



基于ProCAST和ANSYS软件分析径向加载的 铝合金轮毂应力分布

苏大为, 赵玉涛

(江苏大学材料科学与工程学院, 江苏镇江 212013)

摘要: 利用ProCAST软件对某铝合金轮毂产品进行低压铸造数值模拟, 运算后得到了轮毂铸件的铸造残余应力, 通过开发的接口程序分别把轮毂铸件的有限元网格的节点信息、单元信息和各节点上的六个应力分量输入到ANSYS软件中, 利用ANSYS的结构分析模块对轮毂铸件进行静态加载。通过这个方法, 可以对含有铸造残余应力的轮毂铸件进行其他各种载荷分析, 分析的结果更加符合铸件的实际情况, 获得准确的结果, 指导实际工作。

关键词: 数值模拟; ProCAST软件; 铸造残余应力; 接口程序; ANSYS软件

中图分类号: TG146.2¹; TG21¹³ **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2007) 12-1288-04

Residual Stress Analysis of Radial Loading Aluminium Alloy Wheel Hub Based on ProCAST and ANSYS Software

SU Da-wei, ZHAO Yu-tao

(School of Material Science and Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu, China)

Abstract: The low pressure die casting process of a certain aluminum alloy wheel hubs was simulated by using the software ProCAST. The residual stress of the casting was gained after calculation and data exchange program was compiled. Through the Interface program, node and unit elements and the six components of the stress tensor at the node files were transmitted into the ANSYS software, then applying static loading to the wheel hub by using the structure module of ANSYS. By using this mode, variable loading analysis can be conducted on the wheel with residual stress, and the results are more accurate and accord with practice, therefore can give direction to actual production.

Key words: numerical simulation; ProCAST software; casting residual stress; interface program; ANSYS software

随着汽车工业的不断发展, 汽车制造商对车轮的要求越来越高。作为整车行驶部分的主要承载件——车轮, 是左右整车性能最重要的安全部件。车轮从制造出来本身就存在着残余应力, 其大小取决于制造方法和消除应力的手段, 也受着车轮形状和结构本身的影响。当车轮被安装到车上后, 车轮便承受着整车垂直方向的自重力。其中轮辋部分是通过轮胎的充气压力传递而来的, 轮辐部分的力是通过轮毂传递来的车辆自重力, 这些力都属于静态应力。同时还经受车辆行驶中来自各个方向因起动、制动、转弯、石块冲击、路面凹凸不平等各种动态载荷所产生的不规则应力的考验^[1]。随着国内外计算机技术的飞速发展, 汽车轮毂的设计和大量采用数值模拟技术, 进行生产工艺设计和结构优化设计^[2]: 通常是利用专业的铸造模拟软

件对轮毂的铸造工艺进行数值模拟^[3-4], 通过反复模拟计算得到最佳的生产工艺, 再投入实际生产; 通过结构分析软件对轮毂的结构进行优化设计, 得到最佳的设计方案^[5-8]。但是, 结构分析中并没有把铸造残余应力考虑进来, 这样的模拟考虑因素不完全, 结果不精确。本文利用铸造模拟软件ProCAST对新开发的轮毂产品进行铸造模拟, 计算后得到铸件的残余应力, 通过开发的接口程序把铸件的残余应力作为初始载荷导入有限元分析软件ANSYS中, 再对轮毂进行静态加载, 分析比较了考虑残余应力后轮毂的加载应力分布情况, 验证了由于残余应力和车辆重力的方向并非都一致, 受力情况应该是两种力的叠加, 这种叠加可能是“相加”, 也有可能是“相减”的关系, 从而模拟分析了车轮在安装后形成的“初始动态应力”。

基金项目: 江苏省科技成果转化项目 (BA2005054), 教育部重点基金项目 (00170), 江苏省高技术研究项目 (BG2005026)。

收稿日期: 2007-06-11收到初稿, 2007-07-19收到修订稿。

作者简介: 苏大为 (1983-), 男, 吉林蛟河市人, 硕士生, 研究方向为铸造工艺计算机辅助设计及模拟的应用。E-mail: sudawei001@sina.com

通讯作者: 赵玉涛教授, 电话: 0511-8791947; E-mail: zhaoyt@ujs.edu.cn

1 ProCAST分析轮毂铸造应力

1.1 轮毂低压铸造的应力数值计算

金属的凝固过程经过液态、固/液两相共存和固态三个阶段，材料的热物理性能和力学性能变化都很大，而且同一时刻可能存在三个区域共存的现象，因此凝固模拟涉及的应力—应变本构关系非常复杂。由于固/液两相共存区和固相区的力学行为差别很大，因此应力场的数值模拟分为固/液两相区的模拟和凝固以后阶段的模拟两部分^[9]。本文应力模拟计算采用热弹塑性模型，热弹塑性模型不直接计入粘性效应，认为材料屈服前为弹性，屈服后则为塑性，弹性模量与屈服应力是温度的函数，且当材料接近熔点时，弹性模量与屈服应力均为0。在热弹塑性模型中总应变包括弹性应变、塑性应变和热应变，表示为：

$$\{d\xi\}=\{d\xi_e\}+\{d\xi_p\}+\{d\xi_T\}$$

(1)

表2 轮毂铸件材料A356的热力学参数

Table 2 Thermodynamics parameters of the wheel casting material A356

温度/℃	20	200	300	400	500	550	554	616
弹性模量/GPa	71.705	69.636	63.776	57.226	36.542	18.948	14.340	14.340
热膨胀数($\times 10^{-6}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$)	11.3	11.9	12.2	12.65	12.78	12.93	12.93	12.98
屈服应力/MPa	186.16	172.37	116.52	54.47	31.026	—	9.31	1.86

模具材料为Steel-H13，模具之间的传热系数是 $h=500\text{ W/m}^2\text{K}$ ，模具与铸件之间传热系数为 $h=1\,280\text{ W/m}^2\text{K}$ 。

1.3 初始条件的确定

铸件浇注温度为 $705\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，模具上模的初始温度为 $360\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，侧模为 $360\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，下模为 $430\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。充型过程加压参数见表3。

表3 充型过程加压参数

Table 3 Press parameter of filling process

时间/s	0	9	23	30	240	240.001
压力/MPa	0.1	0.121	0.13	0.17	0.17	0.1

ProCAST软件是在高斯点上进行应力计算的，然后内插值到节点上，经过1 490时间步的计算后，得到了最后一步的应力结果，如图1所示。

表4 ProCAST建立的网格单元和ANSYS的Solid185单元的对比

Table 4 Comparison between ANSYS Solid185 and ProCAST mesh

ProCAST 的单元节点类型	A节点	B节点	C节点	D节点				
	61221	159379	5902	5928	0	0	0	0
	150637	5903	159388	5902	0	0	0	0
	5902	5903	5878	150637	0	0	0	0
	5902	5928	5903	61221	0	0	0	0
ANSYS 的单元节点类型	I节点	K节点	L节点	J节点	M节点	N节点	O节点	P节点
	61221	159379	159379	5902	5928	5928	5928	5928
	150637	5903	5903	159388	5902	5902	5902	5902
	5902	5903	5903	5878	150637	150637	150637	150637
	5902	5928	5928	5903	61221	61221	61221	61221

在热弹塑性模型中，应力和弹性应变增量，仍然符合弹性模型应力和应变增量公式：

$$\{d\sigma\}=[D]_e\{d\xi_e\}$$

(2)

把式（1）代入式（2）得应力和总应变的关系为：

$$\{d\sigma\}=[D]_e(\{d\xi\}-\{d\xi_p\}-\{d\xi_T\})$$

(3)

要进行应力分析就要求应力和总应变写成：

$$\{d\sigma\}=[D]_ep(\{d\xi\}-\{d\xi_T\})$$

(4)

式中， $[D]_ep$ 为热弹塑性模型的弹塑性矩阵^[10]。

1.2 材料热物理性能参数的设定

轮毂铸件材料为Al-7%Si-0.3%Mg-A356，泊松比 $\sigma=0.33$ ，材料的热物性参数^[11-16]如表1、2所示。

表1 轮毂铸件材料A356的应力参数

Table 1 Stress parameters of the wheel casting material A356

温度/℃	20	400	558	605	750
热导率/($\text{W}\cdot\text{mK}^{-1}$)	140	189	182	78	80
密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	2 660	—	2 550	2 420	2 380

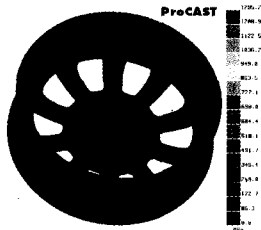


图1 计算到1490时间步的等效应力结果

Fig. 1 The equivalent stress at 1490 time step

2 ProCAST网格单元与ANSYS软件的连接

铸件在ProCAST中划分的单元类型为四节点四面体单元，研究发现对应于ANSYS的六节点四面体Solid185单元，如表4为ProCAST建立的网格单元和ANSYS的Solid185单元的对比。

因此可以通过编写程序将ProCAST的单元网格转化为ANSYS识别的单元。本文利用MATLAB编写了相应的单元转化程序“Exchange-Element.m”，将ProCAST划分的网格单元导入到ANSYS中，如图2为导入到ANSYS中的轮毂单元。

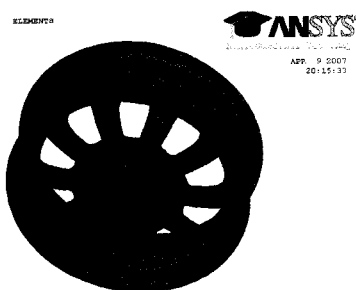


图2 ProCAST的网格单元导入到ANSYS中

Fig. 2 Mesh elements of ProCAST transmitted into ANSYS

3 利用ANSYS对轮毂铸件进行结构分析

3.1 仅施加径向载荷的分析

在轮毂中间凸台面施加所有自由度约束。在轮毂轮辋轴向80%处施加径向载荷，具体数值为8 000 N，如图3所示。计算结果如图4所示。

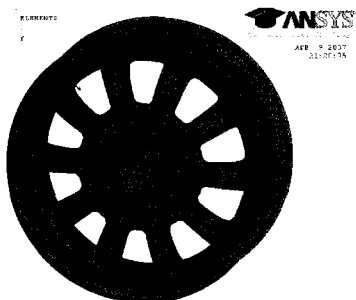


图3 轮毂的边界约束条件和径向载荷

Fig. 3 DOF and radial load on the wheel

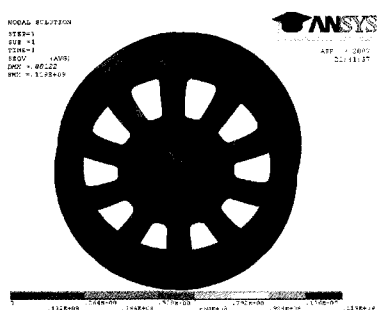


图4 仅施加径向载荷情况下的等效应力分布

Fig. 4 Equivalent stress distribution with only radial load on the wheel

3.2 仅考虑铸造残余应力的分析

本文利用MATLAB编写的“Exchange-Stress.m”程序实现了ProCAST应力文件转换为ANSYS接受的应力文件的过程。将转换后的应力文件“instress.ist”作为初始应力文件加载到ANSYS中轮毂单元的高斯点上。

同样采用约束轮毂中间凸台面的所有自由度。计算其等效应力结果如图5所示。

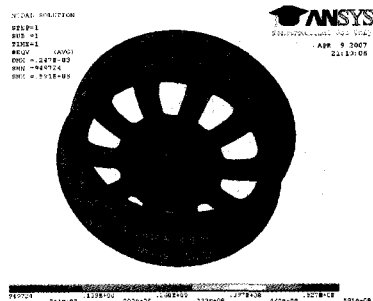


图5 仅施加残余应力情况下的等效应力分布

Fig. 5 Equivalent stress distribution with only residual stress load on the wheel

3.3 综合考虑铸造残余应力和径向载荷的分析

将应力文件作为初始载荷加载到单元的高斯点上，在轮辋轴向80%处施加径向8 000 N的载荷，约束同上，计算后得到等效应力，结果如图6所示。

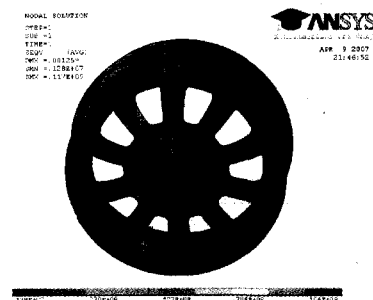


图6 同时施加残余应力和径向载荷情况下的等效应力分布

Fig. 6 Equivalent stress distribution with residual stress and radial load simultaneously on the wheel

4 讨论

表5比较了不同载荷作用下产生的应力极值，结果表明：考虑了轮毂的铸造残余应力后施加径向载荷，使得等效应力最小值变大：从0增大到了1.28 MPa；最大应力值有所下降：从119 MPa减小到117 MPa。其它节点处的应力值也有所变化，说明了节点上残余应力的方向与施加径向载荷产生的等效应力的方向可能相同，也可能相反，如果两者方向相同，在节点处的应力叠加，从而增大该节点处的应力值，方向不一致时则相互抵消，减小了其等效应力。比较图4和图6后很容易观察到，在相同径向载荷作用下，考虑了铸造残余应力后，轮毂上的较大应力的范围扩大。既认为，考虑了铸造残余应力后施加径向载荷使轮毂上的应力无论是数值还是方向都发生了重新分配，符合车轮在安装后形成的“初始动态应力”^[1]的现象，这样对轮毂施加其它外加载荷分析时更加贴近事实。

表5 不同载荷条件下的应力极值的比较

Table 5 Comparison between the min. and max. stress value under different load

载荷情况	最小应力/MPa	最大应力/MPa
仅施加径向载荷	0	119
仅考虑残余应力	0.949 7	59.1
施加径向载荷和考虑残余应力	1.28	117

车轮从制造出来本身就存在着残余应力,其大小取决于制造方法,也受着车轮形状和结构本身的影响。当车轮被安装到车上后,车轮便承受着整车垂直方向的自重力。其中轮辋部分是通过轮胎的充气压力传递而来的,轮辐部分的力是通过轮毂传递来的车辆自重力。这些力都属于静态应力。由于残余应力和车辆重力的方向并非都一致,所以车轮装车后原始状态的受力情况应该是两种应力的叠加,“叠加”的结果如图7所示,这种现象正好符合上述模拟结果的“叠加”关系,这就是车轮在安装后形成的“初始动态应力”^[1]。

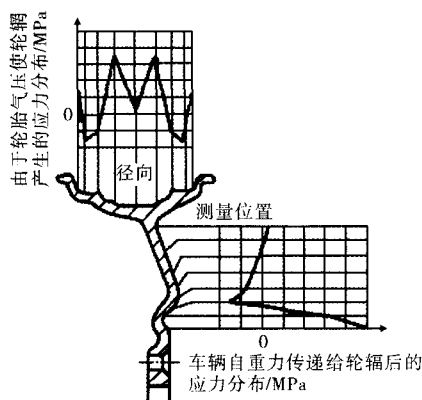


图7 车轮静态初始应力分布^[1]

Fig. 7 The distribution of the wheel's initial static stress

5 结论

(1) 利用ProCAST软件对某低压铸造的铝合金轮毂产品的铸造过程进行数值模拟,运算后得到了轮毂铸件的铸造残余应力,通过开发的接口程序可以把轮毂铸件的有限元网格的节点信息、单元信息和各节点的应力值输入到ANSYS软件中,利用ANSYS进行后续的结构分析计算。

(2) 利用ANSYS软件进行考虑残余应力的铸造零件结构分析是有效的。通过开发的接口程序,可以对含有铸造残余应力的轮毂铸件进行其他各种加载分析,分析的结果更加符合铸件的实际情况,验证了由于残余应力和车辆重力的方向并非都一致,受力情况应该是两种力的叠加,这种叠加可能是“相加”,也有可能是“相减”的关系,分析的结果更符合结构件的实际情况。

参考文献:

[1] 赵玉涛. 铝合金车轮制造技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004: 1-2.

- [2] JOLLY MR. Cost benefits of solidification simulation to foundry users [J]. Foundry, 1994 (1): 11-18.
- [3] SULAIMAN S, HAMOUDA A M S, ABEDIN S, et al. Simulation of metal filling progress during the casting process [J]. Journal of Materials Processing Technology, Volume, 2000, 100 (8): 224-229.
- [4] XIONG S M, LAU F, LEE W B, et al. Numerical methods to improve the computational efficiency of thermal analysis for the die casting process [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003 (139): 457-461.
- [5] LI Xinggang, XIE Shuisheng, JIANG Yunxi. Rigid-viscoplastic finite element analysis on semi-solid thixoforming automobile wheel of AZ91D magnesium alloy [C]. Proceedings of the 8th International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, 2004: 377-383.
- [6] LI Peifeng, LEE Peter D, MAIJER Daan M, et al. Through process modeling of aluminum alloy castings relating casting defects to fatigue performance modeling of casting, welding and advanced solidification processes-XI [C]. Modeling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes - XI, 2006: 661-668.
- [7] LI Peifeng Maijer, DAAN M, LINDLEY Trevor C, et al. A validated model of the cyclic stress state of an A356 automotive wheel and its impact on fatigue life [C]. TMS Annual Meeting, Simulation of Aluminum Shape Casting Processing: From Alloy Design to Mechanical Properties, 2006: 73-80.
- [8] WANG Ying-Chun, WANG Wei-Ming, LI Da-Yong, et al. Simulation analysis of cooling capacity in mold during LPDC of magnesium wheel [J]. Shanghai Jiaotong Daxue Xuebao/Journal of Shanghai Jiaotong University, 2005, 39 (7): 1082-1085.
- [9] 刘强, 蒋玉明, 杨屹, 等. 铸件铸造过程应力场数值模拟 [J]. 热加工工艺, 2002 (5): 52-54.
- [10] 熊守美, 许庆彦, 康进武. 铸造过程模拟仿真技术 [M]. 机械工业出版社, 2004: 281-287.
- [11] SAUNDERS I N, BEECH J, JONES H. Solidification Processing [D]. Sheffield: University of Sheffield, 1997: 362.
- [12] 谭建荣, 吴培宁, 张树有, 等. 压铸件凝固过程温度场变化的计算机模拟 [J]. 农业机械学报, 2002 (2): 105-108.
- [13] 赵玉涛. 高强度、高延性铝合金车轮材料的研究 [D]. 江苏理工大学学报, 1996 (6).
- [14] 柳百成. 铸造工程的模拟仿真与质量控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2001: 92-108.
- [15] 刘新中. 铝合金铸件的凝固过程数值模拟 [J]. 航天工艺, 1998 (5): 33-35.
- [16] 尤江, 王承志, 安晓卫, 等. 铝合金铸件凝固过程的有限元数值模拟研究 [J]. 铸造设备研究, 2000 (1): 37.

(编辑: 张允华, zyh@foundryworld.com)