

潘健生,王 婧,韩利战,顾剑锋

摘要: 介绍了 125MN 挤压机主柱塞差温加热过程模拟、高压气淬过程流场均匀性模拟、渗氮炉虚拟设计、大型模块淬火虚拟生产等热处理数值模拟工程应用的实例,说明了热处理数值模拟已具备工程应用的价值。但热处理数值模拟还很成熟,必须通过试验验证和修正,必须注意到数值模拟精度还相当差的特点,在应用中考虑足够的宽容度。

关键词: 热处理; 数值模拟; 工程应用; 虚拟设计; 虚拟生产

文章编号: 0254-6051 (2008) 01-0003-06

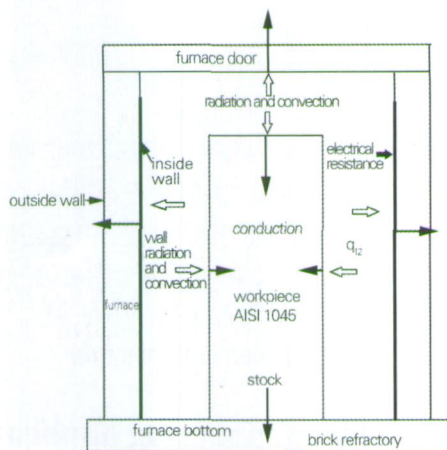


图2 主柱塞在2000kW井式炉内加热模型

Fig.2 Heating model of main plunger in 2000 kW pit furnace

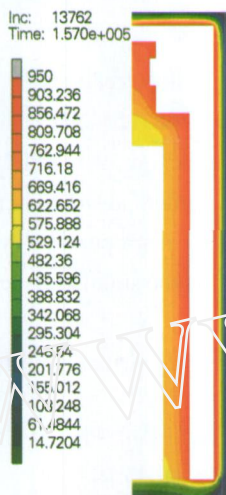


图4 温度场的模拟结果

Fig.4 The simulation results of temperature distribution

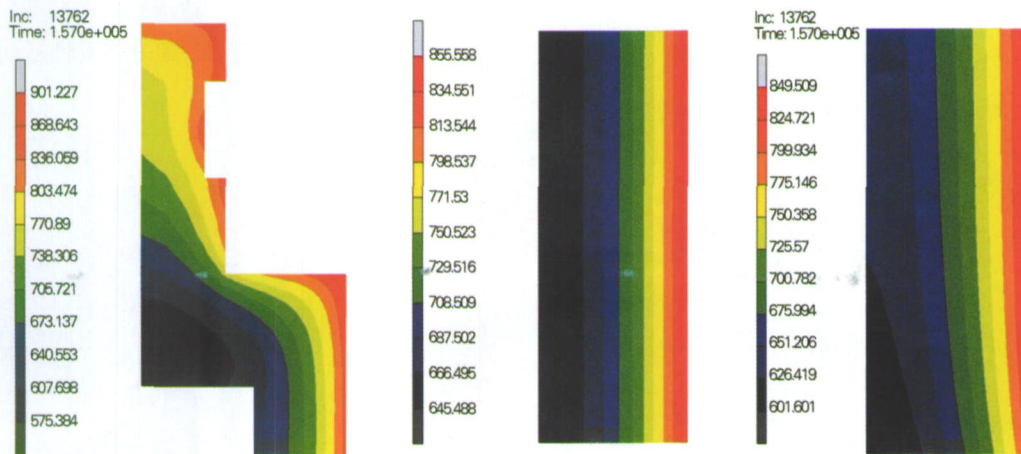


图5 工件顶、中和底部温度场云图

Fig.5 Temperature distribution at top, middle and bottom of the workpiece

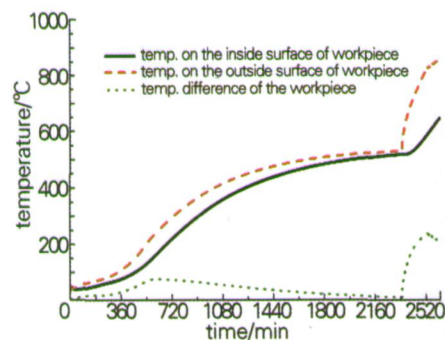


图3 主柱塞外表面与内表面温度变化曲线模拟结果

Fig.3 Temperature curves of main plunger's outside surface and inside surface

的柱塞得到必要的淬硬层。图2是主柱塞差温加热模拟的示意图，是一个多体“耦合传热”的模型。图3是2000 kW加热炉300℃和550℃二次阶梯加热之后全功率快速升温时主柱塞外表面和内表面升温曲线及温度场的模拟结果。经2520 min加热之后外表面已达奥氏体化温度，而内部温度约600℃。图4是差温加热结束加热时温度场云图，图5是主柱塞的顶部、中部和底部温度场云图的局部放大。图6和图7是差温结束时工件内组织分布的模拟结果，考虑到模拟计算可能存在的误差，以及生产现场的复杂性，用模拟方法制订工艺参数时要考虑足够的宽容度。因此按奥氏体层深度达到50~70 mm作为加热完成的判据。实际生产过程中在图1所示的A、B、C、D处安装了4支监控热电偶。实测的曲线与模拟的温度

曲线见图8~9，大致接近，于是按预设判据结束加热，出炉喷水冷却，质量检验结果符合设计要求。收到了一次投产成功的效果，满足了重大工程的急需。

2 真空加热高压气淬炉流场与温度场的数值模拟

真空加热高压气淬替代保护气氛或可控气氛加热后

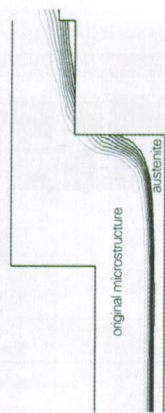


图6 差温加热结束时工件内组织分布模拟结果
Fig.6 Microstructure distribution in the workpiece after differential temperature heating

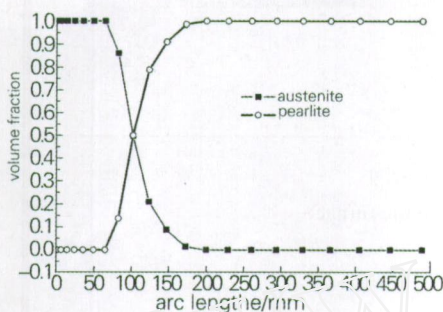


图7 差温加热后中部截面上组织分布曲线
Fig.7 Microstructure path plot on the middle cross section after differential temperature heating

油淬,对于减少温室气体排放和克服环境污染有重大意义^[4]。然而在许多情况下,高压气淬的热处理畸变并未减少,反而增大,恰与人们的期望相反。原因何在?为此对一台典型的国产真空加热高压气淬炉进行流场与温度场耦合的计算机模拟。

高压气淬的对流换热,热边界条件无法预先规定,而是受到流体与固体表面之间相互作用的制约。无论是界面上的温度还是热流密度以及对流换热系数都应看成是计算结果的一部分,而不是已知条件。像这类边界条件是由热量交换过程动态地加以决定而不能预先规定的问题,称为耦合传热问题^[5]。应用 Fluent 软件对一台典型的国产真空高压气淬炉进行数值模拟。图 10 为炉膛、进气管和出气口的结构。

图 11a、c 分别是在工作压力为 2×10^5 Pa,喷嘴流速为 22.5 m/s,出口压力为 10^5 Pa 的条件下流速和压力分布云图。与人们以为沿着圆形炉膛四周均匀布置喷嘴就可获均匀流场的预期结果相反,这种国内应用甚广的典型高压气淬炉中流场很不均匀,而且装料区内的流速很低。图 11b、d 分别是装入一个 $\phi 600$ mm 的圆柱形工件之后的速度与压力分布云图。结果可以看出,在柱面上正对喷嘴处流速较高,两个喷嘴之间流速较低,差异

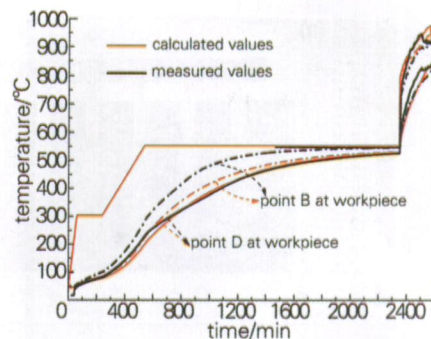


图8 温度变化曲线的模拟值与实测值
Fig.8 Temperature curves of simulation and measurement

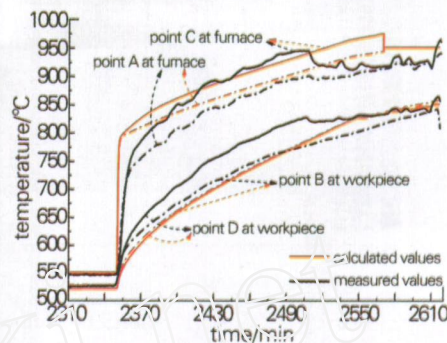


图9 快速升温阶段的温度变化曲线模拟值与实测值
Fig.9 Part of Fig.8 during fast heating process

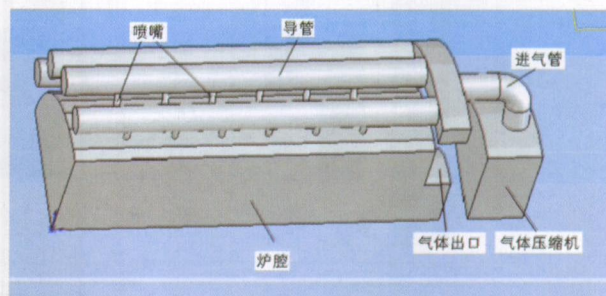


图10 典型的真空高压气淬炉结构示意图
Fig. 10 Sketch of the typical vacuum high pressure gas quenching furnace

很大。两个端面上的流速很低,而且前后两端面的流速也有很大差异。更有甚者,只要条件有所变化,左端端面的流场会发生很大的变化(图 12)。棱角处的流速可能很大。由此可见,即使只有单独一个零件在这种炉膛内气淬,冷却也很不均匀。图 13 则说明将 27 个 $\phi 60$ mm $\times$ 90 mm 的工件在其中气淬时工件周围的流速很小,而且流场很不均匀,同炉中不同位置上的零件冷却效果差异很大。同一工件内部则出现不对称的温度场(图 14~15)。这种状况对淬火的组织性能控制和减少淬火畸变都是很不利。

高压气淬耦合传热的数值模拟揭示出目前国产真空气淬炉普遍采用的典型结构所存在的问题及其复杂性。亟需作深入的研究。

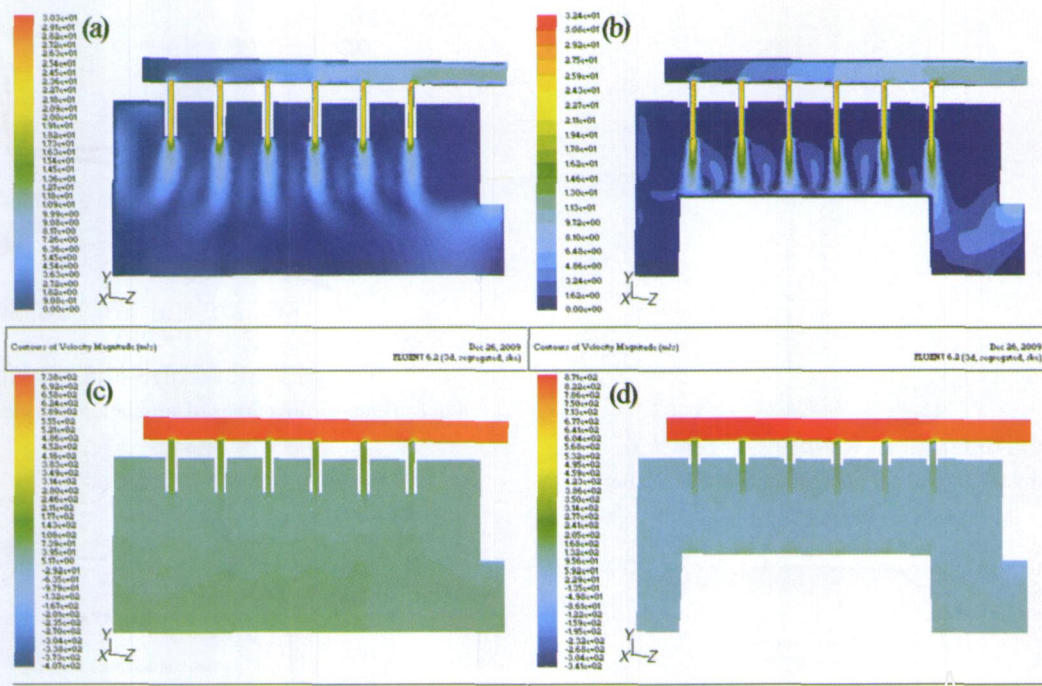


图 11 炉内气流速度和压力分布云图
Fig. 11 Velocity contours and pressure in the furnace

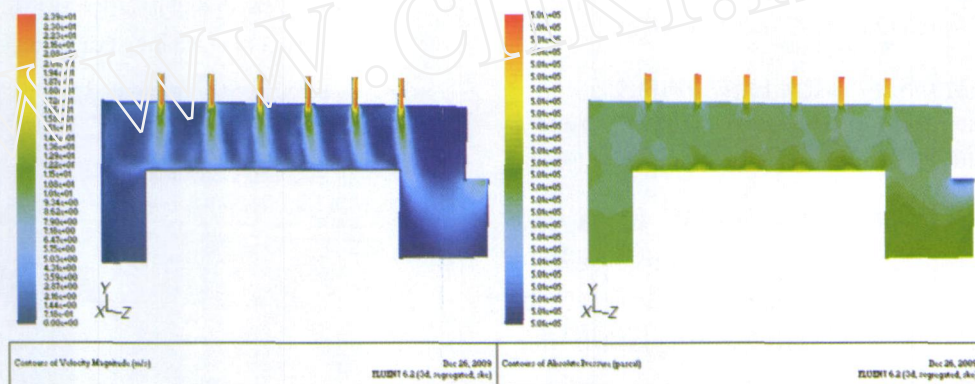


图 12 装入与图 11 相同工件，在工况变化时的流场云图
Fig. 12 Velocity contours in the furnace with the same workpiece in Fig. 11 when the working condition changing

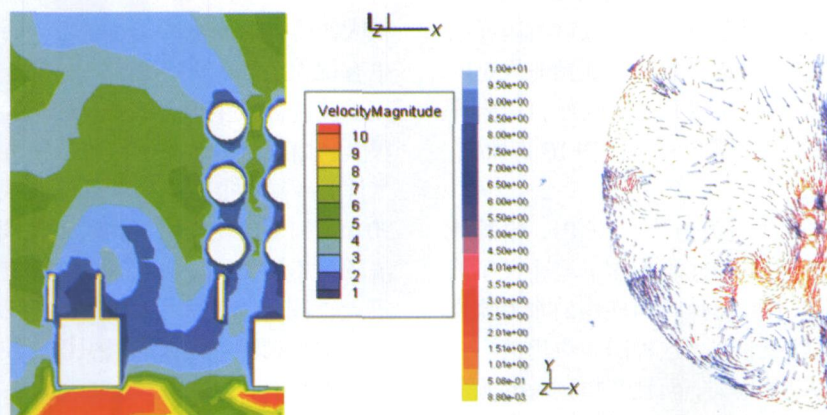


图 13 装入 27 个 $\phi 60 \text{ mm} \times 90 \text{ mm}$ 的工件气淬之后的流场云图(左)和流线图(右)
Fig. 13 Velocity contours (left) and streamline (right) in the furnace with 27 $\phi 60 \text{ mm} \times 90 \text{ mm}$ workpieces after gas quenching

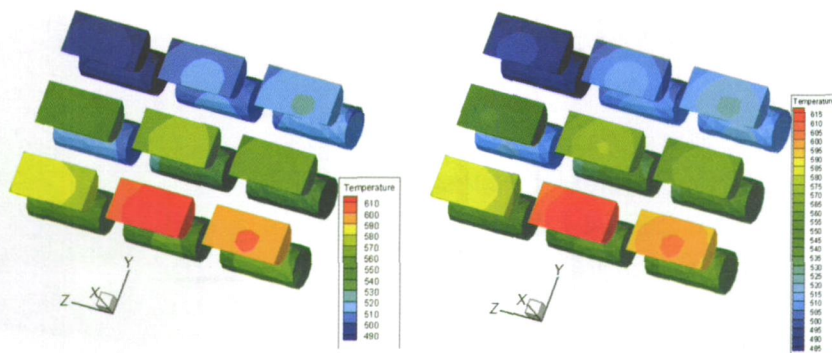


图 14 气淬时棒料温度云图

Fig. 14 Temperature contours of the bars when gas quenching

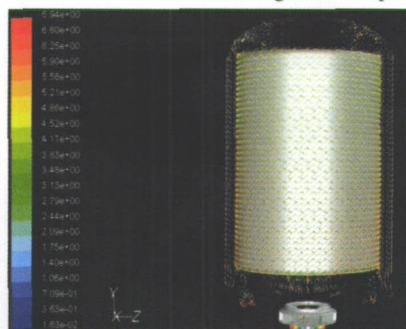


图 15 钟罩式渗氮炉在内部风机驱动下的流速矢量图

Fig. 15 Velocity vector in the bell nitriding furnace under internal fan driving

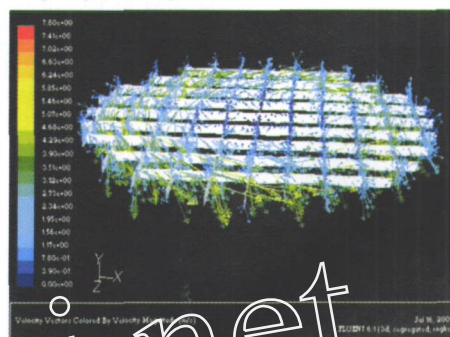


图 17 蜂窝状搁板处的流体速度矢量图

Fig. 17 Velocity vector at the honeycomb shelf

3 气体渗氮炉的流场模拟

为了使模拟结果趋近实际,需要将密封炉膛内风机叶轮对气流的驱动^[6]、各种炉内构件造成的流动阻力及其对速度矢量的影响作为一个统一的问题进行处理。图 15 是一台罩式渗氮炉炉罐内流速矢量图。炉内气体由炉罐底部的气机叶片驱动下,作强迫对流,如图 16 所示。炉内有一个导流桶。顶部是一个标准封头。炉罐内的每一个构件的形状也对流场有重大影响。例如将图 16 与图 17 作比较就可以看出:炉内直角形的搁板和放射状的搁板对流场的影响明显不同。

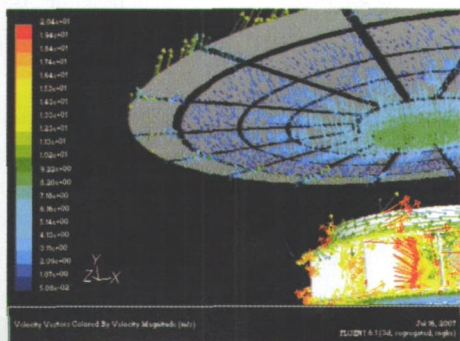


图 16 风机旋转驱动炉气强迫对流,以及放射状搁板附近的流体速度矢量图

Fig. 16 Velocity vector under the fan driven and near the radial shelf

图 18 表明在没有导流板钟罩炉内流场很不均匀。应用数值模拟技术进行虚拟设计,优选导流板配置的方案,

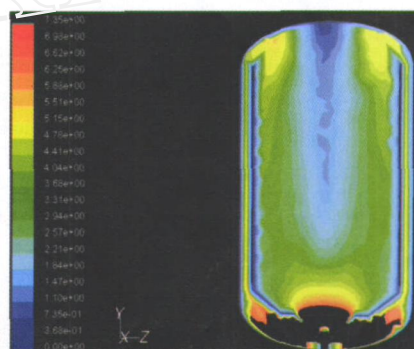


图 18 原始炉型流体速度云图

Fig. 18 Velocity contour in the original model of furnace

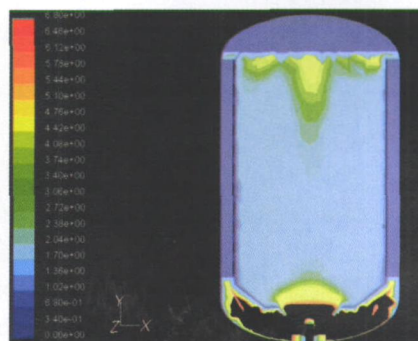


图 19 经过改进的渗氮炉流体速度云图

Fig. 19 Velocity contour in the improved nitriding furnace

可使料框内流场相当均匀(图 19),将有利于提高渗氮零件质量的一致性。这一研究成果已被顺德世创集团所采用,新型渗氮炉正在抓紧制造中,以上结果可以说明流场数值模拟在热处理设备设计中的重要作用。

4 数值模拟在塑料模具钢大型模块智能淬火技术中的应用

用数值模拟进行虚拟生产,研究成功P20钢预冷→水淬→自回火→水淬→自回火的工艺。预冷时棱边和棱角处已分解为珠光体(图20),避免了随后浸水或喷水冷却时产生裂纹。水淬使截面上获得均匀的组织 and 硬度。自回火避免了淬裂。已在抚顺特钢厂大量生产中应用。对于718钢通过虚拟生产找到了一种用间隙脉冲喷水使截面获得均匀的贝氏体组织的方法,通过虚拟生产可以确定合理的脉冲周期和占空比,截面上不同深度处的冷却曲线模拟结果如图21所示。构成了不用等温槽的贝氏体淬火发明专利技术。行将着手进行生产性试验。

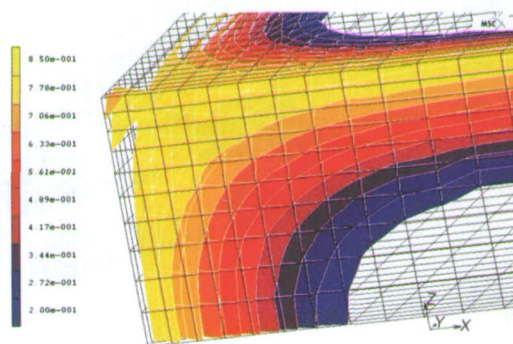
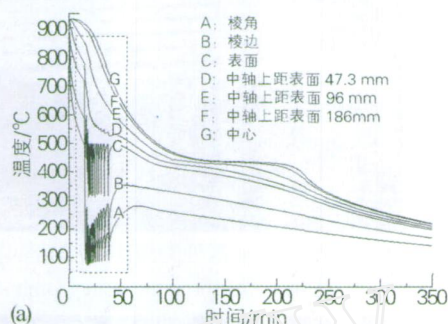


图20 P20大模块预冷→水淬→自回火→水淬→自回火处理后珠光体分布云图

Fig. 20 Pearlite distribution of P20 steel block quenched by the process of pre-cooling → water cooling → self-tempering → water cooling → self-tempering

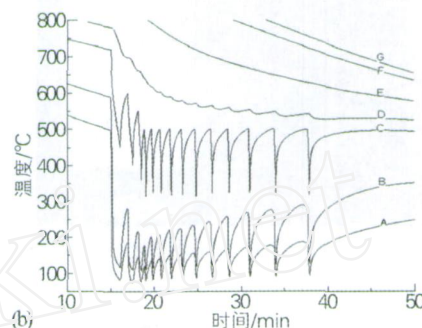


图21 718钢模块脉冲喷水淬火(a)整个冷却过程 (b)局部放大 不同位置上冷却曲线
Fig. 21 Cooling curves of different positions in 718 steel block during water cooling process
(a) whole cooling curves (b) enlarged part of the cooling within the rectangle

基于数值模拟的大型模块(25~30t)预冷→水冷→分段自回火的智能淬火成套设备已在东北特钢抚顺钢厂投入使用,收到显著效果。用水和空气替代油,克服油烟和残油对环境污染,杜绝火灾隐患,实现清洁、安全生产;节省淬火介质成本;扩大了中低合金钢使用尺寸。P20钢由250 mm扩大至400 mm;718钢由500 mm扩大至700 mm以上(估计可望达到1 m);提高组织与硬度均匀性;避免了淬火开裂;自动化操作,保证质量重现性。

5 小结

(1) 热处理数值模拟已经具备工程应用的价值,这种新技术在集成多学科理论知识的基础上,通过科学计算揭示热处理过程中各种复杂现象的变化规律,为解决生产技术问题提供辅助决策的科学依据。它对热处理的技术进步的推动作用之巨大是传统技术所无法比拟的。

(2) 在工程应用中应充分认识到热处理数值模拟还是一种很不成熟的技术,对计算精度差的问题要有清醒的认识。数值模拟只能视为辅助决策的手段。数学模型必须经过试验(包括生产试验)加以验证和修正。鉴于模拟计算不可避免的误差,需要认真估计用虚拟生产方法所得出的工艺方案的宽容性。工程应用时必须考虑足够

的冗余度。

(3) 热处理数值模拟是材料科学与传热学、弹塑性力学、流体力学、计算机科学等多学科集成而发展起来的新技术,各相关学科的理论知识都非常深奥而丰富,目前在热处理数学模型中还仅仅涉及其中很小的部分,不断吸纳各学科的基础知识和新成果,逐步改进热处理数学模型,将促进热处理数值模拟的功能不断扩展,水平不断提升,是热处理技术创新的重要源泉。

以上是笔者的一些粗浅体会,不当之处,恭请赐正。

参考文献:

- [1] 刘庄,吴肇基,吴景之,等.热处理过程的数值模拟[M].北京:科学技术出版社,1996.
- [2] Ju Dongying, Iio Yousuke, Inoue Tatsuo. Simulation and verification of residual stresses and distortion in carburizing quenching process of a gear[A]. Proceedings of the 4th International Conference on Quenching and the Control of Distortion [C]. Beijing: 2003.
- [3] 潘健生,顾剑锋,宋冬利.热处理CAD/CAM/CAE[A]. 中国材料工程大典(第15卷)[M].北京:化学工业出版社,2006.
- [4] 樊东黎.真空热处理的发展和展望[J].机械工人.热加工,2002(4): 6-9.
- [5] 陶文铨.数值传热学[M].西安:西安交通大学出版社,2004.
- [6] Fluent Inc. User's Guide[M]. United States of America, 2002.