

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.07.008

基于 Visual C++ 交互仿真软件的重轨淬火应力场数值模拟分析*

李欣灿

(武汉科技大学 汽车与交通工程学院, 湖北 武汉 430081)

摘要:针对重轨淬火工艺难以制定的问题,对重轨淬火的应力场及其有限元模型的建立进行了分析,并基于 Visual C++ 开发了针对重轨淬火应力场分析的仿真软件。在实际应用中,只需要在该仿真软件上输入相应的参数,包括重轨淬火的材料热物性、工况条件等,该仿真软件就会在后台自动调用有限元软件对重轨淬火过程进行有限元数值模拟,获得其应力场分布,通过对比分析得到最佳加热时间,并制定出较优的重轨淬火工艺。仿真后,通过对比 3 种工况的分析结果表明:加温时间设置为 40 s,保温时间设置为 25 s,淬冷时间设置为 35 s 是较优的重轨淬火工艺路线,为不了解有限元软件甚至没有使用过有限元软件的重轨淬火工作人员对重轨淬火工艺进行分析时提供了方便,对实际生产具有重要意义。

关键词:重轨淬火;有限元法;应力场;数值模拟

中图分类号:TH114;TG15

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2014)07-0854-07

Numerical simulation study on stress field of heavy rail quenching based on Visual C++

LI Xin-can

(School of Automobile and Traffic Engineering, Wuhan University
of Science and Technology, WuHan 430081, China)

Abstract: Aiming at problem of the quenching process is difficult to formulate for the heavy rail, the stress field and the establishment of the finite element model of the heavy rail quenching were analyzed, and based on the Visual C++, the simulation software that analysis the heavy rail quenching stress field was development. In practical application, only need to input the corresponding parameters in the simulation software, including rail quenching thermal properties of materials, conditions, the software would automatically call the finite element software to simulate the quenching process in the background, then obtained the stress field distribution, through comparative the result of analysis to get the best time of heating, and then developed better quenching process. After simulation, by compared the three kinds of conditions, the results indicate that: when the heating time is set to 40 s, the holding time is set to 25 s and the quenching time is set to 35 s, which is the better quenching process. Provided the convenience for the quenching staff who do not understand the finite element software even didn't use the finite element software to carry on the analysis for the heavy rail the quenching process, and there is an important significance for the industrial production.

Key words: rail quenching; finite element method; stress field; numerical simulation

收稿日期:2013-12-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51105283);武汉科技大学绿色制造和节能减排科技研究中心基金资助项目(B1004)

作者简介:李欣灿(1962-),男,江西萍乡人,讲师,主要从事专用汽车设计方面的研究. E-mail:386691872@qq.com

0 引言

随着我国铁路运输朝着重载化、高速化和舒适化的方向发展,必然对铁路运输的安全性提出新的挑战。而铁路运输的安全保障主要取决于轨道系统,特别是高速铁路。铁路运输的高速化和重载化大大提高了铁路重轨的负荷,加快了重轨的损伤速度,必然对重轨的质量提出更为苛刻的要求。重轨轨端热处理作为提高重轨性能的最后手段而得到普遍的重视,而感应淬火是重轨全长淬火中最受欢迎的热处理方法。重轨淬火热处理的实质就是通过对淬火重轨的温度场、组织转变和应力场进行适度调整,使重轨获得所需的组织、性能和较小的残余应力及残余应变^[1]。淬火工艺选择不当不仅影响重轨的组织性能,而且会影响重轨的使用寿命。生产实践表明,淬火过程是热处理工艺中返修率最高和废品率最高的工序,是热处理质量控制中最难掌握的环节。随着对工艺和精度要求的不断提高,对重轨感应淬火进行数值模拟就显得更加重要。以通用而著称的商业有限元软件可对很多工程实际问题进行数值模拟,当然也包括重轨淬火。尽管所选用的有限元软件具备强大的功能,但因为有限元件模拟时其模拟对象、模拟类型、模拟参数甚多且赋值复杂,输出的数据有较多的格式,要达到熟练应用水平对操作者的要求甚高,不仅要掌握相关的专业理论知识,而且还要能建立正确的简化模型,此外还要反复操练有限元软件。

为了让没掌握有限元基本理论的技术人员容易地应用有限元软件来制定重轨淬火工艺,本研究编制一个专用的重轨淬火有限元分析的仿真界面,该仿真界面友好交互,只需要在人机界面上输入相应的参数,包括重轨淬火的加热、保温、冷却时间等,当计算完成后,用户可以点击相应的按钮直接查看所得到的模拟结果。不了解有限元软件甚至没有使用过有限元软件的重轨淬火工作人员都能容易地运用该仿真界面对重轨淬火工艺进行分析制定。

1 淬火应力场的计算方法

淬火时工件不承受外界载荷,在该过程中存在温度的升高和降低,因为工件外层与内部区域之间在温度变化速率不一致,存在一定的温差,从而导致工件的外层与内部区域的膨胀和收缩不相同,此时就会产生热应力。所产生的热应力会对淬火工件的质量产生很大的影响,会引起工件变形,甚至会导致工件开裂而报

废。在本研究中,对工件不施加外界载荷来进行淬火应力场的数值模拟,进而制定出较优的重轨淬火工艺路线^[2]。

在工件的升温 and 降温过程中,由于温度的变化,会导致工件发生膨胀或者收缩。热处理时主要是对轨头进行感应淬火,其几何形状如同一根圆棒,故本研究取一根直径为 d , 长度为 l 的金属棒材,如果温度从 t_0 升高到 t_1 , 那么在长度和径向的方向上都会产生体积发生变化,则相应的体积变化量可以表达为: $\Delta l = a_l(t_1 - t_0)l$, $\Delta d = a_d(t_1 - t_0)d$, 此时在该棒的长度和径向的方向上所产生的应变可以表示为:

$$\begin{cases} \varepsilon_l = \frac{\Delta l}{l} = a_l(t_1 - t_0) \\ \varepsilon_d = \frac{\Delta d}{d} = a_d(t_1 - t_0) \end{cases} \quad (1)$$

式中: a_l, a_d —在该棒的轴向和径向方向上的线膨胀系数。

为使计算简单,令材料是理想的各向同性材质,那么 $a_l = a_d = a$ 。那么温度从 t_0 升高到 t_1 之后,材料在轴向和径向方向上的应变都可表示为:

$$\varepsilon = a(t_1 - t_0) = a\Delta t \quad (2)$$

2 重轨淬火有限元模型的建立

2.1 相关影响因素的分析与处理

2.1.1 工件移动的影响及处理

重轨是以移动方式进行感应加热的,然而考虑到所选用的有限元软件不具备进行运动分析的能力,因此,在进行建模的时候就要对其进行适当简化处理。在整个感应升温过程中,重轨以一定的速度步进式穿过感应加热线圈,重轨相对于线圈是运动的。简化处理如下:

(1) 钢轨还没进入线圈之前,线圈磁场对钢轨端部的预加热可以忽略不计,即可假设钢轨进入线圈后加热才开始;

(2) 温度沿重轨长度方向的传热可以忽略不计,即认为集肤层中才有热量产生,传热只在横断面内发生。

2.1.2 辐射及自然对流的影响与处理方法

在重轨感应加热过程中,热辐射与自然对流现象一直存在着,只是程度不同而已。由于热辐射与自然对流会使热能产生损失,感生热量不能全部用于加热重轨,从而重轨的加热温度比理想条件下低一些。因此,研究人员在分析温度场时一定要把热辐射与自然对流对加热的影响考虑进去。重轨的加热模型根据下列瞬时热传导控制方程描述。

$$[c(T)]\rho \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla(-[k(T)]\nabla T) = Q \quad (3)$$

式中: $[c(T)]$ —比热容,不是恒值,与温度有关; T —温度向量; ρ —质量密度; $[k(T)]$ —热传导系数,不是恒值,与温度有关; Q —热源的体积能量密度,可以根据下式得到:

$$Q = \sigma \omega^2 A^2 \quad (4)$$

重轨表面的边界状态是热对流与辐射,按下式表示为:

$$[k(T)] \frac{\partial T}{\partial n} = -h(T - T_a) - c_s \varepsilon (T^4 - T_a^4) \quad (5)$$

式中: T_a —周围温度; h —对流传热系数; ε —辐射系数; c_s —斯蒂芬-波尔兹曼系数; n —重轨表面的外法向。

由于重轨淬火整个过程不仅仅包含感应加热,还有后续的保温和强制对流冷却,综合考虑后,对热辐射及自然对流的模拟可以选用的方法是:将加热重轨与周围环境自然对流和辐射等效为总的辐射系数系数 ε_s ,利用表面效应单元(SURF151)来模拟等效辐射,总的热损失可描述为:

$$q = c_s \varepsilon (T^4 - T_a^4) \quad (6)$$

式中: T_a —周围温度; T —重轨温度。

2.1.3 模拟中材料性质非线性处理方法

在整个热处理过程中,材料的热物性参数呈现出非线性变化,即比热容 C 、导热系数 k 、电阻率 ρ 及磁导率 μ 等热物性参数均受温度较大的影响,所以为了使数值模拟更接近于实际情况,就得持续地对材料的热物性参数进行更新。有限元软件能很好地将该非线性问题解决。在有限元软件中,与温度呈非线性函数关系的热物性参数就是采用列表定义的方法来表示的。通过定义有限个离散温度点处对应的材料热物性,在模拟计算过程中,对于非离散点处温度值所对应的热物性参数,有限元软件会自动地进行插值来获得该参数值。

2.1.4 耦合方法

对于一个实际的工程问题,既不是简单的单学科问题,也不是多学科简单罗列,而是涉及到多学科相互交叉,相互作用。由上述的重轨淬火过程分析可知,重轨淬火就是一个多学科交叉问题,涉及到电磁生热和淬冷等,其变化过程复杂,它的数值模拟必然会涉及到多物理场耦合,即电磁-热-结构耦合。由于在达到平衡状态过程中不需要同时满足多个物理场的收敛准则,相应产生的方程矩阵规模较小,则其计算量较小,计算过程比较简单,更容易收敛。因为重轨的温度场分布决定了应力场的分布,反过来,其应力场分布对材料的热物性和温度场分布的影响可以忽略不计,本

研究在重轨淬火过程中选择间接法顺序耦合求解方法来进行相应的温度-热应力耦合求解,先进行瞬时热分析,得到温度场,然后完成结构应力分析。

2.2 实际过程的阐述与简化

淬火是将钢加热到 A_{c3} 以上 $30^\circ\text{C} \sim 50^\circ\text{C}$,保温后在淬火介质中快速冷却,以获得珠光体组织的热处理工艺。重轨淬火分为 4 个阶段:感应加热、保温、淬火冷却、空冷至室温。为使重轨钢充分奥氏体化并得到较细的奥氏体组织,加热和保温时间分别设置为 40 s 和 25 s,温度为 $800^\circ\text{C} \sim 840^\circ\text{C}$ 。然后用 5°C 的压缩空气强制冷却 35 s,使用气体冷却可以保证冷却的整个过程中冷却速度一致,得到细化的珠光体组织,最后自然冷却至室温。

从科学的角度看,解决工程问题所希望的目标就是在获得恰当的结果的基础上,要能求解方便、提高计算效率,经常需要在两者之间进行平衡以获得最优结果。本研究以重轨淬火过程作为研究对象,认为重轨材料性质理想。对实际的三维问题进行降维,简化为二维问题^[3]。此外,由于重轨端部还有磁力线的逸散而引起边缘效应,要对重轨周围的空气进行建模,也就是几何模型包括重轨、感应加热器和周围的空气。如果只研究除加热开始与结束以外的稳定生产部分,那么端部的磁逸散影响就能忽略不计了。此时几何模型能转化为一维的计算模型,该模型如图 1 所示。计算量显著减少,很容易收敛。

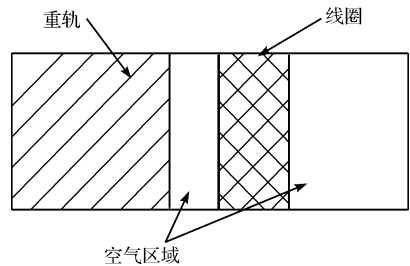


图 1 感应加热一维计算模型

2.2 重轨的热物性

在重轨淬火数值模拟过程中,材料的热物性是随温度的变化而变化的^[4]。根据材料手册可得重轨的热物性参数,轨端材料参数表如表 1 所示。

2.3 重轨二维模型的建立

按照本研究所述的,选取重轨截面进行模拟,这样就能有效地降低单元的数量,计算容易达到平衡状态而收敛,加快模拟速度。出于对漏磁影响的考虑,需要对重轨周围的空气进行简化建模。简化后的重轨感应加热模型^[5]如图 2 所示。

表 1 轨端材料参数表

温度/℃	25	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1 000	1 100
相对磁导率	200	194.5	187.6	181	169.8	157.3	140.8	100.36	1	1	1	1
比热容/ $J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$	472	480	498	524	560	615	700	1 000	806	637	602	580
电阻率/ Ω	1.84e-007	2.54e-007	3.39e-007	4.35e-007	5.41e-007	6.56e-007	7.9e-007	9.49e-007	1.08e-006	1.16e-006	1.20e-006	1.23e-006
焓/ $J \cdot m^{-3}$	9.16e+007	3.56e+008	7.531e+008	1.16e+009	1.63e+009	2.12e+009	2.65e+009	3.19e+009	3.72e+009	4.22e+009	4.52e+009	5.14e+009
热导率/ $[W \cdot (m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1})]$	93.23	87.6	83.53	80.44	78.13	76.0	74.16	71.98	68.6	66.49	65.92	64.02

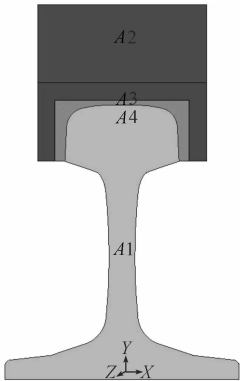


图 2 重轨二维模型

A1 - 重轨,A3 - 线圈,A2 和 A4 - 空气

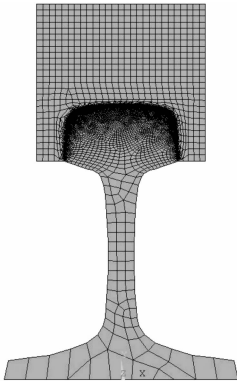


图 3 几何模型的网格划分

2.4 重轨有限元网格划分

根据分析可得,通过选用物理环境法顺序耦合分析来求解电磁-热耦合的问题,通过采用间接法顺序耦合分析来求解热-结构耦合的问题。在进行有限元数值模拟时,网格划分的质量至关重要,能直接决定求解是否收敛,节省计算时间,提高计算结果的精度。电磁感应加热时,重轨中涡流状态表现出显著的集肤效应,常常与电流频率成一定的函数关系,其透入深度的变化范围为远小于 1 毫米或者几毫米。然而,该层产生大约 87% 的热能。加热时轨头最外层最先被加热,为了保证计算正确性和精确度,透入层深度至少划分 3~5 层的单元,在轨头最外层附近划分细密的网格,同时,为了减少计算量,由轨头最外层到轨底,网格密度逐渐降低。因为模拟时对感应线圈所加载的电流为恒定值,本研究对感应线圈所在的几何区域进行映射网格划分得到矩形单元,所得到的规则网格划分能减小计算量同时加快收敛^[6]。几何模型的网格划分如图 3 所示,节点总数为 10 505 个,单元总数为 10 440 个。由于重轨形状极其不规则,在对重轨及其附近区域的空气进行网格划分时本研究采用自由网格划分。同时在轨头最外层区域进行密集的网格划分,然而在远离轨头最外层区域进行稀疏的网格划分方式。由于采用自由网格划分,会自动从密集网格过渡到稀疏网格,不会引起网格畸变。

3 仿真系统的开发过程

3.1 仿真系统的设计思想

在有限元软件中,可以使用 APDL(参数化设计语言)进行有效的数值模拟。虽然 APDL 语言能很容易地进行自动计算(分支、循环、宏等),同时它也是一个有效的参数化建模方式,但是有限元软件中的 GUI 本就具有一定的理论深度和操作难度,更不用说掌握 APDL 语言进行数值模拟是何等不易!为了让没掌握有限元基本理论的技术人员能有效地进行重轨淬火有限元数值模拟,编制具有一个交互友好的人机仿真界面,自动生成由 APDL 语言所组成的 *.mac 文件。选用的有限元软件中有 batch 方式进行求解,使用该方式能使 *.mac 文件进行后台调用。所开发出的应用程序的设计思想为在技术人员和后台运行的有限元软件两者之间建立一座沟通桥梁—前台运行的专用的重轨淬火有限元分析的仿真界面,使用宏来进行数据传递,其过程简化而高效。

VC++ 6.0 所开发出的仿真界面需要解决以下 4 个问题^[7]:①能进行工艺参数的输入;②根据所输入的工艺参数能自动生成 ANSYS 宏文件 *.mac;③让有限元软件后台运行同时把相应的宏文件传递给有限元软件进行 batch 方式求解;④程序要能判别有限元软件的 batch 操作是否结束。

设计过程中,本研究首先在所开发的仿真界面上输入重轨材料的热物性和淬火的工况选择,包括淬冷介质、加热、保温、冷却时间;然后写入 *.mac 文件,同时把用 APDL 编写的命令流也写入 *.mac 文件,完成整个 *.mac 的生成;再让程序调用有限元软件使其后台运行进行计算;最后能直接的查看结果。进行二次开发就是把工艺参数设置为输入参数,利用文件写操作把所输入的参数写入到 *.mac 文件中,然后后台运行有限元软件完成整个模拟^[8-9]。

3.2 仿真系统的实现

显而易见,在完成整个仿真界面的运行过程中,最核心的两个难点为宏文件的生成和导入。所谓宏,就是使用参数化设计语言编写命令流,然后保存为相应的文件,其后缀名是 MAC 或者 mac。VC++6.0 以文件写操作的方式来完成封装^[10],生成相应的宏文件。在界面上输入相应的参数,包括材料的热物性、淬冷对流系数、加热、保温、冷却时间,生成整个宏文件,其代码如下:

```
Cstring strPath, text, Buffer;
Cstring MacFile = "SIMULATION. mac";
GetDlgItem( IDC_PATH ) -> GetWindowText( strPath );
Cfile Inputfile;
DWORD n;
CfileException FileExc;
MacFile = strPath + "\\ " + MacFile;
FILE * fp;
if ( ( fp = fopen( MacFile, "w" ) ) == NULL )
{
    AfxMessageBox( "Can't open the mac file" );
    return;
}

fprintf( fp, "/CWD, '%s'\n", strPath ); //指定到当前路径
fprintf( fp, "Finish\n/PREP7\n" );
.....
GetDlgItem( IDC_HEATING ) -> GetWindowText( text );
fprintf( fp, "Time_Heating = %s\n", text );
GetDlgItem( IDC_HOLDING ) -> GetWindowText( text );
fprintf( fp, "Time_Holding = %s\n", text );
GetDlgItem( IDC_COOLING ) -> GetWindowText( text );
fprintf( fp, "Time_Cooling = %s\n", text );
GetDlgItem( IDC_MAC ) -> GetWindowText( text );
if( Inputfile. Open( text, Cfile::modeRead | Cfile::shareDe-
nyNone |
Cfile::modeNoTruncate, &FileExc ) )
{
    n = Inputfile. GetLength( );
```

```
n = Inputfile. Read( Buffer. GetBuffer( n ), n );
fprintf( fp, "%s\n", Buffer );
Buffer. ReleaseBuffer( n );
nputfile. Close( );
}

fprintf( fp, " * copen, flag, txt\n" );
fprintf( fp, " * DIM, flagtmp, array, 1\n" );
fprintf( fp, " flagm = 0\n" );
fprintf( fp, " flagtmp( 1 ) = flagm\n" );
fprintf( fp, " * vwrite, flagtmp( 1 )\n" );
fprintf( fp, " % % I\n" );
fprintf( fp, " flagtmp = \n" );
fprintf( fp, " * cfclose\n" );
fclose( fp );
```

VC++6.0 执行完上述语句后,就生成一个名称为 SIMULATION 宏文件,其后缀名为. mac。

VC++6.0 后台运行有限元软件使其完成有限元分析,核心是解决接口问题。程序调用有限元软件进行有限元分析时使用如下代码:

```
AfxBeginThread( Run_Simulation, this, THREAD_PRIORITY_
_NORMAL );
UNIT Run_Simulation ( )
{
    .....
    SelectCommand = "\\ " + AnsysPath + "\\ " + " - b nolist
- I " +
    MacFile + " - o output. txt";
    WinExec( SelectCommand, SW_HIDE );
    .....
}
```

其中,“- b nolist - I “表示所选用有限元软件的特征代码,MacFile 表示有限元软件将进行计算的宏文件,“\\ “ + AnsysPath + "\\ “表示 ANSYS130. EXE 所在的路径,“- o output. txt”表示有限元软件所生成的 OUT 文件,能用记事本打开,里面详细记录了有限元软件整个模拟过程相关信息。

本研究所开发的仿真系统如图 4 所示。



图 4 所开发的仿真系统

3.3 加热不同时间时的应力场

本研究设置加热时间为 30 s、40 s、50 s，保温时间设置为 25 s，然后用 5 ℃ 的压缩空气强制淬冷 35 s，最后空冷 100 s；模拟重轨淬火工艺路线下

的应力场，除了在“对象选择”中选择“应力场模拟”的 . mac 文件^[10]。最后点击“查看模拟结果”可以查看所得到的模拟结果不同加热时间的应力场如图 5 所示。

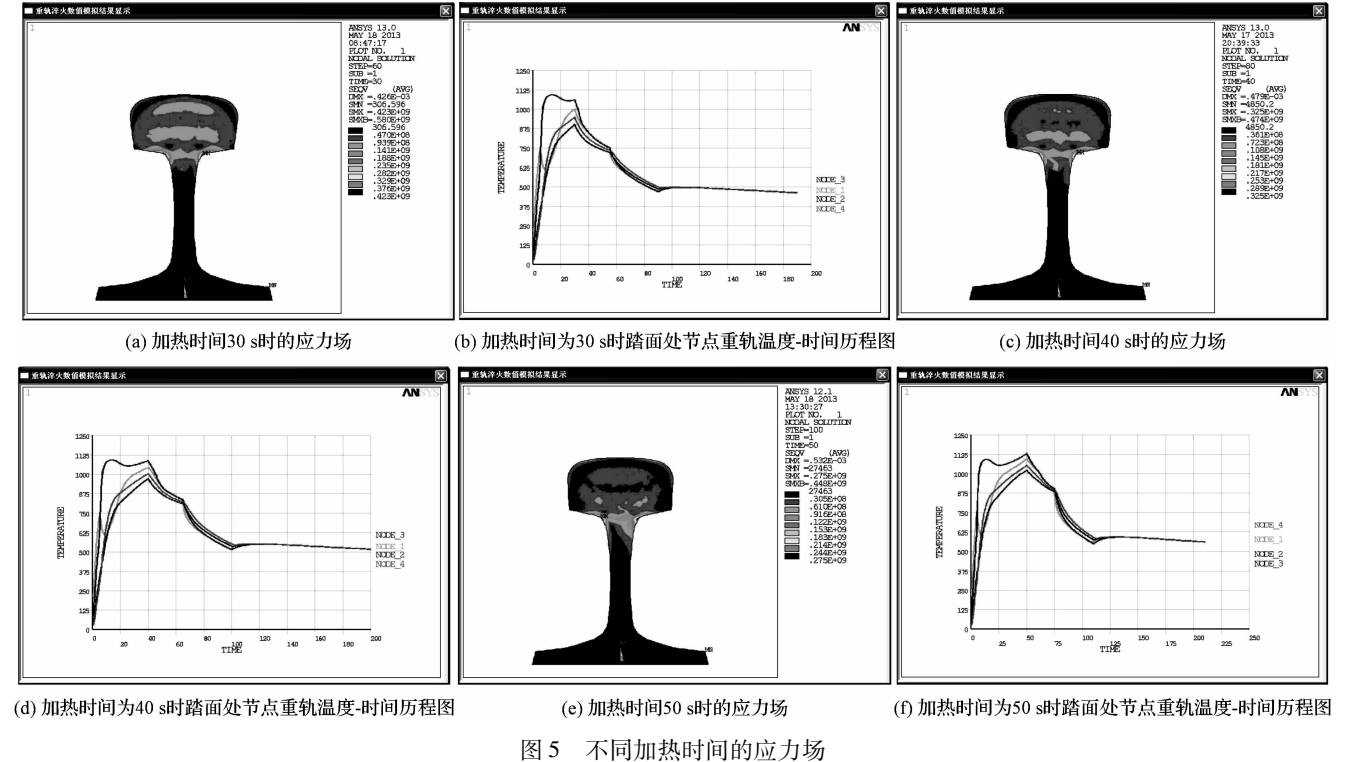


图 5 不同加热时间的应力场

分析图 5，可得以下结论：加热时间越长，保温后的温度就会越高，淬冷时温度越高热应力越大。当加热时间为 30 s 时，淬冷时最大热应力约为 200 MPa；当加热时间为 40 s 时，淬冷时最大热应力约为 230 MPa；当加热时间为 50 s 时，淬冷时最大热应力约为 280 MPa。此时如果热应力过大，容易造成重轨变形、甚至开裂等现象。从热应力最小的角度出发，加热时间为 30 s 最好，但是从图 5(b) 可知，加热时间为 30 s 时保温后重轨最高温度达不到淬冷温度 800 ℃ ~ 840 ℃ 的要求。因此从满足淬火温度、较小热应力和绿色节能的角度来看，加热时间设置为 40 s 是最优的；最后冷却至室温时残留的热应力很小，可以忽略不计；通过应用所开发的友好界面进行对重轨进行有限元分析，从温度场和应力场的质量来看，加热时间设置为 40 s，保温时间设置为 25 s，淬冷时间设置为 35 s，是较优的重轨淬火工艺路线。

4 结束语

本研究首先对重轨淬火有限元模拟的分析过程进行阐述，包括有限元模型的建立、结果的查看、应用有限元软件的 APDL 编写 . mac 文件；然后介绍了程序开发环境，接着阐述了仿真系统开发的设计思想，通过在技术人员和后台运行的有限元软件两者之间建立一座沟通桥梁—前台运行的仿真软件，使用宏来进行数据传递，设计了专用的重轨淬火有限元分析的仿真系统，应用所开发的友好界面进行了实际的运行，选用重轨淬火过程为研究对象，进行了应力场数值模拟。运行前只需输入对应的参数，就能获得重轨加热、保温和淬冷时的应力分布情况，通过对其比较分析，制定出较优工艺路线，也得到重轨淬火过程中重要的结论，对于实际生产具有重要的参考指导意义。

(下转第 869 页)

本文引用格式：

李欣灿. 基于 Visual C++ 交互仿真软件的重轨淬火应力场数值模拟分析[J]. 机电工程, 2014, 31(7): 854-859, 869.
LI Xin-can. Numerical simulation study on stress field of heavy rail quenching based on Visual C++ [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014, 31(7): 854-859, 869.
《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

较小的范围内时,随着电流强度的增加条码表面粗糙度显著增大,当扫描速度过大时,电流强度对条码表面粗糙度的影响较小;

(2)随着扫描速度的增加,条码表面粗糙度逐渐减小,当扫描速度超过某一范围后加工效果不明显,条码表面粗糙度保持一较低值。所以,为提高直接标刻条码的表面粗糙度,应尽量使用大的电流强度和小的扫描速度;

(3)激光标记 DM 条码的表面粗糙度与条码质量等级存在一定的对应关系,表面粗糙度越大的 DM 条码,加工区域颜色越深对应的条码质量等级越高。

(4)激光在铝合金表面直接标记 DM 条码加工质量同时受到电流强度和扫描速度的影响,很难根据单变量实验的结果得到激光标刻最佳质量的 DM 条码的最优工艺参数,接下来将对激光直接标记最佳质量 DM 条码的加工参数优化进行研究。

参考文献 (References):

- [1] JANGSOMBATSIRI W, PORTER J D. Laser direct-pare marking of data matrix symbols on carbon steel substrates [J]. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, 2007, 129(3): 583-591.
- [2] LAZOY L, ANGELOV N. Influence of some technological

parameters on the contrast of laser marking on the fly[J]. **Laser Physics**, 2012, 22(11): 1755-1758.

- [3] LEONE C, GENNA S, CAPRINO G, et al. AISI 304 stainless steel marking by a Q-switched diode pumped Nd:YAG Laser[J]. **Journal of Materials Processing Technology**, 2010, 210(10): 1297-1303.
- [4] 邱化冬,路长厚,肖如镜. 激光参量对铝合金直接标刻条码的影响[J]. **中国激光**, 2011, 38(8): 1-5.
- [5] 赖忠喜,占红武. 基于 Reed-Solomon 码的 Data Matrix 条码纠错研究[J]. **机电工程**, 2009, 26(8): 62-65.
- [6] ISO/IEC JICI ISO/IEC 16022:2000. Information technology International symbology specification-Data matrix[S]. ISO/IEC JTC1, 2004.
- [7] 解志锋,张维,雷蕾,等. 零件表面激光直接标刻二维条码的工艺参数优化研究[J]. **中国机械工程**, 2011, 22(5): 592-596.
- [8] 王建平,李正佳. 激光打标系统及工艺参数的分析[J]. **光学与光电技术**, 2005, 3(3): 32-35.
- [9] MAINI A. Lasers and Optoelectronics: Fundamentals, Devices and applications[M]. New York, USA: Wiley, 2013.
- [10] CHANG Ming, ZHANG Qing-mao, LIAO Jian-hong. Processing parameters optimization of pulsed Nd:YAG laser cladding repairing plastic moulds[J]. **HIGH POWER LASER AND PARTICLE BEAMS**, 2006, 18(9): 1443-1446.

[编辑:洪炜娜]

本文引用格式:

武玉松,李建美,路长厚,等. 激光参数对铝合金表面标刻条码质量的影响研究[J]. **机电工程**, 2014, 31(7): 865-869.

WU Yu-song, Li Jian-mei, LU Chang-hou, et al. Influence of laser parameters on quality of laser direct marked data matrix symbols on aluminum alloy[J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2014, 31(7): 865-869.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第 859 页)

参考文献 (References):

- [1] 杨金堂,龙华,李公法,等. 重轨淬火过程中的温度场模拟[J]. **热加工工艺**, 2008, 37(22): 82-86.
- [2] 杨金堂,龙华,李公法,等. 基于有限元重型重轨温度场研究[J]. **机械设计与制造**, 2009(4): 56-61.
- [3] 苏兴武,顾敏. 淬火冷却过程数值模拟的研究现状及展望[J]. **金属热处理**, 2008, 33(6): 1-7.
- [4] 王勖成,邵敏. 有限单元法基本原理和数值分析[M]. 第2版. 北京:清华大学出版社, 1997.
- [5] 宋树权. 松弛热定型机腔内三维流场及温度场数值模拟研究[J]. **机械设计与制造**, 2011(8): 93-95.
- [6] KRULINSKI D J, WINGO S, SHEPHERD G. Programming Visual C++ 6.0 技术内幕[M]. 第5版. 北京:北京希望

电子出版社, 2001.

- [7] DU Guo-jun, WANG Jian. FEM simulation about residual stress field of carburize quencher part[J]. **Materials Science & Technology**, 2011, 19(2): 10-14.
- [8] LI Ya-xin, LIU Ya-zheng, ZHOU Le-yu, et al. Numerical simulation of residual stress field in an oil casing during quenching process[J]. **Journal of University of Science and Technology Beijing**, 2010, 32(11): 1440-1446.
- [9] 锥设计,王荣,黄立龙,等. 亚温淬火对钻杆钢组织和性能的影响[J]. **机械工程材料**, 2013, 37(6): 35-40.
- [10] 周辉,周宁. 基于 VC++ 和 Matlab 的汽车 ABS 制动性能分析[J]. **轻型汽车技术**, 2013(9): 11-14.

[编辑:洪炜娜]