

基于 ABAQUS 阀门体铸造动态温度场及热应力分析

张群威¹, 刘瑞秋²

(1. 漯河职业技术学院, 河南 漯河 462000; 2. 河南工业大学漯河工学院, 河南 漯河 462000)

摘要: 阀门体在铸造生产过程中要求控制残余热应力, 以减少在使用过程中的变形。本文利用有限元技术, 选取一种典型产品为对象建立有限元模型, 对铸造工况下的瞬态温度场、热应力场及综合应力场进行计算, 准确显示热应力分布区域和特点, 为振动时效参数的选取提供准确依据。使用数值模拟技术对铸造过程中构件的内应力分布特点和规律进行研究, 提高振动时效对残余热应力的消除效果。并通过改变阀门体的测量点位置, 在不同规格和温度条件下, 进行了内应力的定量测定试验。

关键词: 阀门体; 热应力; 有限元; 温度场; 热处理

中图分类号: TG21

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2019)03-0256-04

Dynamic Temperature Field and Thermal Stress Analysis of the Valve Body Casting Based on ABAQUS

ZZHANG Qunwei¹, LIU Ruiqiu²

(1. The Vocational and Technical College Of Luohe, Luohe 462000, China; 2. The Luohe Institute of Henan Technology University, Luohe 462000, China)

Abstract: In the casting process, the residual thermal stress of the valve body should be controlled to reduce the deformation in the use process. In this paper, a typical product is selected as an object to establish a finite element model. The transient temperature field, thermal stress field and comprehensive stress field under casting condition are calculated. The distribution area and characteristics of thermal stress are displayed accurately, which provides an accurate basis for the selection of vibration aging parameters. In order to improve the effect of vibration stress relief on residual thermal stress, the characteristics and rules of internal stress distribution in casting process were studied. By changing the position of the measuring point of the valve body and under different specifications and temperature conditions, the internal stress was quantitatively measured.

Key words: valve body; thermal stress; finite element; temperature field; heat treatment

运用 ABAQUS 对冶金阀门体的工作状况和载荷情况进行分析, 简化其结构细节和工况载荷下的不重要因素, 采用自底向上的建模方式对冶金阀门体建立有限元参数化模型, 模型可控变量参数达到 24 个, 基本覆盖了影响其内应力的主要因素。

通过建立冶金阀门体的参数化有限元模型, 对该型号阀门在铸造工况下的瞬态温度场、热应力场及综合应力场进行计算, 从而预测铸件各个部位的热应力分布, 使冶金阀门体的内应力值与实验测定值误差不大于 10%, 为下一步进行振动时效处理提供准确的依据。

1 动态温度场及热应力预测的原理

在热弹性模型中, 当应力产生一无限小增量 $d\sigma$ 时, 总应变增量 $d\varepsilon$ 可分解成弹性增量 $d\varepsilon_e$ 、塑性增量 $d\varepsilon_p$ 和 $\Delta\varepsilon_t$ 温度增量 3 部分^[1]:

$$d\varepsilon = d\varepsilon_e + d\varepsilon_p + \Delta\varepsilon_t \quad (1)$$

弹性应变增量与应力增量是线性关系, 可写成^[1]

$$d\sigma = D(d\varepsilon_e - d\varepsilon_p - \Delta\varepsilon_t) \quad (2)$$

式(2)中, D 为弹性矩阵。

Von Mises 屈服条件和各向同性硬化法则较好地描述了金属材料的塑性行为, 由此可导出所谓的塑性矩阵 D_p 和弹塑性矩阵 D_{ep} 和增量形式的热弹性应力—应变关系。

$$D_p = D \left(\frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} \right) \left(\frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} \right)^T D$$

收稿日期: 2018-09-20

作者简介: 张群威(1984-), 河南漯河人, 硕士研究生, 讲师, 研究方向: 为轻质合金的先进制造技术与虚拟仿真。

电话: 13939568489

$$\left[\left(\frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} \right)^T D \left(\frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} \right) + \frac{4}{9} \sigma_s^2 E^p \right] \quad (3)$$

$$d\sigma = D_{qp} d\varepsilon = (D_e - D_p) d\varepsilon - D \Delta \varepsilon_t \quad (4)$$

其中, σ 是 Von Mises 等效应力。

在小变形情况下,可建立热弹塑性问题的有限元方程的增量求解格式为

$$\left[\int B^T D_{qp} B dV \Delta U - \int B^T D \Delta \varepsilon_t dV - F \right] = 0 \quad (5)$$

式(5)中,第二项即是由温度引起的等效载荷向量, F 为外载荷向量。

2 建立基于 ABAQUS 的有限元分析模型

2.1 建立参数化有限元分析模型

参数化建模的几何形状和大小都由尺寸参数控制,在产品的设计过程中可随时修改这些尺寸参数,并可对设计对象进行简单的分析。特征之间存在着相依的关系,某一单独特征的修改同时会牵动其它特征的变更^[2]。

ABAQUS 软件可依据参数创建设计模型,可以运用数学计算方式,建立各特征之间的数学关系,使得计算机能计算出模型应有的形状和固有位置。本文中的有限元模型即采用参数化建模方式。

采用三维模型进行模拟计算,冷却凝固过程模拟属于相变问题,为非线性瞬态热分析,故采用低阶热单元 SOLID70 单元进行网格划分;在应力分析阶段属于结构分析,需把单元相应转换为 SOLID45 单元。

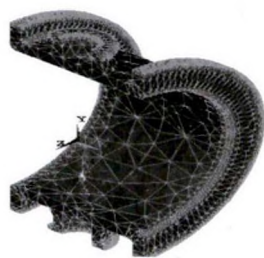
一般来说,网格划分越细、单元越多,计算精度越高,但计算机资源占用越多,耗时巨大,计算复杂且计算量大。本文综合考虑精度与资源问题,包括阀体及砂箱在内共划分 208 586 个单元。

根据阀体的几何形状及结构特点,采用映射网格划分较为困难,本文采用自由网格划分,为了提高结构突变部位的精度,在模型的局部进行了细分及均匀过渡,较好的完成了有限元前处理部分的工作,包括阀体及砂箱在内共划分 208 586 个单元,其中阀体零件 55 959 个单元。

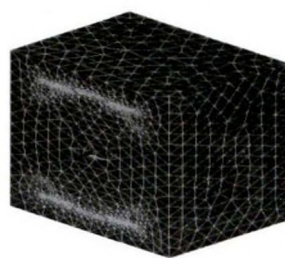
有限元分析模型如图 1 所示。

2.2 边界条件

阀体结构尺寸为:阀门的进汽管外径为 350 mm、内径为 250 mm;出汽管外径为 250 mm、内径为 150 mm;阀杆孔直径为 200 mm;汽室内径为 350 mm,汽室壁厚为 60 mm;上平台平面到气室



(a) 阀体有限元模型



(b) 砂箱有限元模型

图 1 砂箱及阀体有限元分析模型

Fig.1 The Finite element analysis model of sand box and valve body

中截面距离为 315 mm。

考虑到该阀体具有对称型,为减小计算量,取 1/2 模型。

砂箱尺寸为 600 mm×900 mm×900 mm,也取 1/2 模型。

3 浇铸凝固过程动态温度场计算结果

在铸造生产中,铸件将热量传给周围的造型材料,从而使整个系统的温度分布发生变化,由于铸件凝固冷却速度不同、各部分的温度分布不均匀而引起铸件中产生热应力。热应力是铸件产生热裂、变形等铸造缺陷的主要原因,它不仅降低铸件的尺寸精度和使用性能,甚至直接导致铸件报废^[3]。对铸造过程应力场进行数值模拟,可以预测铸件变形、热裂倾向,为提高铸件尺寸精度和使用寿命提供科学的参考依据。

在对铸造应力场进行模拟时,由于应力变形做功引起的热效应同温度变化和凝固潜热释放的热效应相比可以忽略不计,故一般铸造过程的热分析和应力分析可单独进行,只需将温度变化的数据转化为温度载荷加入应力分析中即可。因此,本文先进行温度场模拟,即金属浇铸与冷却过程,然后根据温度场的数值进行热应力计算。

3.1 浇铸过程分析

液态金属浇入铸型,它在型腔内的冷却凝固过程是一个铸型向环境散热的过程,该过程实质是熔体内部显热和潜热不断向外散失的过程,且伴随着铸件和铸型内部温度分布随时间而变化。铸型/砂型系统的传热过程主要通过液态金属与砂型的对流换热、金属向砂型导热、砂型表面与大气的对流换热及其对外界的热辐射等方式综合进行。计算中,为使问题不过于复杂,对冷却过程做出如下假设:

(1)对铸件而言,由于浇铸时间很短,只有 15 s 左右,故假定熔体瞬时充满型腔,料温统一。

(2)熔体均质且各向同性。

(3)砂型温度 25℃,周围环境即空气温度 25℃。

铸件在凝固过程中会释放出大量结晶潜热,潜热处理对冷却过程计算精度有非常重要的影响。潜热处理方法主要有 3 种:等效比热法、热焓法、温度回升法^[4],其中热焓法精度较高,本文通过定义焓来考虑潜热。

浇铸温度对金属充型能力的影响很大,浇铸温度越高,液态金属蓄热越多,粘度越小,其充型能力就越强。金属浇铸温度一般为高于液相线 50~100℃,本文中铸件的材料为 35 钢,经查阅铁碳合金相图及工厂实际调研,在模拟仿真时按浇铸温度 1 532℃,浇注后 10 h 落砂进行计算,采用 ANSYS 热分析计算该时间段内温度场及梯度场的变化。

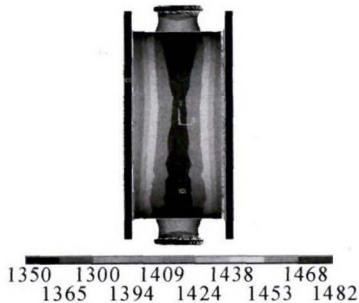


图 2 7 463 s 时温度场分布
Fig.2 The 7 463 s Temperature Field Distribution



图 3 14 663 s 时温度场分布
Fig.3 The 14 663 s Temperature Field Distribution

3.2 浇铸凝固过程动态温度场分析

图 2 为浇铸 7 463 s(2 h 左右)时的铸件中温度分布。从中可以看出,此时铸件已基本凝固,温度在 1 350~1 482℃,其中铸件外部与砂型接触处温度最低,为 1 350℃;铸件内部温度最高,为 1 482℃。温度差别较大,这是由于:

(1)铸件壁厚不同,各处散热快慢速度不一致,壁薄处散热快,因而温度下降快,为低温区,壁厚处散热慢,速度下降慢,为高温区。

(2)铸件外部与砂型接触,热传导较快,降温快,为低温区。内部与砂型无接触,热传导慢,降温慢,为高温区。

图 3 为浇铸 14 663 s 时铸件中温度场分布。

由以上几个时刻的温度分布图中可以看出一个共同点:铸件心部温度与表面温度且有明显差异,心部温度最高,而表面温度最低,其中法兰边缘温度最低,具体原因如前所述,表 1 为不同时间点处温差值。

表 1 铸件冷却过程中不同时刻梯度值
Tab.1 Gradient values of castings at different times during cooling

时间 /s	最小梯度 /℃	最大梯度 /℃	梯度差 /℃
393	5.27	3 584	3 578.23
5 063	15	1 997	1 982
12 263	4.937	746.24	741.303
21 863	4.824	464.57	459.746
31 463	4.58	359.75	355.17

由表 1 中温度值可看出,铸件在两个多小时后完全凝固。在冷却初期壁厚处降温慢,而壁薄处降温快,最大温差值在 130℃左右,所以铸件在冷却过程中会形成热应力。后期的降温为壁厚处快壁薄处慢,温差值逐渐减小,随着时间的推移,温差值也在变化,逐渐趋于均匀。在浇铸 2 h 后,铸件内最高温度为 1 482℃,最低为 1 350℃,温差明显较大;在浇铸 4 h 后,铸件内最高温度为 1 151℃,最低 1 099℃,此时已完全凝固,温差略有减小;在浇铸 6 h 后,铸件内最高温度为 966℃,最低为 927℃,温差逐渐减小;在浇铸 10 h 后,铸件内最高温度为 746℃,最低为 720℃,温差进一步减小为 26℃。

通过对结果数据的分析,得知在冷却过程中随着时间的推移,铸件内温差值逐渐减小,梯度值也逐渐减低。冷却初期,温度梯度较大,因为此时降温速度快,温差值大,而到冷却后期,温度梯度却较小,此时降温速度慢,温差值小。

图 4 为浇铸 14 663 s(4 h 左右)时刻的铸件梯度分布。图 5 不同角度体现温度梯度场的分布。通过对温度梯度场云图观察可以发现,最大梯度在尖角处及转折处,即散热最快处;最小梯度发生在心部,即散热最慢处。

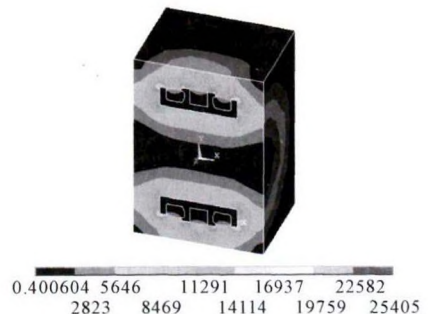


图 4 14 663 s 时刻梯度场分布(含砂箱)
Fig.4 The Gradient field distribution at 14 663 seconds



图 5 14 663 s 时刻铸件梯度场分布

Fig.5 The Gradient field distribution of casting at 14663 seconds

4 阀体冷却热应力分析

当一个工件加热或冷却时,会发生膨胀或收缩。如果工件各部分之间温度升温或冷却速度不一致,则工件各部分膨胀或收缩程度不同,就会产生热应力。对于铸造过程而言,当铸件完全凝固后便进入了固态收缩阶段,若铸件因结构复杂、壁厚不均匀而产生不一致的收缩,或因受热膨胀及铸型结构对铸件的固态收缩产生阻碍,将在铸件内部产生应力,即铸造热应力。铸造热应力是铸件在生产、加工及使用过程中产生变形和裂纹的主要原因,不仅降低了铸件的尺寸精度和使用性能,甚至直接导致铸件报废。铸造过程应力场的模拟计算能够帮助预测和分析铸件裂纹、残余应力,为提高铸件尺寸精度及稳定性提供科学依据。

在进行热应力分析时,应采用热梯度最大的时间点或载荷步的温度值作为进行应力计算的依据^[5]。本文采用铸件完全凝固后梯度最大值的时间点即 7 463 s 时刻的温度值进行热应力计算,该时刻温差 132°。

根据热分析计算出的各节点温度值,将其施加到结构分析的有限元模型上,进行有限元计算,计算结果如图 6 所示。

由图 6 可以看出,最大等效应力为 $0.183 \times 10^8 \text{ Pa}$,最小等效应力 $0.17 \times 10^7 \text{ Pa}$,对比温度梯度分布图,应力分布情况基本与温度梯度分布相吻合。

通过对以上应力分布图观察,可以看出,热应力高值集中在法兰、凸台及肋板周围,尤其肋板周围。这主要是由于该区域与型砂接触,散热较快,从



图 6 等效应力分布图

Fig.6 Equivalent stress distribution

温度梯度图也知该处温度梯度值较大,同时该处几何形状变化显著,存在过渡尖角,形成应力集中,因此应力变化显著。上述结果表明,模拟结果显示的应力分布趋势正确,与传统经验数据基本吻合。

5 结论

利用有限元分析技术,建立了冶金阀门体参数化驱动有限元模型,对阀门体在铸造过程中热应力的形成的因素进行了分析,从定量的角度对铸件的动态温度场和热应力的形成机理及分布特点进行了研究,分析结果为优化振动时效的工艺参数提供了理论依据和技术指导,克服了工艺参数设计中的盲目性。

通过对铸造过程的温度场和应力场的数值模拟,分析了铸件冷却凝固过程,较真实地反映铸造系统温度变化过程及热应力形成过程,对科学分析铸件内的残余应力,预测铸件热裂等缺陷出现的可能性及位置提供了有价值的依据。

参考文献:

- [1] 陈明祥. 弹塑性力学. 北京:科学出版社,2010.
- [2] 涂思京,闫晓东,赵月红,等. 电解铜箔表面光亮带产生原因的研究[J]. 稀有金属,2013 (7): 464-467.
- [3] 谭立军,姚泽坤,李辉,等. 纯钛焊件焊缝组织细化的热加工工艺研究[J]. 铸造技术,2008,29 (1): 28-30.
- [4] 任连保,吴丕杰,宋文君,等. 电解铜箔用钛焊接阴极辊焊缝均晶化处理工艺研究 // 中国有色金属铸造技术研讨会论文集编[C]. 北京:中国铸造协会,2008:33-34.
- [5] 熊德才. 精密铸造技术在航空工业中的应用和发展 [J]. 航空制造技术,2013,10(2):25-26.

欢迎到当地邮政局(所)订阅 2019 年《铸造技术》杂志

国内邮发代号:52-64 国外发行号:M855 国内定价:18 元/本 海外定价:18 美元/本