

基于 SiPESC.FEMS 焊接热力耦合分析模块研发

周延平¹, 董凯骏², 李辉³, 刘洪宇¹, 张盛¹, 陈飙松²

(1. 大连理工大学, 工业装备结构分析优化与 CAE 软件全国重点实验室, 大连, 116024; 2. 大连星派科技有限公司, 大连, 116085; 3. 中国核动力研究设计院, 核反应堆系统设计重点实验室, 成都, 610000)

摘要: 文中基于集成计算仿真平台 SiPESC 的开放式有限元分析软件 SiPESC.FEMS, 研发了模拟焊接过程有限元分析模块。该分析模块可将焊接过程热瞬态分析所得节点温度场以热载荷形式映射到力学分析中, 充分考虑焊接过程中温度变化对结构性能的影响, 实现焊接结构全过程热力耦合数值仿真, 并支持多步分析, 可模拟多道焊接工序及复杂焊接过程。其中热瞬态分析可模拟焊接的非线性瞬态热传导过程, 支持多种焊接移动热源和常用的热单元类型以及热对流和热辐射等复杂边界条件的处理。而焊接结构力学分析可自定义与温度相关的力学材料参数, 支持热弹性和热弹塑性等本构模型。文中采用空心圆筒与带孔方形板沿圆筒外侧焊接的算例进行数值分析对比, 采用顺序热力耦合分析方式, 其中焊接热分析过程为瞬态热传导计算, 结构静力分析过程为热弹塑性计算。计算结果与目前广泛应用的计算机辅助工程 (computer aided engineering, CAE) 商用软件 ABAQUS 相比, 温度最大值偏差为 0.000482%、位移最大值偏差为 0.0231%、等效塑性应变最大值相同。该分析模块的计算精度和 ABAQUS 基本一致, 验证了该焊接模块计算的有效性及时解决工程实际问题的能力。

创新点: (1) 基于 SiPESC 平台研发焊接过程有限元分析模块。

(2) 非线性热传导计算中引入一致线性化算法, 提高迭代效率。

关键词: 热力耦合分析; SiPESC.FEMS; 焊接过程; 有限元数值仿真; 温度场映射

中图分类号: TG 407 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.20231009001

Development of welding thermo-mechanical coupling analysis module based on SiPESC.FEMS

ZHOU Yanping¹, DONG Kaijun², LI Hui³, LIU Hongyu¹, ZHANG Sheng¹, CHEN Biaosong²

(1. State Key Laboratory of Structural Analysis, Optimization and CAE Software for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. Dalian SiPESC Technology Co., Ltd, Dalian, 116085, China; 3. Key Laboratory of Nuclear Reactor System Design, Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610000, China)

Abstract: In this paper, the finite element analysis module for simulating the welding process is developed based on the open finite element analysis software SiPESC.FEMS, which is part of the integrated computational simulation platform SiPESC. This module can map the node temperature field obtained from the thermal transient analysis of the welding process to the mechanical analysis in the form of thermal load. It can fully consider the influence of temperature change on the structural performance during the welding process, and realise the numerical simulation of thermo-mechanical coupling in the whole process of the structure. It also supports multi-step analysis, which can simulate multiple welding stages and complex welding processes. Thermal transient analysis can be used to simulate non-linear transient heat transfer processes in welding. It can support multiple types of welding moving heat sources, commonly used thermal element types, as well as complex boundary conditions such as thermal convection and thermal radiation. Mechanical analyses of welded structures, can support customisation of temperature-dependent mechanical material parameters, and support constitutive models such as thermo-elasticity and thermo-elastoplasticity. There is a numerical analysis and comparison using an example of welding along the outer side of a hollow cylinder and a perforated square plate. The example uses a

sequential thermomechanical coupling analysis method. The welding thermal analysis process is transient heat conduction calculation, and the structural static analysis process is a thermo-elastoplastic calculation. The calculation results are compared with those from ABAQUS, a widely used commercial computer aided engineering(CAE) software, the maximum temperature deviation is 0.000482%, the maximum displacement deviation is 0.023 1%, and the maximum equivalent plastic strain is identical. The calculation accuracy of this analysis module is essentially consistent with that of ABAQUS, which validates the effectiveness of this welding module and its capability to solve practical engineering problems.

Highlights: (1) A finite element analysis module for the welding process is developed based on the SiPESC platform.

(2) In nonlinear heat conduction calculations, a consistent linearization algorithm is introduced to improve iterative efficiency.

Key words: thermodynamic coupling analysis; SiPESC.FEMS; welding process; finite element numerical simulation; temperature field mapping

0 序言

焊接技术作为制造业中传统的工艺和技术,虽然应用到工业中的历史并不长,但发展非常迅速,已被广泛应用于航空航天^[1-3]、汽车^[4]、船舶^[5-6]、建筑^[7]等重要的工业领域。焊接就物理过程本质而言是多样的、复杂的。焊接过程的复杂性一般体现在,焊接方法本身具有多样性,常见的有电弧焊、摩擦焊和高能束焊等;焊接过程的多物理场耦合性两个方面。

CAE 在焊接结构的设计和分析中已经证明了其价值。通过对焊接热循环、残余应力和变形的计算分析,帮助工程师做出更合理的决策^[8]。发展焊接过程分析软件,对焊接过程进行数值模拟是科学认识焊接过程、优化创新焊接工艺的重要一环。近年来,焊接数值模拟计算软件发展迅速,除了 ANSYS、ABAQUS 等通用软件可以进行焊接数值模拟以外,还发展了 Simufact 等专用焊接软件。焊接工艺的优化创新,给焊接数值模拟软件带来了广阔的发展前景。

SiPESC 是由大连理工大学工业装备结构分析优化与 CAE 软件全国重点实验室研发的面向工程与科学计算的集成软件系统^[9]。文中基于其 SiPESC.FEMS 开放式结构有限元分析系统^[10]研发了焊接过程有限元分析模块。该模块应用了大量的软件设计模式,便于后续计算功能的扩展,体现了分析模块的可扩展性和可维护性;同时采用的插件及扩展的管理机制,实现不同计算功能、本构模型的动态替换和组装,具有一定的开放性和通用性。

1 理论基础

1.1 瞬态传热导

随着计算机性能的提高和有限元方法的发展,基于非线性有限元方法的数值模拟已成为研究焊接领域问题的主要手段。由于焊接过程涉及温度场与力学场间的相互耦合作用,需要考虑温度场对材料性能所产生的影响。文中焊接分析模块主要基于非线性有限元理论,采用顺序热力耦合的分析方式对焊接的热过程和力学过程进行数值分析,并包括对焊接过程的温度场、变形、残余应力等焊接现象进行仿真和预测。

Fourier 热传导定律是经典传热理论的基础,由其推导得到热传导控制方程^[11]。考虑以焊接热过程中对流和热源荷载的三维非线性热传导方程为例,进行有限元离散后得到积分弱形式为

$$\int_{\Omega^e} \left[N \left(\rho C \frac{\partial T}{\partial t} - Q \right) + k_{ij} \frac{\partial N}{\partial x_i} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right] d\mathbf{x} + \oint_{\Gamma^e} q_h N d\mathbf{A} = 0 \quad (1)$$

式中: T 为温度; ρ 为密度; C 为热容系数; k_{ij} 为热传导张量的分量(对称); Q 为体生热源; N 为权函数; x_i, y_i 为空间坐标; $d\mathbf{x}$ 为体积微元; t 为时间; q_h 为换热膜系数; $d\mathbf{A}$ 为面积微元。

采用隐式向后欧拉方法,即第 $n+1$ 步的温度导数表示为

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \dot{T}^{n+1} = \frac{1}{\Delta t} (T^{n+1} - T^n) \quad (2)$$

式中: n 为增量步数。

将式(2)带入式(1)并采用 Newton-Raphson 求解上述非线性方程。若焊接材料热容系数或热传导

系数是随温度变化的,需采用 N-R 算法进行迭代计算.为提高迭代效率,引入一致线性化算法来推导一致切线刚度.式 (1) 中热容系数相关的内力为

$$R_I^{Mn+1} = \int_{\Omega} \left[N_I \rho C \frac{1}{\Delta t} (T_I^{n+1} - T_I^n) \right] d\mathbf{x} \quad (3)$$

式 (1) 中热传导系数相关的内力为

$$R_I^K = \int_{\Omega} k_{ij} \frac{\partial N_I}{\partial x_i} \frac{\partial T_I^{n+1}}{\partial x_j} d\mathbf{x} \quad (4)$$

对式 (3) 进行一致线性化推导,可得到热容系数项关于温度的一致切线刚度表达式,即

$$M_{II}^{n+1} = \int_{\Omega} \rho N_I C \frac{1}{\Delta t} N_J d\mathbf{x} + \int_{\Omega} \rho N_I \frac{\partial C}{\partial T} N_J \frac{1}{\Delta t} (T_I^{n+1} - T_I^n) d\mathbf{x} \quad (5)$$

同样,对式 (4) 进行一致线性化推导,可得到热传导系数项关于温度的一致切线刚度表达式,即

$$K_{II}^{n+1} = \int_{\Omega} k_{ij} \frac{\partial N_I}{\partial x_i} \frac{\partial N_J}{\partial x_j} d\mathbf{x} + \int_{\Omega} \frac{\partial k_{ij}}{\partial T} N_J \frac{\partial N_I}{\partial x_i} \frac{\partial T_I^{n+1}}{\partial x_j} d\mathbf{x} \quad (6)$$

1.2 材料非线性本构

焊接过程涉及温度场与力学场间的相互耦合作用,当焊接材料受到热作用,由于温度的上升或下降发生的形变,通常用热应变来描述.以考虑弹性模量和热膨胀系数随温度变化的热弹塑性问题为例,热应变计算为

$$\boldsymbol{\varepsilon}^{th} = \alpha(T - T^0) - \alpha^l(T^l - T^0) \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (7)$$

式中: α 为当前温度下的热膨胀系数; α^l 为初始温度下的热膨胀系数; T 为当前温度; T^0 为热膨胀系数参考温度; T^l 为初始温度.

在考虑温度变化的弹塑性本构问题中,温度对材料的屈服应力、杨氏模量等有影响,在热弹塑性本构中,屈服应力、杨氏模量等材料参数会随温度发生变化,同时需要考虑热膨胀效应.在弹性预测步中,得到 t_n 时刻到 t_{n+1} 时刻的应变增量 $\Delta \boldsymbol{\varepsilon}$ 后,可得第 $n+1$ 步增量弹性试探应变和试探等效塑性应变为

$$\begin{cases} \Delta \boldsymbol{\varepsilon}_{n+1}^{e \text{ trial}} = \Delta \boldsymbol{\varepsilon} - \Delta \boldsymbol{\varepsilon}^{th} \\ \bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_{n+1}^p = \bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_n^p \end{cases} \quad (8)$$

此时,考虑到温度变化对材料物性的影响,相应的试探应力和试探屈服应力为

$$\begin{cases} \boldsymbol{\sigma}_{n+1}^{trial} = \boldsymbol{\sigma}_n + \mathbf{D}^e : \Delta \boldsymbol{\varepsilon}_{n+1}^{e \text{ trial}} \\ \sigma_{yn+1}^{trial} = \sigma_y(\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_n^p, T_{n+1}) = \sigma_{yn} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\mathbf{D}^e$ 为弹性矩阵.

完成弹性预测步中的各状态变量更新后,下一步进行塑性修正.首先判断试探应力是否满足屈服条件,若试探应力小于屈服应力,则当前时间步为纯弹性步,所有的试探状态变量均为该积分算法的解,直接完成状态变量更新,即

$$\begin{cases} \boldsymbol{\varepsilon}_{n+1}^e = \boldsymbol{\varepsilon}_{n+1}^{e \text{ trial}} \\ \boldsymbol{\sigma}_{n+1} = \boldsymbol{\sigma}_{n+1}^{trial} \\ \bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_{n+1}^p = \bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_n^p \end{cases} \quad (10)$$

如弹性预测步中的试探应力不满足屈服条件,则需要进行塑性修正.以 Mises 等向强化弹塑性本构为例,对状态变量进行修正,即

$$\begin{cases} \boldsymbol{\varepsilon}_{n+1}^e = \boldsymbol{\varepsilon}_{n+1}^{e \text{ trial}} - d\lambda \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{\mathbf{s}_{n+1}}{\|\mathbf{s}_{n+1}\|} \\ \boldsymbol{\sigma}_{n+1} = \boldsymbol{\sigma}_{n+1}^{trial} - \frac{d\lambda 3G}{q_{n+1}^{trial}} \mathbf{s}_{n+1}^{trial} \\ \bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_{n+1}^p = \bar{\boldsymbol{\varepsilon}}_n^p + d\lambda \end{cases} \quad (11)$$

式中: $d\lambda$ 为塑性乘子; $\mathbf{s}_{n+1}$ 为第 $n+1$ 个增量步时的偏应力; $\mathbf{s}_{n+1}^{trial}$ 为第 $n+1$ 个增量步时的试探偏应力; G 为材料的剪切模量; q_{n+1}^{trial} 为试探等效应力.

对于 Mises 等向强化弹塑性本构这种最简单的弹塑性本构,塑性乘子可直接通过屈服函数求得.而其他复杂弹塑性本构则需要 Newton-Raphson 迭代求解 $d\lambda$.将 $d\lambda$ 回代到经过塑性修正的状态变量表达式中,即可完成应力更新.定义单位流动向量为

$$\bar{\mathbf{N}}_{n+1} = \sqrt{\frac{3}{2}} \mathbf{N}_{n+1} \quad (12)$$

该本构模型的一致切线模量为

$$\mathbf{D}^{ep} = 2G \left(1 - \frac{d\lambda 3G}{q_{n+1}^{trial}} \right) \mathbf{I}_d + K \mathbf{I}_u \otimes \mathbf{I}_u + 6G^2 \left(\frac{d\lambda}{q_{n+1}^{trial}} - \frac{1}{3G+H} \right) \bar{\mathbf{N}}_{n+1} \otimes \bar{\mathbf{N}}_{n+1} \quad (13)$$

式中: K 为材料体积模量; $\mathbf{I}_u$ 为二阶单位张量; $\mathbf{I}_d$ 为四阶偏量投影张量; H 为硬化模量.

2 程序框架设计

文中基于 SiPESC.FEMS 开放式结构有限元分析系统,采用 C++ 面向对象的程序设计方法,针对复杂焊接过程中的非线性多物理场分析问题,构建了焊接有限元分析模块整体框架.整个焊接数值分析过程需对热分析过程、静力分析过程分别进行非线性求解,在非线性和求解器的计算流程中,需要调

用单元、材料以及载荷计算等具体的非线性特性计算功能. 通过插件技术和工厂设计模式实现上述具体的非线性特性计算功能的动态扩展和装配. 焊接

分析模块主流程的 UML 类, 如图 1 所示. 从中可以看出整个求解流程分为主控流程类、求解器类和非线性特性计算类 3 个主要层次.

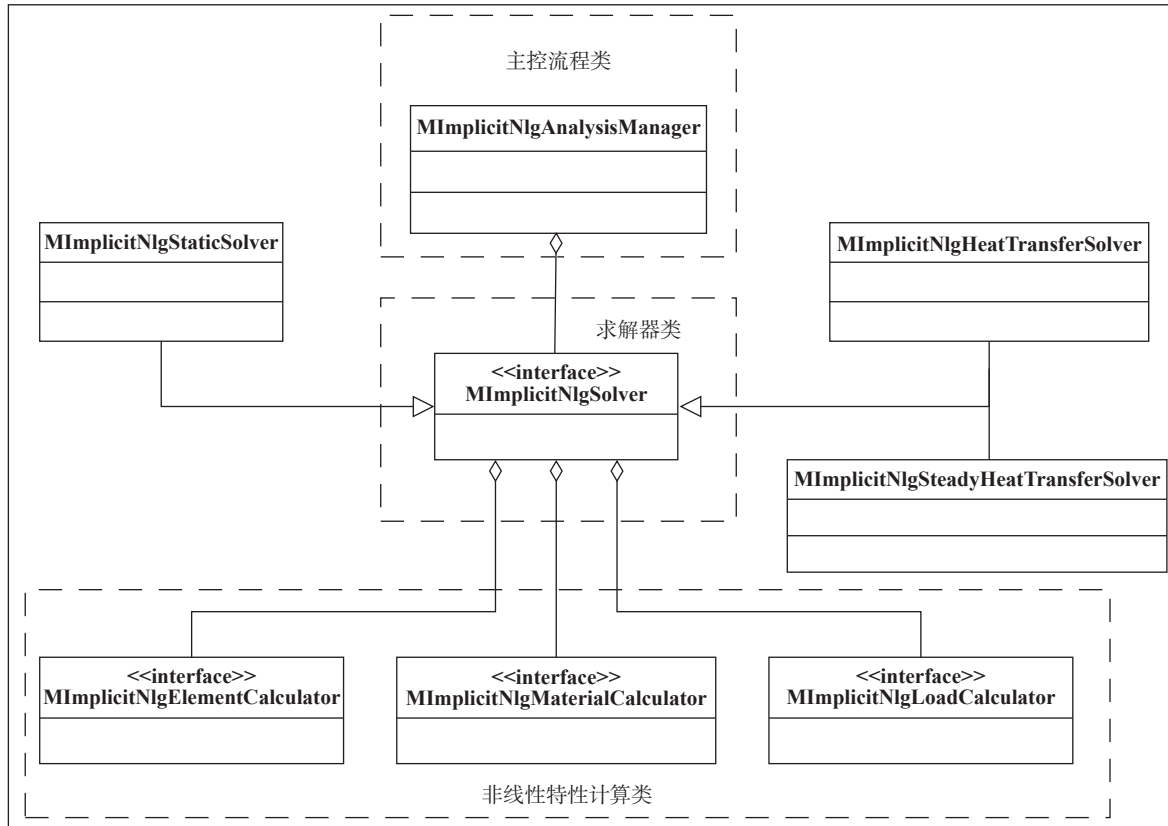


图 1 焊接分析软件主流程框架

Fig. 1 Framework of welding analysis software main process

主控流程类 MImplicitNlgAnalysisManager 的接口在主函数中调用, 调用顺序位于数据导入和预处理之后. 主要用于封装求解器类以及相关的初始化工作. 求解器类的虚基类为 MImplicitNlgSolver, 定义了非线性求解器的公用接口, 各类非线性求解器均继承自该基类, 并通过工厂模式进行动态添加. 在图 1 中, 衍生出的非线性求解器为 MImplicitNlgStaticSolver(隐式非线性力学求解器)以及 MImplicitNlgHeatTransferSolver(非线性瞬态热传导求解器). 在非线性求解器的计算流程中, 需要调用单元, 材料以及载荷计算等具体的非线性特性计算功能. 与求解器类类似, 根据具体的计算需求, 设计了 MImplicitNlgElementCalculator(单元计算虚基类), MImplicitNlgMaterialCalculator(材料计算虚基类)以及 MImplicitNlgLoadCalculator(载荷计算虚基类), 各类不同的单元, 材料以及载荷通过相应的基类派生, 并通过工厂模式动态添加. 基于上述主求解框架, 在数据文件导入、转储之后,

通过主控流程类创建新的分析, 根据数据文件中的分析类型关键字调用并初始化相应的求解器, 在具体的求解流程中根据具体的单元类型、荷载类型和本构类型调用相应的计算插件, 完成整个求解流程.

在文中的总体框架下, 相同类型的计算功能都可以采用工厂模式进行开发, 例如单元计算, 材料计算, 载荷计算以及非线性求解器等. 这些功能都拥有相同的接口, 但不同类型计算功能的内部实现不同. 通过工厂模式, 可以在统一的接口下, 动态添加任意多类型的计算功能而不需要修改总体流程, 实现了计算功能开发和程序流程开发的分离.

3 计算插件设计

3.1 单元计算

在非线性求解器的计算流程中, 需要调用单元计算功能. 根据焊接分析的功能的需求, 文中设计

开发了单元计算插件. 目前添加了多种三维实体热传导单元和相应的三维实体连续体力学单元. 具体的单元计算类通过工厂模式添加. 以八节点六面体热传导单元为例, 单元计算类如图 2 所示. 最顶层的为求解器类, 其中根据单元的类型 DC3D8 创建相应的工厂类 MDC3D8ElementCalculatorFactory, 该工厂类负责创建具体的单元计算类 MDC3D8ElementCalculator, 该类继承自统一的单元计算接口基类 MImplicitNlgElementCalculator, 该基类定义了所有单元通用的操作接口, 单元计算类的计算接口说明为

initialize(): 初始化数据库

allocate(): 分配单元数据内存

getStrain(): 计算单元积分点应变/温度梯度

getInternalForce(): 计算单元内力/热传导向量

getInertiaForce(): 计算单元惯性力/热容向量

getPostValue(): 计算单元节点场变量值

单元计算在求解器中出现在初始化, 求解以及后处理结果输出这 3 个主要流程中. 其中初始化模块中调用 initialize(), allocate(); 求解模块中调用 getStrain(), getInternalForce() 和 getInertiaForce() 进行计算; 后处理模块中调用 getPostValue() 接口外推单元节点结果. 目前已经开发了低阶四面体、低阶六面体、高阶四面体和高阶六面体共 4 种三维实体热

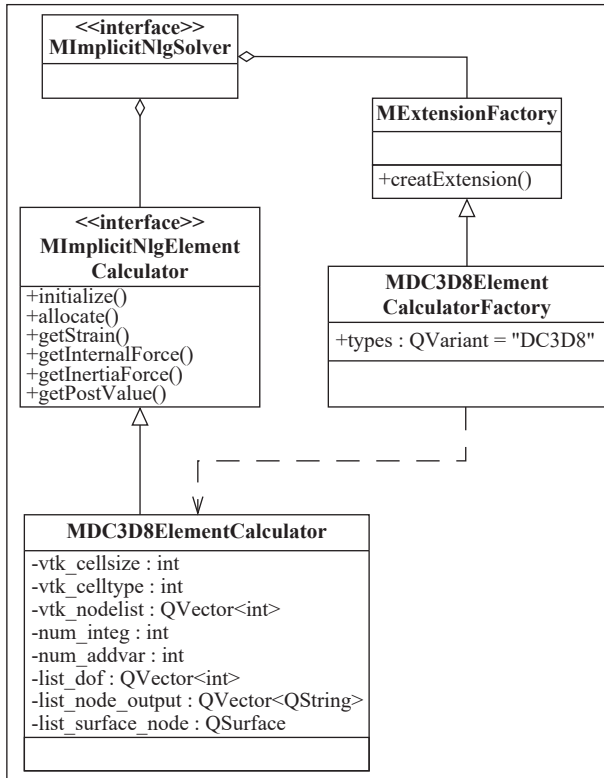


图 2 DC3D8 单元计算类关系

Fig. 2 Relationship of class for DC3D8 calculation

传导单元和相应的 4 种三维实体连续体力学单元.

3.2 本构计算

在非线性求解器的计算流程中, 需要调用材料计算功能. 根据焊接分析的功能的需求, 文中设计开发了本构计算插件. 与单元计算类的添加类似, 本构计算类根据本构类型通过工厂模式添加以热弹塑性本构计算类为例, 本构计算类关系如图 3 所示. 本构计算类继承自统一的本构计算接口基类 MImplicitNlgMaterialCalculator, 本构计算类的计算接口说明为

initialize(): 初始化数据库

allocate(): 分配材料数据内存

getStress(): 计算单元积分点应力/热流密度

其中 getStress() 在求解器的求解模块中调用.

目前已经集成了热传导、热弹性和热弹塑性等本构类型, 新的本构计算也可以通过工厂设计模式实现动态扩展.

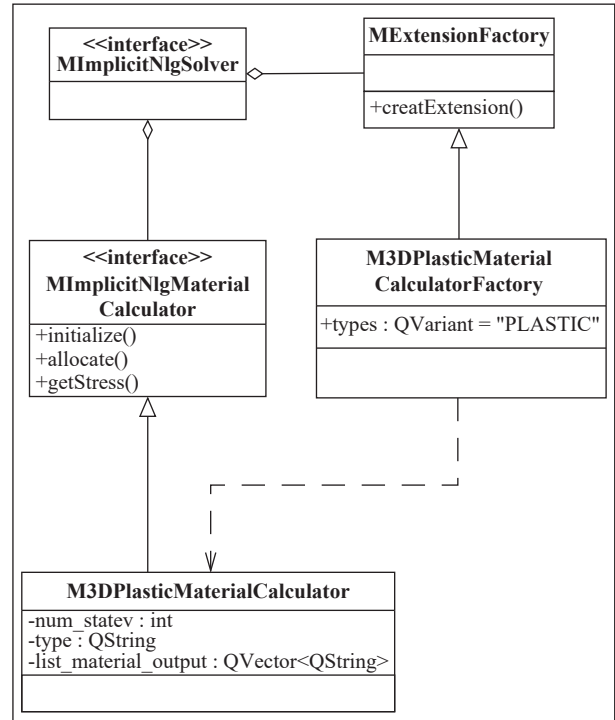


图 3 热弹塑性本构计算类关系

Fig. 3 Relationship of class for thermoplasticity constitutive calculation

3.3 焊接相关荷载计算

3.3.1 荷载计算类

在非线性求解器的计算流程中, 需要调用荷载计算功能. 根据焊接分析的功能的需求, 文中设计开发了焊接相关荷载计算插件. 通过工厂模式动态添加了移动热源、表面换热荷载和表面辐射荷载等焊接相关荷载类型. 具体荷载计算类的添加是根据

载荷类型,通过工厂模式动态添加,对流换热荷载计算类关系,如图 4 所示.荷载计算类继承自统一的荷载计算接口基类 `MImplicitNlgLoadCalculator`.荷载计算类的计算接口说明为

`initialize()`: 初始化数据库

`allocate()`: 分配荷载数据内存

`getExternalForce()`: 计算外荷载向量

其中 `getExternalForce()` 在求解器的求解模块中调用.

目前已经开发了体热源荷载(包括移动热源)、表面换热荷载和表面辐射荷载等荷载类型.其中焊接移动热源可通过热源子程序的方式定义,文中开发的分析模块通过插件技术实现了对 ABAQUS 的用户自定义热源子程序 DFLUX 的动态集成,用户只需要编写 DFLUX 的代码并编译成动态链接库即可在 SiPESC 平台中进行使用.

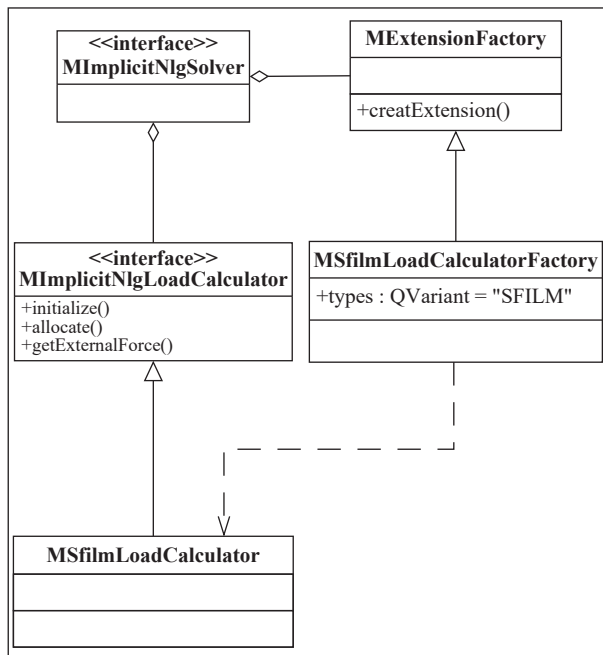


图 4 对流换热荷载计算类关系

Fig. 4 Relationship of class for surface film calculation

3.3.2 热力耦合温度场映射

焊接非线性有限元分析中采用热—力顺序耦合方法,因此需要将瞬态热传导分析得出的节点温度场时程结果作为外荷载映射到力学分析中.热分析过程的每个增量步计算收敛后调用求解器封装类的内部接口 `_Task_Result_OUTPUT()`,将全部节点温度场结果输出 1 个热结果文件.在力学分析的初始化过程中通过调用求解器封装类的内部接口 `_Task_Read_Result()`,读入该文件并存入数据库.力学分析增量—迭代计算时,调用求解器内部接口 `getTemperature()`,根据当前增量步时间,对温度场

数据进行线性插值得到当前增量步的节点温度场.

3.4 热力耦合求解

目前已经开发了非线性稳态热传导求解器、非线性瞬态热传导求解器和隐式非线性力学求解器.以隐式非线性静力力学分析求解器说明求解器类关系,如图 5 所示.最顶层的为求解器主控流程类,其中根据求解器的类型 (STATIC) 创建相应的工厂类 `MImplicitNlgStaticSolverFactory`,该工厂类负责创建具体的求解器类 `MImplicitNlgStaticSolver`,求解器类继承自统一的求解器计算接口基类 `MImplicitNlgSolver`,该基类定义了所有求解器通用的操作接口,即

`initialize()`: 初始化数据库

`start()`: 开始分析步求解

`restart()`: 通过重启动开始分析步求解

除了通用接口外,每个求解器内部还定义了一系列私有函数,用于调用单元,本构等计算模块执行操作,图 5 中隐式非线性静力力学分析求解器为

`getForceParallel()`: 执行并行计算操作(单元计算)

`getForceSequential()`: 执行串行计算操作(荷载计算)

`solve()`: 执行线性方程组求解

`updateConfiguration()`: 更新构型

`converge()`: 执行收敛操作.

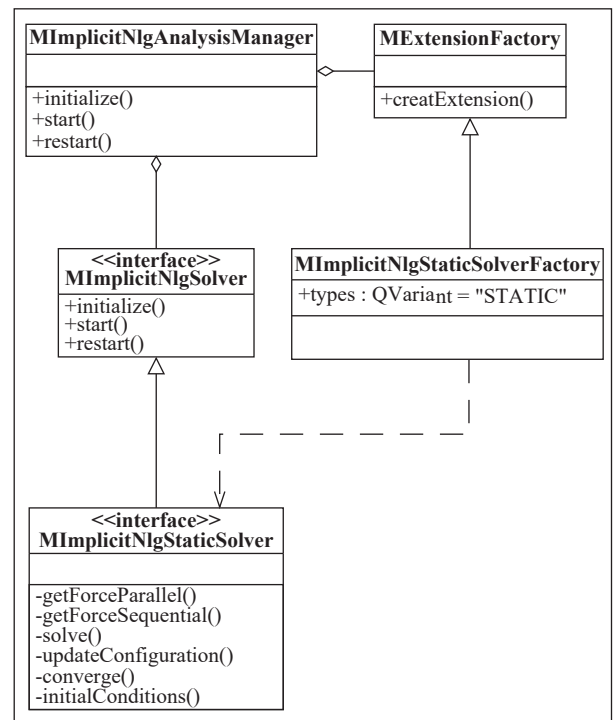


图 5 隐式非线性静力力学分析求解器类关系

Fig. 5 Relationship of class for implicit nonlinear static solver

4 数值算例

4.1 算例说明

为验证分析模块对焊接全过程的数值仿真效果,建立空心圆筒与带孔方形板沿圆筒外侧焊接的算例进行分析并与商业软件 ABAQUS 进行对比,模型及网格划分,如图 6 所示.焊缝长度为 1/4 圆周.热分析过程为非线性瞬态热传导分析,随温度变化的材料参数如表 1 所示;模型采用八节点六面体单元划分,共有 35 568 个单元,45 296 个节点.中间焊缝处施加 45°倾角的双椭球移动热源;外表面有环境温度 20 °C 的对流换热和表面热辐射;初始温度为 20 °C,分析时长为 20 s,时间步长为 0.005 s,共 4 000 步.作为对比,ABAQUS 软件中采用 DC3D8 单元,为了保证对比的合理性,两者的非线性收敛残差均为相对温度变化 0.000 001、相对热流变化 0.000 001.

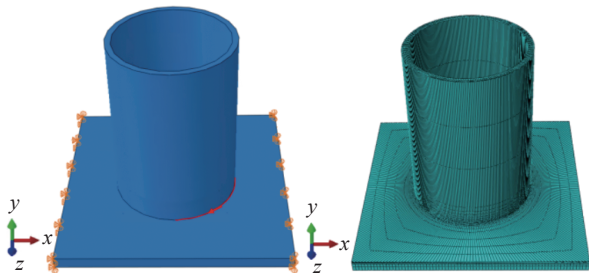


图 6 模型及网格划分
Fig. 6 Model and meshes

表 1 热分析过程材料参数 Table 1 Material parameters for thermal analysis process		
温度 $T/^{\circ}\text{C}$	热传导系数 $K/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	热容系数 $C/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$
0	51.9	468.9
200	48.1	510.8
400	49.1	586.2
800	24.7	619.6
1 200	29.7	653.1

静力分析过程为热弹塑性,随温度变化的材料参数中,屈服应力 σ_y 为 355 MPa,其他参数如表 2 所示.方板两侧施加 3 个方向的位移约束,如图 7 所示.初始温度为 20 °C,分析时长为 20 s,时间步长为 0.01 s,共 2 000 步.作为对比,ABAQUS 软件中采用 C3D8 单元.为了保证对比的合理性,两者的非线性收敛残差均为相对位移变化 0.005、相对内力变化 0.01.

表 2 静力分析过程材料参数
Table 2 Material parameters for static analysis process

温度 $T/^{\circ}\text{C}$	弹性模量 E/GPa	热膨胀系数 $\alpha/^{\circ}\text{C}^{-1}$	强化切线模量 E_t/GPa
0	209	0.000 011 59	7.705
250	207	0.000 012 32	7.702
500	202	0.000 013 09	7.695
750	196	0.000 013 71	7.686
1 000	186	0.000 014 18	7.670

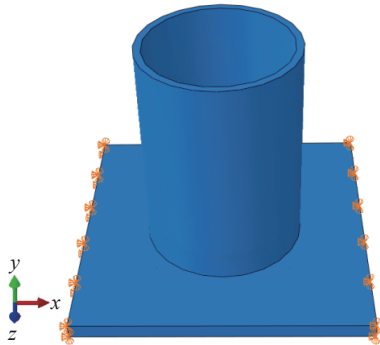


图 7 边界条件
Fig. 7 Boundary conditions

4.2 结果对比

4.2.1 热过程结果对比

ABAQUS 与 SiPESC 的温度云图对比,如图 8 所示. ABAQUS 计算得到的温度最大值为

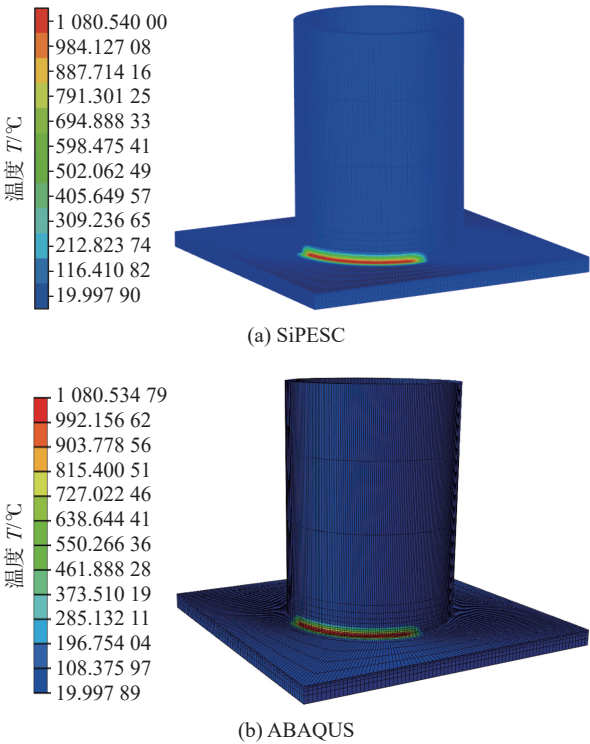


图 8 SiPESC 平台与 ABAQUS 的温度云图对比
Fig. 8 Comparison of SiPESC with ABAQUS temperature cloud map. (a) SiPESC; (b) ABAQUS

1080.53479 °C, SiPESC 计算得到的温度最大值为 1080.54000 °C, 两者偏差为 0.000482%; ABAQUS 计算得到的温度最小值为 19.99789 °C, SiPESC 计算得到的温度最小值为 19.99790 °C, 两者偏差为 0.00005%。324 号节点 (温度最大值点) 温度时程曲线, 如图 9 所示。SiPESC 与 ABAQUS 时程曲线基本吻合。热过程分析的热流结果对比, 如图 10 所示。热流的云图吻合良好, ABAQUS 计算得到的热流最大值为 $9.93718 \times 10^4 \text{ W/m}^2$, SiPESC 计算得到的热流最大值为 $9.93713 \times 10^4 \text{ W/m}^2$, 两者偏差为 0.000503%, 偏差非常小。

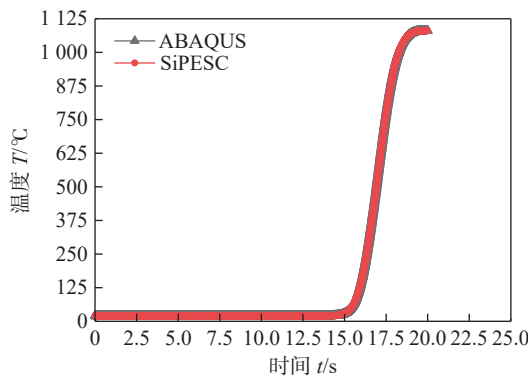


图 9 324 号节点温度时程曲线对比
Fig. 9 Comparison of temperature time-history curves for node 324

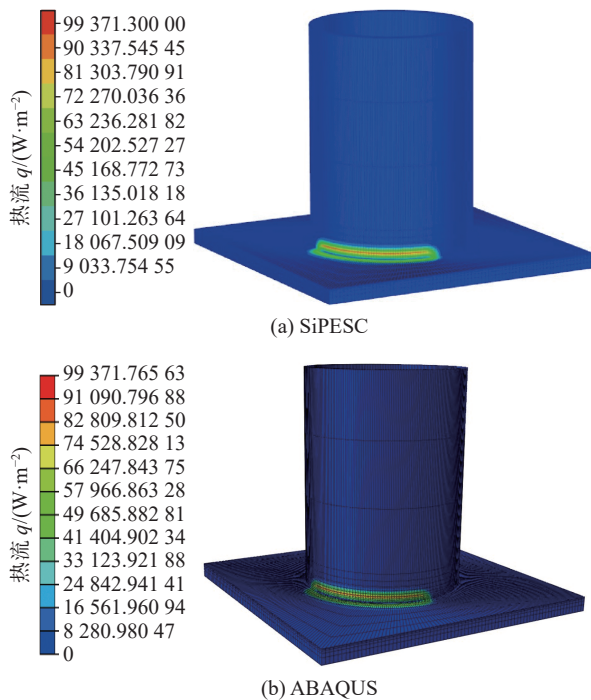


图 10 SiPESC 平台与 ABAQUS 的热流云图对比
Fig. 10 Comparison of SiPESC with ABAQUS heat flux cloud map. (a) SiPESC; (b) ABAQUS

4.2.2 力过程结果对比

ABAQUS 与 SiPESC 的位移云图对比, 如图 11

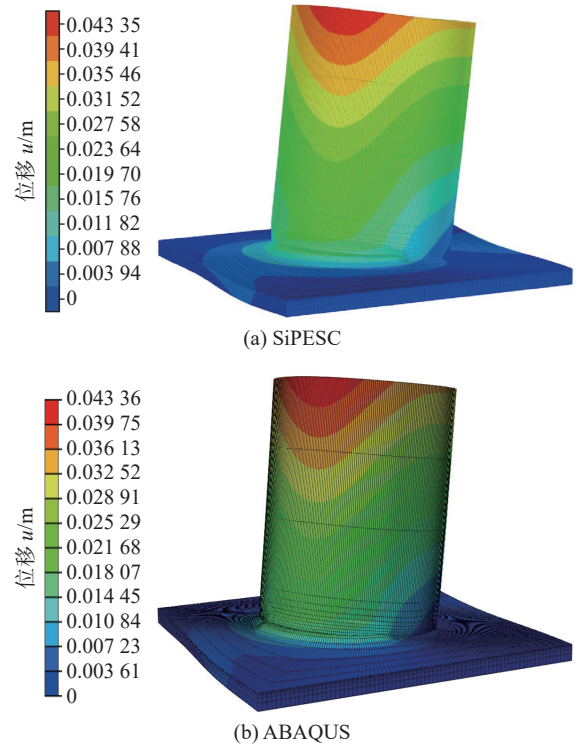


图 11 SiPESC 平台与 ABAQUS 的位移云图对比
Fig. 11 Comparison of SiPESC with ABAQUS displacement cloud map. (a) SiPESC; (b) ABAQUS

所示。ABAQUS 计算得到的位移最大值为 0.04336 m, SiPESC 计算得到的位移最大值为 0.04335 m, 两者偏差为 0.0231%。3768 号节点 (位移最大值点) 位移时程曲线, 如图 12 所示。SiPESC 与 ABAQUS 时程曲线基本吻合。

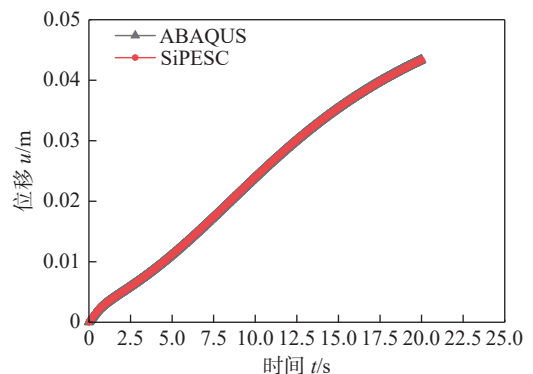


图 12 3768 号节点位移时程曲线对比
Fig. 12 Comparison of displacement time history curves for node 3768

Mises 应力结果对比, 如图 13 所示。可以看出 Mises 应力的云图吻合良好。ABAQUS 计算得到的最大值为 692.2 MPa, SiPESC 计算得到的最大值为 692.7 MPa, 两者偏差为 0.0722%; ABAQUS 计算得到的最小值为 1.934 MPa, SiPESC 计算得到的最小值为 1.935 MPa, 两者偏差为 0.0517%, 结果偏差较小。

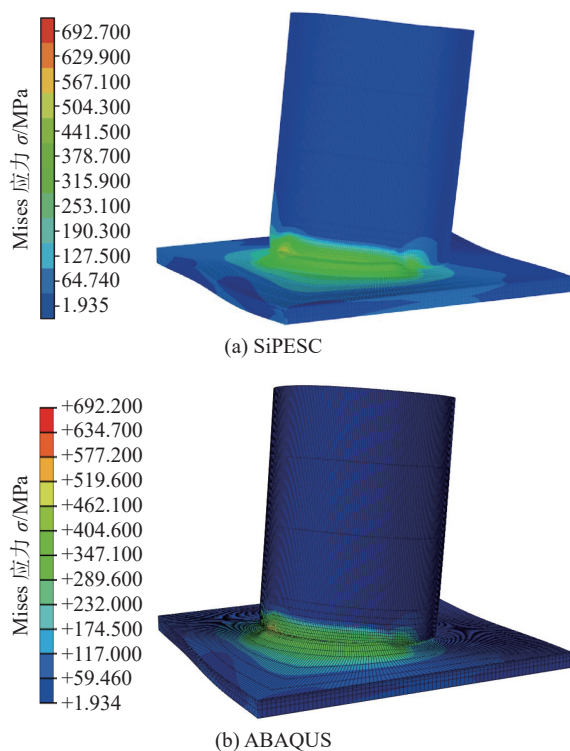


图 13 SiPESC 平台与 ABAQUS 的 Mises 应力云图对比
Fig. 13 Comparison of SiPESC with ABAQUS Mises stress cloud map. (a) SiPESC; (b) ABAQUS

ABAQUS 与 SiPESC 的等效塑性应变云图对比, 如图 14 所示. SiPESC 和 ABAQUS 计算得到的

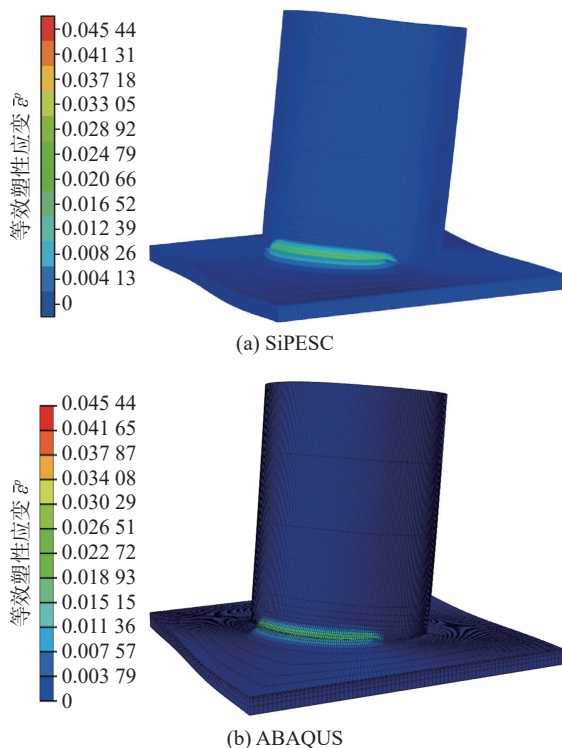


图 14 SiPESC 平台与 ABAQUS 的等效塑性应变云图对比
Fig. 14 Comparison of SiPESC with ABAQUS equivalent plastic strain cloud map. (a) SiPESC; (b) ABAQUS

等效塑性应变最大值均为 0.04544, 20013 号节点 (等效塑性应变最大值点) 等效塑性应变时程曲线, 如图 15 所示. SiPESC 与 ABAQUS 时程曲线基本吻合.

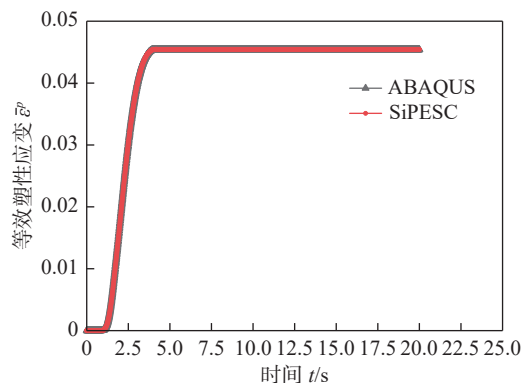


图 15 20013 号节点等效塑性应变时程曲线对比
Fig. 15 Comparison of equivalent plastic strain time history curves for node 20013

5 结论

(1) 基于集成计算仿真平台 SiPESC 的开放式有限元分析软件 SiPESC.FEMS, 研发了焊接过程有限元分析模块, 支持多种热单元和结构单元类型; 满足多种焊接热源模型, 对 ABAQUS 的用户自定义热源子程序动态集成; 支持多种非线性传热边界条件 (换热、辐射等); 支持多种非线性力学材料本构模型 (热弹性、热弹塑性等); 可模拟多道焊接过程分析程序及复杂焊接过程; 程序具备可扩展性, 可根据需求进行功能及算法扩展; 焊接全过程的数值仿真 (热源施加、冷却等).

(2) 通过焊接筒的数值算例与目前广泛应用的 CAE 商业软件 ABAQUS 进行分析对比, 焊接热过程分析中温度最大值偏差为 0.000482%、热流最大值偏差为 0.000503%, 焊接静力分析过程中位移最大值偏差为 0.0231%、Mises 应力最大值偏差为 0.0722%、等效塑性应变最大值相同. 可以看出, 该焊接分析模块的计算精度 ABAQUS 基本一致, 验证了该焊接模块计算的有效性及解决工程实际问题的能力.

参考文献

- [1] Ahmed M M, Seleman M M, Fydrich D, *et al.* Friction stir welding of aluminum in the aerospace industry: the current progress

- and state-of-the-art review[J]. *Materials*, 2023, 16(8): 2971.
- [2] Nirmal K, Jagadesh T. Numerical simulations of friction stir welding of dual phase titanium alloy for aerospace applications[J]. *Materials Today*, 2021, 46: 4702 – 4708. .
- [3] Pandian V, Kannan S. Numerical prediction and experimental investigation of aerospace-grade dissimilar aluminium alloy by friction stir welding[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, 54: 99 – 108.
- [4] 韩永全, 刘乐乐, 孙振邦, 等. 车用薄镀锌板 CMT 搭接工艺特性 [J]. *焊接学报*, 2023, 44(2): 90 – 95.
Han Yongquan, Liu Lele, Sun Zhenbang, *et al.* Characteristics of CMT lap joint process for thin galvanized sheet for vehicles[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2023, 44(2): 90 – 95.
- [5] 许维明, 李智东, 祝晓, 等. 船舶结构 T 型接头焊接变形数值模拟研究 [J]. *江苏船舶*, 2023, 40(5): 54 – 57.
Xu Weiming, Li Zhidong, Zhu Xiao, *et al.* Numerical simulation research on welding deformation of T-joints in ship structures[J]. *Jiangsu Ship*, 2023, 40(5): 54 – 57.
- [6] 袁明新, 戴现令, 刘超, 等. 基于空间位置和轮廓线距离的船舶焊缝特征参数提取 [J]. *焊接学报*, 2023, 44(1): 84 – 92.
Yuan Mingxin, Dai Xianling, Liu Chao, *et al.* Feature parameters extraction of ship welds based on spatial position and contour distance[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2023, 44(1): 84 – 92.
- [7] Chou C C, Yu G J, Wang K J, *et al.* Application of robotic welding technology to the continuity plate weld within a steel built-up box column in buildings[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2023, 24(9): 1563 – 1576.
- [8] Hu G X, Yang X Y, Yu X B, *et al.* Investigation on automated loading of dynamic 3D heat source model for welding simulation[J]. *China Welding*, 2022, 31(3): 48 – 52.
- [9] 张洪武, 陈飙松, 李云鹏, 等. 面向集成化 CAE 软件开发的 SiPESC 研发工作进展 [J]. *计算机辅助工程*, 2011, 20(2): 39 – 49.
Zhang Hongwu, Chen Biaosong, Li Yunpeng, *et al.* Advancement of design and implementation of SiPESC for development of integrated CAE software systems[J]. *Computer Aided Engineering*, 2011, 20(2): 39 – 49.
- [10] 张盛, 杨东生, 尹进, 等. SiPESC.FEMS 的单元计算模块设计模式 [J]. *计算机辅助工程*, 2011, 20(3): 49 – 54.
Zhang Sheng, Yang Dongsheng, Yin Jin, *et al.* Design pattern of element computation module of SiPESC.FEMS[J]. *Computer Aided Engineering*, 2011, 20(3): 49 – 54.
- [11] Tamma K K, Namburu R R. Computational approaches with applications to non-classical and classical thermomechanical problems[J]. *Applied Mechanics Reviews*, 1997, 50(9): 514 – 551.

第一作者: 周延平, 硕士研究生; 主要研究方向为热力耦合有限元分析; Email: g22103074@163.com.

通信作者: 张盛, 博士, 副教授; Email: zhangs@dlut.edu.cn.

(编辑: 汤明日)