

# MSC. Patran 二次开发在预拉伸消减淬火残余应力中的应用

湛利华, 陈 真

(中南大学 机电工程学院, 湖南 长沙 410083)

**摘 要:**以 MSC. Patran 为二次开发平台,以 Marc 为求解器,充分利用 PCL 语言批处理命令的功能,通过制定自定义菜单和图形界面,开发了铝合金厚板残余应力分析软件系统,实现了预拉伸消减残余应力过程的前处理(几何建模-网格划分-边界条件施加及淬火残余应力到预拉伸初始条件的映射-材料属性定义)-分析-后处理等一系列工序的自动化和参数化.结果表明:该系统计算结果准确,误差率最大仅为 8.5%,使用方便,大大提高了分析效率.

**关键词:**MSC. Patran/Marc;二次开发;PCL;铝合金;残余应力

**中图分类号:**TG166.3 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2015.02.004

## 0 引言

热处理是改善材料性能、充分发挥材料潜力的重要手段,铝合金经过热处理可获得很高的力学性能.淬火工艺虽然能够大大提高铝合金厚板的力学性能,但同时不可避免地使板材内部产生较高的残余应力,而预拉伸可以有效消除厚板的残余应力,从而减小工件的变形,其消减机理是通过塑性变形,使厚板内部弹性能得以释放,消耗内能从而降低内部应力.

研究预拉伸消减厚板淬火残余应力规律时,需要考虑厚板尺寸、固溶-淬火温度、界面换热系数、拉伸速率及拉伸量等结构和工艺参数的影响.传统方法是通过重复操作建立多组模型,工作量较大,同时分析结果还会受到工作人员的个人理论水平 and 操作技术的影响,因此效率较低且容易出错.通过 Patran 二次开发制定用户自定义界面,分析人员只需在相应的程序界面进行操作,即可实现整个淬火-预拉伸过程自动化、分析参数化,工作效率得到大幅度提高<sup>[1-6]</sup>.

PCL(Patran Command Language)是一个高级模块化结构编程语言和用户自定义工具,其语法规则类似于 C 语言,是 MSC. Patran 系统不可或缺的组成部分,可用于生成应用程序或特定的用户界面,显示自定义图形、读写 Patran 数据库,建立新的

功能或增强功能<sup>[7]</sup>.同时通过 PCL 的二次开发,其它商品化的自编分析程序可被集成到 Patran 中.一个完整的带有用户界面的 PCL 文件程序结构包含一个类和若干个函数.笔者基于 MSC. Patran 平台,并以 MSC. Marc 为求解器开发的预拉伸消减残余应力分析系统,能够快速准确地实现不同尺寸、不同系列的铝合金厚板残余应力分析.

## 1 设计方法

Patran 在运行时,所有的操作都会记录在会话文件 \*.ses 文件中<sup>[8]</sup>,会话文件中记录的操作可以通过回放的形式重做,删除不必要的语句,同时通过 PCL 语言嵌入变量、定义函数,从而实现某些操作过程的自动化、参数化<sup>[9]</sup>.参数化就是将那些原本固定不变的量(几何尺寸、单元属性、材料属性、边界条件等几乎所有可以由用户在 Patran 界面上输入确定的数值)用可以通过实时输入的参数变量代替,通过定制界面改变这些参数变量的值就可以达到建立新的分析模型的目的<sup>[10]</sup>.同时,还可以通过 PCL 定制具有 Patran 风格的菜单,创建良好的人机互动界面,将开发的程序集成于 Patran 系统中<sup>[11]</sup>,提高用户功能模块的自动化程度,使其更具可操作性.

MSC. Patran 中几乎所有的窗体和控件都由 PCL 语言创建,其函数文件中包括 init() 和 dis-

收稿日期:2014-09-28;修订日期:2014-12-10

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2012CB619504)

通信作者:陈真(1989-),男,硕士研究生,主要从事材料成型及控制方向的研究,E-mail:1820041946@qq.com.

play()两个函数. 还提供了一系列与表格位置与大小有关的参数和用户界面可以直接调用的函数,如<sup>[12]</sup>:

```
ui_menu_create( 创建菜单 );
ui_label_create( 创建一个标签 );
ui_form_create( 创建一个用户界面 );
ui_databox_create( 创建数据输入对话框 );
ui_botton_create( 创建一个按钮 ) 等.
```

在窗体中输入或选择参数后,可以用 ui\_wid\_get\_vstring(),ui\_wid\_get()等函数使相应参数进行传递,并在关联的程序中使用. 为此,笔者开发了预拉伸消减残余应力分析系统,用户可以通过该系统方便地设置模型尺寸和材料参数,查看分析结果.

(1)手动操作实现淬火、预拉伸模型的建立,网格划分,材料属性,加载与约束设置,单元属性、求解条件与参数等<sup>[9]</sup>,该分析系统中需要调用多个不同的变量,而某些变量需在不同函数文件中被调用,需要将其定义为全局变量.

(2)通过 PCL 语言编辑手动操作各步骤过程中生成的会话文件,定义相关变量与操作函数,实现分析过程的自动化与参数化,格式如下<sup>[7]</sup>

```
CLASS menu form / * 类名 * /
CLASSWIDE WIDGET item2, item3 / * 定义类范围 * /
FUNCTION init( ) / * 产生窗体或菜单 * /
    END FUNCTION
FUNCTION display ( ) / * 显示窗体或菜单 * /
    END FUNCTION
FUNCTION callback( ) / * 菜单或窗体按钮的响应函数 * /
    END FUNCTION
END CLASS.
```

(3)定制图形用户界面,Patran 中表示控件大小和间距的标准参数在 appforms. p 文件中定义,在界面函数文件的开始部分使用#include " appforms. p"语句即可链接这些常用函数定义,同时通过 C 预处理程序 p3pclcomp 进行转换,将“\*.pcl”文件转换为“\*.cpp”文件<sup>[12]</sup>. C 预处理程序以如下形式运行:“cpp -I/path\_to/customization source. pcl source. cpp”,编译完成后的“\*.pcl”集中在一起保存在安装目录下配置的 p3 epillog. pcl 文件里. 笔者创建的预拉伸消减残余应力分析系统的图形用户界面如图 1 所示.

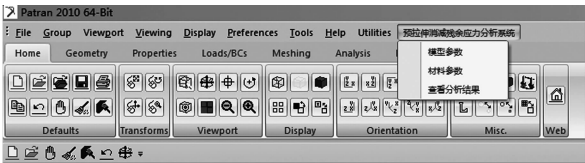


图 1 预拉伸消减残余应力分析软件系统菜单  
Fig.1 Menu of the analysis system

2 应用实例

模拟实际生产情况,建立如图 2 所示 2124 铝合金厚板消减残余应力仿真模型,其中夹钳材料选为钢,拉伸梁为理想情况下不易变形的刚性体,并保持匀速运动向端部拉伸. 尺寸为 900 mm × 200 mm × 20 mm 的 2124 铝合金板进行 20 ℃ 水浴淬火后在 500 MN 预拉伸试验机上进行拉伸,拉伸钳口夹持区为板厚的 1.6 倍<sup>[13]</sup>,刚体与夹钳之间摩擦系数为 0.2,夹钳与厚板间摩擦系数为 0.8<sup>[14]</sup>. 铝合金板所采用的拉伸量为 1.0%,拉伸实验机的拉伸速度为 0.5 mm/s<sup>[13]</sup>,此时,铝合金厚板的残余应力不仅得到了有效的削减而且符合塑性变形理论以及航空铝业的规定.

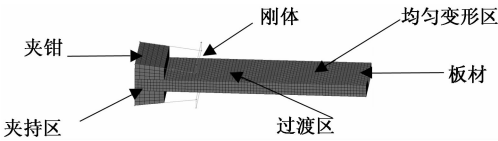


图 2 预拉伸有限元模型  
Fig.2 The finite element model of pre-stretching

2.1 模型参数设置

建立尺寸为 900 mm × 200 mm × 20 mm 的铝合金板材模型,并分别设置网格数为 40,15,20,分别可以得到淬火温度场模型、应力场模型以及预拉伸模型. 淬火残余应力场的结果作为预拉伸的初始条件导入模型中,其中应力模型和预拉伸模型对应的板材节点号不变.

2.2 材料参数设置

在“材料参数”中设置各参数,换热系数为 14  $\text{W}/(\text{s}^3 \cdot \text{℃})$ ,热膨胀系数  $3.0 \times 10^{-5} \text{℃}^{-1}$ ,初始温度为 475 ℃,拉伸率 1.0%,进行分析计算,得到三组模型的分析结果.

在该分析系统中需要依次分析淬火温度场、淬火应力场和预拉伸三组模型,其结果文件需相互调用,系统按先后顺序进行分析,即前模型分析结束再开始下一个模型的分析. 语句“analysis \_submit\_2( "MSC. Marc", " \* \* \* \_job1" )”能实现提交分析功能<sup>[10]</sup>,而使用语句 analysis \_submit

("MSC. Marc", " \* \* \* \_job1", true), 在分析未结束的情况下, MSC. Patran 会处于忙碌状态, 无法进行下一个分析, 即可避免操作上的错误。

2.3 分析结果查看

在“预拉伸消减残余应力分析系统”中的“查看分析结果”, 可查看淬火和预拉伸在轧向和横向的残余应力结果. 当需要研究不同拉伸量对残余应力消减规律影响时, 只需要删除 MSC. Patran 的工作目录下预拉伸应力场的相关文件, 重新建立预拉伸模型, 设置新的拉伸率, 得到另一组拉伸率下厚板内的残余应力。

图 3 是厚板淬火残余应力和预拉伸残余应力的仿真比较曲线, 分析可以看出, 拉伸量为 1.0% 时, 残余压应力从 135 MPa 消减到 55 MPa, 拉应力从 79.3 MPa 消减到 24 MPa, 消减率最高近 70%. 不难看出拉伸后残余应力分布均匀性变好, 残余应力消减效果显著。

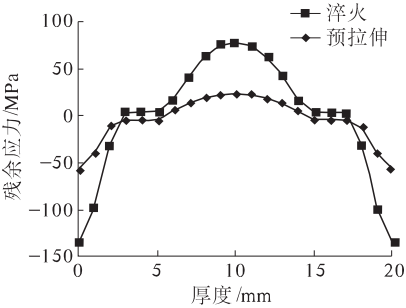


图 3 残余应力比较曲线  
Fig.3 Curves of residual stress

3 实验验证

为验证本分析系统的准确性, 笔者采用 2124 板材做试样进行实验, 利用空气自然对流式电阻解热炉, 满负荷功率为 30 kW, 在炉中将板材加热至 475 ℃, 并保温 2 h 至样板加热均匀, 将厚板迅速平稳转移到温度为 20 ℃ 的淬火槽中, 进行水浴淬火, 并确保转移时间尽量短, 以降低时效, 强化效果. 淬火结束后采用中南大学 500 MN 卧式拉伸机, 进行 1% 拉伸量的预拉伸消减残余应力实验, 该设备便于拉伸时铝材试样的安装, 拉伸时动梁工作行程速度为 0.5 ~ 1.0 mm/s, 动梁返回行程速度为 15 mm/s, 拉伸速度可以连续调节. 测量残余应力实验设备采用的是能准确测量样板表层残余应力的 ixRD 型便携式 X 射线高速残余应力测试分析仪。

比较仿真与实验测得的淬火后轧制方向和横向残余应力, 以及预拉伸后轧制方向和横向残余

应力曲线如图 4 所示。  
根据残余应力曲线, 对铝合金板材的轧向、横向淬火残余应力以及预拉伸残余应力的实验与仿真后的拉、压应力峰值消减率进行对比分析, 得到的结果如表 1 所示。  
结果表明仿真和实验之间的消减率误差最大仅为 8.5%, 验证了本分析系统的准确性。

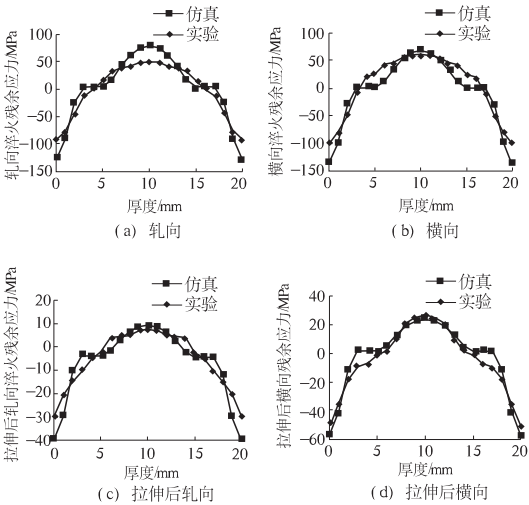


图 4 残余应力比较曲线  
Fig.4 Curves of residual stress

表 1 仿真结果与实验结果比较  
Tab.1 Comparison of analysis results

	轧向消减率/%	横向消减率/%
仿真压应力峰值	69.50	58.80
实验压应力峰值	67.10	55.00
误差	2.40	3.80
仿真拉应力峰值	88.60	70.20
实验拉应力峰值	80.10	78.50
误差	8.50	8.30

4 结论

- (1) 以 MSC. Patran 为二次开发平台, 以 Marc 为求解器, 利用 PCL 语言开发了铝合金厚板残余应力分析系统软件, 该分析系统能够实现厚板预拉伸消减淬火残余应力的建模、材料属性定义以及网格划分的参数化和分析过程自动化等功能。
- (2) 系统能迅速准确实现厚板预拉伸消减淬火残余应力模拟, 减少了大量重复工作, 提高了工作效率, 体现了分析系统的优势与实用性。
- (3) 本分析系统工作界面集成于 Patran2010, 风格与 Patran 完全相同, 且本分析系统易于操作和掌握, 具有较大的实用价值和发展潜力。

## 参考文献:

- [1] 龙凯,贾长治,李宝峰. Patran 2010 与 Nastran 2010 有限元分析从入门到精通[M]. 北京:机械工业出版社, 2008:1.
- [2] 刘兵山,黄聪. Patran 从入门到精通[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2003.
- [3] 马爱军,周传月,王旭. Patran 和 Nastran 有限元分析专业教程[M]. 北京:清华大学出版社, 2005.
- [4] MSC Software. Patran PCL reference Manual [M]. MSC. 2010.
- [5] MSC Software. Patran PCL Reference Manual Code Examples [M]. MSC. 2010.
- [6] MSC Software. PCL and Customization for MSC. Patran [M]. MSC. 2010.
- [7] 张军彦,李昌华,李晓辉. 基于 MSC. Patran 界面的 PCL 二次开发[J]. 现代电子技术, 2010, 16(1):17-22.
- [8] 钟志宏. 基于 Patran 的泵车臂架多姿态自动分析模块的开发及应用[D]. 长沙:中南大学机电工程学院, 2012.
- [9] 吴运新,钟志宏,滑广军. 基于 MSC. Patran/Nastran 的泵车臂架分析系统的研究[J]. 郑州大学学报:工学版. 2010,31(6):86-89.
- [10] 陈博,陈秀华,汪海. MSC. Patran 二次开发及其集成开发环境[J]. 机械设计与制造, 2009,7(7):71-73.
- [11] 黄海,陶骞,柯文. 基于 MSC/Patran 的结构优化系统前后置开发与应用[J]. 北京航空航天大学学报, 1999,25(6):23-26.
- [12] 唐友宏,陈宾康. 用 MSC. Patran 的 PCL 二次开发用户界面[J]. 船海工程, 2002,14(3):22-24.
- [13] 张园园. 铝合金厚板淬火过程与预拉伸热-力仿真与实验研究[D]. 长沙:中南大学机电工程学院, 2008.
- [14] 张园园,吴运新,李丽敏,等. 铝合金预拉伸板淬火后残余应力的有限元模拟[J]. 材料热处理技术, 2008,7(14):93-96.
- [15] 王树宏,马康民,马俊. 预拉伸铝合金板 7075T7351 内部残余应力分布测试[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2004,23(2):24-26.
- [16] 赵丽丽,张以都. 基于轧制应力分布的铝合金厚板淬火应力仿真[J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(1):93-96.

## Application Of PCL Based on The MSC. Patran in residual Stress Reducing by Pre-stretching

ZHAN Li-hua, CHEN Zhen

(School of Mechanical and Electronic Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** Pre-treatment (geometric modeling-grid-boundary conditions-material attribute definition)-analysis-post-processing are needed when the different plate sizes, solid solution, quenching temperature, thermal conductivity, stretching rate and other parameters are taken into consideration on the residual stress analysis. The mathematical model is set up for each set of parameters for analysis, repeating operation, the analysis efficiency is low. Based on MSC. Patran for secondary development platform, were based on Marc solver, make full use of the powerful features of the Patran command language, by making the custom menus and graphical interface, can submit automatically parameterized modeling, analysis, and read the result of analysis. The aluminum alloy thick plate residual stress analysis software system is developed. The results show that the system calculation results are accurate, convenient and practical, and the efficiency is improved greatly. The error limit is 8.5%.

**Key words:** MSC. Patran Marc; secondary development; PCL; aluminum alloy; residual stress