ICS 25.160.01
CCS J 33

CWA

团　　体　　标　　准

T/CWAN 0063—XXXX

焊接数值模拟 固有应变法

Numerical welding simulation Inherent strain method

（征求意见稿）

（本稿完成时间：2023.11.20）

XXXX-XX-XX 发布　　XXXX-XX-XX 实施

中国焊接协会 发布

焊接数值模拟 固有应变法

1 范围

本文件规定了焊接数值模拟流程、一般要求、仿真建模规则、接头固有变形的计算、仿真结果评估、仿真分析报告构成等内容与规范。

本文件适用于基于固有应变法的工程机械焊接结构件熔化焊（气保焊、激光焊等）的焊接变形预测。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 31054 机械产品计算机辅助工程有限元数值计算术语

GB/T 33582 机械产品结构有限元力学分析通用规则

ISO/TS 18166 焊接数值模拟 执行和文档(Numerical welding simulation — Execution and documentation)

ISO/TR 25901（所有部分） 焊接及相关工艺 词汇（Welding and allied processes — Vocabulary）

T/CWAN XXXX—2023 焊接数值模拟 热弹塑性有限元方法

3 术语和定义

GB/T 31054、GB/T 33582、ISO/TR 25901、ISO/TS 18166和T/CWAN XXXX—2023界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

固有应变 inherent strain

经历焊接热循环后，焊缝及其附近产生的永久应变。

3.2

固有变形 inherent deformation

固有应变在焊缝横截面上的积分结果。

3.3

固有应变法 inherent strain method

一种焊接变形数值模拟方法，其原理是将焊缝及其附近的固有应变作为初始值进行一次弹性分析，从而得到焊接结构的整体变形。

4 基本流程

固有应变法焊接数值模拟的基本流程主要包括有限元模型建立、模型求解、结果评估、仿真方案制定实施及报告编写，具体参见附录 A。

5 一般要求

有限元模型分析前应符合下述要求：

——应按照 GB/T 33582 附录 B 规定选择 SI 单位制，质量单位选择吨，长度单位选择毫米，应力单位选择兆帕，时间单位选择秒，密度单位选择吨/立方毫米，力的单位选择牛，模型材料属性单位应与几何模型单位一致；

——应选笛卡尔直角坐标系，当边界条件中有力或者约束与全局坐标系不一致时，可增加局部坐标系；

——焊接 CAD 模型应结构完整，装配关系清晰明了；

——三维建模软件可选用 Creo，网格划分软件可选用 Hyper mesh，焊接仿真专用软件可选 JWRIAN-Assembly 或 Jweld，大型通用软件可选 Abaqus 或 Ansys。

6 焊接仿真分析模型建立规则

6.1 几何模型建立及简化

6.1.1 几何模型简化应符合准确性和经济性两个原则。

6.1.2 焊接仿真分析的几何模型简化原则：

——应对模型进行干涉检查，避免模型中存在干涉；

——应删除对焊接变形影响较小且不重要的零部件，如螺丝、油缸、吊耳、安装板、固定板等；

——应删除各个零件上的圆角、切角、退刀槽、凸台、无焊缝填充的倒角等细节特征；

——应删除各个零件上直径≤10 mm 的孔；

——应简化不规则的截面形状。

6.2 有限元网格划分

6.2.1 使用 JWRIAN-Assembly 软件时应采用壳单元网格划分，使用 Abaqus 和 Ansys 软件时应采用实体单元网格划分。

6.2.2 基于壳单元的网格划分应遵守以下原则：

——应对模型进行干涉检查，避免模型中存在干涉；

——将模型导入 Hyper mesh 中，宜选择 offset+plane 的形式对几何模型抽取中面，当抽取的中面存在破损的情况时，可选择其它中面抽取方式；

——应调整需要对齐的平面，并去除中面上的圆倒角、切角等细节特征；

——应去除中面间隙，使各中面相交；

——应修补模型的破面，合并距离很近的边及节点；

——应去除模型中存在的自由边；

——应将对接接头、角接接头各组件中面的交线作为焊缝，如图 1 和图 2 所示；

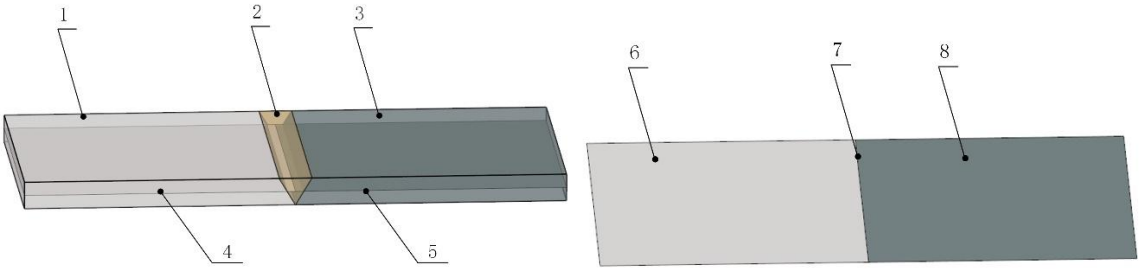
——应在搭接接头两组件中面之间建立一个面 P，并将该面作为搭接接头 P1 组件中面的一部分，P1 组件与 P2 组件的交线为搭接接头的焊缝，如图 3 所示；

——应在端接接头两组件中面之间建立一个面，并将该面平均分为 A，B 两个面，分别赋给 P1，P2 两个组件的中面，两组件中面的交线为端接接头的焊缝，如图 4 所示；

——当两组件之间的焊缝超过一条时，应将组件切割成为多个组件，使每两个组件之间仅有一条焊缝，如图 5 所示；

——建立焊接仿真分析模型时，宜使用四边形低阶单元；

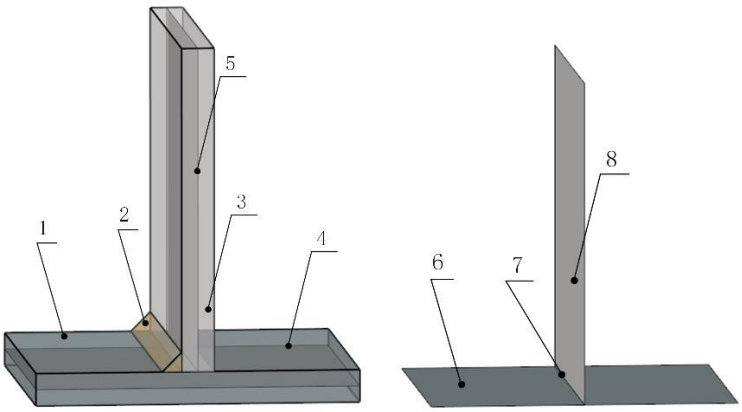
——应在焊缝位置划分足够多的网格来准确预测变形，小型结构焊缝长度方向宜不少于 8 个单元，大型结构宜不少于 6 个单元，超大型结构宜不少于 4 个单元。



a） 几何模型　　b） 中面模型

标引序号说明：
1——几何模型中的组件 P1；
2——几何模型中的焊缝；
3——几何模型中的组件 P2；
4——几何模型中组件 P1 的中面；
5——几何模型中组件 P2 的中面；
6——中面模型中的组件 P1；
7——中面模型中的焊缝；
8——中面模型中的组件 P2。

图 1 对接接头的简化

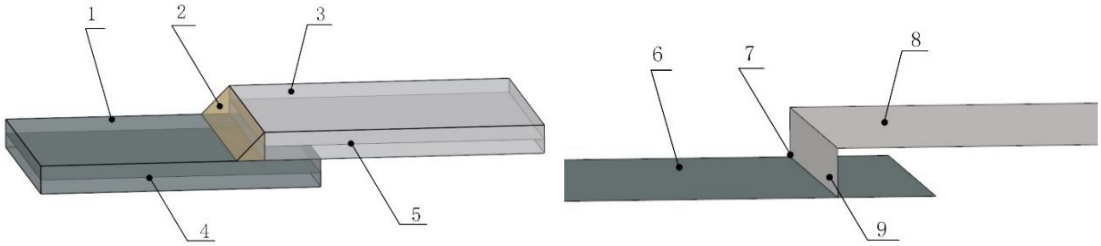


a） 几何模型　　b） 中面模型

标引序号说明：
1——几何模型中的组件 P1；

2——几何模型中的焊缝；
3——几何模型中的组件 P2；
4——几何模型中组件 P1 的中面；
5——几何模型中组件 P2 的中面；
6——中面模型中的组件 P1；
7——中面模型中的焊缝；
8——中面模型中的组件P2。

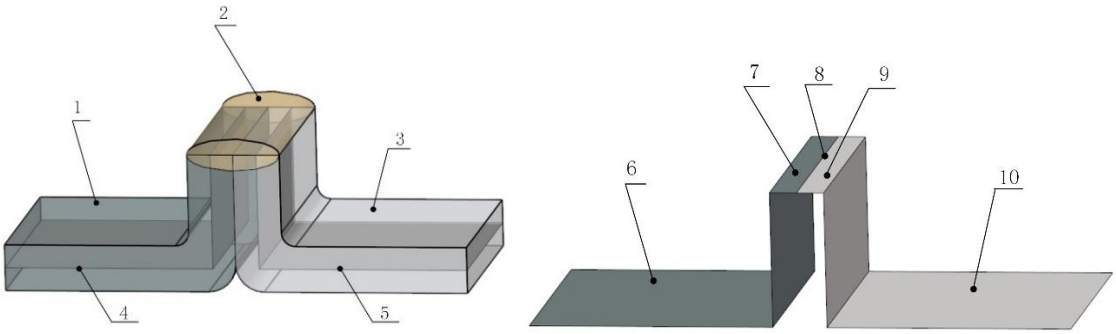
图 2 角接接头的简化



a） 几何模型　　b） 中面模型

标引序号说明：
1——几何模型中的组件 P1；
2——几何模型中的焊缝；
3——几何模型中的组件 P2；
4——几何模型中组件 P1 的中面；
5——几何模型中组件 P2 的中面；
6——中面模型中的组件 P1；
7——中面模型中的焊缝；
8——中面模型中的组件P2;
9——中面模型中的面P。

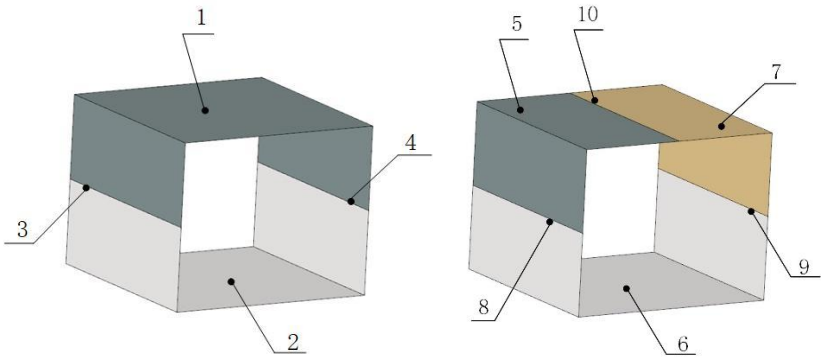
图 3 搭接接头的简化



a）几何模型　　b）中面模型

标引序号说明：
1 ——几何模型中的组件 P1；
2 ——几何模型中的焊缝；
3 ——几何模型中的组件 P2；
4 ——几何模型中组件 P1 的中面；
5 ——几何模型中组件 P2 的中面；
6 ——中面模型中的组件 P1；
7 ——中面模型中的面 A；
8 ——中面模型中的焊缝；
9 ——中面模型中的面B；
10——中面模型中的组件P2。

图 4 端接接头的简化



a）组件切割前　　b）组件切割后

标引序号说明：
1 ——切割前的组件 P1；
2 ——切割前的组件 P2；
3 ——切割前组件 P1 与组件 P2 形成的焊缝 w1；
4 ——切割前组件 P1 与组件 P2 形成的焊缝 w2；
5 ——切割后的组件 P1；
6 ——切割后的组件 P2；
7 ——切割后形成的新组件 P3；
8 ——切割后组件P1与P2形成的焊缝w1；
9 ——切割后组件P2与P3形成的焊缝w2；
10——切割后组件P1与P2形成的焊缝w3。
切割前组件P1与组件P2组成的C型结构之间存在焊缝w1和焊缝w2，应将组件1切割成为组件P1和组件P3，此时C型结构中多出焊缝w3，变形计算时应忽略焊缝w3，将组件P1与P3之间设置为刚性连接。

图 5 C 型结构的简化

6.2.3 基于实体单元的网格划分宜符合 T/CWAN XXXX—2023 的规定。

6.3 焊接接头固有变形计算

利用固有应变法计算结构焊接变形，应先根据结构特征提取其接头形式，再根据接头形式的不同分别提取固有变形（包括纵向固有收缩、横向固有收缩、横向固有弯曲和纵向固有弯曲），最后在软件中输入固有变形值进行变形计算。焊接接头固有变形可采用实验方法、热弹塑性法和经验公式法进行计算，计算步骤见附录 B，主要包括以下内容：

a）附录 B.1 给出了采用实验方法提取固有变形的步骤；

b）附录 B.2 给出了采用热弹塑性法提取固有变形的步骤；

c）附录 B.3 给出了采用经验公式计算固有变形的步骤。

6.4 计算条件设置

6.4.1 力学边界条件的施加

模型结构边界条件的设定应符合以下原则：

——焊接仿真分析模型的结构边界条件设定应符合实际工况；

——当在自由状态下进行焊接变形计算时，应限制仿真模型的 6 个自由度，以防止工件发生刚体位移和转动，宜使用如图 6 所示的约束方式；

——当在装夹条件下进行焊接变形计算时，应在夹具作用位置施加位移约束。

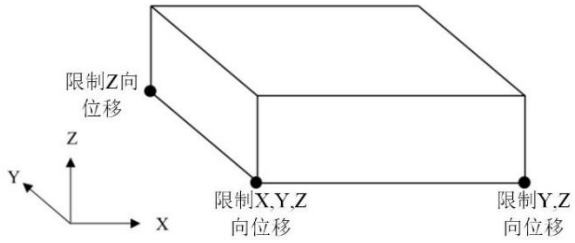


图 6 限制刚体位移的约束方式

6.4.2 固有变形的施加

6.4.2.1 基于壳单元模型的固有变形的施加应符合以下原则：

——单元法向应保持一致；

——固有变形的施加位置应符合 6.2.2 中规定的焊缝位置。

6.4.2.2 基于实体单元模型的固有应变的施加应符合以下原则：

——宜施加到焊缝热影响区；

——宜通过修改材料热膨胀系数的方法施加固有应变，应保证固有应变的方向与坐标系的方向一致，针对异形焊缝，应通过对焊缝进行分段，并建立局部坐标系的方式保证固有应变与坐标系方向的一致性。

6.5 有限元模型的检查

6.5.1 网格模型的检查

网格划分完成后，应对网格进行检查，检查内容及要求如下：

——模型中不应有重复、折叠、畸变和连接问题的网格；

——网格检查的主要参数包括单元的法向、长宽比、雅克比、内角、翘曲度、偏斜度，单元质量控制参数应符合表 1 的规定；

——应优先保证焊缝位置的网格质量；

——应检查相连组件间是否存在未耦合的节点，并进行节点耦合操作。

表 1 单元质量检查控制参数

参数	长宽比	雅克比	内角	翘曲度	偏斜度
数值	5～10	≥0.3	40～135°	≤18°	≤60°

6.5.2 模型设定的检查

模型设定完成后，应对模型进行检查，检查内容及要求如下：

——组件属性检查，应对模型中的各个组件进行排序，并分别赋予属性特征，确保组件顺序与属性顺序一一对应；

——力学边界检查，依据模型在实际焊接过程中的约束状态，检查模型的约束。

7 仿真结果评估

7.1 表象评估

结果表象评估，具体方法如下：

——检查模型的奇异比；

——检查模型的收敛性；

——分析焊接变形的合理性。

7.2 变形趋势评估

通过三维扫描的形式确定物理样件的变形趋势，具体方法如下：

——采用三维扫描仪对焊接后的物理样件进行整体扫描；

——将有限元分析的网格模型导出为 stl 文件；

——采用最小二乘法进行两个文件拟合，比对模型的重合度。

7.3 关键位置数据评估

进行物理样件试验，对比关键位置的有限元结果和试验结果，以试验结果为依据修正固有变形参数，重新计算评估，保证变形结果偏差不大于10%。

7.4 仿真方案制定与实施

基于7.1~7.3评估得到的合理有限元模型，可制定考虑焊接顺序、焊接工装夹具、焊前反变形等工艺的仿真方案，并进行仿真实施与验证，获得符合目标值要求的焊接变形控制方案。

8 仿真分析报告

根据具体的分析对象、分析目的等编写分析报告，模板见附录C，仿真实施过程可参见附录D示出的对接接头MIG焊接的变形模拟仿真实例，报告至少包括但不限于以下内容：

——仿真对象，详细描述组件或者结构、焊接工艺和参数；

——仿真目标，介绍分析问题背景，说明采取的分析手段、阐述预期结果细节；

——物理模型，描述需要模拟的物理过程，给定的边界条件及简化假设；

——分析过程，描述几何模型的简化、网格划分、材料属性、边界条件、求解参数及求解方式；

——结果分析，应给出关键位置的焊接变形值及典型的图标结果，如变形、应力/应变云图。图表应简明易懂且不应有无关的信息；

——模型校核，应给出保证模拟结果正确的措施，主要有模型核查、与物理样件对比验证。

附 录 A

（规范性）

基于固有应变法焊接数值模拟流程图

基于固有应变法焊接数值模拟基本流程如图 A.1 所示。

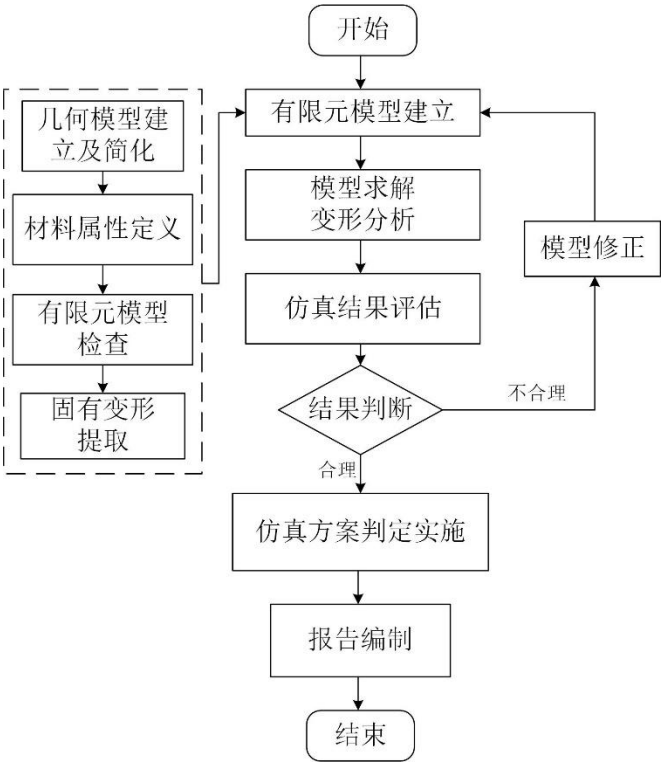


图 A.1 基于固有应变法焊接数值模拟流程图

附 录 B

（资料性）

固有应变的提取及数据修正

B.1 实验方法

B.1.1 利用实验方法提取对接接头固有变形的主要步骤如下：

——根据图 B.1 及表 B.1 所示的细节参数截取两块板材，并根据板材厚度填充表 B.1 第一行数据；

——拼装两块平板并点焊固定，使用冲头和锤子在平板上下表面进行标记，位置如图 B.1 中的黑点所示；

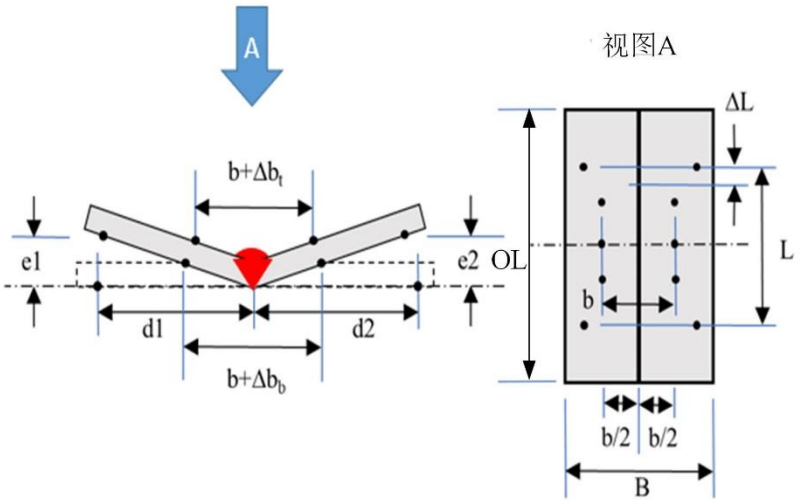
——宜采用三坐标仪测量标记点位置坐标，计算表 B.1 第二行相关数据并填充；

——测量后在自由状态下焊接平板；

——焊后测量接头相关尺寸，填充表 B.1 第三行数据；

——将相关数据带入公式（B.1）～（B.3）计算接头纵向固有收缩、横向固有收缩和横向固有弯曲，其中ΔL 或Δb 为负值时表示收缩；

——一般情况下纵向固有弯曲（θx*）取值 0 rad。



注 1：OL 为该对接接头总长度。
注 2：B 为接头总宽度。
注 3：L、b 为参考点位置，其中 L 参考点仅在下表面标记，b 参考点在上、下表面均标记。
注 4：ΔL 为焊接后上下表面的平均收缩量。
注 5：Δbt 为焊接后接头上表面 b 的收缩量。
注 6：Δbb 为焊接后接头下表面 b 的收缩量。
注 7：e1 为焊接后接头左侧 L 参考点的上翘量。
注 8：e2 为焊接后接头右侧 L 参考点的上翘量。
注 9：d1、d2 分别为左、右 L 参考点与焊缝中心的距离。

图 B.1 对接焊接头的实验测量

表 B.1 对接接头固有变形提取中的相关尺寸（单位：mm）

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：https://d.book118.com/438143107064006025