端子焊点成形几何对热机械响应影响的有限元研究

吴一宽 [1,2]；彭敦诚 [1,2]；王维思 [1,2]；章冠群 [1,2]
(1 中国电器科学研究院股份有限公司,广州 510000
2 威凯检测技术有限公司,广州 510000)
wuyk@cei1958.com

摘要

端子焊点通常以外观和截面检查判断成形质量，但固定取样位置与单一极值能否代表内部热机械响应尚不明确。本文建立润湿弯月面、侧壁爬锡和前缘铺展特征的三维有限元模型，采用 Anand 黏塑性本构，在 20～100 ℃ 规定温度循环下开展 40 循环基准分析及三组爬锡高度构型的两循环对照。本文通过三维响应定位与不同爬锡高度的构型对照，揭示了固定截面和局部选区表征焊点整体响应的局限，以及不同区域和指标对成形几何变化的非一致响应，为端子焊点的截面取样与成形差异分析提供数值参考。

关键词：端子；焊点成形；热循环；焊接质量

1 引言

随着科学技术的发展，日常生产需要对器件的可靠性要求也更加严格。器件内部的启停与负载切换，其内部连接在反复热胀冷缩下承受循环热机械载荷，焊层疲劳、脱层及端子连接退化均可能影响服役可靠性[1–4]。实际检验中，端子焊点通常依靠外观和截面观察判断焊料量、爬锡、润湿状态及可见缺陷，但这些可见形貌并不能直接反映焊点内部应力与黏塑性变形的空间分布。

已有焊点形状优化、空洞分析和 CT 重建研究表明，将可测的几何特征引入有限元模型，有助于识别焊点内部热机械响应的集中区域[5–8]。端子焊料沿端子侧壁爬升，并在基体表面形成铺展区；端子脚周界附近同时伴随焊料厚度、界面曲率和局部约束的变化。因此，这类焊点的分析不仅要看某一截面上的数值大小，还需确认该截面与三维高响应区域之间的空间关系。

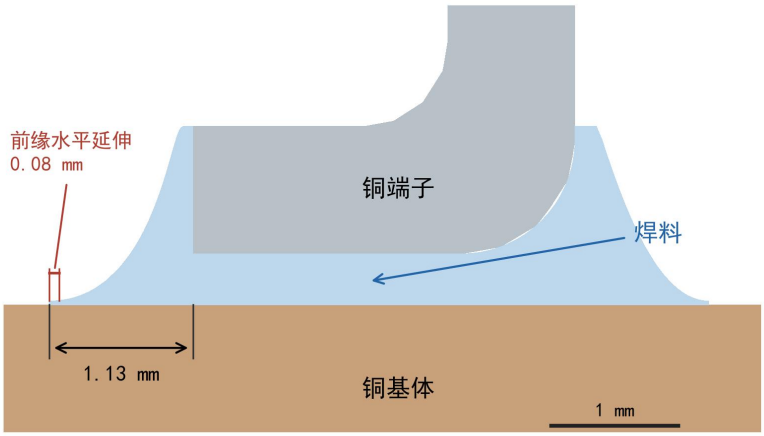
本文以端子焊点为研究对象，回答三个与实际检验直接相关的问题：一是固定截面是否覆盖三维模型中的主要高响应位置；二是局部选区的统计量能否代表整个焊料域；三是侧壁爬锡高度改变后，不同响应指标是否给出一致的成形差异表征。为此，本文在保留主要成形特征的基准模型上分析加载阶段、循环演化、区域贡献和数值敏感性，并进一步建立 0.45、0.60 和 0.75 mm 三种爬锡高度的单因素构型对照。已有几何参数研究以及实验与有限元联合研究均表明，焊点形状和高度会改变热机械响应与疲劳行为[6,15,18]。本文以爬锡高度为几何控制变量，通过区域黏塑性应变增量与耗散能密度的对比，分析不同响应指标随爬锡高度变化的规律及其一致性。该参数调整同时引起焊料体积变化，因此构型间的差异反映了几何形态与体积变化的共同影响。后文按建模与分析方法、基准焊点响应分析、成形参数对照的顺序展开，最后讨论上述结果的意义与适用边界。其中，构型间的比较以基准构型的响应规律为参照。

2 建模与分析方法

本文包含两类计算任务，一是 40 循环基准模型用于分析基准焊点的加载阶段、循环演化与空间响应；二是统一两循环三构型对照模型用于研究成形几何变化对第二循环黏塑性响应及耗散能的影响。针对基准构型开展网格与局部积分容差敏感性检查，评估相关统计指标对数值设置的敏感程度。

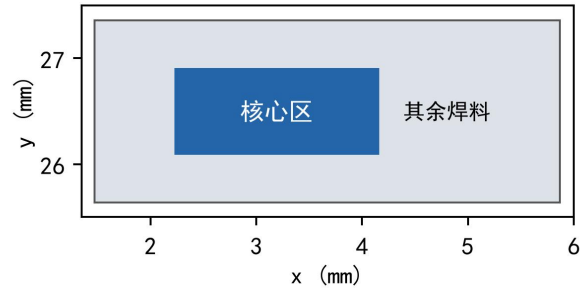
2.1 成形特征与几何简化

模型由铜端子、铜基体和焊料组成，端子四侧为润湿弯月面，同时对侧壁爬锡及前缘铺展特征进行建模，模型如图 1 所示。前缘等厚过渡为 0.08 mm，总外伸约 1.13 mm，爬锡高度约 0.60 mm，作为基准构型的工程近似输入。过渡区表示焊料外形的变化，与主体焊料采用相同材料参数。基准网格包含 112,963 个体单元，并在端子脚、焊料接触面和前缘过渡区进行局部加密。图 1(c)所示为本位定义核心区在中部截面内的位置。



XZ截面：y = 26.50 mm；端子上部截断显示

核心区的 XY 投影示意



核心区 = 焊料域 ∩ 平面选框 ∩ {z < z₁ + 0.05 mm}；d = 0.10 mm

图 1 端子焊点的整体位置、实际截面及核心区定义

2.2 材料与本构关系

焊料采用 Anand 模型描述与温度和应变率相关的黏塑性响应[9,10]，其流动关系写为

$$\dot{\varepsilon}^{vp} = A\,exp[-Q/(RT)] \cdot[\sinh(\xi\sigma_{eq}/s)]^{1/m} \quad (1)$$

式中：

$\dot{\varepsilon}^{vp}$—累积等效黏塑性应变的变化率；

σ_{eq}— 等效应力；

s —内部变形阻力；

R —气体常数；

T—绝对温度。

内部变形阻力的演化采用 COMSOL 示例中的 Anand 形式，由于目前缺少该焊料完整的 Anand 参数标定数据，计算采用 COMSOL 示例中 60Sn–40Pb 焊料参数作为工程近似[11]，即材料属性为：A=1.49×10^{7}s^{-1}；Q=90046J/mol；m=0.303；a=1.34；n=0.0231；s_{sat}=80.42 MPa；s_{init}=56.33 MPa，ξ=11，h_0=2640.75 MPa。其中 s_{sat} 为 COMSOL 所用变形阻力归一化的材料参数，s_{init} 为初始变形阻力[11]。

2.3 温度载荷、边界与求解设置

计算采用 COMSOL Multiphysics 6.4 的固体力学接口，材料模型选用非线性结构材料中的 Anand 黏塑性模型。基体底部固定，各材料结合界面按连续连接处理。空间温度在 20～100 ℃ 之间循环，循环包括升温、高温保持、降温和低温四个阶段，保持各 5 s，总计算时间为 800 s。不同材料的热膨胀失配在界面连续和底部约束条件下形成热应力。考虑到实际计算成本，本文的单次温度循环为 20s，由于 Anand 模型具有时间依赖性，因此本研究仅对端子模型热响应特征进行识别，不表征实际长周期热循环试验的等比例时间压缩。

2.4 响应指标与统计区域

为同时考察取样位置、区域响应和成形参数影响，本文以每循环等效黏塑性应变增量表征焊料的非弹性累积[12,13]，并分别统计其区域平均值和最大值。对于三构型对照，进一步引入单循环黏塑性耗散能密度增量 ΔW^{vp}。Darveaux 能量型焊点疲劳方法以循环耗散能密度的体积平均量作为裂纹萌生与扩展的相关参数，COMSOL Multiphysics 6.4 也将黏塑性耗散能密度作为焊点热疲劳评价的可选能量指标[13,16]，第 k 循环在同一空间点上的黏塑性应变增量定义为：

$$\Delta\varepsilon_k^{vp}(x) = \varepsilon^{vp}(x, 20k, s) - \varepsilon^{vp}(x, 20(k-1), s) \quad (2)$$

第二循环的黏塑性耗散能密度增量由循环终点与起点的累积耗散能密度之差计算，并分别统计全焊料域及核心区的体积平均值，再对区域 Ω 求体积平均值与最大值，分别记为：

$$I_{avg,k} = (1/V_\Omega)\int_\Omega \Delta\varepsilon_k^{vp}\,dV \qquad I_{max,k} = max_\Omega\,\Delta\varepsilon_k^{vp} \quad (3)$$

统计范围分为全焊料域和指定核心区，核心区定义为焊料域与下列坐标范围的交集：

$$\begin{cases} x_0 + d < x < x_1 - d \\ y_0 + d < y < y_1 - d \\ z < z_1 + 0.05\ mm \end{cases} \quad (4)$$

式(4)的坐标数值以 mm 表示：x_0=2.14，x_1=4.25，y_0=26，y_1=27；默认排除宽度 d=0.10 mm，另取 0.08 和 0.12 mm 检查定义敏感性。该选区还受高度条件限制，体积为 0.61 mm³，占全焊料域 5.36 mm³ 的 11.42%，其余焊料作为互补区域。

应力演化采用每循环起点及其后 5s 、10s 、15s 、20 s 五个相位的焊料域最大 von Mises 应力，并取五个相位中的最大值作为该循环的离散相位应力指标。第二循环的时间历程采用模型保存的 13 个时间点，阶段贡献由相邻阶段端点的平均增量差计算。相邻循环变化率按式(5)计算；图 7 以第 22 循环为基准，用 100%×(Ik/I22−1) 表示后续变化。上述模型设置与响应指标定义为后续分析提供了统一口径，基准焊点的响应特征即在这一口径下逐层展开。

$$r_k = 100\% \cdot (I_k - I_{k-1})/I_{k-1} \quad (5)$$

3 基准焊点的响应分析

本节以 40 循环基准模型为对象，从空间分布、加载阶段与循环演化三个方面给出基准焊点的黏塑性响应特征。分析先从三维空间分布入手，考察固定截面与局部选区对整体响应是否具有代表性；随后转入单一温度循环内部，考察各加载阶段对黏塑性应变累积的贡献；进而在循环尺度上比较全域平均、全局极值与核心区统计量的演化差异。这三方面共同刻画了基准焊点的响应规律，也为后文成形参数对照提供了比较基线。

3.1 空间分布与统计区域的代表性

第二循环的黏塑性应变增量并非均匀分布，高值主要集中在端子脚周界和焊料几何过渡附近如图 2 所示，H1 和 H2 分别为端子脚周界和焊料几何过渡。

端子焊料中部截面的黏塑性应变增量上的最大增量为 1.09×10⁻⁸，显著低于三维模型中的全局最大值，表明这一固定截面并未穿过模型中的最高响应位置。

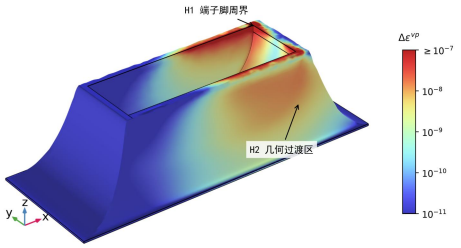


图 2 第二循环(20～40 s)焊料黏塑性应变增量的三维表面分布

为进一步考察局部选区的代表性，本文对第 40 循环的黏塑性应变增量进行了分区统计，统计结果如表 1 所示。核心区体积占比为 11.42%，但其应变增量体积分仅占全焊料域的 0.69%；其余区域的平均应变增量约为核心区的 18 倍，表明核心区的响应水平不足以代表焊料整体。

表 1 第 40 循环分区均值及增量体积分贡献

区域	体积占比 (%)	平均增量 (×10⁻⁹)	体积分贡献(%)
核心区	11.42	0.11	0.69
其余焊料	88.58	2.00	99.31
全焊料	100.00	1.78	100.00

上述分区差异说明了局部统计结果对选区位置的依赖。顶部近界面截面的高响应呈较集中的窄带分布，中部截面的响应变化则相对平缓，表明不同高度的截面所反映的局部响应特征存在明显差异，如图 4 所示。因此，截面结果的比较应明确取样位置，并结合三维响应分布判断其代表性。上述结果表明，焊点响应在空间上的分布与取样位置密切相关。除空间位置外，黏塑性应变增量在单一循环内的累积还随时间变化，为此进一步考察各加载阶段的贡献。

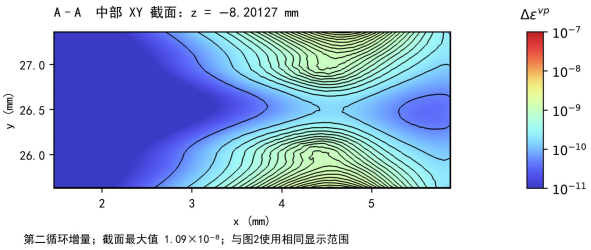


图 3 中部 XY 截面的第二循环黏塑性应变增量

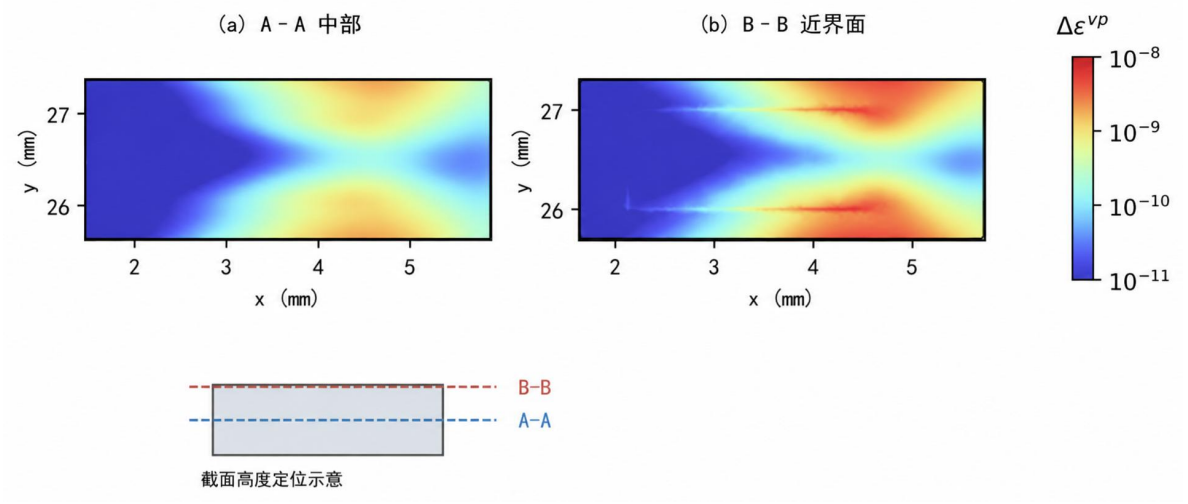


图 4　第二循环两个 XY 截面的响应对照及高度定位

3.2 加载阶段与累积过程

除空间分布特征外，焊料黏塑性响应还表现出明显的加载阶段差异。以 20s、25s、30s、35s 和 40s 为温度循环各阶段端点，对焊料域最大 von Mises 应力和体积平均黏塑性应变增量进行统计，并根据相邻阶段端点的增量变化计算各阶段贡献。结果如图 5 和图 6(a) 所示，升温、高温保持、降温和低温保持阶段对第二循环平均黏塑性应变增量的贡献分别为 21.28%、77.36%、1.33% 和 0.03%。其中，升温与高温保持阶段累计贡献达到 98.64%，表明该工况下焊料的黏塑性变形主要集中在升温及高温停留阶段。

进一步比较应力与黏塑性累积过程可以发现，两类响应具有不同的阶段演化特征。20～25 s 升温过程中，焊料域最大应力由 3.02 MPa 降至 2.71 MPa，而体积平均黏塑性应变增量持续增加；随后进入 100 ℃ 高温保持阶段，最大应力进一步降至 30 s 时的 2.64 MPa，而平均黏塑性应变增量已达到该循环最终值的 98.64%。进入降温阶段后，最大应力重新升高，而黏塑性应变的新增量明显减小。由此可见，在本温度循环条件下，高温阶段是黏塑性变形累积的主要阶段，应力水平的升降与黏塑性累积速率并非同步变化。

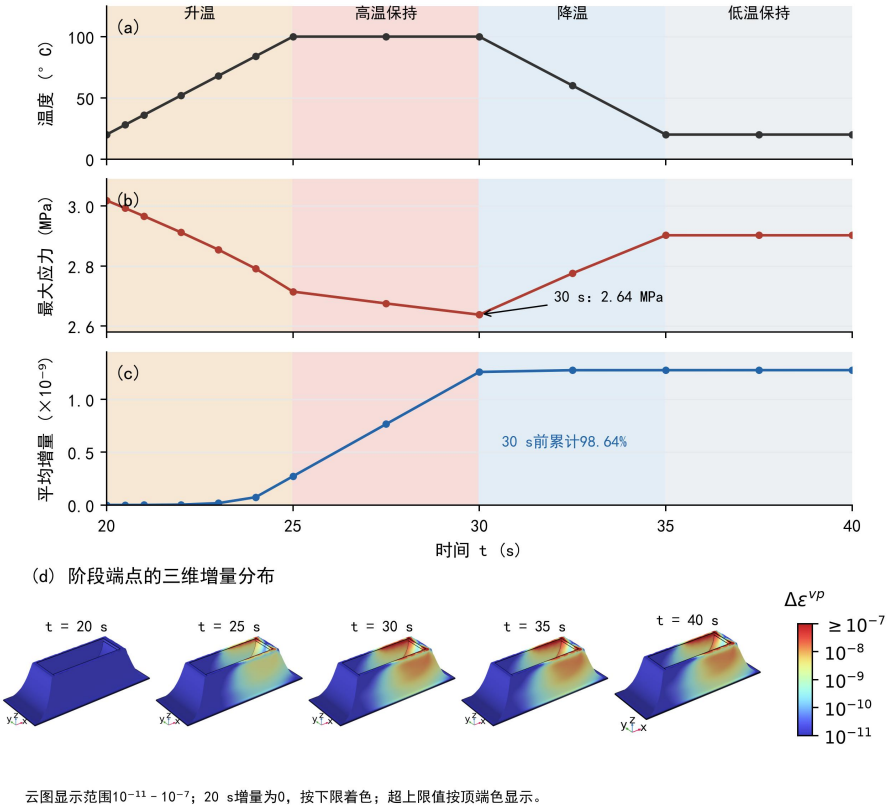


图 5　第二循环的温度输入与响应历程

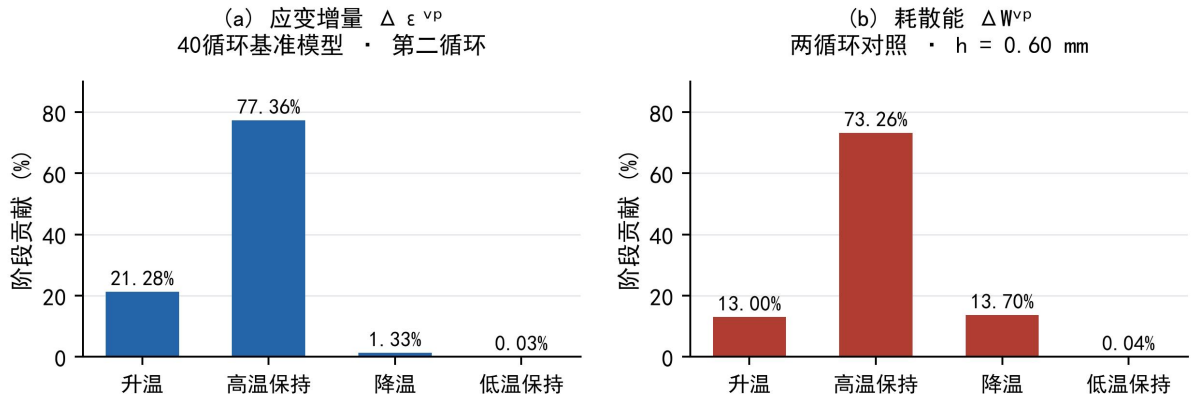


图 6 第二循环各加载阶段的贡献比例

3.3 循环演化与区域响应分化

第 22～40 循环内，全焊料域平均增量由 1.86×10^{-9} 降至 1.78×10^{-9}，累计下降 4.15%；同期全局最大增量下降 45.61%，统计趋势如图 7(a) 所示。相比之下，图 7(b) 中核心区平均增量和最大增量分别增加 1.43% 和 0.54%。结合表 1 可知，核心区整体处于较低响应水平，其体积分贡献也较小。上述结果表明，随着循环推进，不同空间区域及不同统计尺度下的响应演化存在明显差异：全焊料域平均响应缓慢下降，全局极值衰减幅度较大，而核心区保持低响应水平并呈小幅增长趋势。通过同时比较全域平均值、全局极值以及核心区统计量，可以从整体、局部和区域三个尺度描述焊点黏塑性响应的循环演化特征。

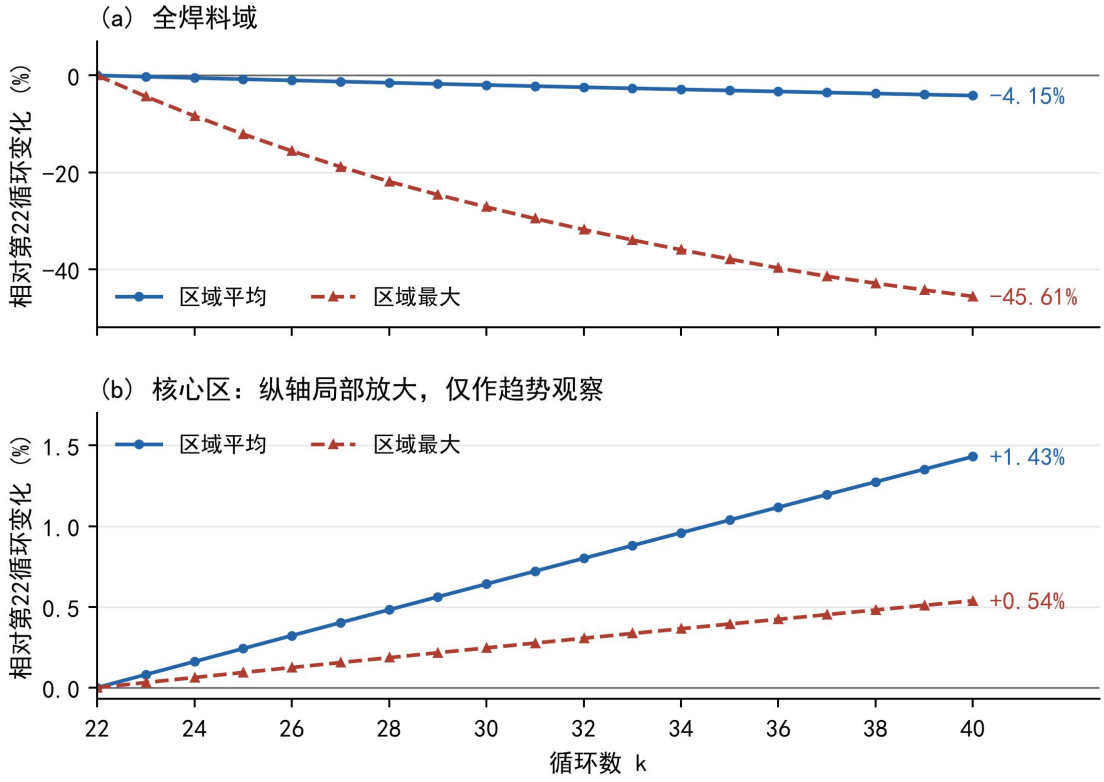


图 7 第 22～40 循环响应指标相对第 22 循环的变化

结合表 1 的区域统计结果，核心区在第 40 循环中的平均响应和体积分贡献均明显低于其余焊料区域，因此其小幅增长并未改变该区域整体处于低响应水平的特征。与此同时，全局最大增量的下降幅度显著高于全域平均值，局部高响应水平的演化速度快于整体平均响应。这一整体与局部并不同步的演化特征，为后续考察成形几何变化的影响提供了比较参照。

4 成形参数对照

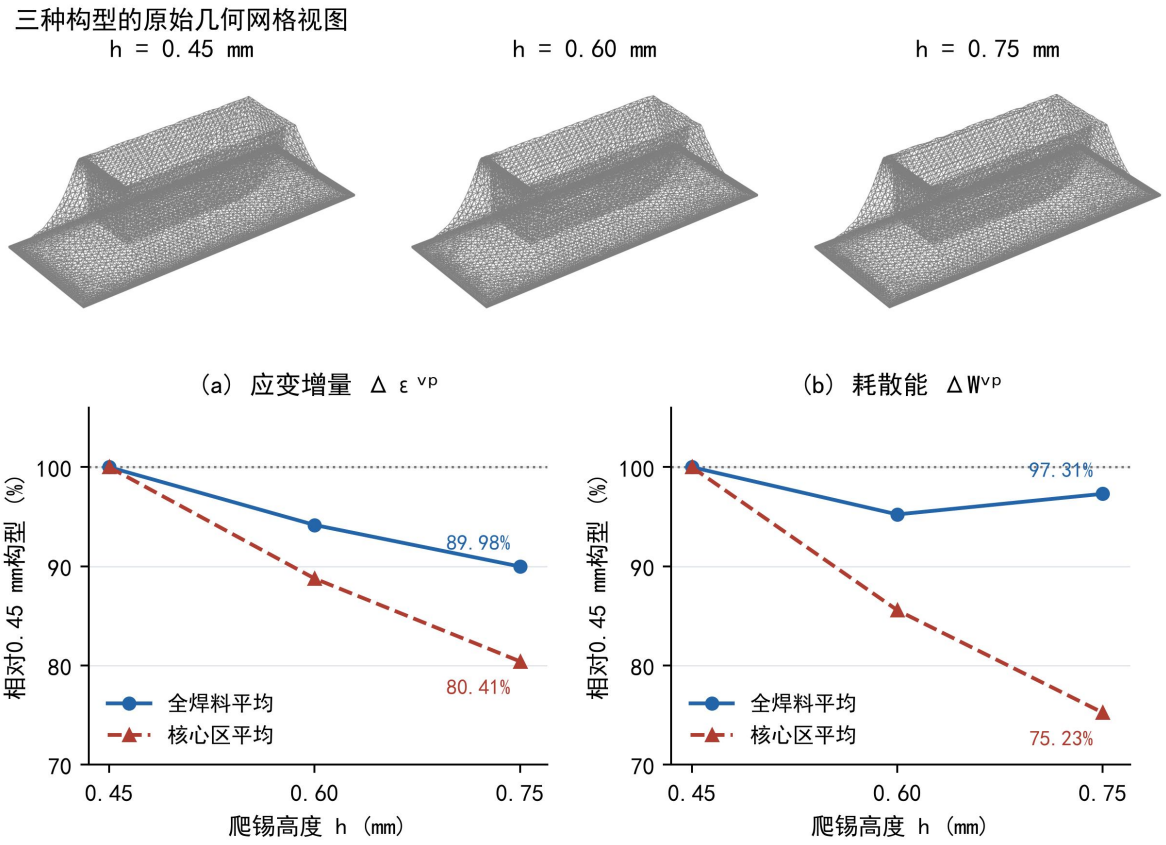
为进一步分析侧壁爬锡高度对焊点热机械响应的影响，在前缘总外伸 1.13 mm、0.08 mm 等厚过渡、趾端接触端点、材料参数、温度历程及求解设置保持一致的条件下，分别建立爬锡高度为

0.45、0.60 和 0.75 mm 的三种几何构型。三组模型的网格单元数分别为 111656、113734 和 115617，最小单元质量均为 0.23，各构型保持相近的网格离散水平，从而形成统一条件下的几何参数对照。

三种爬锡高度构型第二循环的响应结果如表 5 所示，随着爬锡高度由 0.45 mm 增加至 0.75 mm，全焊料域平均黏塑性应变增量 $\Delta\varepsilon^{vp}$ 由 1.40×10^{-9} 降至 1.26×10^{-9}，降低约 10.0%；核心区平均 $\Delta\varepsilon^{vp}$ 由 7.82×10^{-11} 降至 6.29×10^{-11}，降低约 19.6%，三种爬锡高度构型对比结果如图 8 所示。两项应变指标均随爬锡高度增加而下降，且核心区的变化幅度更为明显，说明爬锡高度对局部区域响应的影响强于全焊料域平均水平。

表 2　三种爬锡高度的第二循环响应对照(三构型统一求解设置)

指标	0.45 mm	0.60 mm	0.75 mm
全焊料平均 $\Delta\varepsilon^{vp}$	1.40×10^{-9}	1.32×10^{-9}	1.26×10^{-9}
核心区平均 $\Delta\varepsilon^{vp}$	7.82×10^{-11}	6.94×10^{-11}	6.29×10^{-11}
全焊料平均 ΔW^{vp} ($J\cdot m^{-3}$)	7.11×10^{-4}	6.77×10^{-4}	6.92×10^{-4}
核心区平均 ΔW^{vp} ($J\cdot m^{-3}$)	1.23×10^{-5}	1.05×10^{-5}	9.25×10^{-6}
五相位最大应力 (MPa)	3.43	3.00	3.87
焊料体积 (mm^3)	5.18	5.36	5.51



(a)平均黏塑性应变增量；(b)平均黏塑性耗散能

图 8　三种爬锡高度的几何网格视图与第二循环响应对照

耗散能指标则表现出不同的变化特征，核心区平均黏塑性耗散能密度 ΔW^{vp} 随爬锡高度增加持续下降，在 0.75 mm 构型下降至 0.45 mm 构型的 75.23%；全焊料域平均 ΔW^{vp} 则由 0.45 mm 至 0.60 mm 先下降至 95.23%，随后在 0.75 mm 构型回升至 97.31%。由此可见，爬锡高度变化不仅改变响应幅值，也使不同统计区域和不同响应指标表现出不同的敏感程度。黏塑性应变指标整体呈随高度增加而下降的趋势，而全域平均耗散能则表现出非单调变化，反映了几何变化对焊点响应分配的多指标特征。

考虑焊料体积变化，三种构型的焊料体积分别为 5.18mm³、5.36mm³和 5.51mm³。根据全域平均ΔW^{vp}与对应焊料体积计算，第二循环全域总耗散能约为 3.68×10^{-12}J、3.63×10^{-12}J 和 3.82×10^{-12}J。0.75 mm 构型虽然具有低于 0.45 mm 构型的平均耗散能密度，但由于焊料总体积增加，其总耗散能反而更高。这说明在比较不同成形构型时，平均响应反映单位体积水平，而总量同时受到响应强度与焊料体积的共同影响，两类统计量可以从不同角度表征几何变化对焊点热机械响应的影响。

5 总结与讨论

本文针对端子焊点，建立了包含润湿弯月面、侧壁爬锡及前缘铺展特征的三维有限元模型，虽然材料条件基于工程假设，但不影响端子引脚在热应力条件下的相对趋势。从空间分布、加载阶段、循环演化及爬锡高度变化等方面分析焊点的热机械响应，得到以下主要结论：

(1)焊点黏塑性响应具有明显的空间非均匀性，高响应区域主要集中在端子脚周界及焊料几何过渡附近。不同高度截面获得的局部分布存在明显差异，且核心区在第 40 循环中的黏塑性增量体积分贡献仅为 0.69%。因此，结合三维场分布、区域平均量和体积分贡献，可以更完整地描述焊点内部响应特征，并为实际截面取样位置的选择提供依据。

(2)温度循环过程中黏塑性变形表现出明显的阶段性。第二循环中，升温和高温保持阶段对全焊料域平均黏塑性应变增量的贡献分别为 21.28%和 77.36%，合计达到 98.64%，表明高温阶段是该工况下黏塑性变形累积的主要阶段。第 22～40 循环进一步显示，全焊料域平均响应、全局极值和核心区响应具有不同的演化趋势，体现了焊点整体与局部响应在循环过程中的空间分化特征。

(3)侧壁爬锡高度对焊点热机械响应具有明显影响。爬锡高度由 0.45 mm 增加至 0.75 mm 时，全焊料域平均 $\Delta\varepsilon^{vp}$、核心区平均 $\Delta\varepsilon^{vp}$ 和核心区平均 ΔW^{vp} 分别降低约 10.0%、19.6% 和 24.8%；与此同时，全焊料域平均 ΔW^{vp} 在 0.60 mm 构型达到最低值。不同区域和不同指标表现出不同的变化规律，说明成形几何对焊点响应的影响具有明显的区域性和指标依赖性。基于三维响应定位与多区域、多指标对照，可为端子焊点成形参数筛选及后续质量评价方法建立提供数值参考。

参考文献

[1] Berg H, Wolfgang E. Advanced IGBT modules for railway traction applications: Reliability testing. Microelectronics Reliability, 1998, 38(6–8): 1319–1323. DOI: 10.1016/S0026-2714(98)00150-4.
[2] Fratelli L, Cascone B, Giannini G, et al. Long term reliability testing of HV-IGBT modules in worst case traction operation. Microelectronics Reliability, 1999, 39(6–7): 1137–1142.
[3] Ciappa M. Selected failure mechanisms of modern power modules. Microelectronics Reliability, 2002, 42(4–5): 653–667.
[4] Feller L M, Hartmann S, Schneider D. Lifetime analysis of solder joints in high power IGBT modules for increasing the reliability for operation at 150 °C. Microelectronics Reliability, 2008, 48(8–9): 1161–1166.
[5] Xu J, Zhang B. Reliability Analysis and Optimization of Power Terminal Solder Joints in PPS-Packaged IPMs. Micromachines, 2026, 17(6): 749.
[6] Li G, Wang S, Ding Y, et al. Solder joint shape optimization and thermal-mechanical reliability improvement for microwave RF coaxial connectors. Microelectronics Reliability, 2024, 154: 115345.
[7] Chen K, Zhang Y, Cheng G, et al. A machine learning and finite element simulation-based void inspection for higher solder joint reliability. Microelectronics Reliability, 2024, 154: 115323.
[8] Jia F, Zhang G, Xi Y, et al. Correlations of microstructure and mechanical and thermal parameters of solder joints by X-ray CT and simulations. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2024, 157: 107805.
[9] Anand L. Constitutive equations for hot-working of metals. International Journal of Plasticity, 1985, 1(3): 213–231.
[10] Cheng Z N, Wang G Z, Chen L, et al. Viscoplastic Anand model for solder alloys and its application. Soldering & Surface Mount Technology, 2000, 12(2): 31–36.
[11] COMSOL AB. Viscoplastic Creep in Solder Joints. COMSOL Multiphysics 6.4 Application Library.
[12] Nebo S E, Amalu E H, Hughes D J. Critical solder joint in insulated gate bipolar transistors (IGBT) power module for improved mechanical reliability. Microelectronic Engineering, 2024, 291: 112200.
[13] Darveaux R. Effect of simulation methodology on solder joint crack growth correlation. Proceedings of the 50th Electronic Components and Technology Conference, 2000: 1048–1058.
[14] Liu X, Lu G Q. Effects of solder joint shape and height on thermal fatigue lifetime. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2003, 26(2): 455–465.
[15] COMSOL AB. Energy-Based Thermal Fatigue Prediction in a Ball Grid Array. COMSOL Multiphysics 6.4 Application Library.
[16] Ha J, Lai Y, Yang J, Yin P, Park S. Effect of Differently Shaped Solder Joints of Chip Resistor on Fatigue Life. Journal of Electronic Packaging, 2024, 146(2): 021002.