

粉芯的填充量为25.5%。

丝材制备，结合传统药芯丝材制作工艺制定了如下的高熵合金粉芯制作工艺路线，如图1。具体制作如下：主要分为粉芯配置和丝材拉拔成形两部分。首先是粉芯的配置，采用自动配粉机配置设计好的金属粉芯成分，后利用烘干机将配置好的进行烘干。将烘干的粉末放入v型搅拌机进行搅拌均匀，将搅拌好的粉末放入粉末放置箱。丝材制备采用14mm0.8mm的不锈钢带作为外皮基材，第一步，利用对焊机对不锈钢钢带进行对接，使所有钢带连接成完整的一条钢带。第二步，对钢带进行清洗烘干进入卷u型槽，将钢带先卷成u型，利用自动送粉机，按照指定粉末填充量进行填充。最后将其卷成封闭的丝材，直径范围为：3.2mm~3.4mm，并对对丝材填充度进行称重法进行检测。第三步，根据要求成品的直径进行丝材的拉拔，采用嵌套模具的方式进行模具的设计。对成品进行熔覆检测，最后仅丝材进行分盘真空包装（如图1）。

2.2 方法

熔覆采用ESBA逆交式氩弧焊机进行熔敷，熔覆方式为连续送丝的TIG焊。根据不锈钢熔覆经验，通过对熔覆参数电流120~200A，熔覆速度10~20cm/min，送丝速度150~200cm/min，熔覆角度30~60°的区间进行大量熔覆实验。对上述熔覆质量进行判断取表1中较优的熔覆参数，得到基本保持合金性能的熔覆试样（如表1）。

采用ZEISS光镜分析熔覆层金相组织，主要观察熔覆层纵向的组织，采用硬度仪对熔覆层表面的硬度分布，分析以单层熔覆层的焊缝为轴线的硬度分布。

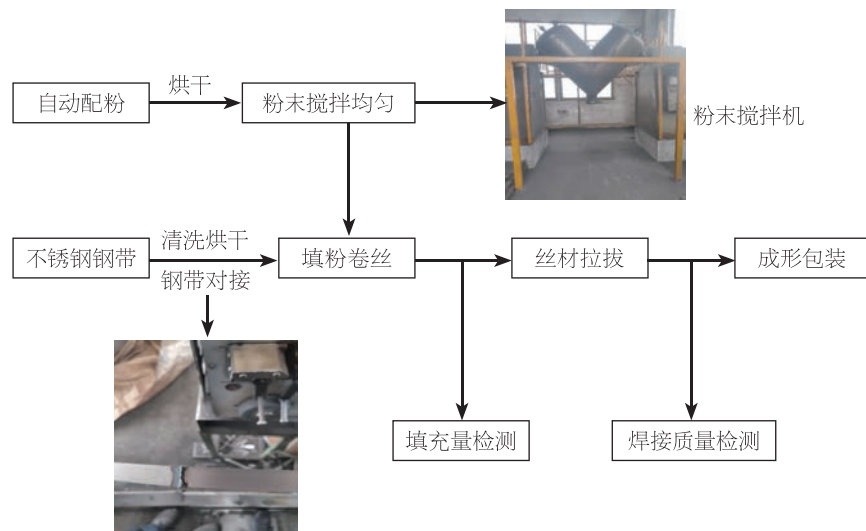


图1 丝材制备工艺

表1 熔覆参数

熔覆参数	电流/ (A)	熔覆速度/ (cm/min)	送丝速度/ (cm/min)	熔覆角度/ (°)
高熵合金熔覆焊道	175	17.5	185	55

采用Nanovea Tribometer微型摩擦磨损试验机测试不锈钢基材和高熵合金熔覆层的耐磨性能，摩擦磨损的实验是在室温下进行，试样尺寸为的试样块上，试样块摩擦表面经过打磨抛光，干摩擦条件下，摩擦偶件为高铬刚轴承钢球，直径为6mm，采用往复磨损方式，摩擦长度为10mm。采用载荷6和转速200 r/min，时间为20min对试样进行测试。采用显微镜和扫描电镜对摩擦磨损后的三维形貌与磨损形貌进行分析。

3 实验结果与分析

3.1 熔覆参数对熔覆层的影响

图中为实际熔覆形貌，熔覆参数熔覆速度为17.5cm/min，送丝速度为140cm/min，熔覆角度为55°。可见随着熔覆电流的改变对熔覆形貌由一定的影响，随着电流的增大，表面上熔覆层宽度在逐渐的增加。在形貌上可以看出在其他不变的参数下，当电流为120A,140A时，熔池细小，出现熔覆层堆积过剩，熔覆层表面出现突起及熔

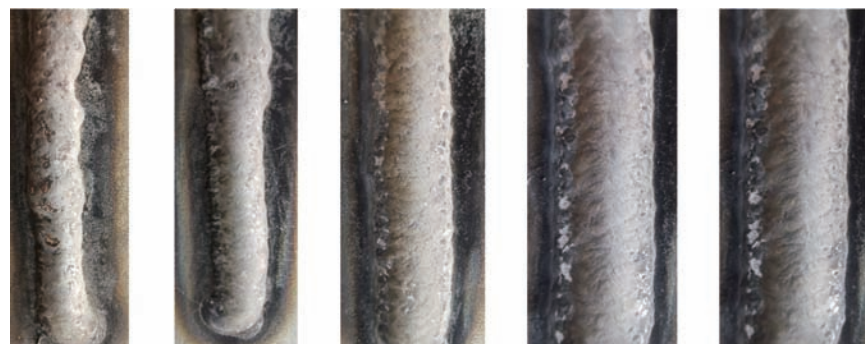


图2 熔覆层示意图

覆层边缘出现不平顺的现象。同时，当电流为180A, 200A时，熔池变大导致熔覆层变宽，熔覆层也变得平滑均匀。可见对于不同的电流，对于其他参数也有一定的适应性（如图2, 3）。

图4为送丝速度对熔覆层的影响，随着送丝速度的增加，熔覆层的高度不断增且当送丝速度较大时，高度增加比较明显。从图中可以看出送丝速度对熔覆层宽度影响较小，随着送丝速度的增加，熔覆层宽度变化较小。

3.2 熔覆层的金相及硬度分析

图5为高熵合金熔覆层的截面的金相组织，基体为奥氏体不锈钢，可见越靠近焊缝区域基体晶粒越大。熔覆层部分为片状的珠光体，且熔覆层与熔覆层之间有明显的连接区域，熔覆层部分可以明显看出组织单一均匀。

图6为熔覆层横截面的硬度分布，采用维氏硬度测试，以焊缝为中心向两侧的硬度分布。图中可见基材部分硬度变化较小，熔覆层部分随着向焊缝靠近硬度也随之增加。

3.3 熔覆层的耐磨性能

通过摩擦仪和轮廓仪测试不锈钢基材和熔覆层的耐磨性能，采用的摩擦参数如下：加载力：6N, 摩擦速率：200r/min, 摩擦时间：20min。

根据基材和高熵合金熔覆层磨损结果分析，在6N载荷和200r/min摩擦速率下磨损结果稳定准确，以上述参数为例说明不锈钢基材和高熵合金熔覆层在磨损行为上的差异，采用轮廓仪对摩擦完不锈钢基材和高熵合金丝材熔覆层进行表面轮廓扫描，通过得到轮廓数据计算试样的磨损率，图7为（a）不锈钢基材，（b）高熵合金焊丝的摩擦表面的三维地貌图，可以明显看出不锈钢基材的磨损宽度较大，磨损深度较深。表2为不锈钢基材和

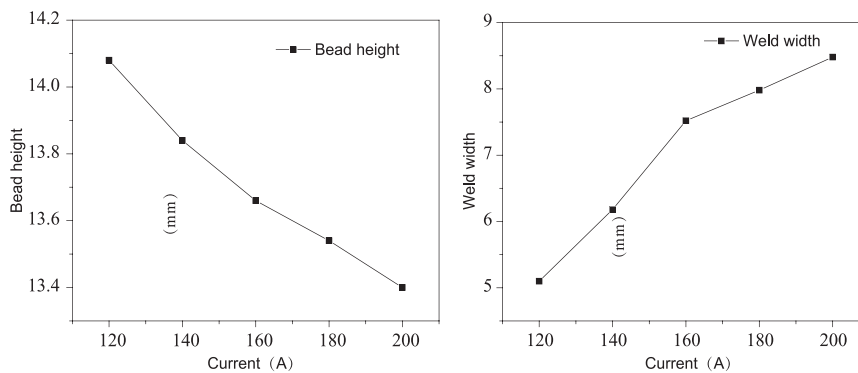


图3 熔覆电流对熔覆层的影响

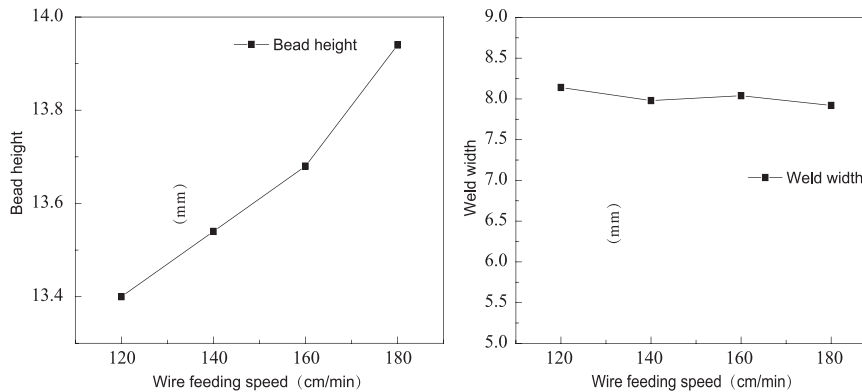


图4 送丝速度对熔覆层的影响

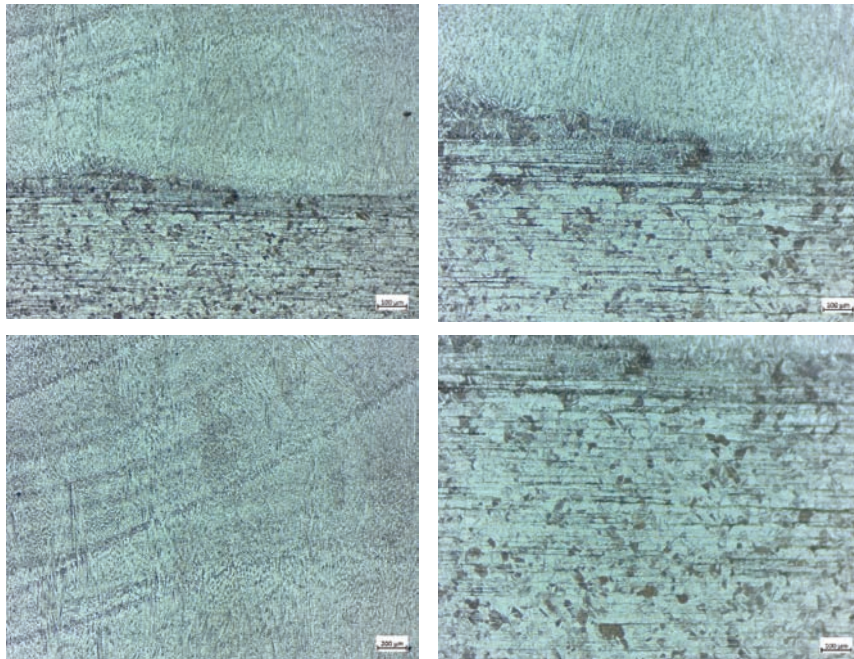


图5 高熵合金丝材的金相图

高熵合金丝材熔覆层的耐磨性测试结果，根据上述计算公式，得到相应的试样的磨损率。相比于不锈钢基材高熵合金熔覆层的宽度明显变窄，最大

深度更浅，磨损率更低。可见相对于基材，在高熵合金粉芯的作用下，使得熔覆层的耐磨性能相比于不锈钢的基材得到了一定的提高^[14-16]。

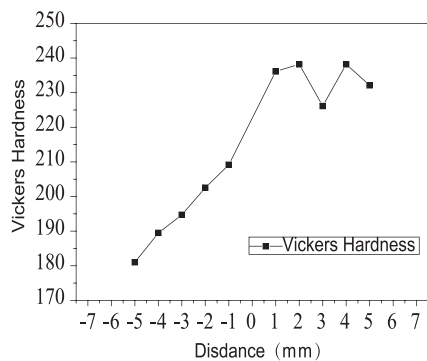
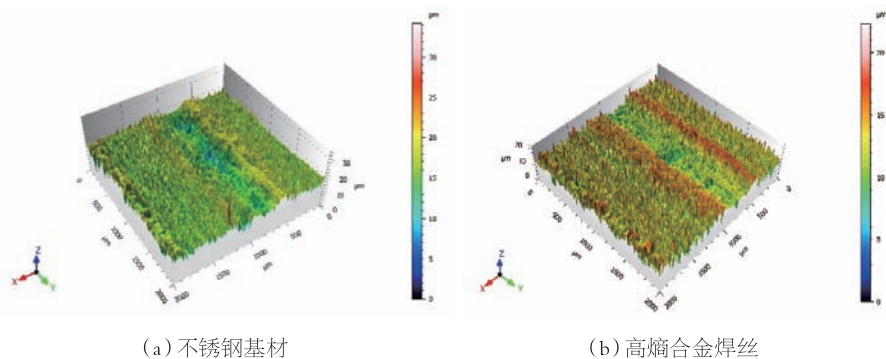


图6 高熵合金熔粉芯丝材覆层硬度分布



(a) 不锈钢基材

(b) 高熵合金焊丝

图7 不锈钢基材和高熵合金焊丝的三维形貌图

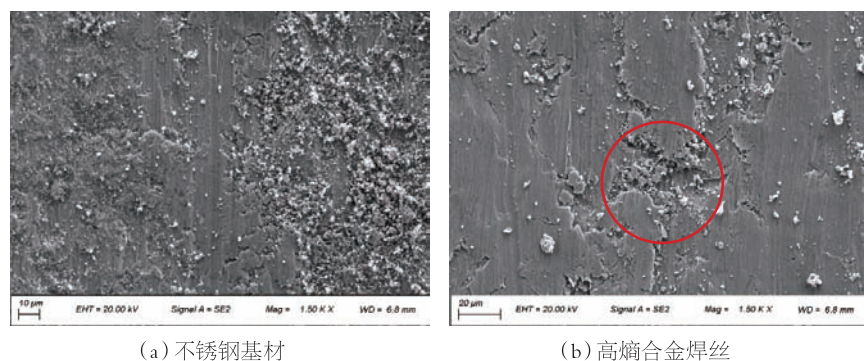
表2 不锈钢基材和高熵合金丝材熔覆层的耐磨性测试结果

摩擦结果	最大摩擦深度/ μm	摩擦宽度/ μm	摩擦截面积/ μm^2	磨损率/ mm^3 ($\text{N}\cdot\text{mm}$) ⁻⁴
不锈钢	11	608	2417	4.02×10^{-4}
高熵合金熔覆焊道	8.89	490	2237	3.72×10^{-4}

图8为不锈钢基材和高熵合金丝材熔覆层的磨痕SEM图。从图8中可以看出，在6N和200r/min的摩擦参数下，在图8(a)中可以看出不锈钢基材的表面发生严重的磨粒磨损，不锈钢表面材料在钢球的摩擦下呈颗粒状大量剥离，并不均匀的分布在摩擦表面和基材表面从而加剧了磨损。在图8(b)中可以看出高熵合金丝材熔覆层表面并没有出现大量的磨粒，反之出现细小的犁沟，表面材料发生材料转移并不断堆积在材料的表面，随着摩擦的进行，材料粘着的加强使得材料表面出现一定的平滑区域，随着摩擦的进行材料表面出现疲劳裂纹并剥落材料表面(如图8b中标注所示)。可以看出基材主要表现为磨粒磨损，而熔覆层主要表面为疲劳剥落磨损。由于高熵合金的塑性这使得熔覆层的摩擦得到减缓，降低了熔覆层的磨损量。

4 结论

(1) 和传统药芯丝材制备方式相同，以308不锈钢带为金属外皮，以Fe、Co、Ni、Cu、Al五种金属元素为主元的高熵合金制成丝材粉芯。将钢带卷成u形槽的方式再填粉圈丝拔丝的过程，制成电弧熔敷用的直径为1.2mm，填充量为25%~28%的高熵合金粉芯丝材。



(a) 不锈钢基材

(b) 高熵合金焊丝

图8 不锈钢基材和高熵合金丝材熔覆层的磨痕SEM

基材主要表现为磨粒磨损，熔覆层主要表现为疲劳剥落磨损。

(2) 对于高熵合金丝材熔敷在不锈钢表面，随着熔覆电流的增加，熔覆层宽度增加，熔覆层高度减小。随着送丝速度的增加，熔覆层宽度变化较小，高度增加。基材主要为奥氏体不锈钢，而熔覆层部分主要为片状的珠光体且层连接区明显，因此熔覆层硬度随着靠近焊缝而增加，而基体硬度变化较小。

(3) 通过对稳定参数对不锈钢基材和高熵合金熔覆层进行摩擦测试，得出摩擦实验结果，熔覆层摩擦性能相比于不锈钢得到一定的提高，基材

基材主要表现为磨粒磨损，熔覆层主要表现为疲劳剥落磨损。^[7]

参考文献

[1] 张正,于忠卡,程皓,李维火.A1含量对Al_xFeCoNiCu高熵合金结构和纳米压痕蠕变行为的影响[J/OL].热加工工艺,2019(12):62-65.
 [2] 贾云柯,杜艳晶,孙翠娟.高熵合金的优良性能和应用研究[J].世界有色金属,2018(21):202-204.
 [3] 陈刚,王璐,杨静,李强,吕品,马胜国.A1_(0.1)CoCrFeNi高熵合金的力学性能和变形机理[J].材料工程,2019,47(01):106-111.

[4] Zezhou Lia, Shiteng Zhaob, Robert O. Ritchieb, Marc A. Meyersa, Mechanical properties of high-entropy alloys with emphasis on face-centered cubic alloys[J]. Progress in materials Science 102(2019)296-345.

[5] 蒋淑英,林志峰,许红明.铸态和退火态Al₁(0.5)CoCrFeNiTi₁(0.5)高熵合金的组织与性能[J].中国有色金属学报,2019,29(02):326-333.

[6] 黄林兵,余圣甫,等.电弧喷涂粉芯丝材的研究进展与应用[J].材料导报,2017: 63-65.

[7] 刘政军,贾华,等.自保护药芯焊丝堆焊原位合成TiB₂-TiC颗粒对堆焊合金组织性能的影响[J].材料工程,2018,46(7): 106-112.

[8] 田浩亮,魏世丞,等.高速电弧喷涂再制造曲轴用粉芯丝材的研究现状[J].熔覆技术,2014,43(1): 1-4.

[9] 王照峰,彭伟,等.高速电弧喷涂FeCrN iW/ C粉芯丝材的研制与性能研

究[J].表面技术,2006,35(5): 17-25.

[10] Tianli Zhang a,b,c, Zhuoxin Li b, Sindo Kou c,n, Hongyang Jing a, Guodong Li b, Hong Li b, Hee Jin Kim. Effect of inclusions on microstructure and toughness of deposited metals of self-shielded flux cored wires[J]. Materials Science & Engineering A 628 (2015) 332-339.

[11] 武丹,裘荣鹏.氟化物对药芯焊丝熔敷金属扩散氢含量和熔覆电弧稳定性的影响[J].热加工工艺,2016,45(09):35-38.

[12] 陈长江.实芯焊丝MAG焊的熔敷特性研究[J].船海工程,2006(05):72-74.

[13] 曲生志.Stellite 6手工焊条电弧熔敷层的微观组织及高温力学性能[J].锅炉技术,2018,49(03):47-50.

[14] MOSTAFA A. Microstructure, wear and friction behavior of nanocomposite materials with natural ingredients[J]. Tribology international,2019,13:184-190.

[15] 周仲炎,庄宿国,杨霞辉,等.Ti6Al4V合金激光原位合成自润滑复合涂层高温摩擦学性能[J].材料工程,2019,47(03):101-108.

[16] M R AKBARPOUR,S ALIPOUR. Wear and friction properties of spark plasma sintered SiC/Cu nanocomposites[J]. Ceramics international,2017,43:13364-13370.

作者信息

彭勇(1994-),男,硕士研究生,主要研究方向为电弧熔敷粉芯丝材。

雷卫宁(1963-),男,教授,博士,主要从事精密、微细特种加工。E-mail: leiweining@jsut.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(51275222);江苏省自然科学基金项目(BK20161198);江苏省研究生实践创新项目(SJCX18-1040)

(上接第14页)

办设计周、设计节或设计集市。支持行业组织和社会机构健全标准制定、规范推广、统计分析等方面的职能,在政企对接、企业合作、业务交流、活动组织、氛围营造等方面更好发挥作用。鼓励行业组织研究提出行业发展的重大设计问题和解决对策,组织开展国际交流,建设中外设计合作基地。

七、保障措施

(一) 加强组织协调

建立相关部门统筹协调、合力推动的工作机制。各地相关部门要结合实际,部署落实工作任务。相关行业组织和社会机构要广泛参与,共同落实各项任务安排。

(二) 加大政策引导

修订推动工业设计发展的政策,拓展设计内涵外延,针对制造业转型升级提出有力举措。利用相关部门现有渠道和重大项目,支持制造业设计能力提升,重点支持设计基础研究、基础软件开发、设计教育、重点行业领域“母机”设计方法研发等。企业提供技术转让、技术开发和与之相关的技术咨询、技术服务收入,可按国家税法规定享受相关税收优惠政策。加强行业统计监测。

(三) 拓宽投融资渠道

鼓励社会资本设立设计类产业基金,完善多元化投融资机制。引导天使投资人和创业投资基金支持制造业设

计能力提升项目,为设计企业提供覆盖全生命周期的投融资服务。鼓励符合条件的设计企业上市融资。鼓励银行等金融机构为设计企业提供个性化服务,拓宽抵质押品范围。鼓励担保机构设立专项担保品种,加大对设计企业和设计创新项目的信用担保支持力度。

(四) 加强政策宣传

准确解读相关政策,大力宣传设计领域优秀成果、赛事活动、重点企业和领军人才,突出设计创新元素,体现设计对制造业转型升级的支撑作用。加强设计类知识产权保护的宣传,提升诚信经营意识。不断扩大设计创新的社会影响,营造全社会重视设计、推动设计发展的良好氛围。T

基于仿真分析的BGA无铅焊点热可靠性研究

冯 烈, 徐敬伟, 李冰彬

珠海格力电器股份有限公司, 珠海, 519000

摘 要: 电子产品失效形式大多与热疲劳失效有关, 本文运用ANSYS软件, 模拟BGA冷热冲击, 分析了在BGA两种结构在两种工况下的受热分布和应力应变情况。研究发现, BGA焊球最容易发生失效的位置集中在外围焊球; 高温下焊球所受的等效应力小于低温状态下, 焊球更容易在低温环境中失效; PCB板和芯片周期性的剪切应力的作用是焊球热疲劳失效的根本原因; 焊球的大小对焊点热疲劳寿命有直接影响; 焊球热疲劳寿命受温变速率和保温时间影响较小。通过设计样板, 进行了1000个cycle冷热冲击试验, 对样品进行切片分析, 焊球良好, 无裂纹, 证实了焊点热疲劳寿命预测的准确性。

关键词: BGA; 焊点疲劳; ANSYS仿真; 寿命预测

1 引言

电子器件在制造和使用过程中, 往往要承受多次的大幅度热载荷(如焊接、环境温度、功率耗热等引起的热载荷变化), 温度的变化将使构成器件的不同材料间产生与其热膨胀系数相对应的热胀冷缩, 但由于受到外部约束或内部的变形协调要求而不能自由发生, 就会在器件内引起附加应力。因此, 组件和PCB板的热膨胀失配引起焊接部分和器件的应力应变一直是人们关心和研究的热门课题之一^[1-5]。

电子产品失效形式大多与热疲劳失效有关, 对焊点疲劳性能的研究有助于认识疲劳发生的过程, 寻找原因进行预防和优化, 提升焊点可靠性。而焊料可靠性传统的评估方式, 需要通过制作样板, 进行冷热冲击试验等实验加载载荷, 评估焊点的疲劳寿命, 往往需要耗费大量的时间和实验资源。在样板设计和元件选型方面, 通常需要考虑热匹配性, BGA由于结构

的特殊性, 成为了焊点疲劳实验的首选封装。

为研究无铅焊料SAC305在冷热冲击条件下的热疲劳性能, 本文基于ANSYS分析不同BGA封装在不同冷热冲击条件下, 焊点的应力应变情况, 计算出焊点的热疲劳寿命, 并进行实验验证, 证实了焊点热疲劳寿命预测的准确性。

2 BGA封装

即球栅阵列封装, 它将IC的引脚以焊球代替, 并将焊球以阵列模式排列。与传统SMT封装相比, BGA的优点包括: 优良的互连密度、低廉的组装成本、在回焊时能自动对齐、采用小尺寸规格、容易散热与支持电子管理、容易配置电路。集成电路技术的发展, 对集成电路封装的要求只会更

加严格, 这是因为封装技术关系到产品的功能, 当IC频率超过100MHz时, 传统封装方式会使信号产生串扰现象, 当IC的引脚数大于208时, 除使用QFP封装方式外, 现今大多数的高引脚数芯片均转向使用BGA封装技术。BGA现为CPU等高密度、高性能、多引脚IC封装的最佳选择。

BGA器件的结构可按焊点形状分为两类: 球形焊点和柱形焊点。球形焊点包括塑料球栅阵列PBGA(Plastic Ball Array)、载带自动键合球栅阵列TBGA(Tape Automatic Ball Grid Array)和陶瓷球栅阵列CBGA(Ceramic Ball Grid Array)。PBGA、TBGA和CBGA是按封装方式不同划分的; 柱形焊点称为CCGA(Ceramic Column Grid Array)。球形焊点和柱形焊点的简图分别如图1所示。^[6]



图1 球形焊点和柱形焊点

3 焊点 Anand 本构方程

由于焊料的力学行为是粘塑性现象,在本课题的研究过程中采用 Anand 的本构模型对焊球进行受热条件下力学行为分析。

在仿真模拟过程中,焊球在热循环条件下表现蠕变的特性,故除了焊球其余都应用线弹性来求解力学模型。但是焊球要考虑温度以及塑性变形对材质特性的作用。当然,合金以及金属,粘塑性跟晶粒中滑移、位错有联系。然而从材料方面来考虑,蠕变与粘塑性是相同的。^[7]

ANSYS中有3种类型的蠕变力学模型,分别是Perzyna、Peirce和Anand模型。Peirce、Perzyna模型通常适用于高应变率载荷条件。Anand模型通常适用在低应变速率情况下,本文研究属于低应变情形。

阻抗s为Anand本构模型形变变量,跟固溶体强化、位错密度等相联

系。相关的关系式为:

$$\sigma = c s, c < 1 \quad (3.1)$$

其中c为材料的参数。c可以表达关系式如下:

$$c = \frac{1}{\xi} \sinh^{-1} \left[\left(\frac{\dot{\epsilon}_p}{A} e^{\frac{Q}{RT}} \right)^m \right] \quad (3.2)$$

Anand流动方程关系式以下所示:

$$\dot{\epsilon}_p = f(\sigma, s, T) \quad (3.3)$$

f(σ, s, T)的具体方程表达式如下:

$$\dot{\epsilon}_p = A \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \left[\sinh\left(\xi \frac{\sigma}{s}\right) \right]^m \quad (3.4)$$

内部变量关于演化的关系式如下:

$$\dot{s} = g(\sigma, s, T) \dot{\epsilon}_p \quad (3.5)$$

在式(3.5)里g(σ, s, T)对回复、应变硬化等过程作出了定义。其演化的详细函数式:

$$\dot{s} = \left\{ h_0 \left| 1 - \frac{s}{s_0} \right|^a \cdot \text{sign}\left(1 - \frac{s}{s_0}\right) \right\} \cdot \dot{\epsilon}_p; a > 1 \quad (3.6)$$

另外,

$$s^* = \hat{s} \left[\frac{\dot{\epsilon}_p}{A} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \right]^n \quad (3.7)$$

以上Anand模型关系式里,合起来有九种参数分别为 A、s₀、Q、α、ξ、m、ŝ、n、h₀。

4 BGA焊点模型的设定

采用如图关于焊点的简化模型。其中,芯片材料选择塑封材料EMC, PCB板使用FR-4基板,焊料选择Sn3.0Ag0.5Cu(SAC305)。

模型主要分为两种结构,见图2和图3。结构几何参数见表1。

Anand模型中各参数含义, A表示常数, Q即为激活能, R表示气体常数, ξ表示应力乘子, m即为应变敏感指数, ŝ表示系数, n表示指数, h₀表示形变硬化软化常数, a是与h₀相关的应变敏感指数, S₀表示初始形变阻抗。SAC305焊料的Anand模型参数^[8]见表2。

为了进一步简化模型,节约求解



图2 结构1

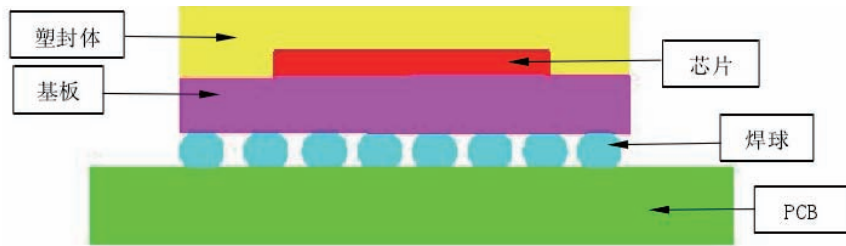


图3 结构2

表1 BGA几何参数

结构类型	焊点个数	芯片尺寸 (mm)	焊球直径 (mm)	焊球间距 (mm)	焊球高度 (mm)	塑封体 (mm)	基板 (mm)
结构1	44		0.08	0.65	0.05	10×10×0.45	15×15×1
结构2	64	3×3×0.25	0.4	0.8	0.38	8×8×0.61	8×8×0.36

表2 SAC305焊料的Anand模型参数

参数	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
参数变量	S ₀ (Mpa)	Q/R (K)	A (sec ⁻¹)	ξ	m	h ₀ (Mpa)	ŝ (MPa)	n	a
数值	45.9	7460	5.87e6	2	0.0942	9350	58.3	0.015	1.5

时间,提高效率,在保证不会造成研究对象出现较大的错误及误差的前提下,对BGA模型作一些适当而又合理的假设:

(1) 焊球为鼓状,即截顶的球体,所有阵列焊点的几何尺寸相同并呈轴对称分布;

(2) 焊点致密,没有空穴、气孔等缺陷;

(3) 各材料界面之间的连接为完全连接;

(4) 考虑到模型和载荷的对称性,本文只对BGA封装结构的四分之一进行分析;

(5) 在做热循环分析时,模型内部温度与外界环境温度相同,并且不考虑热传导及热对流。

5 BGA热循环下的仿真分析

5.1 边界条件及载荷设定

考虑计算资源的问题,取用1/4模型进行分析。在进行热应力分析时,需要对模型施加位移边界条件,在对称面上施加与该平面垂直方向的位移约束,在PCB板地面施加垂直于该面的位移约束,详见图4。

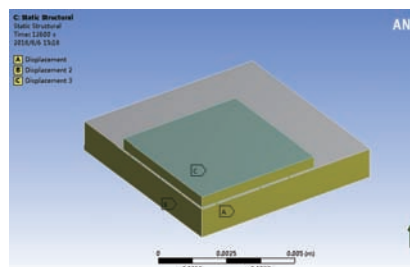


图4 BGA 1/4模型约束条件

在进行热分析时,设定外部环境温度为25℃,塑封体、基板和PCB板的侧面、上下表面的对流换热系数为30W/(m²·K),内侧及焊球表面的对流换热系数为10W/(m²·K)。工况分为两种:

(1) 在进行热应力分析时,热循环温度变化范围是-55℃~+125℃,升降温时间为9min,高低温保持时间为21min,循环频率为1cycle/hour,选择零应力应变状态时的参考温度为室温25℃,假定环境温度为25℃,内部无热源,无对流,共4个循环,详见图5(a)。(参考标准:JEDEC Standard, JESD22-A104-B, Temperature Cycling, 2000.)

(2) 进行热分析时,热循环分析温度变化范围即为-55℃~+125℃,升降温时间都是300S,高低温保持时间也都是300S,温度呈周期性的变化,循环频率是3cycle/h,参考温度设定为

25℃,对内部假定无对流、无热源,也就是说模型零应力状态时温度是25℃,热分析之前先对模型施加均衡温度25℃,详见图5(b)。

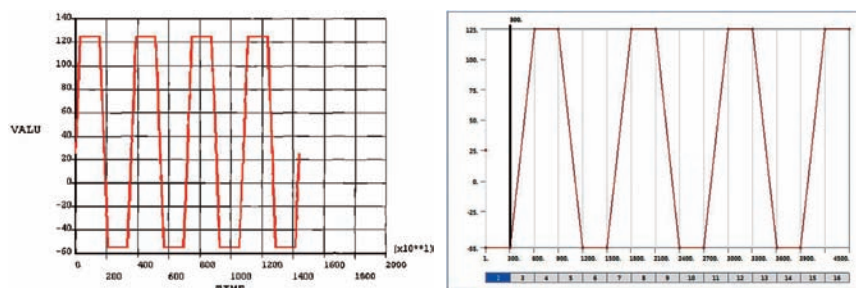
5.2 网格划分

考虑焊球和PCB尺寸相差较大,整体采用结构化六面体网格(见图6(a)),对焊球及周围部分进行了局部网格细化,网格处理见图6(b)。

5.3 材料参数和求解模型设置

为确保仿真结果的准确性,芯片材料选择塑封材料EMC, PCB板使用FR-4基板,焊料选择Sn3.0Ag0.5Cu(SAC305),相关的热物理性能^[7]见表3。

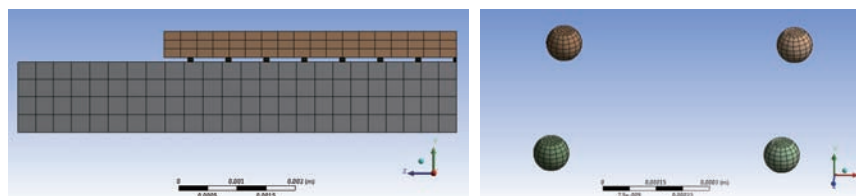
先对模型进行瞬态热求解,将求



(a) 工况1

(b) 工况2

图5 工况1和工况2温度随时间历程



(a) 整体模型

(b) 焊球

图6 BGA仿真模型网格划分

表3 芯片材料的热物理性能

材料	比热	热传导系数	弹性模量	泊松比	热膨胀系数
	J/(kg·°C)	W/(m·K)	GPa		Ppm/°C
塑封体	1672	2.1	14.21	0.3	13.8
芯片	712	2.8	131	0.3	2.8
BT	1672	14.8	18.62	0.18	16
FR-4基板	369	17	17.2	0.28	16
SAC305	238	64.2	41.6	0.36	21.7

得的温度结果导入静力学模块，进行耦合分析，求解焊点的热应力，见图7。

5.4 求解器求解

通过仿真得到了BGA及焊球的温度场见图8(a)，焊球温度分布情况如图8(b)。

从图9焊球整体应力分布情况可以看出，BGA外围焊球受力最大，而BGA失效焊球往往是在外围焊球，这与实际情况一致。

从图10(a)和图10(b)可以看出，外围焊球在125°C和-55°C时均受到来自PCB板和芯片的横向切应力，主要原因在于PCB板和芯片二者在横向的热膨胀系数不一致所致。当在125°C时，PCB板横向热膨胀系数大于芯片，PCB板横向膨胀比芯片快，而芯片膨胀滞后，产生了左上右下的横向切应力；当在-55°C时，PCB板横向热膨胀系数大于芯片，PCB板横向收缩比芯片快，而芯片收缩滞后，产生了右上左下的横向切应力。

分析焊球整体等效应力-时间历程(Equivalent Stress)，当1826s时，焊球受到的等效应力最大，且在1800~3060s时间段内，焊球受到的等效应力均大于0~1260s，这说明焊球在低温下受到的等效应力要大于高温下，即焊球在低温下更容易失效。

通过上述分析，BGA焊球最容易发生失效的位置集中在外围焊球。高

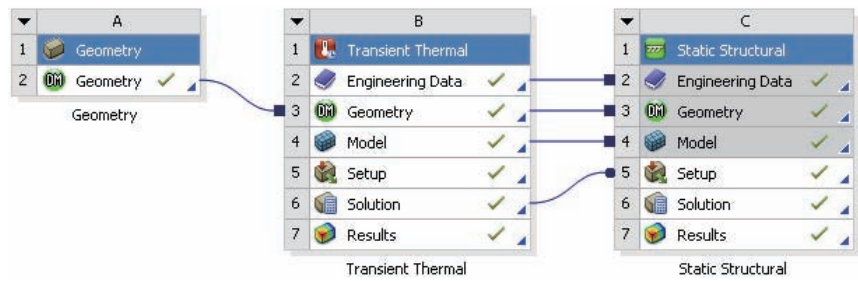
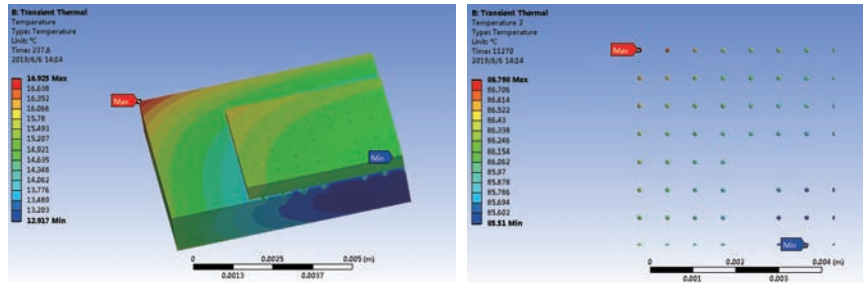


图7 优化后的仿真模型



(a) 整体温度分布

(b) 焊球温度分布

图8 焊球温度场分布

温下焊球所受的等效应力小于低温状态下，焊球更容易在低温环境中失效。焊球失效的原因是受到PCB板和芯片周期性的剪切应力的作用，由于PCB和芯片材料横向热膨胀系数的差异性，在高温和低温阶段均会在焊球两端产生横向切应力，且高温和低温切应力作用方向相反，在周期性的温度载荷作用下，就会形成周期性的剪切应力作用在焊球两端，直至耗尽焊料的塑性变形能力，产生裂纹，最终失效。

(1) 不同工况

通过仿真得到了BGA及焊球的温度场，焊球温度分布情况如图11(a)，

温度随时间历程见图11(b)，结构1在工况1和工况2下，温度分布情况基本一致。

工况1条件下，BGA整体形变量如图12，四个循环中最大值为 $1.7596 \times 10^{-5} \text{m}$ ，呈周期性变化。

工况1条件下，整体塑性变形如下，由于仅焊球为塑性材料，图13反映焊球整体的等效塑性应变，四个循环中最大值为 $2.18 \times 10^{-2} \text{m}$ ，最小值为 $1.09 \times 10^{-2} \text{m}$ ，呈周期性变化，等效塑性应变范围为 $1.09 \times 10^{-2} \text{m}$ ，但从第四周期开始呈增大的趋势；工况2条件下，焊球整体的等效塑性应变最大值

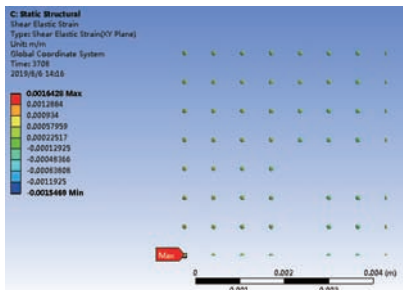
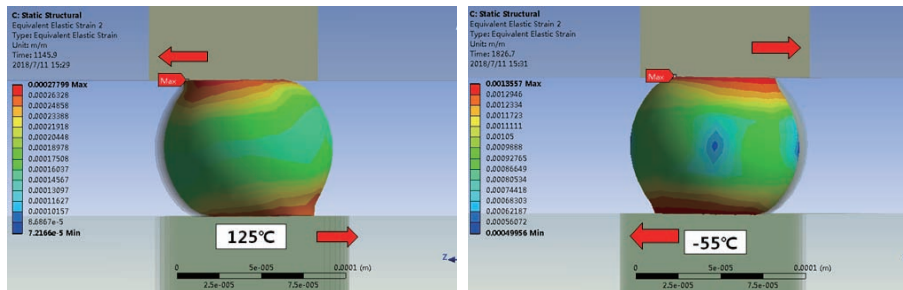


图9 焊球等效应力分布 (von-Mises)



(a) 焊球125°C时等效塑性变形

(b) 焊球-55°C时等效塑性变形

图10 焊球等效塑性变形 (Equivalent Elastic Strain)