DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2008.24.008

航空航天焊接结构件应力与变形的预测与控制

Prediction and Control of Stress and Distortion in Welded Structure used in Aviation and Aerospace Fields

清华大学先进成形制造教育部重点实验室 吴爱萍 赵海燕 史清宇 蔡志鹏 鹿安理 任家烈

吴爱萍

工学博士，清华大学机械工程系教授、博士生导师，焊接学会理事，宇航材料与工艺专业委员会委员。主要从事新材料连接、异种材料的焊接、以及数值模拟技术在焊接中的应用等方面的研究工作。负责和完成包括自然科学基金、“863”项目、攻关项目等科研课题20余项，获教育部科技进步一等奖1项、国家发明专利授权2项，发表学术论文80余篇。

焊接是航空航天结构件制造的主要方法之一，焊接结构的应力与变形是构成焊接构件质量的重要因素，是焊接质量控制的重要内容。

焊接是航空航天结构件制造的主要方法之一，焊接结构的应力与变形是构成焊接构件质量的重要因素，是焊接质量控制的重要内容。传统的预测焊接应力与变形的方法主要是根据经验或利用经验公式进行简单的估计，其控制也基本上是根据经验和通过大量的试验摸索完成的，因此传统的预测方法粗略且仅适用于简单、理想条件。对于结构复杂的实际构件，仅根据经验和经验公式预测焊接结构的应力和变形是十分困难且基本上不可行的。应力和变形的控制需要通过大量试验、经过较长时间、消耗大量材料和资源才能达到要求、实现控制目标。

随着计算机技术和数值计算方法的发展，数值模拟技术逐渐应用于焊接应力与变形的预测和工艺参数的优化，国内外在此领域开展了大量的研究工作[1]，对典型接头和简单结构件的焊接温度场变化过程以及焊接应力与变形的数值分析模型、数值分析方法、以及影响数值分析精度的各种因素及其影响规律进行了研究，取得了丰硕的结果。但是对于大多数的实际焊接结构而言，按现有的一般方法对其应力和应变过程进行数值分析，所需要的计算机容量是一般计算机所不能及的；分析所需要的计算时间长到难以接受（数月）的地步，因此，数值模拟技术用于实际焊接构件应力与变形的分析时还存在计算机容量无法满足需求和计算效率低的困难，在实际应用中受到限制，成为焊接过程数值模拟技术应用和发展的瓶颈[1]。

生产的发展、技术的进步、效率的提高以及资源的危机对制造过程提出了更高的要求：高质量、低成本、低消耗、高效率、短流程……，同时对焊接质量的控制也提出了更高的技术要求，焊接数值模拟技术成为控制焊接过程和质量的重要技术途径。

为突破实际焊接结构数值模拟

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

计算效率低的瓶颈，本研究组开展了分段移动热源等效焊接热过程计算焊接变形、整体模型与局部模型相结合分析焊接应力、采用复合单元技术和自适应网格重划分技术减少单元数量等方面的工作，以提高焊接数值模拟的效率，使数值模拟技术可以应用于实际焊接结构件应力与变形的预测与控制。

焊接变形的控制，除了通过优化焊接过程与工艺参数减小变形外，一般还可以通过反变形、利用工装卡具进行拘束、以及通过焊后矫形和对焊接温度场或应力应变的控制[1]等方法来实现。但是，对于航空航天大型薄壁焊接结构件，尤其是铝合金薄壁结构件的焊接，容易产生失稳变形，而失稳变形很难通过矫形来消除。

针对大型薄壁铝合金焊接结构件焊接变形的特点，本研究组研究提出了预应力和预应变控制焊接变形的方法。焊接应力是焊接裂纹产生的外因，航空航天领域常用的结构材料（如铝合金、奥氏体不锈钢、高温合金等），容易在焊接过程中产生热裂纹，生产中一般是通过调整焊缝的合金成份和焊接工艺参数来防止热裂纹的产生，但焊缝成份的调整与控制有时会影响到结构的使用性能或受到冶金水平的限制，本研究组提出通过施加辅助冷热源调整焊接温度场、减小和控制焊缝凝固时所受的应力应变、从而防止焊缝热裂纹的方法。另外，电子束焊接由于熔深大、焊接接头质量高，广泛应用于航空航天领域结构件的焊接生产中，本研究组所研究的多束流电子束焊接技术，可以灵活地控制焊接过程中的热输入，从而控制焊接过程中的应力和变形。本文主要介绍本研究组在上述各方面开展的部分主要工作及其结果。

焊接应力与变形的高效数值分析技术

1 分段移动热源等效焊接过程

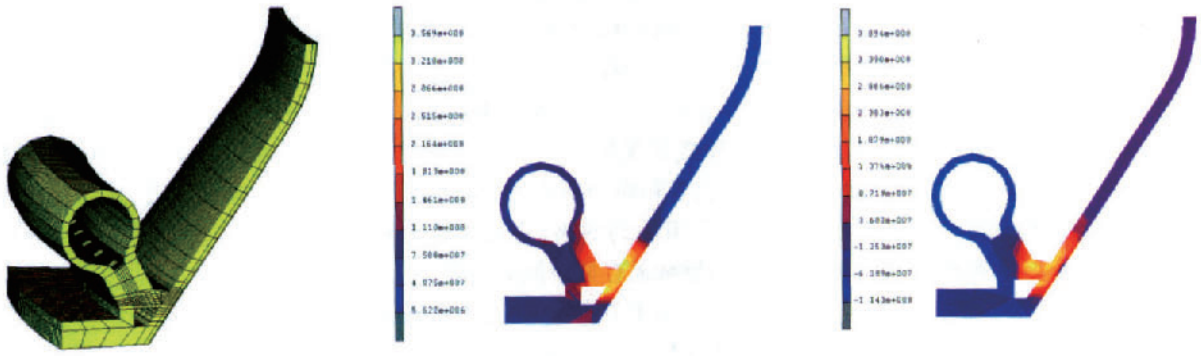
焊接热源能量集中、温度梯度大，在焊接过程的数值分析中需要在焊接部位划分很细的网格，同时要采用很小的时间步长划分很多的时间步，因此计算量很大。分段移动热源是将长焊缝分成若干段，然后按照焊接顺序依次在每一段上施加等效的段热源，以减少计算量。它其实是一种等效分段热源方法。

对于一条焊缝来说，如果焊接热源的移动速度足够快，那么在这条焊缝上所施加的移动热源就可以近似变换为等效的、提前一定时间作用的带状热源。该热源在垂直于运动方向和沿深度方向的热流按照一定规律分布（例如高斯分布或者双椭球分布）。实际上，移动热源是否可以看作是带状热源，与热源的移动速度和焊缝的长度有关。针对一定的焊接结构，对于具有某一焊速 v 的移动热源，总存在着某一焊缝长度（假定为 a），在这个长度之内，移动热源可以近似处理成为带状热源。那么对于长度为 l 的焊缝，就可以被分成 n 段，其中每一段的长度小于或等于 a，在每一段内，将移动热源看作为等效的、作用一定时间的带状热源，分段热源在焊缝长度上按移动热源的移动方向顺序施加。

对焊接残余应力和变形分析来说，分段移动热源既可以体现出高度集中热源热流分布的特点，又可以体现出移动的特点。在每一段内因为是按带状热源处理，所以在带状热源的作用时间 Δt 内，所施加的热源不再是移动的边界条件，因此就可以用较大的时间步长，从而大大减少计算时间。另外由于带状热源和移动热源在空间上不同的分布特点，在焊接方向上可以采用较粗的网格，简化了有限元网格划分的工作量。

分段移动热源可以大大减少焊接残余应力和变形的计算量，使大型焊接结构的数值分析成为可能，使得需要几个星期才能完成的计算量可以在十几个小时之内完成。在计算中要根据实际情况，合理选择分段长度或分段数。一般来讲，针对焊接残余应力的计算，可以选取较少的分段数和焊缝部位较细的网格尺寸；焊接变形的计算则可以选用较少的分段数和较粗的网格[2-3]。

2 整体模型与局部模型相结合分析焊接应力



(a) 局部三维网格模型　(b) 等效应力分布 (Pa)　(c) 周向应力分布 (Pa)

图 1 航天发动机复杂结构焊接应力分析

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

对于大型复杂结构的焊接应力分析，可以根据结构的特点选择感兴趣的部位，采用局部模型将其余部位对所选择局部的影响通过设置合理的边界条件来加以考虑。如航天发动机中的某复杂结构，是采用多种材料通过焊接的方法实现制造的，其制造过程中产生的应力及其对结构工作性能的影响是需要关注的。采用完整的三维模型进行焊接应力有限元分析是难以实现的。因此根据周期对称结构特点进行了简化，建立了应力分析的局部三维模型（如图 1 所示），将其余部分对局部模型的影响考虑到边界拘束条件中，研究了几种边界拘束条件对应力分布和大小的影响，确定了采用无周向位移的约束条件，并分析了复杂结构压力作用下的应力分布、焊接残余应力以及焊接残余应力对压力作用下结构中应力分布的影响[4]。

另外，对于大型复杂结构的焊接应力分析，还可以采用对感兴趣的部位进行细致分析、局部划分精细单元、其余部位划分粗单元的方法来进行[5]。

3 复合单元技术

针对焊接的特点，在建立有限元模型时一般采用焊缝及其附近区域的密网格向远离焊缝区域的粗网格逐渐过渡的方法进行网格划分。但由于过渡区的单元和节点必须匹配，造成了网格划分的灵活性非常差，网格划分效率低，特别是对大型结构分析工作量极大且不易实现。针对这个问题，可以采用能够更方便实现网格疏密过渡的粘贴技术进行网格划分。“粘贴”实际上是一种特殊的接触，在这种接触中，分离力和摩擦系数无穷大，所以接触部位不会发生分离和滑动。由于这种粘接并不要求公共边界上单元节点的一一对应，所以网格划分十分灵活，对于形状较复杂或结构尺寸较大的物体，可以根据需要将焊缝区域及远离焊缝区域等各个部位分别划分网格，然后利用“粘贴技术”将其“粘连”起来，使接触体的连接面上具有相同的位移、温度等，如一个整体一般。

在一般情况下，对于薄壁结构的有限元建模，可以采用计算效率较高的三维壳单元进行网格划分，但对于焊接问题，由于焊缝部位的模拟需要一定的厚度来反映焊缝和坡口的形状，以及模拟熔敷金属的填充等，所以这部分结构的建模需要应用实体单元才能得到准确的结果。针对薄壁结构焊接过程数值模拟的这一特点，在建立有限元模型时可以采用能够自动实现从实体单元到壳单元过渡的网格划分技术——壳体混合单元技术进行网格划分。从实体单元到壳单元的过渡方法之一是通过退化了的实体单元（楔形单元）来实现的，楔形单元靠近壳单元一边的节点数目由原来实体单元的四个退化为两个，在有限元计算过程中，各种计算信息即通过这种退化了的节点实现从体元到壳元的传递，并保证楔形单元与壳单元的厚度匹配与协调性。因为壳单元的节点数目明显少于实体单元，且自由度数目较之实体单元也有减少，因此采用壳体混合单元划分技术也可以很好地减少模型的计算规模。例如，对于焊接薄板的应力和变形分析，采用新技术后网格的数量可降为原来的一半[6-7]。

4 自适应网格重划分技术

焊接时采用的热源大多是移动热源。在热源移动时，整个焊件的温度、应力应变随时间和空间急剧变化，并且同时存在着加热和冷却、加载和卸载等现象。在不同的时刻和位置，温度和应力应变的分布极不均匀，如采用均匀网格，势必引起计算时间的增加或存储空间的浪费。

由于只有在热源附近才有较大的温度梯度，所以在移动热源的情况下，离热源较远的其他部位，即使也处于焊缝及其周围的区域，也没有很大的温度梯度。在这种情况下，如果还采用较密的网格，就会造成大量密网格的同时出现，造成存储空间的浪费，大幅度提高运算成本。因此较理想的方法是，随着热源的移动，加密的网格也跟着移动，称之为动态可逆的自适应网格技术。它允许根据自适应误差准则自动细化网格，在误差减小到一定程度后，自动回到细化前的较稀疏的网格状态。这种技术可有效地处理有移动边界的场问题，在焊接分析时，可使运动的焊枪前沿和熔池局部等部位始终保持细密的网格，而焊后逐渐冷却的焊缝可恢复稀疏网格。需要注意的问题是，焊接的过程是一个热力耦合的过程，在热弹塑性分析的过程中，既需要计算温度场，又需要计算应力应变场，这就涉及如何决定误差判定准则的问题。因为在计算温度场时需要加密网格的地方，不一定就是应力应变场也需要加密网格的地方。所以在计算的过程中要兼顾二者，或者分别用不同的判定准则。在平板堆焊的应力分析中，采用此技术后计算时间可以节省 1/3 以上[8-10]。

焊接应力与变形的控制方法

1 预拉伸和预应变控制焊接变形

为了减小、控制结构的焊接变形，其关键环节就是使加热产生的压缩塑性变形得到有效恢复，为此可通过两种途径：一是焊前控制，二是焊接过程控制，这两种方法均为主动控制方法。

焊前控制结构的焊接变形主要采用预拉伸或反变形方法，其中预拉伸方法是在焊前对板、板架结构、梁等结构或构件进行预先拉伸，在结构中形成一定的拉伸应力和应变，这种方式的优点是结构中的预拉伸应力或应变均匀，控制焊接变形的效果明显。研究结果表明，当施加的载荷在结构中产生的应力水平超过被焊材料屈服极限的 1/2 时，能获得比较好

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

的控制效果。这种方法需要专用大型拉伸设备，适合于梁、板直线焊缝的焊接。

基于主动控制焊接加热时产生的压缩塑性变形的思想，提出一种与上述方法不同，且易于实现、灵活、能有效的控制焊接变形的新方法——预应变法。如果在焊接之前采用横向载荷对薄板施加一定预应变量，则有可能使之在焊接过程中减小和完全抵消焊接加热阶段造成的压缩塑性应变，那么冷却到原始状态，焊件中的残余塑性应变将处在很低的水平，焊后结构中的焊接应变相应得到有效控制。这种方法便于实现，焊接过程中不需增添附加设备和工序，不影响焊接过程和焊接质量。该方法既不同于预拉伸法，又不同于常规的反变形法。其特点是根据焊接数值模拟结果，在获得焊接压缩塑性应变大小的基础上，焊前施加所需要的预应变量，抑制热源前缘及两侧区域产生的压缩塑性应变，并可有效减小焊接产生的横向扰动力，焊后焊接区域的残余塑性应变很小、或者被完全消除，从而有效控制结构的焊接弯曲变形；同时，残余应力水平很低，横向扰动力矩得到有效控制，因而也特别适合于控制薄板的失稳焊接变形。

2 辅助冷热源减小焊缝凝固所受的应力与应变

焊缝凝固裂纹是焊接单相奥氏体、镍基合金、铝及铝合金等材料时存在的一个主要问题，焊缝在凝固过程中所受的应变超过其塑性时就会产生凝固裂纹，所以，提高焊缝的塑性或降低焊缝所受的拉伸应变均可防止凝固裂纹的产生。对于单相奥氏体以及镍基合金焊缝而言，塑性的改善很难通过成份的调整来实现，而适当调整邻近焊缝的热场分布可以减小焊缝所受的拉伸应变，有可能防止凝固裂纹的产生。本研究组提出并研究了通过施加辅助热源或冷源调整温度场分布来达到减小焊缝所受拉伸应变、防止凝固裂纹产生的方法，研究了辅助冷、热源的施加条件对温度场分布、焊缝所受拉伸应变以及焊缝凝固裂纹率的影响规律，确定了可以有效降低拉伸应变、防止凝固裂纹产生的辅助热源的能量密度及施加位置，研究结果还表明，施加辅助冷源也可以降低焊缝的拉伸应变，但效果不如辅助热源显著[11-13]。

3 采用数值模拟方法研究焊后碾压控制薄壁结构焊接变形

焊缝碾压技术是一种机械的方法，在窄轮压力的作用下，焊缝区产生相应的延伸塑性变形，用以补偿焊后残余的压缩塑性变形，达到降低压缩残余应变，减小变形的目的。

由于碾压技术可以使焊件内的残余应力分布更合理，并在一定程度上矫正焊接变形，因此成为目前航空航天结构制造中应用较广的一种控制焊接残余应力和矫正变形的方法。采用碾压技术控制焊接应力和变形的方法主要有预热碾压、随焊热碾压和焊后冷碾压等方法。由于焊后冷碾压技术具有设备简单、成本低、容易实现的特点，目前广泛地应用于生产。但是其工艺优化和机理研究如果用传统的实验方法很难进行，而通过数值模拟则可以解决这个难题。

焊后冷碾压技术是在焊件焊接完成之后，温度恢复至室温进行的碾压，此时焊件残余应力场和变形已经稳定，碾压过程中通过碾压轮的碾压力迫使焊件在较低温度下发生塑性应变，从而使焊接残余应力场在焊件内重新分布，同时使焊接变形得到矫正。

4 多束流电子束焊接技术

通过磁场（磁透镜）控制电子束的高速偏转和快速摆动，可以实现两束以上的多束电子束的焊接和加工。这样，电子束可以同时作用于工件上的几个不同位置，而且在每次摆动中还可以改变焦点位置和电子束能量，通过散焦和摆动实现材料的焊接预热和焊后热处理。

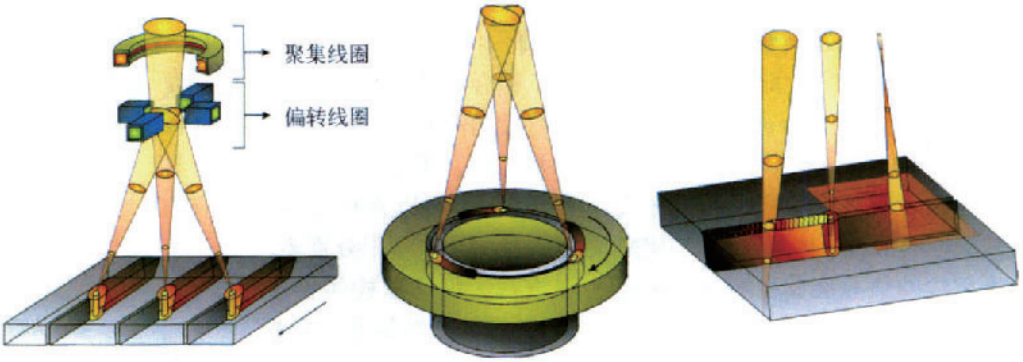


图 2 多束流电子束焊接技术

多束电子束焊接可以通过输入热量的动态调节，实现焊接过程中应力和变形（应变）的动态控制，形成高质量的焊接接头。图 2 所示为采用多束流来进行焊接、预热和后处理过程的示意图，图 3 为采用多束流中的辅助束流对焊接残余应力的控制效果。

应用举例

1 铝合金搅拌摩擦焊焊接应力与变形的预测

搅拌摩擦焊是一种固相连接方法，焊接变形和焊接应力小，因此非常适用于镁、铝等轻合金的焊接。虽然搅拌摩擦焊的残余应力和变形一般比熔化焊小，但在连接铝合金薄壁件，特别是大尺寸薄板结构时，焊后

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

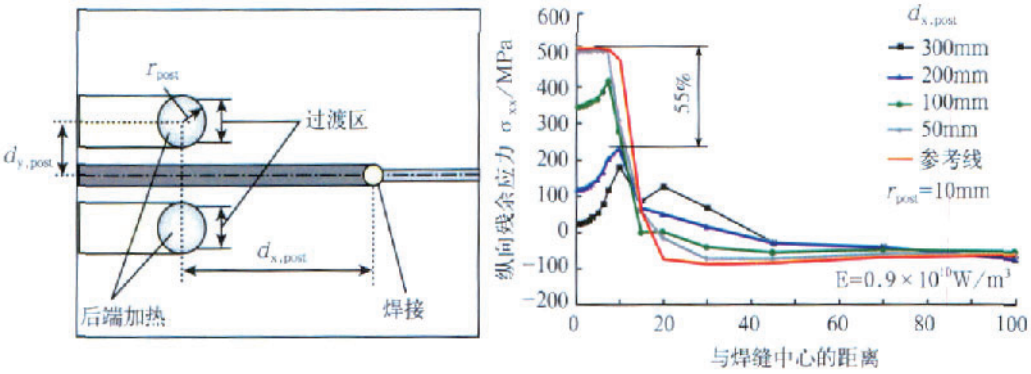


图 3 采用多束流电子束加工技术控制焊接残余应力[14-15]

存在不可忽视的残余变形。本研究组利用数值模拟和实际焊接试验相结合的方法，研究铝合金薄壁结构搅拌摩擦焊的焊接应力与变形规律，建立了基于材料屈服极限和搅拌头旋转速度的自适应热源模型[16]，使搅拌摩擦焊的热源能够很好地反映其固相焊接的特点；建立了与热过程相关的材料模型[17]，使得材料性能随着焊接过程的进行所发生的变化能够得到很好的考虑；在应力和变形分析中，考虑了轴肩的压力和卡具的作用；这些工作使得搅拌摩擦焊应力与变形的数值模拟能够很好地反映实际结果(图 4)，可将数值模拟用于铝合金搅拌摩擦焊焊接应力与变形的预测。在这些研究基础上，利用数值模拟和试验相结合的方法，研究了各种焊接条件(包括结构尺寸、焊接参数、装卡条件、焊接顺序、焊道分布等)对铝合金结构搅拌摩擦焊变形的影响规律，获得了丰富的变形数据[18-21]。

2 铝合金薄壁件焊接变形预测与控制

铝合金薄壁结构广泛应用于航空航天构件中，有的还带有各种各样的加强筋。重要部件对尺寸精度有严格要求，所以对焊接变形和应力进行预测和控制十分重要。在进行大型薄壁构件的分析时，焊缝的局部可以采用三维实体单元，远离焊缝的部分用壳单元；内外筋和薄壁筒体的连接可以采用“粘接”技术或者内部约束来实现。通过数值模拟，对焊接工艺进行了优化，从而控制了焊接变形和应力。

3 航天发动机复杂结构件焊接变形的预测

某发动机的复杂结构是由大量的焊接完成制造的，结构尺寸和形状的精密控制是该结构质量控制的重要内容之一。本研究组通过简单模拟件焊接试验确定材料性能和热学边界条件、进行结构等效以减少分析单元与节点、采用分段模型通过边界条件考虑结构的影响、利用分段热源进行焊接过程等效等方法，成功地实现了大型复杂构件焊接变形的预测(图 5)，为快速精确控制该类结构件的焊接变形建立了一种可行的途径[22]。

结束语

航空航天结构件焊接应力与变形的预测与控制是其制造中的关键技术之一，在此领域，本研究组在焊接应力和变形的数值模拟分析、试验测试、预测和控制方面，开展了大量的工作，取得了阶段性研究成果。

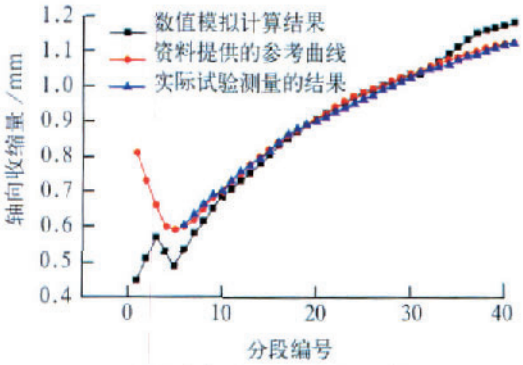


图 5 焊接变形预测与实测结果

本文有参考文献 22 篇，因篇幅所限，未能一一列出，如有需要，请向编辑部索取。

（责编 悠然）

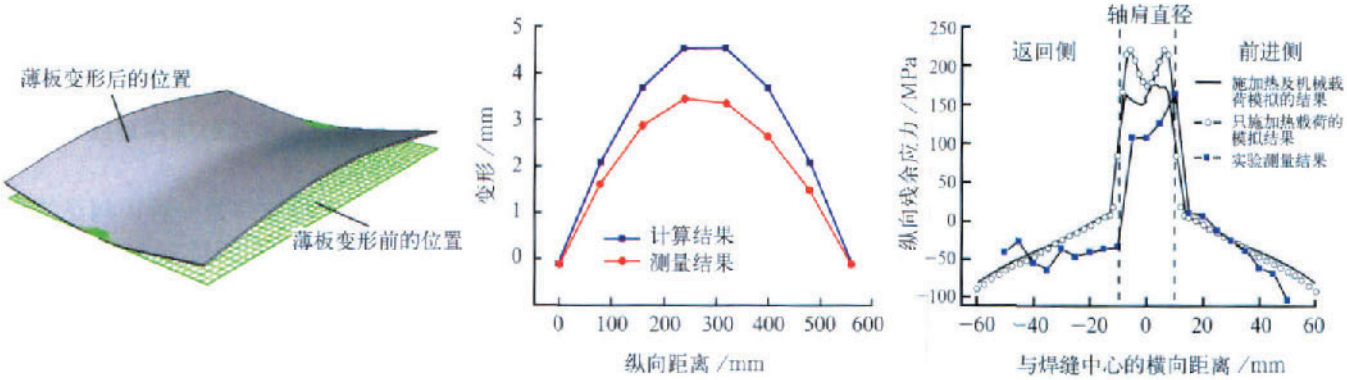


图 4 铝合金搅拌摩擦焊焊接应力与变形的模拟和实验测量结果

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net