

·成果简介·

大型铸件的模拟技术及质量控制研究

郑贤淑 姚山 李治 金俊泽

(大连理工大学铸造工程研究中心, 大连 116024)

〔关键词〕 铸造热裂纹, 铸型阻碍应力, 金属凝固组织模拟

采用数值模拟方法, 定量解析伴随铸件凝固和冷却过程而产生的缩松、缩孔、裂纹等铸造缺陷, 并据此优化设计铸造工艺, 提高铸件质量的研究, 是铸造领域的研究热点。大连理工大学在“六五”、“七五”期间承担的有关科技攻关项目已使该项研究达到了当时世界水平^[1], 但由于已有计算模型的局限性和繁杂性, 使工程应用受到很多的限制。国家自然科学基金委员会以建立工程应用模型为宗旨, 于1993年组织清华大学、大连理工大学进行“大型铸件的模拟技术及质量控制研究”, 使这一领域的研究得以深化。

在该重点项目中, 大连理工大学铸造工程研究中心的任务是: 研究裂纹萌生的机理, 建立工程上可行的判据, 以达到预测和减少裂纹发生。研究成果如下:

1 大型特种铸件热裂纹萌生机理研究

在裂纹缺陷数理统计的基础上, 剖析直径为810 mm, 重量为610 kg的50SiMn铸刚车轮及激冷条件下的大板坯(1.3 m×0.48 m)裂纹断面, 对其组织形貌及材料性能进行了全面测试, 研究了热裂纹萌生的机理^[2,3]。

依据可移动界面凝固层内力的平衡原理, 在凝固进程中, 应力分布规律为坐标的二次函数

$$\sigma = -\frac{E\alpha}{4}(T_S - T_0)\left(1 - \frac{3X}{S}\right)\left(1 - \frac{X}{S}\right) \quad (1)$$

式中 E , α , T_S , T_0 , S 及 X 分别为铸件的弹性模量、热膨胀系数、凝固前沿温度、表面温度、凝固层厚度及所求应力点的位置 (见图1)。式(1)表明:

(1) 在凝固前沿铸件受拉, 而在铸件表面受压, 其分布规律如图1所示。

(2) 最大应力发生在凝固层内 $X = 2S/3$ 处, 其值为

$$\sigma_{\max} = \frac{E\alpha}{12}(T_S - T_0) \quad (2)$$

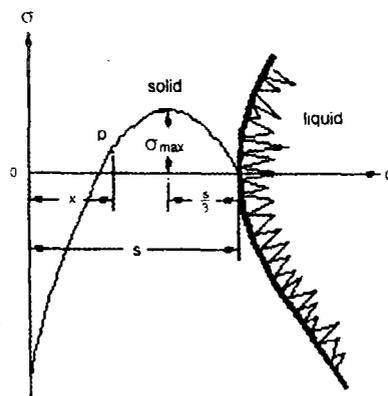


图1 凝固层内应力分布

* 国家自然科学基金重点项目。

本文于1997年8月12日收到。

防止裂纹萌生的判据为

$$\sigma_{\max} \leq \sigma_b(T) \quad (3)$$

式中 $\sigma_b(T)$ 为 $X = 2S/3$ 处材料的强度极限(与该处的温度 T 相对应)。式(2)表明:提高凝固进程中铸件的表面温度 T_0 将减少热裂纹萌生的可能性。

(3) 铸件的缩松、缩孔缺陷及组织形貌不是诱发热裂纹萌生的直接原因。

式(2)和(3)即为基于铸件凝固进程温度场的热裂纹预测模型。对所研究的大型铸钢车轮和大板坯裂纹都发生在距铸件表面与最终凝固位置(凝固层)的 $2/3$ 处。这表明在接近凝固终了时最大应力达到该处的强度极限,因而出现了裂纹^[2,3]。

热裂纹萌生机理的研究,首次揭示了凝固层内应力分布规律及其最大应力出现的位置与量值。从理论和实验证实了缩松、缩孔、材质的组织形貌及结构尖角处不是诱发热裂纹的裂纹源。该文已被英国出版的《科学文摘 A 辑——物理文摘》(PA96-35853)所摘录。

2 型砂机械阻力计算模型的建立

对铸造工程常用的树脂砂、水玻璃砂、石灰石砂的溃散性及随温度变化的力学性能进行了全面测试,建立了型砂机械阻力的计算模型^[4]。

铸件受阻部分的铸型阻碍应力可用下式计算

$$\Delta\sigma_1 = E_2(F_2/F_1)(\Delta\epsilon_1 + \Delta\epsilon_2)/(1 + E_2F_2/E_1F_1), \quad \sigma_1 = \sigma_0 + \Delta\sigma_1 \quad (4)$$

式中 $\Delta\epsilon_1, \Delta\epsilon_2$ 分别为铸件(下标 1)的加权自由线收缩率增量及铸型(下标 2)的加权线膨胀率增量, F 按下标分别表示铸件、铸型受阻部分的面积。

式(4)表明铸型阻碍应力与铸型的温度场、弹性模量及热膨胀率增量直接相关。根据力的独立作用原理,可以独立计算铸型阻碍应力及热应力,然后叠加,以此评价全应力状态。通常情况下假定铸型具有完全的退让性是合理的,但当铸型刚度 E_2F_2 较大,一般与铸件刚度之比大于 0.1 时,铸型阻力不可忽略。

铸型阻力计算模型的建立,为定量分析型砂阻力对铸件裂纹的影响提供了依据。学术界及工程界认为,该模型对这一古老问题作了较为实际的数学处理,具有重要的学术意义和应用价值。特别对大型特种铸件的生产具有指导意义。

3 完成大型铸钢件凝固过程的流场、温度场、浓度场耦合计算软件系统

宏观偏析——A 偏析和 V 偏析是在凝固过程中严重影响大型铸钢锭质量的缺陷。探明偏析形成机理,建立具有糊状区对流-扩散问题的流场、温度场及浓度场的三传模型,是当前理论课题的前沿。

依据糊状区单元体溶质守恒原理,导出了包括固相内任何程度扩散的溶质守恒方程^[5,6]。计算结果表明:当流动方向与等温线推进方向一致时,流动加快了等温线的推进速度,否则则相反。这一结论更接近实验结果。该成果把我国宏观偏析的研究水平提到了一个新的高度,已被美国《化学文摘》(CA122-244814)及《金属文摘》(MA96-02-51-0347)摘录。

4 铸造工艺 CAD 与数值模拟集成化的研究

在我们的“六五”、“七五”科技攻关成果的基础上,依据本项目研究的面向工程的缩松、缩

孔、裂纹计算模型和判据,编制了数值模拟软件与基于实体造型的网络自动剖分和自动转换的前、后处理集成软件系统,将铸造工艺 CAD 提到了一个新的高度^[7-9]。我国轻型车后轮毂(重 11.5 kg)采用国外引进软件设计的铸造工艺方案制造的产品,废品率达 90%,即 90%的轮毂铸件上有缩孔。而采用我们研制的集成软件系统设计的铸造工艺方案,在凝固进程中把缩孔推向了冒口,整个铸件里没有缩孔,使产品合格率达到 95%(见基金总结报告中的工厂证明)。

5 首次完成了金属凝固组织的计算机仿真

以异质形核概率模型,描述形核的连续过程,用 Monte Carlo 随机过程及 KGT 模型确定形核位置及计算晶粒的生长速度,首次将微观结构的形成过程与图形成学相结合,逼真有效的显示了晶粒的生长过程^[10],结果与微观结构形貌的实验金相照片相比较,基本吻合。

专家认为,这一成果开创了我国金属凝固组织计算机模拟研究的新领域,将对新材料的设计及铸件凝固组织控制具有深远的影响。

此外,我们在完成该项目的过程中,还培养了 2 名博士生和 5 名硕士生。在学术期刊上发表论文 10 篇,在国际学术会议上交流论文 6 篇,国内学术会议上交流论文 2 篇。

参 考 文 献

- [1] 张毅,郑贤淑等. 铸造工艺 CAD 及其应用. 北京:机械工业出版社,1994,88—124.
- [2] 郑贤淑,金俊泽. 电磁铸造大板坯凝固过程中热裂纹萌生机理分析. 金属学报,1995,31(11):B511—517.
- [3] Li Z, Yao S, Zheng X S, Jin J Z. Experimental research on cracks of large wheel of cast steel. MCS3-'96, 1996, 12:387—391.
- [4] 郑贤淑,姚山,金俊泽. 铸型阻碍应力计算模型研究. 大连理工大学学报,1996,36(6),687—691.
- [5] 陈卫德,郑贤淑,金俊泽. 糊状区固相内溶质任何程度扩散的传输模型. 材料研究学报,1996,10(5):509—511.
- [6] Chen W D, Zheng X S, Jin J Z. Effect of gravity field on solidification behavior of steel ingot. ACTA METALLURGICA SINICA, 1995, 8(2):110—114.
- [7] 王晨,姚山,郑贤淑,金俊泽. 铸造工艺 CAD 与数值模拟集成化. 大连理工大学学报,1995,35(6):815—819.
- [8] 姚山,郑贤淑,金俊泽. 大型扁型钢锭模的裂纹分析及结构优化设计. 钢铁研究学报,1996,8(4):22—27.
- [9] 姚山,郑贤淑,金俊泽. 钢铸件、铸锭缩孔形成过程的数值模拟及应用. 铸造,1996,8:11—13.
- [10] 唐勇,金俊泽. 金属凝固组织的计算机仿真. 大连理工大学学报,1997,37(5):560—563.

RESEARCHES ON SIMULATION AND QUALITY CONTROLLING OF LARGE CASTINGS

Zheng Xianshu Yao Shan Li Zhi Jin Junze

(The research Center of Foundry Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024)

Key words thermal cracks, mold resistance stresses, simulation of solidification structure of metals