y形构形微通道散热器中截面的最高温度为 25.6℃, 并且两种温度场的分布存在较大区别: 对于直微通道而言温度沿流向迅速上升, 形成了较大的温度梯度, 这严重影响了芯片的稳定性; 而对于 Y 形构形微通道而言, 全场温度分布很均匀, 温度梯度的减小有效地避免了芯片局部热负荷过高带来的危害.



a　直微通道



b　Y形构形微通道

图 3　两种通道的温度场分布

图 4为两种通道中心截面压力平均值的分布曲线. 为了更好地进行比较, 横坐标采用了无量纲长度 X ($X = x/L$). 由于两种微通道结构均具有良好的对称性, 所以可以选取任意一条通道的中心截面的压力平均值分布. 如图所示: 流体在直微通道中的总压降约为 33 kPa, 而在 Y 形构形微通道中的总压降仅为 20 kPa. 在压力下降的过程中, Y 形构形微通道在每个分叉处均产生了一定的压力回升, 直接导致了整个通道总压降的下降. 明显的压力回升是由通道分叉后截面积突然变大, 压力随之升高引起的.

2.2　Y形构形微通道的优化

为了提高 Y形构形微通道的综合换热性能, 对其结构中一些重要的几何参数进行了优化, 其中包括: 通道级数、分叉角度和分支个数. 在优化过程中, 所有工况的对流换热面积均设定为

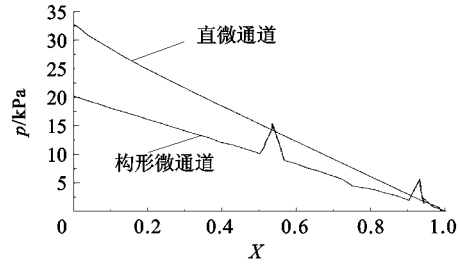


图 4　两种通道中心截面压力平均值分布

181mm^{2}以方便比较. 本文采用了发热功率为 50W 的芯片, 此时热流密度已达到 10^5 W /m^{2}量级.

1) 流道级数的影响

微通道的主要缺点是容易堵塞, 由于 Y形构形微通道是不断分叉发展的, 所以通道级数较多时, 末级通道容易出现交叉, 从而加大了通道堵塞的概率. 参考文献[7]曾系统地研究了各级通道堵塞对系统散热带来的危害. 本研究只针对 1~4级的 Y形构形微通道结构进行了分析.

不同级数 l的微通道散热器中截面的温度场分布如图 5所示 (分叉角度均为 90°, 分支个数为 2). 通过比较发现, 随着通道级数的增加, 温度场的分布越来越均匀, 高温区域逐步向角落处逼近并缩小. 截面的最高温度 T_{max}随着通道级数的增加而逐渐下降, 由 l= 1时的 T_{max} = 89.9℃下降到 l= 4的 T_{max} = 81.5℃. 但是下降的趋势逐渐减缓, l= 3时, T_{max} = 82.7℃, l= 4时, T_{max}仅下降了 1.2℃. 这是由于通道级数的增加使流体分布更合理, 全场温度梯度越来越小, 最终减小了截面最高温度. 同时在相同的对流换热面积条件下, 通道的宽度随级数的增加而减小, 导致通道起始段流体对温度场的影响范围减小, 所以截面最高温度的下降越来越缓慢.

图 6为不同级数的 Y形构形微通道中心截面压力平均值的分布曲线. 可以看出, 所有微通道均在分叉处产生了明显的压力回升现象, 这是由于通道分叉后截面积突然变大, 导致流体速度下降, 从而造成了压力的升高. l= 4时, 通道两端压差最大约为 26 kPa, 而 l= 1时, 通道两端压差最小约为 14 kPa, 由此可见通道级数的增加将引起通道两端的压差增大. 同时, 随着通道级数的增加, 通道的截面积逐渐减小, 导致了分叉处的压力回升越来越小.

应用无量纲参数 J来评价不同通道级数 l对散热器综合性能的影响. l= 1时, J为 102, 然后 J先随着级数的增加而迅速增大, 当 l= 3时, J为 602, 接着 J又随着级数的增加而减小, 当 l= 4时, J为 498. 这是由于随着通道级数的增加, 散热

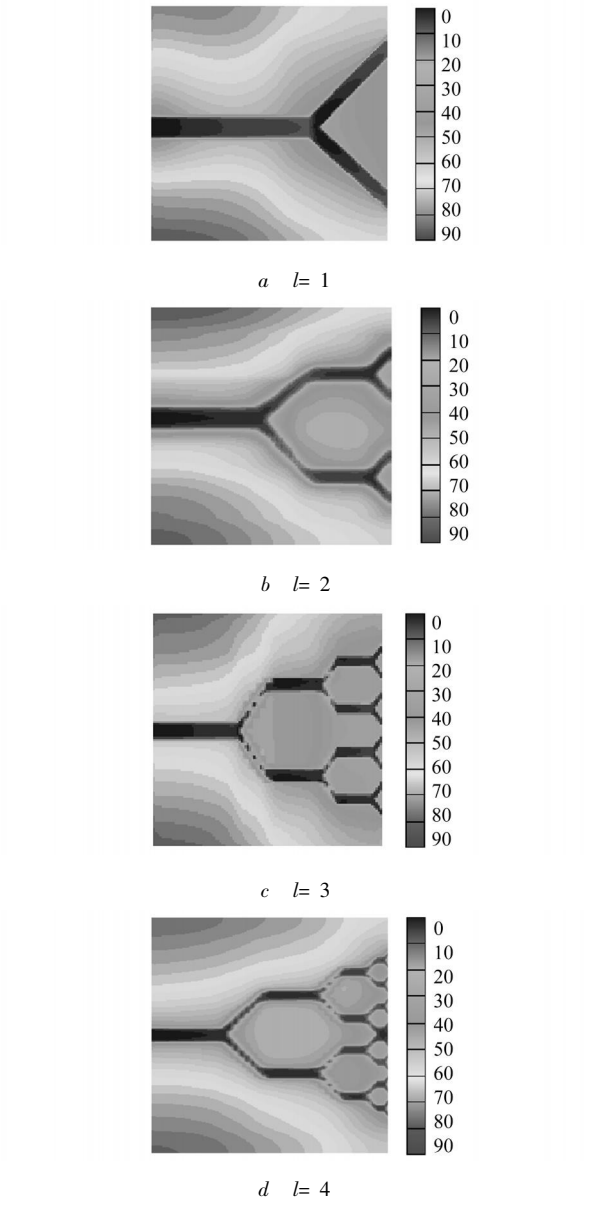


图 5 不同级数微通道散热器中截面温度场

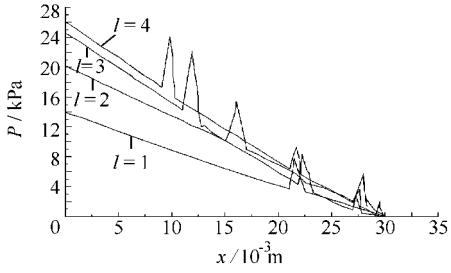


图 6 不同级数 Y形构形微通道的压力分布

器的换热增强, 而通道的压降也随之增大. 因此, 将换热和压降这两方面因素进行综合, 并同时考虑随级数增加而难度逐渐增大的加工特性, 在当前工况的研究中, 最佳的通道级数为 3.

2) 分叉角度的影响

目前国内外对于构形微通道的研究很少, 并且均假定微通道的分叉角度对通道中流体的流动换热没有影响. 本文通过三维数值模拟发现, 分叉角度对散热器的综合换热性能有直接影响, 因此有必要对其进行优化. 研究中选取了 4种不同的分叉角度: 30°, 60°, 90°和 120° (通道级数均为 2, 分支个数为 2).

图 7为不同分叉角度 θ对 Y 形构形散热器沿微通道中截面的温度影响. 如图所示, 当 θ从 30°上升到 120°时, 高温区域逐渐向通道起始段的角落里逼近, 面积随之缩小, 有利于温度场的均匀性. 当 θ= 120°时, 通道包围区域的温度升高. 这是由于分叉角度过大时, 该区域远离流体, 不能得到充分的冷却所致. 同时, 当分叉角度逐渐增大, 截面最高温度将下降, 由 θ= 30°的 90 8℃下降到 θ= 120°的 84 5℃, 下降趋势逐渐变缓.

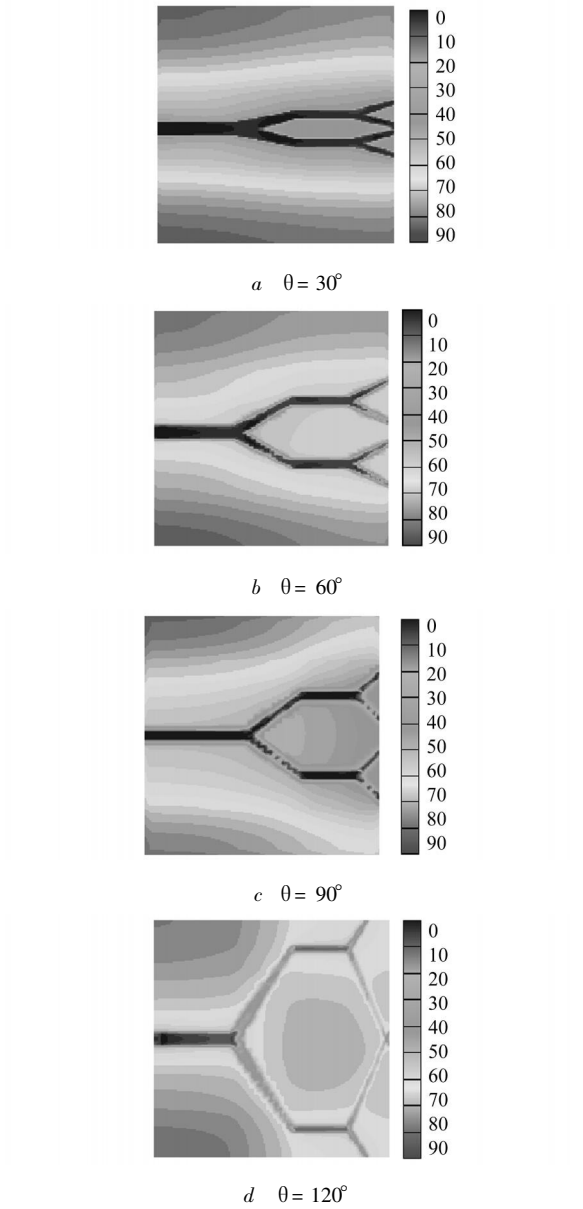


图 7 不同分叉角度微通道散热器中截面温度场

图 8为不同分叉角度对 Y 形构形微通道中

心截面压力平均值分布的影响. 与前面结果相同, 在通道的分叉处均有压力的突然上升. 当 θ< 90°时, 总压降随 θ的变化很小, 而 θ= 120°时总压降突然上升到 30 kPa 可见过大的分叉角度反而使得微通道中的流阻增大, 从而增加了通道两端压降. 计算结果表明, 当 θ= 60°时通道中压降最低为 16 25 kPa

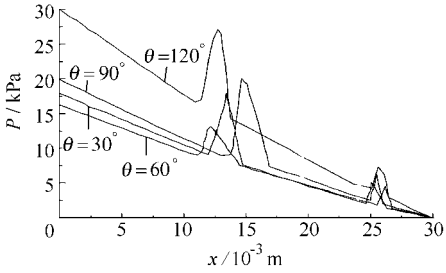
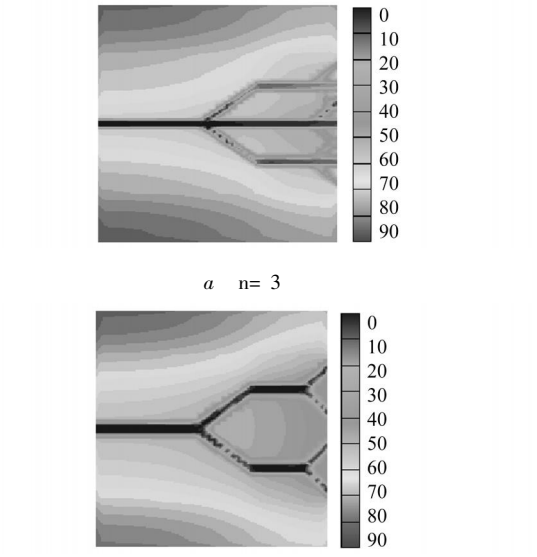


图 8　不同分叉角度的 Y形构形微通道的压力分布

当分叉角度由 30°变为 60°时, J 由 125突增到 575, 然后 J随着分叉角度的增加而减小. 这表明 θ= 60°时, 换热的显著提高和最小总压降值的出现使得散热器的综合性能达到最佳. 因此, 当前研究中最佳的通道分叉角度为 60°.

3) 分支个数的影响

图 9为通道分支个数 n= 2和 n= 3时对通道中截面温度场的影响. 从图中可观察到, 两图的温度场分布基本相似, 但最高温度值却有很大差别, 当 n= 3时, T_{max}约为 89. 8℃, 而当 n= 2时, T_{max}约为 84 9℃. 这是由于 n= 3时, 第 2级的平行于流向的直通道流阻很小, 大部分流体由此通过, 使得整场温度分布不均匀, 因此散热器的综合性能将变差. 无量纲参数 J的数值也证实了此结果, 当 n= 2时, J为 386, 而当 n= 3时, J仅为 220



a　n= 3

b　n= 2

图 9　不同分支个数微通道散热器中截面温度场

3　结　论

本文提出了一种新型芯片内部冷却用构型微通道散热器 ——Y形构形微通道散热器, 研究了通道中流体的流动换热特性, 并对该结构中重要的几何参数进行了优化, 得到的结论如下:

1) Y形构形微通道与传统微通道相比可以明显降低全场的最高温度, 改善了温度场均匀性, 并且有效地降低了进出口的总压降.

2) 通道级数越多, 全场温度越均匀, 通道进出口压降越大. 综合评价不同通道级数对散热器性能的影响, 得到了通道级数的最佳值.

3) 温度场随通道分叉角度的增大而变均匀, 全场最高温度下降; 通道进出口压降随分叉角度的增加先减小后增大. 当 θ= 60°时获得了散热器的最佳综合换热性能.

4) Y 形构形微通道分支个数 n = 2比 n= 3具有更好的散热器综合换热性能.

由于 Y形构形微通道散热器具有更优的综合换热性能, 因此在微机电系统、生物工程学和航空领域都将得到广泛的应用.

参考文献 (**References**)

[1] 张兆光. 电子设备冷却设计手册 [M]. 安徽: 电子工业部第十四研究所, 1983: 149- 162
Zhang Zhaoguang. The cooling of electronic equipment design handbook[M]. Anhui: The Fourteen Graduate School of Electronic Industry Department, 1983: 149- 162 (in Chinese)

[2] Tuckerman D B, Pease R FW. Higher-performance heat sink for VLSI[C] //IEEE Electron Device Lett [S. l.]: IEEE, 1981: 126- 277

[3] Bejan A. Shape and structure, from engineering to nature[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000

[4] Pence D V. Improved thermal efficiency and temperature uniformity using fractal-like branching channel networks[C] // International Conference on Heat Transfer and Transport Phenomena in Microscale. Begell House, New York: [s. n.], 2000: 142- 148

[5] Murray C D. The physiological principle of minimum work, in the vascular system and the cost of blood-volume[C] // Proc Natl Acad Sci USA: [s. n.], 1926: 207- 214

[6] Pence D V. Reduced pumping power and wall temperature in microchannel heat sinks with fractal-Like branching channel Networks[J]. Microscale Thermophys Eng, 2002, 6(4): 319 - 330

[7] Wang Xiangqi, Mujumdar A S, Yap C. Numerical analysis of blockage and optimization of heat transfer performance of fractal-like microchannel nets[J]. Journal of Electronic Packaging, 2006, 128(3): 38- 45

(责任编辑: 张　嵘)