热应力法在钢结构焊接疲劳模拟中的应用

Application of thermal stress method in fatigue simulation of steel structure welding

李斌[1,2] 苗青[3] 胡志明[1] 张如鹏[2]

（1甘肃建筑职业技术学院，甘肃 兰州 730050；2兰州理工大学，甘肃 兰州 730050；
3 78167部队，四川 成都 610000）

摘要：基于ANSYS平台，给出了间接热应力法计算焊接残余应力的计算流程。以V型坡口钢板为例，利用APDL语言编程，获得了焊接温度场及残余应力场的分布规律，计算结果与实测结果比较吻合。对于进一步研究焊接疲劳具有指导意义。

关键词：热应力法；数值模拟；残余应力；疲劳

Abstract: Based on the ANSYS platform, the calculation process of indirect thermal stress method to calculate welding residual stress is given. Taking V-groove steel plate as an example, the distribution rules of welding temperature field and residual stress field are obtained by APDL programming language. The calculated results are in good agreement with the measured results. It is of guiding significance for further study of welding fatigue.

Keywords: thermal stress method; numerical simulation; residual stress; fatigue

中图分类号：TG405　**文献标志码：**B　**文章编号：**1003-8965(2020)01-0092-02

0　前言

焊接是钢结构最主要的连接方式之一。相较于螺栓连接，具有结构简单，强度高、气密性好，生产效率高的优点。但是由于局部不均匀的加热，焊接完成后会产生残余应力。残余应力的存在会影响焊接结构的承载能力和使用寿命，因此分析残余的分布对焊接结构的影响至关重要。测量残余应力的方法主要有机械释放测量法和物理测量方法。虽然通过实验的手段可以准确地测量残余应力，但无疑增加了研究成本。当前得益于计算机技术和有限元方法的快速发展，使焊接过程的数值模拟成为可能。本文基于有限元分析软件ANSYS，通过APDL语言编程，利用间接热应力法，实现了焊接过程中的温度场和应力场的模拟，得到了残余应力的分布状态，模拟结果与测量结果相对比，吻合较好，为焊接疲劳研究打下基础。

1　计算流程

构件在加热和冷却过程中，由于各部分的热传导状况不同，构件的温度场不均匀，致使部分的弹性模量、热膨胀系数等各不相同，从而在构件内部产生的塑性变形也是并不均匀的，此时，保留在焊接结构的热应力即残余应力。间接热应力法模拟计算残余应力时，首先要进行热分析，然后将求得的节点温度作为体载荷施加在结构应力分析中，进行焊接过程中的结构分析，最终得到残余应力的大小和分布。

2　前处理

2.1　几何模型建立

根据实际焊件，建立符合条件的几何模型。可以直接在有限元软件ANSYS中创建模型，或将其他软件创建的模型导入ANSYS中。创建的模型不能影响计算精度。

2.2　单元类型选取

ANSYS单元库提供了众多类型的单元，每个单元根据自身的特点可应用于不同的情况，满足同种情况的两个单元又因为节点数的不同，导致网格划分的形状不同，从而影响计算复杂程度。单元要根据分析问题的物理性质来选择，热应力分析选择的单元应具备三维热传导能力，可用于三维稳态或瞬态热分析，可直接转化为等效结构单元。

2.3　材料属性

焊接过程中金属发生固-液-固的相变，组织发生很大变化，模拟焊接过程必须考虑金属材料的热物理性能(如密度ρ、导热系数k等)随温度的变化情况，否则，计算结果将与真实情况产生一定的偏差。本文给出具有代表性的几个温度下的值，其余温度下的值则由ANSYS按线性插值求得，更高温度下的值由外推法求得。

2.4　网格划分

采用映射网格划分得到的网格具有规则的几何形状，同时有利于载荷的施加和收敛的控制。为了保证计算精度，在焊缝及焊缝附近采用小尺寸的网格，在离焊缝较远的地方采用较大尺寸的网格。

3　温度场计算

3.1　焊接热输入

手工电弧焊常采用平面分布热源，此类热源具有集中、可移动的特点。本文采用高斯分布热源来近似模拟此类热源。数学表达式为：

$$q(\mathrm{r}) = \frac{3Q}{\pi R^2} e^{\frac{3\mathrm{r}^2}{R^2}} \tag{1}$$

基金项目：甘肃省高等学校创新能力提升项目“多轴应力下几何不连续钢构件疲劳寿命预估及损伤机理研究”(2019A-225)；甘肃省职业教育教学改革研究项目“基于‘课证融通’模式的建筑钢结构工程技术专业综合实训教学改革与实践”(2019gszyjy-39)

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

式中：e为自然常数，Q为输入热量，$Q=\eta UI$，U为焊接电压，I为焊接电流，η为效率，R为电弧有效加热半径，r为加热中心到投影点的距离。

3.2 焊缝形成

在实际焊接的过程中，焊料在焊接热源加热下融化，填充到母材之间，冷却至形成焊缝。要真实地模拟这一过程，需要利用ANSYS中的“生死单元”技术。首先，将焊缝区域单元刚度矩阵乘以一个很小的因子，使其载荷、质量、阻尼等类似效果变为零，从而实现“杀死”单元，然后，随着热源的移动，逐步激活之前被“杀死”的单元，使其刚度、质量、单元载荷等恢复到原始数值，激活单元这一过程称为单元的“出生”。单元的“出生”可以模拟焊缝形成的过程。

3.3 求解节点温度

焊接过程中的热平衡方程可表达为：CT+KT=Q。其中，C为热容量矩阵，K为热传导矩阵，Q为节点热流量向量，T为温度值向量，T’为温度对时间的导数。求解每一节点的热平衡方程，计算出每个节点的温度值。将计算得到的各节点温度值保存在热分析结果文件中，以便作为体载荷加在结构应力分析中。

3.4 温度场后处理

温度场后处理就是查询模拟计算结果并对计算结果进行处理，用以判断分析结果是否正确。通过通用后处理模块查看某一时间点焊件温度的分布。

4 应力场计算

进行应力场的计算首先需要重新进入前处理，将热单元转化为相应的结构单元，建立结构分析中材料的力学性能参数库，如弹性模量、泊松比等。然后读入温度场分析中各节点的温度，将节点温度作为结构分析中的体载荷，设置环境参考温度及边界约束条件。接下来求解得到动态应力变化过程及焊接完成后的残余应力。最后后处理查看残余应力的分布状态。

5 算例分析

选用桥梁建造中常用的Q345钢作为焊接母材，钢板尺寸为100mm×50mm×10mm，单边开V形坡口，坡口角度为60°。焊接参数如下：电压240V，电流20A，速度2mm/s，加热半径7mm，加热效率0.7，初始温度23℃。考虑到焊接模拟过程涉及热、结构分析，且过程较复杂，采用APDL语言编写程序进行建模、计算和分析。

为准确描述焊接接头，采用点–线–面–体，自底向上的建模方式。单元选用solid70，solid70为三维八节点实体热单元，具备三维热传导能力，可用于三维稳态或瞬态热分析，同时可应用“生死单元”技术，此外在结构分析时，可转化为相对应的结构单元solid45。利用APDL语句中的mptemp和mpdata命令建立材料随温度变化的参数库。网格划分时，定义网格尺寸，网格尺寸应沿焊缝–热影响区–母材逐步增大。

温度场求解过程中，将整个焊接过程分为若干段，每一段又分为若干个载荷步，通过建立数组表的方式，循环施加每一个载荷步，载荷步之间的时间步长取0.1s。

温度场分析后，结构分析前需要重新进入前处理，用etchg，tts命令将solid70转化为solid45，设定上下边约束条件，将热分析后的节点温度文件*.rth用ldread命令读入，循环导入各时间步温度，完成求解计算。进入后处理查看结果，求解完成后得到残余应力分布状态图，得出最后结果。

参考文献

[1]冯艳辉. 基于ANSYS的焊接梁残余应力分析[D]. 西安：西安建筑科技大学，2008.

[2]张文钺. 焊接冶金学[M]. 北京：机械工业出版社，2004.

[3]蒋小华. 建筑钢结构中典型焊接接头残余应力的数值模拟[D]. 重庆：重庆大学，2016.

[4]陈会丽，钟毅. 残余应力测试方法的研究进展[J]. 云南冶金，2005(03)：52–54.

(上接第94页)

实意义，积极研发智能卫浴产品，可从如下几点着手：

1)智能感应座便器：具体是将红外识别感应器均衡安置于座便器上，保证智能感应座便器具备温水冲洗、暖风烘干、座圈加热等诸多功能，并且也可以联合使用杀菌节水系统。以上设计模式一方面能节约水资源，迎合节能环保的产品现代化设计理念，另一方面还能维持座便器中的清洁度。

2)感应水龙头：即将一个触控显示屏安设在水龙头上部，此时显示屏就能直接显示出水温，为用户调节水温创造便利条件。

3)智能浴缸：智能浴缸中通常安设了多种感应装置，其能对人体智能化感知，并有针对性的为用户提供沐浴模式，还能识别用户的面貌特征，智能化选择沐浴时所需水量。

节水理念持续发展目标的实现是一个循序渐进的过程，相关部门应加强龙头生产质量的监管力度，立足于国情及技术水平，拟定更详实的国家节水标准，针对产品质量与节水质量不符合相关标准的情况，应及时将其淘汰出市场，异常残次品会扰乱市场运行状态，降低消费者对龙头节水功能的好评度。在社会力量的支撑下，提升我国居民的节水意识，引导消费者形成对龙头节水功能的主观需求，进而在该方面产生消费行为，消费者的需求将会驱动生产企业加大节水技术研发资金，助力于具有节水理念龙头的市场发展进程。

4 结语

本文设计的装置可以通过洗脸池向空储水池自动进水，而当储水池满时，可以自动实现停止进水而正常排污，具有较大的推广价值。

参考文献

[1]秦迪，甘吴厅，裴野. 整体卫浴技术在装配式保障性住房中的应用研究[J]. 建材与装饰，2019，17(26)：72–73.

[2]李翠玉，董艳晴. 基于城市独居老人需求的卫浴产品创新设计[J]. 包装工程，2019，40(16)：145–150.

[3]刘蓉蓉. 无障碍适老性室内居住空间设计研究[J]. 设计，2019，32(15)：31–33.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net