DOI: 10.3901/JME.2014.16.104

冷却速度对 42CrMo 环坯铸造二次枝晶臂间距及裂纹缺陷的影响*

武永红^{1,2} 李永堂^{1,2} 贾璐^{1,2} 秦芳诚^{1,2}

(1. 太原科技大学材料科学与工程学院 太原 030024;

2. 太原科技大学金属材料成形理论与技术山西省重点实验室 太原 030024)

摘要: 针对提出的铸轧连续成形新工艺,从细化组织、提高铸件质量,避免裂纹缺陷方面考虑,分别对采用砂型和金属型的 42CrMo 铸造环件进行温度场、应力场的数值模拟,利用模拟结果,进行凝固冷却过程裂纹倾向性预测。得到铸坯冷却速度越大,在铸型内停留时间越长,铸件收缩量越大,热应力越大,形成裂纹的倾向性也越大。边角部是最容易形成裂纹的部位。同时通过对铸坯进行微观组织数值模拟,建立冷却速度与二次枝晶臂间距的函数关系,分析冷却速度对组织性能的影响,得到采用金属型铸造可获得比砂型铸造组织性能好的铸坯。通过对比两种铸造方式,确定采用金属型铸造在 1 050 ℃ 左右温度下出模,可获得高质量无缺陷铸坯,可基本满足基于 42CrMo 环坯的铸轧连续成形工艺要求。分析结果可为预测铸件质量,试验研究提供理论参考。

关键词: 42CrMo; 冷却速度; 枝晶臂间距; 热应力

中图分类号: TG242

Effect of Cooling Rate on Secondary Dendrite Arm Spacing and Crack Defects of 42CrMo Casting

WU Yonghong^{1,2} LI Yongtang^{1,2} JIA Lu^{1,2} QIN Fangcheng^{1,2}

(1. School of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024;

2. Shanxi Key Laboratory of Metallic Materials Forming Theory and Technology,

Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024)

Abstract: Based on the proposed a new technology casting-rolling continuously forming of ring parts, it is considered to detail organization, improve the quality of castings, and avoid the crack defects. Numerical simulations of temperature field and stress field are taken respectively in 42CrMo of sand mold and metal mold casting, solidification cooling process and the crack tendency prediction is studied by using the simulation results. The greater cooling rate in the cast was, the longer the casting stayed in the mold and the bigger the casting shrinkage is, the greater thermal stress will became, the greater the inclination of forming crack isare. The part of the edge is the easier to form cracking. By the numerical simulation of the microstructure for the casting, the functions of the cooling velocity and the secondary dendrite arm spacing are established. The effect of cooling rate on the organization performance is analyzed. It is obtained that the casting performance is the better using the metal mold casting than using the sand mold casting. Comparing the two casting methods, it is identified that the higher quality and no defects casting may be got when casting temperature out of the mold about 1 050 ℃. It can be satisfied in technology requirement based on casting-rolling continuously forming of ring parts. Analysis results may provide a theoretical reference for forecast the quality of castings and experiments.

Key words: 42CrMo; cooling rate; dendrite arm spacing; thermal stress

0 前言

随着现代工业与装备制造业的快速发展,对轴

承、法兰、齿轮环、火车车轮及轮箍等环件的需求量越来越大,质量要求也越来越高。目前生产环件普遍采用的是基于锻坯的热辗扩成形工艺。该工艺存在效率低下、加热次数多、能源及材料浪费严重等问题,因此,近年来,太原科技大学与洛阳 LYC 轴承有限公司等单位合作研究开发了金属环件短流程铸轧复合成形工艺。该工艺与传统工艺相比,具有节约能源、节省材料等优点。在该工艺基础上,

* 国家自然科学基金重点(51135007)、国家自然科学基金(51174140, 51075290)、国家自然科学基金青年(51205270)、高等学校博士点优先发展(20111415130001)和山西省归国留学人员基金(2011-084)资助项目。20140116 收到初稿,20140601 收到修改稿

借鉴连铸连轧工艺, 提出了一种利用环坯余热直接辗扩成形的铸辗连续成形新工艺。其工艺流程是合金熔化→钢液精炼→离心铸环坯→利用余热热辗扩。这个工艺省去了环形铸坯的二次加热, 进一步简化了工艺流程, 对提高工作效率、节约能源具有重要意义。

在这个工艺流程中, 其中高温下出模这个工艺是个全新的理论和工艺。保证高温出模铸坯的质量且无缺陷是确保辗扩件质量的关键。而铸坯的质量主要依赖于其凝固冷却过程, 因此研究铸坯凝固过程冷却速度对铸造组织及裂纹缺陷的影响, 对细化铸造晶粒、消除铸造缺陷, 提高铸件质量, 确保这个工艺成功实现具有重要的现实意义。

目前国内外许多学者^[1-4]对钛镁合金、铝合金球墨铸态等铸件就工艺参数对铸造缺陷形成影响、微观组织控制及组织与性能关系等方面进行了广泛深入的模拟与试验研究。许庆彦等^[1]建立了简化枝晶形状物理模型、等轴晶生长计算模型, 利用坐标变换技术, 开发了铝合金等轴晶生长模拟程序, 其模拟结果得到了试验验证。吴士平等^[2]采用 ProCAST 数值模拟软件研究了立式离心铸造工艺参数对钛合金薄壁复杂铸件凝固组织的影响。LI 等^[3]研究了立式离心铸造下钛合金充型过程及工艺参数对凝固缺陷形成的影响。JOEL^[4]进行了砂型铸造球墨铸铁不同冷却条件的一系列微观组织与强度研究, 分析了冷却速度对枝晶臂间距、共晶元胞和最终力学性能的影响。这些研究基本都局限于对冷却到室温下的采用砂型铸造的研究。对 42CrMo 材质的铸造凝固组织性能及其缺陷研究很少, 而对高温下出模的铸坯组织性能、缺陷的研究几乎没有。热裂、疏松和缩孔是铸造过程产生的主要缺陷, 也是造成铸件报废的主要原因。高温下, 由于受试验条件的限制, 很难通过试验方法获得铸件的热应力分布, 对铸件的应力集中区和危险区做出预测。而铸造过程中由于各部分冷却速度差异导致的热应力及相变过程产生的相变应力是促使铸件产生残余应力和热裂的主要原因。因此严格控制冷却速度是有效控制热应力的关键, 是避免铸造缺陷, 提高组织性能的主要途径。枝晶臂距离在预测铸件组织性能上比晶粒尺寸更为重要^[5], 由于二次枝晶臂间距直接依赖于合金冷速和局部凝固时间, 受到试验方式限制, 很难准确测量枝晶臂间距, 而高温下可借助热电偶监测铸件凝固冷却温度, 进而得到铸件的冷却速度。如果能获得二次枝晶臂间距与冷却速度的定量关系, 就可间接获得二次枝晶臂在凝固过程的信息, 提高了预测铸件组织及其力学性能的准确性。因此本文采

取了砂型和金属型两种铸型, 借助 ProCAST 模拟仿真软件, 通过对铸件实施温度场、微观组织及应力场数值模拟, 对高温出模铸件的裂纹倾向进行了预测; 建立了铸件冷却速度与二次枝晶臂间距的数学模型, 对比了两种铸造方式下冷却速度对二次枝晶臂与裂纹缺陷的影响。仿真结果可为预测铸件质量、研究设计、进行试验奠定一定理论基础。

1 仿真模型建立

采用专业铸造模拟软件 ProCAST 对铸造凝固过程热-流动-应力进行完全耦合模拟。基于热流计算, 忽略熔体内的对流, 采用有限元法及热焓法和隐式格式求解热流方程; 模拟过程采用两种不同尺寸的网格和两个大小不同的时间步长, 大网格和大时间步长用于计算热流, 小网格和小时间步长用于计算枝晶形核和生长, 并考虑到枝晶尖端动力学和晶粒范围内的溶质扩散。

铸造 42CrMo 环坯尺寸为 $\phi 638 \text{ mm} \times \phi 300 \text{ mm} \times 190 \text{ mm}$; 采用立式离心铸造; 铸型分别选用砂型和金属型。砂型材质为硅砂, 金属型为 20CrMo。各材料的热物性参数采用软件自行计算结果。42CrMo 合金成分如表 1 所示。模拟过程考虑了相变潜热及材料热参数随温度的变化, 且通过定义材料焓随温度的变化来描述凝固潜热。转速 $n=300 \text{ r/min}$, 铸型外壁采用空冷。

表 1 42CrMo 合金化学成分(质量分数) %

元素	C	Mn	Mo	Cr	Si	S	P
质量分数	0.39	0.86	0.26	1.19	0.33	0.011	0.023

1.1 温度数值模型

铸造凝固过程温度的变化直接影响其组织形成和热应力的产生, 因此, 对铸件进行温度场模拟是关键的一步。铸件的凝固过程是一个具有内热源的非稳态导热过程, 内部的传热形式主要是热传导与对流, 结果使凝固层不断增厚, 液相层不断减薄, 直至铸件全部凝固。

导热微分方程如下

$$\rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right) + \dot{\phi} \quad (1)$$

式中 ρ ——金属液密度;

c ——比热容;

λ ——金属凝固过程热导率;

$\dot{\phi}$ ——金属凝固过程相变产生的内热源;

t ——温度;

τ ——时间。

采用有限元求解时, 首先将求解区域进行单元划分, 将温度场离散到单元节点上, 写成矩阵形式为

$$Ci + Kt = Q \quad (2)$$

式中 C ——比热容矩阵;

K ——温度刚度矩阵;

Q ——施加在节点上的热载荷矢量。

内部单元采用第一类边界条件, 边界单元采用第三类边界条件。

为避免由于温差悬殊使铸件内部产生较大的热应力, 浇注前对铸型进行预热, 预热温度 $t_0=200^\circ\text{C}$, 浇注温度 $t=1\ 560^\circ\text{C}$ 。采用砂型铸造, 经过 6 800 s 铸坯全部凝固; 采用金属型铸造, 经过 900 s 铸坯全部凝固。

1.2 应力场数值模型

裂纹和变形是铸造生产中普遍存在的铸造缺陷, 其形成主要与凝固冷却过程热应力的产生和发展有关。生产实践表明, 铸件浇注后开型时间过早、过迟对防止裂纹都不利。通过应力场模拟, 可全面了解凝固冷却过程热应力的分布情况, 为预测合理开型时间具有重要意义。铸件采用弹塑性模型, 考虑了铸型自身硬度对合金液膨胀与收缩阻碍作用, 对金属型, 退让性差, 假设其完全刚性, 合金的膨胀可重新填充出现的缩孔; 对砂型铸造, 假设合金的膨胀收缩可部分被移动的铸型抵消。计算应力所需的参数: 弹性模量、泊松比、热膨胀系数可通过 ProCAST 热力学数据库作为化学成分的函数自动计算。屈服应力参考文献[6-8]试验数据通过插值计算所得如表 2 所示, 硬化系数为 0.42。

表 2 42CrMo 合金不同温度下的屈服应力

温度/ $^\circ\text{C}$	屈服应力/MPa
850	78.15
950	65.15
1 050	46.45
1 150	37.70
1 250	29.60
1 350	22.00
1 450	5.00

应力场的计算应满足应力平衡微分方程与描述应力-应变关系的本构方程。

弹性区

$$\Delta\sigma = E \cdot \Delta\varepsilon \quad (3)$$

塑性区

$$\sigma = \sigma_0 + H \cdot \Delta\varepsilon^{pl} \quad (4)$$

式中 E ——与温度有关的弹性模量矢量;

H ——硬化系数;

σ_0 ——屈服极限矢量;

$\Delta\varepsilon^{pl}$ ——塑性应变增量。

应力平衡微分方程为

$$K_{ep} \Delta\delta = \Delta F + \Delta R \quad (5)$$

式中 K_{ep} ——弹塑性刚度矩阵;

$\Delta\delta$ ——位移增量

ΔF ——载荷增量引起的节点力增量;

ΔR ——初始应变增量和初始应力增量引起的节点力增量。

1.3 二次枝晶生长模型

本模型采用热焓法处理凝固潜热, 可在确保能量守恒、热焓曲线无奇异情况下, 利用严格的热焓减小来描述凝固过程。采用 RAPPAZ 等^[9]提出的基于高斯分布的连续形核模型, 主要包括铸型内表面处的面形核与熔融液体内部体形核两种参数。给定某一过冷度, 对应晶粒密度可通过沿分布函数积分求得。在存在温度梯度的凝固过程中, 枝晶的生长主要通过热扩散控制。枝晶生长的驱动力是界面过冷度, 主要包括成分过冷与动力学过冷, 这样, 柱状晶和等轴晶的生长可用 KGT(Kurz-Givoanola - Trivedi)模型描述。

该软件是基于铸件空间位置某点处凝固时间来计算枝晶臂间距, 可表达为^[10]

$$\lambda_1 = (Mt_f)^{1/3} \quad (6)$$

式中 M ——由合金性质决定的常数;

t_f ——局部凝固时间。

$$M = 166 \frac{\Gamma D_L}{m_L (1 - k_0) (w_0 - w_E)} \ln \frac{w_E}{w_0}$$

式中 Γ ——Gibbs-Thomson 系数;

D_L ——溶质在液相中的扩散系数;

m_L ——液相线斜率;

k_0 ——溶质平衡分配系数;

w_0 ——合金成分质量分数;

w_E ——共晶成分质量分数。

2 模拟结果及分析

2.1 温度场模拟结果与分析

模拟时在铸坯上取具有代表性的节点 13 825、4 605、8 977、11 901 如图 1 所示。

图1 模拟节点示意图

图2 分别是采用砂型和金属型进行铸造的铸件中心纵截面上图1所示节点的冷却曲线。

(a) 砂型铸造冷却曲线

(b) 金属型铸造冷却曲线

图2 铸件横截面不同厚度处节点冷却曲线

由图2知, 不管采用金属型还是砂型铸造, 冷却曲线大致经历了三个阶段, 浇注初期, 从浇注温度降到液相线温度时, 因不存在相变, 温度出现不同程度急剧下降; 在糊状区, 由于凝固释放出大量潜热抵消了一部分散热, 这一阶段冷却速度相对缓慢, 曲线变化平缓, 同时可看到图2a中与铸型接触的边角部13 825节点浇注初期因铸型的激冷作用降温幅度最大, 但在随后的凝固过程中因砂型散热慢使结晶潜热来不及释放, 温度反而上升; 当相变结束达到完全凝固温度时, 由于铸件各部分散热不同, 心部温度最高, 靠近铸型处温度较低, 边角部温度最低。

此后在内部热扩散作用下, 内外温差开始减小, 进入均热化阶段。对砂型铸造, 因整体散热较

慢, 不同壁厚处温度变化相对均匀。对金属型铸造, 因初期降温较快, 当铸坯外壁温度达到一定温度时, 铸坯的表面温度变化较小, 而铸坯内部温度随时间逐渐趋于表面温度。

2.2 热应力模拟结果与分析

2.2.1 凝固期间裂纹倾向性预测

金属液在凝固初期, 形成的枝晶不太发达, 凝固收缩产生的微裂纹可通过枝晶间液体的渗入而补充消除, 当凝固超过0.85的临界固相率时, 该区域分散在枝晶间的液膜如受到垂直于枝晶生长方向大于其强度的拉应力作用时, 将被撕裂而形成裂纹, 这时出现的微裂纹因长大的枝晶阻碍了液体的流动, 不能得到液体很好的补充成为以后裂纹扩展源。一般金属材料的抗拉强度为屈服应力的1.4~1.5倍, 故抗拉强度的判据临界值取屈服应力的1.4~1.5倍^[11]。

由此可以看出, 热裂纹形成的两个条件: 一是固相率大于0.85的处于糊状区的合金; 二是受到大于其强度的拉应力作用, 因第一主应力在三个主应力中应力值最大, 可选用第一主应力值判断其热裂情况。

2.2.2 完全凝固后裂纹倾向性预测

完全凝固后的铸坯如产生的热应力大于该温度下的屈服极限, 将产生冷裂。因此处于该阶段的铸坯可采用Mises等效应力与该温度下的屈服极限的比值来判断。比值大于1, 则会产生裂纹。

图3~8分别是在相同条件下采用砂型和金属型离心铸造取节点13 825、4 605、8 977、11 901的第一主应力、等效应力及凝固固相率图。

图3 砂型离心铸造第一主应力模拟结果

由图4、图7可以看出, 等效应力随着铸件冷却速度的增加而增加。铸件边角部位及与铸型接触的激冷层, 因冷却速度最快, 最先凝固, 热应力最大, 应力相对集中, 因此这两个部位是裂纹容易萌生发展的部位, 也是最先产生裂纹缺陷的部位。因此在铸件的凝固冷却过程中, 只要使得这两处不发

图4 砂型离心铸造等效应力模拟结果

图5 砂型离心铸造体积分模拟结果

图6 金属型铸造第一主应力模拟结果

图7 金属型离心铸造等效应力模拟结果

生裂纹,铸件的其他部位一般也不会发生裂纹。结合图3、图5可以看出,13 825边角节点因最先凝

固,收缩时受到拉应力作用,但因其冷却速度较慢,整个凝固冷却过程中,应力变化幅度并不大,在16 s时固相率达到1,第一主应力为4.09 MPa,可以判断其在凝固过程中不会产生热裂。而外表面中心部4 605节及内部8 977节点,凝固相对较晚,随着凝固的进行,压应力逐渐增大,也不会出现裂纹。由图4知,13 825节点冷却到41 s时热应力达到最大15.95 MPa,但在随后冷却过程中,由于潜热释放导致该处温度上升,金属变软释放了一部分应力,热应力随之快速减小,到450 s时减小到10.1 MPa,温度接近1 400 °C,此后因冷却速度变慢,应力在振荡中缓慢变化,这个过程中等效应力没有超过该温度下的屈服极限,不会出现裂纹。

图8 金属型离心铸造体积分模拟结果

由图6、图8知,13 825节点、4 605节点凝固初期,因相邻金属液对其的收缩阻力小,所受拉应力小,随着凝固的进行,相邻金属液相继凝固,这时收缩受到阻碍越来越大,当凝固接近到240 s时,应力达到了峰值,随着凝固的进行,凝固金属强度增强,抗裂纹缺陷能力增强,应力瞬间快速降低,待铸件完全凝固后,应力又开始增大。通过比较砂型与金属型两种铸造方式,由此可看出,控制激冷层冷却速度可有效防止裂纹的产生。

由图7知,合金液凝固到1 200 s时,13 825节点热应力达到78 MPa,对应温度802 °C,对照同温度下的屈服极限可知,此时快接近冷裂。840 s时,铸坯整体凝固体积分数已达到0.8以上,而铸坯外表面的温度大约是1 050 °C,已具有一定的高温强度,因此从避免铸坯裂纹产生,在高温强度足够的前提下,因铸坯辗扩的温度范围是1 000~1 250 °C,考虑到满足辗扩温度的要求,铸坯在温度1 050 °C左右出模是比较合适的。通过分析可以看出,铸件在铸型内停留时间越长,铸坯收缩量越大,裂纹倾向性越大;边角部位热应力最大,容易形成裂纹;浇注初期,由于铸型的激冷作用,铸坯与铸

型接触部位快速冷却，各部分温度梯度最大，热应力相对较大，容易形成裂纹；砂型与金属型相比，因冷却速度较慢，形成的热应力较小，不容易形成裂纹，对避免缺陷有利；金属型铸造可在外表面达 1 050 ℃左右温度时开型取件。

2.3 二次枝晶臂间距与凝固冷却速度关系模型

铸件的二次枝晶间距直接依赖于合金冷速和局部凝固时间，热梯度和凝固速度的函数关系为^[12]

$$d = k_1 (G\varepsilon)^{-a} \tag{7}$$

式中 k_1, a ——常数；

G ——温度梯度；

ε ——冷却速度。

因此可以看出二次枝晶臂间距与冷却速度之间呈指数关系。

冷却速度可按式(8)计算

$$\varepsilon = t_f / \Delta t_s \tag{8}$$

式中 t_f ——非平衡凝固温度区间；

Δt_s ——合金局部凝固时间。

图 9、10 为两种不同铸造方式下铸坯刚好完全凝固时枝晶臂间距分布云图。

图 9 900 s 时金属型二次枝晶臂间距分布图(cm)

图 10 6 800 s 时砂型二次枝晶臂间距分布图(cm)

通过二次枝晶臂间距及温度场模拟，动态获取某些节点的温度及凝固时间，通过式(8)可得到分析数据，如表 3 所示。

表 3 冷却速度与二次枝晶臂间距统计表

冷却速度/(℃/s)	二次枝晶臂间距/μm
10.300	20
1.390	30
0.430	40
0.300	50
0.200	60
0.045	73
0.033	80
0.029	100

采用 Origin 软件进行数据拟合回归处理，得到拟合曲线如图 11 所示。

图 11 二次枝晶臂间距和冷却速度拟合曲线

由拟合曲线得 42CrMo 合金离心铸坯二次枝晶臂间距和冷却速度间拟合函数关系

$$d = 34.8\varepsilon^{-0.26}$$

通过模拟结果动态显示，在金属凝固过程中，可以看到枝晶的生长经历了形成、生长到粗化的发展过程。枝晶生长时不仅有热量传递，还存在溶质原子的重新分配。当合金液温度降低到液相线温度时，通过形核，细小的二次枝晶开始出现，由于枝晶的生长具有择优取向性，沿着与温度梯度方向一致的枝晶会优先生长，而其他偏离温度梯度方向的枝晶则会在生长过程中被择优取向枝晶吞并，这样使得枝晶随着凝固固相分数的增加，枝晶会逐渐生长粗化，当二次枝晶臂尖端遇到相邻枝晶扩散场时，生长受到阻碍，将逐渐停止生长。因此可看出枝晶主要在凝固阶段形成，要改善组织的性能，控制凝固阶段的冷却速度是至关重要的。在 42CrMo 立式离心铸造凝固过程中，与铸型接触的铸坯外表面冷却速度最大，散热最快，心部散热最差，使得凝固前沿由外到内逐渐推进，从图 9、图 10 可看到二次枝晶的分布情况，外面边角部因边界效应，过冷度最大，二次枝晶臂间距最小，截面由外向内枝晶臂间距逐渐增大，中心部位达到最大。

比较图 9、图 10, 可看出采用金属型因冷却速度快, 整个铸坯由外到内枝晶臂间距都比同条件下的砂型铸造小, 凝固结束后多集中在 $30\sim 50\ \mu\text{m}$, 组织性能好。而采用砂型铸造的枝晶臂距离在铸件完全凝固时枝晶臂达到 $110\sim 120\ \mu\text{m}$, 同时, 由文献[4]知, 铸件的抗拉强度随着二次枝晶臂间距的减少而增加, 因此, 从改善组织性能来说, 采用金属型铸造要比砂型好。对比砂型与金属型两种铸造方式, 采用砂型铸造冷却速度慢, 冷却到 $1\ 300\ ^\circ\text{C}$ 大约用 $1.5\ \text{h}$, 出模时间长, 而金属型铸造冷却到 $1\ 050\ ^\circ\text{C}$ 只需十几分钟, 且采用砂型铸造组织相对金属型铸造要粗大得多, 因此采用金属型立式离心铸造, 可满足铸辊连续成形新工艺对铸件提出的高质量、高效率要求。

3 结论

(1) 通过热应力的有限元数值模拟, 利用提出的裂纹形成判据, 对两种不同铸造方式铸件的裂纹倾向性进行了预测。经分析, 无论采用哪种铸型, 热应力都随着时间的增大而增大; 因此, 铸件浇注后, 在铸坯强度足够的前提下, 及早开型取件对防止裂纹有利。边角部位、与铸型接触的铸坯表面, 因冷却速度快, 是裂纹最容易形成的部位。对砂型铸造, 因整体冷却速度慢, 高温下出模是不会形成裂纹的。而采用金属型铸造, 应通过衬砂或涂覆耐火材料降低金属的激冷作用, 以避免裂纹的形成。

(2) 通过温度场及微观组织的有限元数值模拟, 得到了采用不同铸型铸造的冷却曲线, 获得了对应冷却速度下铸件的二次枝晶臂间距, 建立冷却速度与二次枝晶臂距离的数学模型。经分析, 凝固过程的冷却速度越快, 得到的组织越好, 铸件质量越高。砂型铸造, 凝固结束后二次枝晶臂多集中在 $110\sim 120\ \mu\text{m}$, 金属型铸造凝固结束后二次枝晶臂间距仅为 $30\sim 50\ \mu\text{m}$, 组织性能优于砂型铸造。

(3) 通过冷却速度对铸件热裂趋势与二次枝晶臂间距的影响分析, 可以看出, 提高冷却速度, 可有效细化晶粒, 提高铸件质量, 但却增加了热裂趋势。 42CrMo 环件铸辊连续成形工艺, 要求高温出模时能保证铸件质量, 有效提高效率, 因此在铸造过程中只要能保证铸件无缺陷, 应优先采用金属型铸造。通过仿真可知采用金属型铸造, 42CrMo 环件在 $1\ 050\ ^\circ\text{C}$ 左右温度下出模可获得无缺陷铸件, 因此采用金属型铸造满足了 42CrMo 环件铸辊连续成形的高温出模工艺要求。

参 考 文 献

- [1] 许庆彦, 冯伟明, 柳百成, 等. 铝合金枝晶生长的数值模拟[J]. 金属学报, 2002, 38(8): 799-803.
XU Qingyan, FENG Weiming, LIU Baicheng, et al. Numerical simulation of dendrite growth of aluminum alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2002, 38(8): 799-803.
- [2] 吴士平, 张军, 徐琴, 等. 钛合金铸件立式离心铸造凝固组织的数值模拟研究[J]. 中国体视学与图像分析, 2010, 15(2): 134-140.
WU Shiping, ZHANG Jun, XU Qin, et al. Solidified microstructure simulation of the titanium castings made by vertical centrifugal casting[J]. Chinese Journal of Stereology and Image Analysis, 2010, 15(2): 134-140.
- [3] LI Changyun, WANG Kuangfei, XU Lei, et al. Research on mould filling and solidification of titanium alloy in vertical centrifugal casting[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2010, 39(3): 388-392.
- [4] JOEL H. Effect of cooling rate on dendrite arm spacing(DAS), eutectic cell count (ECC)and ultimate tensile strength (UTS) of austempered chilled ductile iron[J]. Materials and Design, 2000, 21: 1-8.
- [5] PEDRO R G, JOSÉ E S, WISLEI R O, et al. Mechanical properties as a function of microstructure and solidification thermal variables of Al-Si castings[J]. Materials Science and Engineering A, 2006, 421: 245-253.
- [6] LIN Y C, CHEN Mingsong, ZHONG Jue. Prediction of 42CrMo steel flow stress at high temperature and strain rate[J]. Mechanics Research Communications, 2008, 35: 142-150.
- [7] QUAN Guozheng, TONG Ying, LUO Gang, et al. A characterization for the flow behavior of 42CrMo steel[J]. Computational Materials Science, 2010, 50: 167-171.
- [8] 齐会萍. 基于铸坯的环件热辊扩过程组织演变与工艺参数研究[D]. 太原: 太原科技大学, 2012.
QI Huiping. Based on the slab of hot rolling ring process evolution ring process parameters research organization[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2012.
- [9] RAPPAZ M, THÉVOZ P H. Solute diffusion model for equiaxed dendritic growth: Analytical solution[J]. Acta Metallurgica, 1987, 35(12): 2929-2933.
- [10] 李日. 铸造工艺仿真 ProCAST 从入门到精通[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.
LI Ri. Casting process simulation ProCAST from entry to

master[M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2010.

- [11] 刘小刚, 康进武, 黄天佑, 等. 凝固过程应力场模拟技术在大型铸钢件中的应用[J]. 中国机械工程, 2006, 17(19): 2029-2033.

LIU Xiaogang, KANG Jinwu, HUANG Tianyou, et al. Application of modeling and simulation of thermal stress in solidification process of a heavy steel casting[J]. China Mechanical Engineering, 2006, 17(19): 2029-2033.

- [12] 贾丽敏, 徐达鸣, 郭景杰, 等. 离心铸造 TC4 合金冷却对其组织和力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(4): 767-773.

JIA Limin, XU Daming, GUO Jingjie, et al. Effect of

cooling rate on structure and tensile strength of centrifugally cast TC4 alloy in ceramic-shell mold[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(4): 767-773.

作者简介: 武永红, 女, 1973 年出生, 博士研究生。主要研究方向为材料加工、锻压设备及结构动力学分析。

E-mail: wyh1997@126.com

李永堂, 男, 1957 年出生, 教授, 博士研究生导师, 太原科技大学副校长, 材料科学与工程学科首席学科带头人。主要研究方向为材料加工先进制造技术及锻压设备理论与控制, 发表论文 150 余篇。

E-mail: liyongtang@tyustedu.cn

国家自然科学基金委员会机械工程学科 2012/2013 年度优秀结题项目简介

强噪声多声源陡畸变高速列车轴承声学诊断理论基础研究*

项目负责人: 孔凡让(E-mail: kongfr@ustc.edu.cn)

依托单位: 中国科学技术大学

项目批准号: 51075379

1. 项目简介

列车安全运行对保障人员安全, 较少财产损失具有重要意义。列车轮对轴承故障是列车最主要故障之一, 因此开展列车轴承故障诊断对保障我国铁路事业的蓬勃发展具有重要意义。本项目开展了列车轴承道旁声学诊断理论的基础研究, 主要解决三个核心问题: ① 强噪声问题, 即从轨边阵列麦克风采集到的含噪声信号中提取有效轴承信息; ② 多声源问题, 即从每个麦克风采集到的混合有多个轴承信息的信号中提取单个轴承的信号; ③ 陡畸变问题, 即校正静态麦克风采集到的动态运动的轴承导致的多普勒畸变信号。通过对这三个核心问题的研究, 为开发具有我国知识产权的轨边声学诊断系统提供了坚实的理论基础。

2. 主要创新点及其主要研究进展

针对以上三个核心问题, 本项目开展了一系列深入细致的研究, 进展和创新点总结如下。

(1) 针对强噪声问题, 发展了三系列能够增强含噪信号信噪比的方法: 基于随机共振原理的信号增强方法, 包括多尺度噪声调节随机共振, Woods-Saxon 随机共振, 三稳态随机共振等; 基于时频流形学习的信号增强方法, 包括小波包能量流非线性时频流形学习, 小波脊线提取时频流形学习等; 基于变尺度形态学滤波的信号增强方法。

(2) 针对多声源问题, 提出了两种从源信号中提取单个轴承信号的方法: 多变参数 Dopplerlet 匹配重构信号提取法; 变参数 Dopplerlet 的 S 变换脊线滤波反解重构信号提取法。

(3) 针对陡畸变问题, 发展了三种多普勒畸变信号校正方法: 基于运动学模型和莫尔斯声学理论的离散插值重采样校正方法; 基于时频脊线提取的频率间隔重采样校正方法; 基于循环 Laplace 小波的 Doppler 嵌入匹配诊断方法。

* 此项目在“第十一届设计与制造前沿国际会议(ICFDM2014)”上被评为优秀结题项目。