

焊料键合实现 MEMS 真空封装的模拟^{*}

程迎军 蒋玉齐 许 薇 罗 乐

(中国科学院上海微系统与信息技术研究所 传感技术国家联合重点实验室, 上海 200050)

摘要: 结合典型的焊料键合 MEMS 真空封装工艺, 应用真空物理的相关理论, 建立了封装腔体的真空度与气体吸附和解吸、气体的渗透、材料的蒸气压、气体通过小孔的流动等的数学模型, 确定了其数值模拟的算法. 通过实验初步验证了模拟结果的准确性, 分析了毛细孔尺寸对腔体和烘箱真空度的影响, 实现了 MEMS 器件真空封装工艺的参数化建模与模拟和仿真优化设计.

关键词: MEMS; 真空; 封装; 模拟

EEACC: 2527; 8460

中图分类号: TN402

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2005)05-1033-07

1 引言

众所周知, 封装技术是影响 MEMS 器件成本和性能的重要因素, 然而近年来在 MEMS 的研究领域, 主要是针对 MEMS 芯片本身的设计与模拟^[1~4], 缺少对 MEMS 封装进行系统化的模拟与仿真研究. 随着 MEMS 封装问题日益重要, MEMS 封装建模、模拟与仿真已逐渐被重视并已开展一系列研究.

在很多应用中, MEMS 器件对真空度和气密性提出了很高的要求. 外部环境中的污染会导致传感器输出信号发生偏移, 并会腐蚀其内部的金属层. 在真空环境下进行气密封装, 不仅可以保护传感器远离外界污染, 还可以使微加速度计、微陀螺仪等得到更大的 Q 值和更高的灵敏度. 从设计和优化考虑, 有必要研究和确定真空封装工艺和封装结构对密封腔体中的真空度影响. 本文结合典型的焊料键合 MEMS 真空封装工艺, 应用真空物理和气体吸附/脱附等的相关理论^[5~7], 建立了封装腔体的真空度与气体吸附和解吸、气体的渗透、材料的蒸气压、气体通过小孔的流动等的数学模型, 确定了其数值模拟的算法. 通过实验初步验证了模拟结果的准确性,

并分析了毛细孔尺寸对腔体和烘箱真空度的影响, 实现了 MEMS 器件真空封装工艺的参数化建模与模拟和仿真优化设计.

2 真空封装工艺及建模

在真空环境中用焊料来密封 MEMS 器件是一种常用的真空封装工艺^[8], 其示意图如图 1 所示. 基本工艺为: 分别在盖板和基板(或管座)上制作金属化层和焊料环, 并在焊料环上留有可供气体通过的毛细孔; 用精密对位设备将盖板和芯片对准后, 将焊料适度熔融进行预键合; 将预键合后的结构移入真空烘箱, 抽真空并保持一定的时间; 然后以一定速率升温至焊接温度, 此时, 焊料熔化并焊接上下基板, 同时焊料环中的毛细孔融合封死, 随后降温使焊料凝固形成真空密封腔体. 最后所形成腔体的真空度与腔体的三维尺寸、焊料环中毛细孔的尺寸及数量、真空烘箱的真空度和升温前的基础温度、升温前保持时间和焊接所用的熔融温度曲线等有关.

对于这样的 MEMS 器件真空封装系统, 真空度计算的等效物理模型如图 1(a) 所示. 在任意时刻, 烘箱内和封装 MEMS 器件的腔体内的气体流动会保持动态的平衡. 根据真空物理中有关抽气和气体

^{*} 国家高技术研究发展计划资助项目(批准号: 2003AA40415)

程迎军 男, 1978 年出生, 博士研究生, 从事电子封装及热机械可靠性的计算机模拟研究.

罗 乐 男, 1956 年出生, 研究员, 从事先进电子器件封装及可靠性研究.

2004-07-20 收到, 2004-09-07 定稿

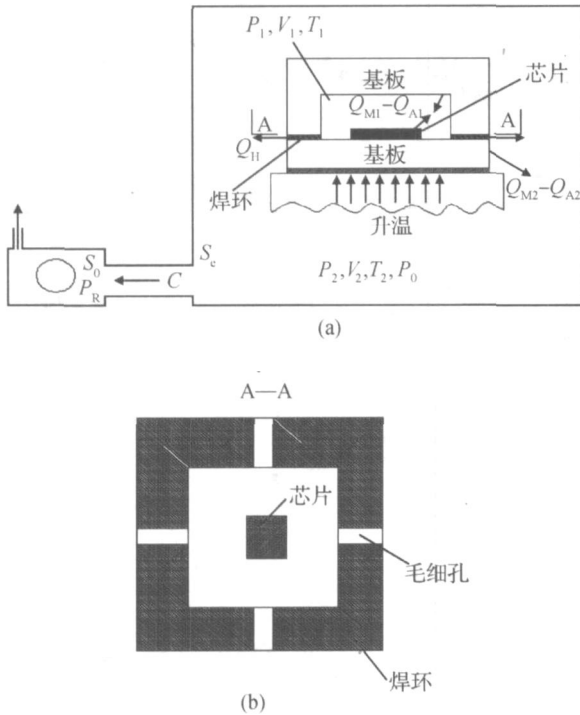


图 1 焊料键合真空封装示意图

Fig. 1 Schematic view of solder bonding vacuum packaging

分子运动论、气体吸附和解吸、气体在材料中的渗透、材料的蒸气压、气体通过小孔的流动等理论,可确定焊料键合 MEMS 真空封装过程中,烘箱与腔体中真空度的常微分控制方程分别为:

$$V_1 \frac{dP_1}{dt} = - Q_{A1} + Q_{M1} - Q_H \quad (1)$$

$$V_2 \frac{dP_2}{dt} = - P_2 S_e - Q_{A2} + Q_{M2} + Q_{Z2} + Q_{S2} + Q_L + Q_H \quad (2)$$

式中 V_1, P_1 为腔体的体积和压强; V_2, P_2 为烘箱的体积和压强; S_e 为真空泵对真空烘箱的有效抽速; Q_{A1}, Q_{M1} 对应为腔体内材料表面单位时间吸附和解吸的分子数量; Q_{A2}, Q_{M2} 对应为烘箱内材料表面单位时间吸附和解吸的分子数量; Q_{Z2} 是烘箱内材料的蒸发气流量; Q_{S2} 为外界大气通过器壁向真空烘箱内渗透的气体量; Q_L 为大气通过各种密封连接处向真空烘箱的漏气流量; Q_H 为腔体气体通过毛细孔向真空烘箱流入的气体量。

这是属于在考虑体系极限压强和材料出气的情况下,真空泵通过变化的导管流导和变化的抽速对容器抽气的瞬变过程的研究. 方程中各项的处理如

下:

(1) S_e : 根据真空装置与电路的类比,可知 $S_e = CS_0 / (C + S_0)$, 其中 C 为真空泵入口到容器出口之间连接管路的流导,其值与气流状态有关,即导管在粘滞流、过渡流和分子流时的流导是不一样的:粘滞流时,对直径为 D , 长度为 L 的圆截面导管,其流导为: $C = D^4 \bar{P} / 128 L$, 其中 \bar{P} 为管内的平均压强,为粘滞系数;分子流时,对截面为 A , 长度为 L , 周长为 B 的圆截面导管,其流导为: $C = \frac{16}{3} \times \frac{\sqrt{kT}}{\sqrt{2} m} \times \frac{A^2}{BL}$, 其中 k 为波尔兹曼常数 ($1.3805 \times 10^{-23} \text{ J/K}$), m 为分子的质量, T 为绝对温度. S_0 为真空泵的实际抽速. 大多数抽气装置的特征抽速在相当宽的压强范围内是不变的,而在 $100 \sim 0.5 \text{ Pa}$ 时,抽速的变化较大. 抽速的变化是通过分段来处理的. 因为大多数真空泵的抽速都随其入口压强 P_R 的变化而变化,所以在预先知道泵的抽速与其入口压强的关系曲线之后,可将压强分成多段,取每段的平均抽速作为该压强段真空泵的实际抽速.

(2) Q_{Z2}, Q_{S2}, Q_L : 对于一个设计、加工制造良好的真空系统,这三项都是很微小的,其总体气体量 $Q_0 = Q_{Z2} + Q_{S2} + Q_L$ 的贡献表现为体系存在一定的极限压强 $P_0 (Q_0 = S_e P_0)$. 极限压强 P_0 可通过将真空烘箱抽一定时间后所保持的稳定不变的真空度来确定. 在抽气的初期,由于 $P_0 \ll P_2$, 可以不考虑 P_0 的影响,即 $P_0 = 0$. 而当体系压强降到一定的程度(一般为 $P_2 = 10 P_0$),就得考虑极限压强 P_0 的影响.

(3) $Q_{M1} - Q_{A1}, Q_{M2} - Q_{A2}$: 在抽气的过程中,烘箱内和腔体内的压力不断降低,表面上的解吸速率大于吸附速率,气体吸附量逐渐减少,气体从表面上缓缓放出,所以这两项的差值实际上代表的是材料的放气性能. 有些工程材料的放气量数据可以查到^[7],对于不能查到的,可通过实验来测量. 对于本真空系统,可通过对比不同温度下,在真空烘箱中放入计算体系中包含的材料(如玻璃、硅等)前后,真空烘箱真空度曲线的差值来计算材料的放气率(与时间的关系). 一般用抽空 1h 的放气速率数据. 实践经验表明:在低真空阶段,表面放气与空间气体相比,数量很小,其影响可以忽略不计;而在中、高真空阶段,放气的快慢直接影响抽气过程.

(4) Q_H : 气体通过毛细孔的流动可用图 2 来表

示. 孔的截面积为 A , 孔两边的压强分别为 P_1 和 P_2 ($P_1 > P_2$), 气流从压强较高的空间流向压强较低的空间. 如果压强较高, 即气体分子的平均自由程 $\ll d$ (d 为小孔尺寸), 则惯性力与摩擦力起主要作用. 气体逸出小孔时由于孔的阻力, 先略收缩, 后立即波浪式扩张, 形成湍流. 在这种流动下, 通常流量随 P_2 的降低而增加; 但在 $P_2/P_1 = r$ 值小到临界值

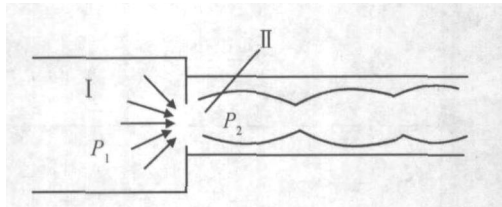


图 2 气体通过小孔的流动示意图

Fig. 2 Schematic diagram of gas flow through hole

r_c 后, 流量就不再随 P_2 的降低而变化. 在临界值 r_c 时, 气体在小孔处的流速已达声速 (气流为粘滞流), 容器中压强下降的信号无法通过声速的区域而影响到 P_1 处. 依流体力学, r_c 为:

$$r_c = \left[\frac{2}{\gamma + 1} \right]^{-\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad (3)$$

式中 γ 为气体定压比热与定容比热的比值. 在 $P_2/P_1 > r_c$ 时, 流量则由下式确定:

$$Q_H = A P_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \sqrt{\frac{2}{\gamma - 1} \times \frac{RT_1}{M} \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \right]} \quad (4)$$

式中 T 为空间气体的温度; R 为普适常数 (8.314 J/K); M 为分子量.

当压强很低且气体分子的平均自由程 $\gg d$ 时, 气体分子通过小孔时相互无碰撞, 由 P_1 飞往 P_2 的分子或由 P_2 飞往 P_1 的分子都是相互独立的. 因此单位时间内通过小孔的气体量: 由 P_1 飞往 P_2 的气体量: $Q_1 = \bar{v} A P_1 / 4$; 由 P_2 飞往 P_1 的气体量: $Q_2 = \bar{v} A P_2 / 4$. 式中 \bar{v} 为分子的平均速率. 从 P_1 流往 P_2 的净流量为: $Q = Q_1 - Q_2 = \bar{v} A (P_1 - P_2) / 4$.

3 数值算法

根据前面的分析, 需分粘滞流和分子流两种情况对方程 (1), (2) 分别进行处理:

(1) 粘滞流时: 令 $C = \frac{D^4}{128 L} \bar{P} = C_1 \bar{P}$, 将 $\bar{P} =$

$\frac{P_R + P_2}{2}$, $P_R = -\frac{V_2}{S_0} \times \frac{dP_2}{dt}$ 及 $S_c = \frac{CS_0}{C + S_0}$ 代入方程 (2) 中并整理得:

$$\frac{dP_2}{dt} = \frac{B - \sqrt{B^2 + 4ED}}{2E} \quad (5)$$

其中 $E = \frac{C_1 V_2^2}{S_0}$, $B = 2S_0 V_2 + \frac{C_1 V_2 (Q_{M2} - Q_{A2})}{S_0} + \frac{C_1 V_2 Q_H}{S_0} + C_1 V_2 P_0$, $D = S_0 C_1 P_2^2 - S_0 C_1 P_0 P_2 - (2S_0 + C_1 P_2) (Q_{M2} - Q_{A2}) - 2S_0 Q_H - C_1 P_2 Q_H$. 而

$$\frac{dP_1}{dt} = \frac{Q_{M1} - Q_{A1} - Q_H}{V_1} \quad (6)$$

(2) 分子流时: $C = \frac{16}{3} \times \sqrt{\frac{kT}{m}} \times \frac{A^2}{BL}$, 与压强

无关, 将其代入方程 (2) 中得:

$$\frac{dP_2}{dt} = \frac{S_0 C}{V_2 (S_0 + C)} (P_0 - P_2) + \frac{Q_{M2} - Q_{A2} + Q_H}{V_2} \quad (7)$$

而 $\frac{dP_1}{dt}$ 与粘滞流时相同:

$$\frac{dP_1}{dt} = \frac{Q_{M1} - Q_{A1} - Q_H}{V_1} \quad (8)$$

由于上述常微分方程组 (5), (6) 和 (7), (8) 与 P_1, P_2 有较为复杂的关系, 不适宜采用解析法进行求解, 所以, 本文通过 C 语言编程, 采用数值模拟方法 (半隐式龙格-库塔法) 对方程组 (5), (6) 和 (7), (8) 进行联合求解. 通过编制相应的软件, 即可实现 MEMS 器件真空封装工艺的参数化建模与模拟, 模拟腔体的三维尺寸、焊料环中毛细孔的尺寸及数量、焊接温度等封装工艺参数对烘箱和待封腔体内真空度的影响.

4 验证实例

为了验证上述模拟结果的准确性, 以在真空回流炉中焊料键合真空封装 MEMS 器件为研究实例, 进行了相应的模拟计算和测量实验. 实验所采用的回流炉内烘箱的体积为 $2.32 \times 10^{-3} \text{ m}^3$, 泵的特征抽速为 $1.25 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$, 导管的尺寸为 $1.5 \times 95 \text{ cm}$; 烘箱的极限压强为 $1 \times 10^{-2} \text{ Pa}$; 烘箱材料的放气量为 $9 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$. 为了方便待封腔体内压强的测量, 实验中选用了尺寸较大的管座 (基板) 和相应的盖板. 其内腔体积为 $1.53 \times 10^{-5} \text{ m}^3$, 腔体内材料

的放气量为 $2 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$. 待封腔体内的真空度采用标准热传导真空计进行测量,其方法是将真空计规管内电阻温度系数较大的细钨丝电阻两端的引线剪断,将引线焊接在管座的引脚上. 真空计的测量回路通过回流炉的接口连接到管座的引脚上,即可进行真空度的测量,而真空回流炉烘箱内真空度的变化可以从其面板上的显示获得.

图 3 和图 4 分别为毛细孔直径为 $300\mu\text{m}$ 时,常温下抽气 5min 的过程中,待封腔体和烘箱真空度变化的实测值与从模拟中提取的相应时间下计算值的比较. 从图中可以看出:实测值与计算值变化趋势相同,且数据相差不大. 在同一时间下,实测值要比计算值稍高,这主要是因为刚开始的时候,真空泵的抽速较快,真空计的读数显示存在一定的滞后. 另外,真空计本身的误差对实验结果也有一定的影响. 在工程领域内,可认为实验的结果初步验证了模拟的准确性.

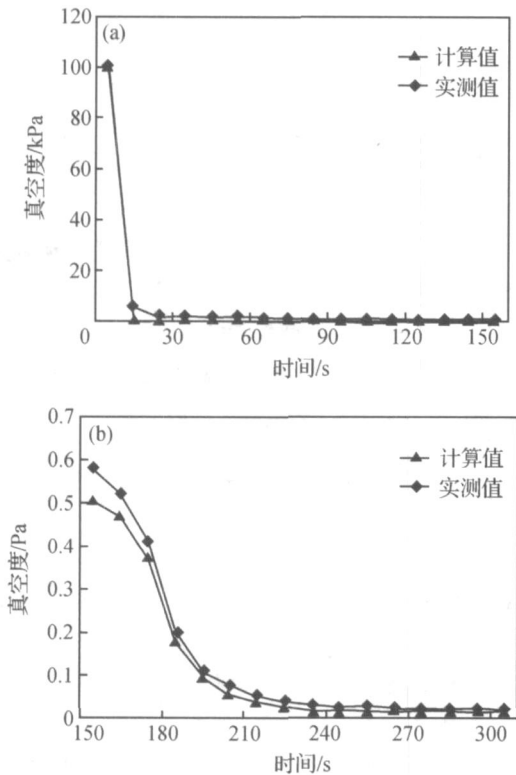


图 3 毛细孔直径为 $300\mu\text{m}$ 时,待封腔体真空度变化的实测值与计算值的对比 (a) 0 ~ 150s; (b) 150 ~ 300s

Fig. 3 Comparison of measurement results and simulation results of vacuum degree of the cavity to be packaged when diameter of the capillary hole is $300\mu\text{m}$ (a) 0 ~ 150s; (b) 150 ~ 300s

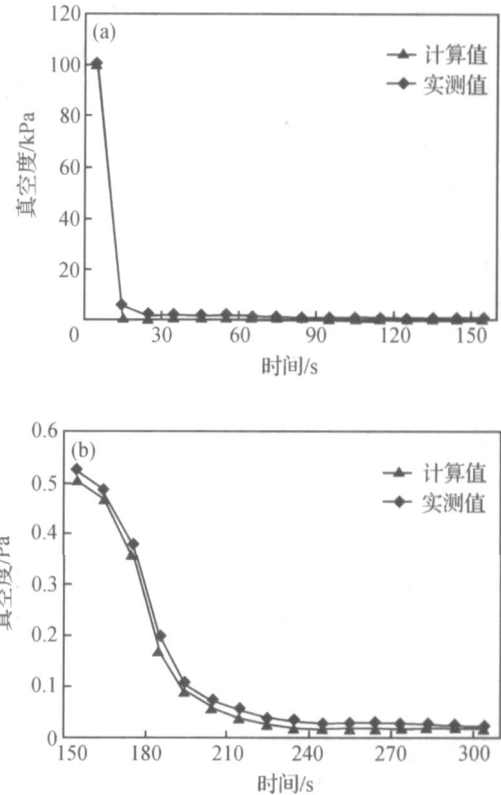


图 4 毛细孔直径为 $300\mu\text{m}$ 时,烘箱真空度变化的实测值与计算值的对比 (a) 0 ~ 150s; (b) 150 ~ 300s

Fig. 4 Comparison of measurement results and simulation results of vacuum degree of the oven when diameter of the capillary hole is $300\mu\text{m}$ (a) 0 ~ 150s; (b) 150 ~ 300s

5 毛细孔的影响

为了研究毛细孔尺寸对体系真空度的影响,考虑六种毛细孔尺寸: $50\mu\text{m} \times 4$, $100\mu\text{m} \times 4$, $150\mu\text{m} \times 4$, $200\mu\text{m} \times 4$, $250\mu\text{m} \times 4$ 及 $300\mu\text{m} \times 4$ (4 个). 采用上述模拟方法对常温下该体系在抽气 5min 的过程中,烘箱和待封腔体内真空度的变化情况进行了模拟比较,其结果如图 5 ~ 8 所示.

图 5 和图 6 分别为毛细孔直径对腔体内和烘箱内真空度随时间变化曲线的影响. 图 7 和图 8 分别为毛细孔直径 $50\mu\text{m}$ 和 $100\mu\text{m}$ 时,腔体与烘箱真空度随时间变化曲线的对比. 从图中可以看出:毛细孔直径为 $50\mu\text{m}$ 时,腔体内的真空度开始下降速度都很快,50s 后的下降速度趋于平缓. 同一时间腔体内和烘箱内的真空度存在较大的差别;而对于其他几种毛细孔直径,同一时间腔体内和烘箱内真空度的差别很小,两者的真空度在 10s 后趋于平缓. 所以对

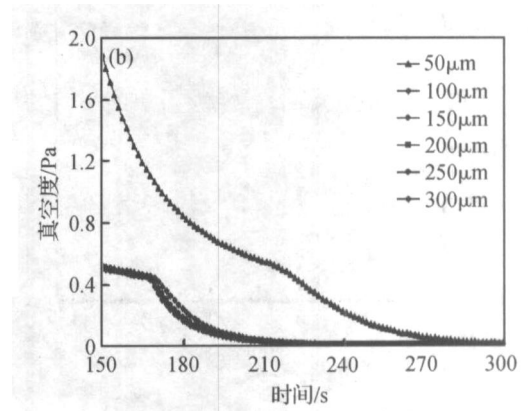
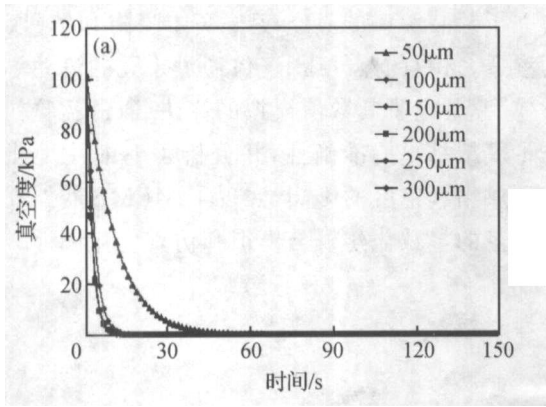


图 5 毛细孔直径对待封腔体内真空度随时间变化曲线的影响 (a) 0 ~ 150s; (b) 150 ~ 300s

Fig. 5 Effect of the size of capillary hole on vacuum degree of the cavity to be packaged (a) 0 ~ 150s; (b) 150 ~ 300s

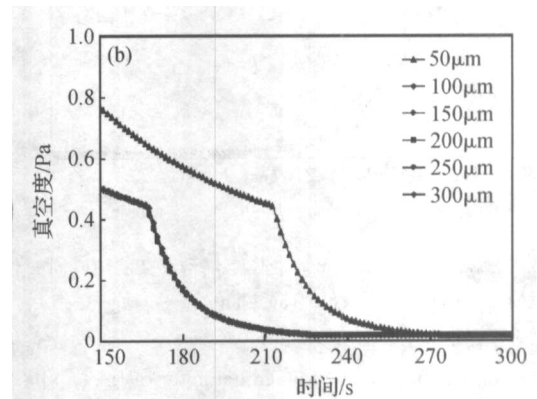
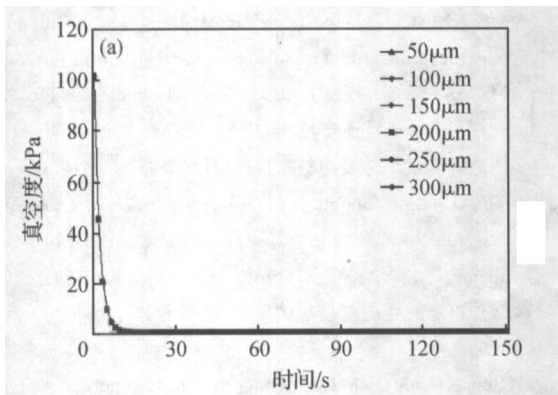


图 6 毛细孔直径对烘箱内真空度随时间变化曲线的影响 (a) 0 ~ 150s; (b) 150 ~ 300s

Fig. 6 Effect of the size of capillary hole on vacuum degree of the oven (a) 0 ~ 150s; (b) 150 ~ 300s

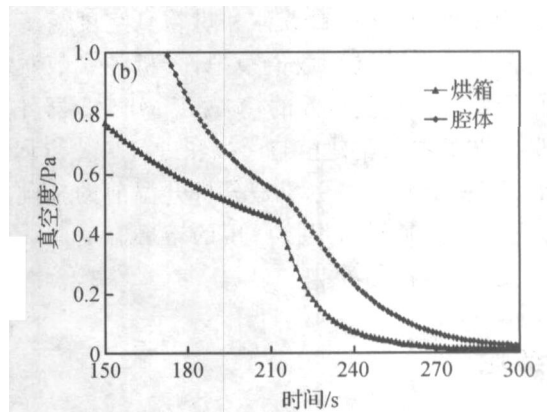
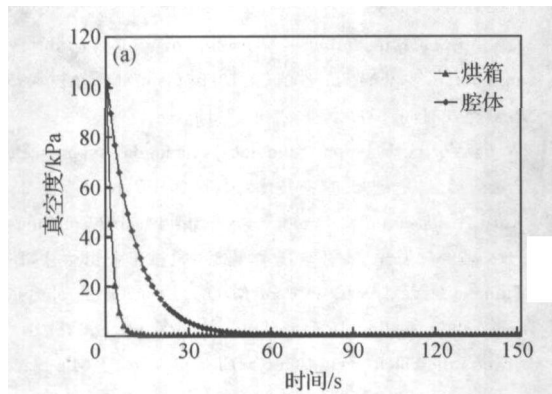


图 7 毛细孔直径为 50μm 时腔体与烘箱真空度随时间变化曲线对比 (a) 0 ~ 150s; (b) 150 ~ 300s

Fig. 7 Comparison of vacuum degree of the cavity to be packaged and the oven when diameter of the capillary hole is 50μm (a) 0 ~ 150s; (b) 150 ~ 300s

于这样的—个体系, 300μm 的毛细孔直径相比于 100μm 的毛细孔直径对真空度的改善很小, 而 100μm 的毛细孔直径相比于 50μm 的毛细孔直径对

真空度的改善很明显. 因此, 对于上述的研究体系, 综合考虑到模拟结果和方便封装过程中毛细孔的融合, 建议采用 100μm 的毛细孔直径.

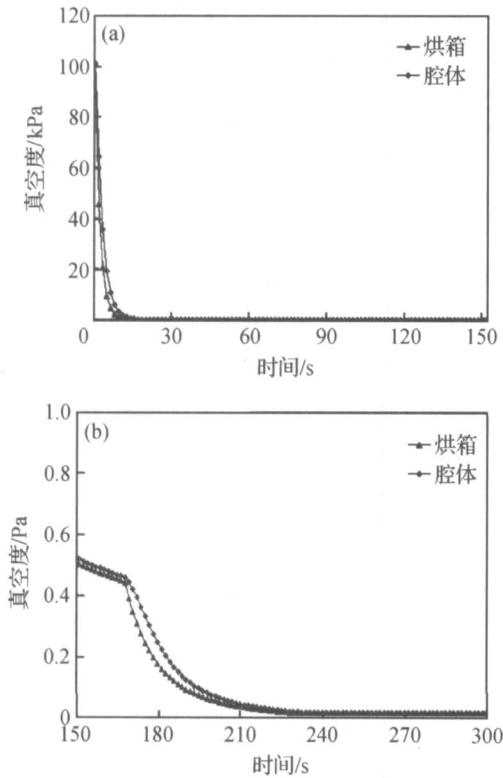


图 8 毛细孔直径为 $100\mu\text{m}$ 时腔体与烘箱真空度随时间变化曲线对比 (a) $0 \sim 150\text{s}$; (b) $150 \sim 300\text{s}$

Fig. 8 Comparison of vacuum degree of the cavity to be packaged and the oven when diameter of the capillary hole is $100\mu\text{m}$ (a) $0 \sim 150\text{s}$; (b) $150 \sim 300\text{s}$

上述分析表明:对 MEMS 器件的真空封装工艺过程进行建模,建立待封腔体和烘箱真空度与工艺参数之间的关系并进行数值模拟,分析各参数对真空度的影响是可行且有效的,实现了 MEMS 器件真空封装工艺的参数化建模与模拟和进行封装仿真优化设计.下一步的工作主要是分析升温前的基础温度、升温前保持时间和焊接所用的熔融温度曲线等对真空度的影响.

6 结论

本文结合典型的焊料键合 MEMS 真空封装工

艺,应用真空物理和气体吸附/脱附等的相关理论,建立了封装腔体的真空度与气体吸附和解吸、气体的渗透、材料的蒸气压、气体通过小孔的流动等的数学模型,确定了其数值模拟的算法.通过实验初步验证了模拟结果的准确性,并分析了毛细孔尺寸对腔体和烘箱真空度的影响,实现了 MEMS 器件真空封装工艺的参数化建模与模拟和仿真优化设计.

参考文献

- [1] Zhang Peijun, Huang Qing'an. Simulation of anisotropic etching of silicon based on MATLAB. Chinese Journal of Semiconductors, 2002, 23(4): 440 (in Chinese) [张佩君, 黄庆安. 基于 MATLAB 的硅各向异性腐蚀过程模拟. 半导体学报, 2002, 23(4): 440]
- [2] Mei Niansong, Huang Qing'an. Modeling and simulation of a test structure for measuring vertical fracture strength of MEMS film. Chinese Journal of Semiconductors, 2004, 25(1): 82 (in Chinese) [梅年松, 黄庆安. MEMS 薄膜纵向断裂强度的静电测试结构模型与模拟. 半导体学报, 2004, 25(1): 82]
- [3] Ning Jin, Liu Zhongli. Simulation of performance and optimal design of condenser microphone. Chinese Journal of Semiconductors, 2003, 24(8): 876 (in Chinese) [宁瑾, 刘忠立. 电容式微传声器的性能模拟与优化设计. 半导体学报, 2003, 24(8): 876]
- [4] Sun Kehao, Qian Jin, Zhang Lixian. Computer-aided design and simulation for MEMS devices. Journal of Mechanical Strength, 2001, 23(4): 488 (in Chinese) [孙克豪, 钱劲, 张立宪, 等. MEMS 器件的计算机辅助设计与模拟. 机械强度, 2001, 23(4): 488]
- [5] Xu Shushen. Calculating way on time of filling gas into vacuum container. Vacuum, 2000, 2: 10 (in Chinese) [徐树深. 真空容器充气时间计算. 真空, 2000, 2: 10]
- [6] Wang Yuzhi. Vacuum technology. Chengdu: Sichuan People Press, 1981 [王欲知. 真空技术. 成都: 四川人民出版社, 1981]
- [7] Roth A. Vacuum technology. Beijing: Mechanical Industrial Press, 1980 [罗思 A. 真空技术. 北京: 机械工业出版社, 1980]
- [8] Tilmans H A C, Van de Peer M D J, Beyne E, et al. The indented reflow sealing (IRS) technique — A method for the fabrication of sealed cavities for MEMS devices. J Microelectromech Syst, 2000, 9(2): 206

Simulation of Vacuum Package for MEMS Devices with Solder Bonding^{*}

Cheng Yingjun , Jiang Yuqi , Xu Wei , and Luo Le

*(State Key Laboratory of Transducer Technology, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)*

Abstract : By applying vacuum physics to typical solder-bonding vacuum packaging process of MEMS devices ,the mathematical and physical model between vacuum degree of cavity to be packaged and gas absorption and desorption ,gas penetration ,gas flowage through little hole ,and steam pressure of materials is established and its arithmetic is ascertained with numerical simulation method. The veracity of the simulation results is validated by experiments and the effect of the size of capillary hole on vacuum degree is analyzed. The parametrical modeling ,simulation ,and optimization design of vacuum package process of MEMS devices are realized.

Key words : MEMS; vacuum; packaging; simulation

EEACC : 2527; 8460

Article ID : 0253-4177(2005)05-1033-07

^{*} Project supported by National High Technology Research and Development Program of China(No.2003AA40415)

Cheng Yingjun male ,was born in 1978 ,PhD candidate. He is engaged in computational simulation of thermalmechanical reliability for electronic package.

Luo Le male ,was born in 1956 ,professor. He is engaged in advanced electronic package and reliability.

Received 20 July 2004 ,revised manuscript received 7 September 2004

© 2005 Chinese Institute of Electronics