

半固态成型数值模拟的研究进展

闫洪华, 吉泽升

(哈尔滨理工大学 材料科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要: 综述了国内外关于数值模拟技术在半固态流变铸造过程、触变铸造过程及二次加热等方面的研究进展, 并展望了半固态成型数值模拟的应用前景及意义。同时, 采用商业有限元软件 DEFORM 3D TM 成功地模拟了半固态镁合金 AZ91D 的成型过程, 并利用自制的模具, 对 AZ91D 镁合金 570℃ 时的触变成型作了试验验证。通过对比得出模拟结果与试验结果基本吻合。

关键词: 固态成型; 触变成型; 数值模拟; 有限元

中图分类号: TG21

文献标识码: A

文章编号: 1002-2333(2006)01-0052-03

铸造过程数值模拟的研究始于 20 世纪 40 年代, 当时美国哥伦比亚大学的 Paschke 教授用大型模拟计算机对铸件凝固过程进行了研究^[1]。近年来, 作为计算机辅助铸造过程设计和生产的一部分, 铸造过程数值模拟技术的应用范围不断扩大, 已开始应用于半固态铸造^[2~5]。

采用计算机模拟技术模拟半固态成型过程对于成型工艺参数的确定、模具设计周期的缩短以及铸造工艺优化等无疑都具有重要的指导意义。

1 流变铸造过程的数值模拟

研究半固态浆料在型腔中的流动规律及流动特性, 对半固态流变铸造成形具有重要意义。试验表明, 浆料的表现粘度均与固相分数和剪切速率呈一定的函数关系^[6]。Ali Shah 等人^[7]建立了粘度模型:

$$\eta = k \dot{\gamma}^{n-1}$$

式中: k 是幂律系数, $n-1$ 是幂率指数。并利用计算流体动力学模型 (CFD), 采用流体软件模拟了半固态金属在毛细管粘度计中的流动情况。

M.Perez 等人^[8]研究了低固相分数 (<50%) 时含有固液两相金属合金的流变性。同时引入了格子模型模拟了浆料在剪切力下的聚合、分离过程。当达到稳态时, 计算了诱发的液相分数, 得出了粘度随固相分数和剪切速率的变化规律以及剪应力下三维原子团的结构形态和形核规律。模拟结果与试验结果基本吻合。

N. Tonmukayakul 等人^[9]应用 MHD (the magneto hydrodynamic stirring process) 研究了 A356 铝合金在转速不变的情况下的瞬时流变性, 使用高温流变仪测量, 得出了合金的瞬时流变性是一个转速的函数。并采用商业软件 Pandat 测出了指定温度下浆料的固相率。这与用流变学测量方法测出的温度为 597℃ 时的固相率是相吻合的。

利用有限的流变研究成果, Pierre Cezand 等人^[10]用一个新的 Micro-Macro 模型来描述了在大范围应变率下半固态材料的等温稳流特性。通过选择典型的微观结构组织说明了固液两相的空间分布以及变形机制。并且用有限元软件 Forge2 实现了这个 Micro-Macro 模型。同时用两

种本构关系模拟了压缩试验。其中一种本构关系是用 Norton-Hoff 模型来描述的典型的粘塑性材料, 另一种本构关系是用 Micro-Macro 模型描述的易软化的材料。分析了本构关系的影响并提出了自己的观点。

2 触变铸造过程的数值模拟

半固态合金具有一定的触变特性, 其形变抗力不仅与剪切速率有关, 还与时间有密切关系, 因此要跟踪流体微团变形历史^[11~13]。目前, 对触变成型过程的模拟研究大多在一些商业有限元平台上进行。C.G.Kang 等人^[14]通过有限元方法 (FEM) 实现了半固态铝合金涡旋形零件的近净成形。同时采用商业有限元软件 DEFORM3D 成功地分析了涡旋件的应力分布及固相率超过 55% 时的应变率, 并得出冲模行程越长, 有效应变率的变化随之急剧增加的结论。另外, C.G.Kang 等人^[15]还提出了一个新的有限元程序 Semi-Form, 并用它来预测了半固态材料中固相的畸变状况、充型缺陷以及液相的偏析。同时验证了 Semi-Form 是一种对触变成型优化和设计的有效而又经济的工具。

G.Fang 等人^[16]采用了三维刚塑性有限元法模拟分析了十字楔辊 (cross-wedge rolling 简称 CWR) 的成形过程。选用有限元软件 DEFORM-3D 模拟了 CWR 的整个成形情况。利用软件本身的自动调整重划分网格技术生成了四面体实体网格, 分析了成形件横截面的应力分布, 解释了工件中部的变细与破坏情况的原因。

Xiong ShangWu 等人^[17]采用了一种新的手段分析平面应变辊, 这种新方法是结合了 EFG (element free Galerkin) 和 BEM (boundary element method) 两种方法。其中 EFG 法是用工件的数学模型来预算辊所承受的破坏力、转矩和沿着辊表面的接触力, 同时应用 BEM 法计算辊的弹性变形。这两种数值方法的结合保证了用 EFG 法来预测沿辊表面方向的接触力来定义边界条件, 进而用 BEM 法对辊进行弹性分析。作者通过实验数据与理论预测的对比证实了这种方法的可靠性。

触变成型以塑性变形为主, 但因变形体是半固态, 其本构关系的描述与固体金属的本构关系有较大的差别。

国内外不少学者对半固态金属加工过程的模拟进行了大量研究工作。

Krzysztof Solek 等人^[18]对单相采用 Norton-Hoff 模型描述了加工过程中材料的机械性质,采用商业有限元软件 FORGE3 进行了数值模拟,研究半固态加工过程中的流动特性。这个本构方程经过了挤出试验的验证。通过模拟结果与试验结果进行对比,得出了触变铸造过程中材料的实际特性。

D.H.Kirkwood 等人^[19]对半固态合金的触变流动提出了一种新模型,这种模型与时间和剪切速率有关。用这种模型来预测当半固态圆柱试样在两压盘间快速压缩时的流动特性。模拟采用了 stefan 方程和 Flow-3D 模拟软件。模拟结果与试验结果一致。

李兴刚等人^[20]在 Gleeble-1500 材料热模拟试验机上实现了压缩试验。考察了温度在 510℃~570℃范围内及应变率在 0.1~20s⁻¹ 范围内的 AZ91D 镁合金半固态的变形特性,在刚粘塑性有限元理论和实验数据的基础上,用回归法确立了本构方程 $\sigma = A \cdot \dot{\epsilon}^{m(T+C)} \cdot \epsilon^{n(T+E)} \cdot e^{F(T+G\sigma)}$ 。并用商业有限元软件 DEFORM-3D 模拟了实际最小尺寸的汽车车轮的触变成型过程。由此获得了触变过程中的流场和应力应变场。同时分析了应力、应变率和温度之间的关系。

另外,由于各自模拟的实际情况存在差异,许多研究者开发了有针对性的模拟系统。国内崔成林等人^[21]建立了连续方程、动量方程和守恒标量的方程,开发了适用于半固态合金触变铸造充型过程的数值模拟系统。并在自制的半固态合金触变成型装置上进行了半固态合金成型工艺的研究。其数值模拟结果与试验充型结果基本相符。齐乐华等人^[22]针对液-固挤压复合材料管材的成型过程,采用热刚塑性准耦合有限元法进行了数值模拟,通过自行开发的有限元模拟系统软件,利用网格重新划分技术,得到了复合材料半固态成形过程的应力场、应变场及变形力。并通过试验验证了该系统的可靠性。

3 二次加热的数值模拟

半固态的二次加热(局部重熔)的目的是为了获得不同工艺所需的固相体积分数,同时获得触变成型所需的有利组织结构。为了能了解坯料凝固过程的组织演变,Michel Bellet 等人^[23]对二元合金凝固过程中两相的热力学模型作了基本假设,认为只有固相和液相。由于微观上,液相是牛顿流体,而固相是低动力流体,因此认为宏观上质量和动量守恒、局部热平衡、能量守恒。并采用二维有限元作了等温模拟,特别清晰地描述了混合相在整个凝固过程中的演变过程。

坯料的二次加热的作用在半固态触变成型工艺中也是承上启下的,由于在生产中定量地检测坯料局部重熔程度几乎无法实现,因此以试验为基础进行工艺优化的努力十分艰难。先进的数值模拟技术给我们提供了新的切入点。

张恒华等人^[24]用带多匝线圈的中频感应加热器对不同条件不同尺寸的 A356 铝合金坯料进行加热,并通过有

限元模拟和实验测量的方法详细地研究了被加热坯料的温度场。同时介绍了一种可以有效模拟不同尺寸和类型的铝合金坯料的温度场的模拟方法。通过模拟方便地优化了感应加热过程中的参数,来满足半固态成形的要求。李海江等人^[25]对感应加热进行了有限元理论分析,采用商业用有限元软件 ANSYS 对半固态坯料触变成型感应加热进行了数值模拟。模拟了频率、加热时间、线圈电流强度系数、坯料尺寸半径、线圈尺寸大小等参数对坯料温度的影响。

管仁国等人^[26]利用 ANSYS 有限元分析软件包中 FLOTRAN CFD141 单元,对制备 2Al1 半固态材料过程中耦合场进行了数值模拟,得出了温度场的分布规律。由于轧辊的转动,使合金等温线发生偏移,近轧辊侧温度偏高。

二次加热的要求是均匀、迅速,因此目前半固态成形普遍采用电磁感应加热。这种方法可以根据需要快速调整加热参数,能耗也相对较低。

电磁感应加热有限元模拟问题是电磁感应-热相互耦合分析的问题,交流电场分析计算出热源的数据,作为瞬态热分析的热载荷求解温度场随时间的变化。Dominique Bouchard 等人^[27]描述了半固态 A356 铝合金铸造工艺中的接触热交换率的特点。分别考察了暂态和稳态时的接触热交换率的变化,并把这个测量出的参数带入数学模型中,用 Procast 软件模拟了零件铸造冷却过程中的温度变化。模拟结果说明冷却 30s 后脱模较好,这与实际铸造实验中观察到的是相符的。

4 半固态 AZ91D 镁合金触变成型的数值模拟及实验验证

模拟试验是在 DEFORM-3DTM 上进行的,在 DEFORM-3DTM 的前处理器中建立好几何模型和物理模型(包括材料的材料特性、成形温度、模具和坯料之间的摩擦关系等)以后,设定各种控制参数,如非线性方程迭代解法、增量步长、网格重画控制参数等等^[28],同时保存好数据库文件,然后就可以用求解器进行计算求解了。模拟计算结果如图 1 所示。

验证试验是把 AZ91D 镁合金用 SIMA 法制成半固态坯料,然后把模具拿到电阻炉内进行 300℃预热;把加工好的半固态坯料试样放入预热好的模具中,一起放置在液压万能试验机上的电阻炉子里阶段式升温;半固态等温温度为 570℃,分别等温不同的时间 5min、15min、30min、45min、60min;到时间后在 WE-60 液压万能试验机上进行半固态流动压缩试验。成型结束,马上连同模具一起水淬;最后取出成形件,打磨模具。试验结果如图 2 所示。从图 1、2 的对比中可以看出模拟结果与试验结果基本吻合。

5 半固态成型数值模拟的发展前景

目前对半固态成型的数值模拟大部分都采用各种商业有限元软件,这些软件用起来的确比较方便,但由于这些软件开发的适用领域比较广,应用到具体的某一领域时考虑的因素比较粗线条化,大多应用时都需做一些假设,所以模拟结果和真实的试验情况还是有一定的差

距。故对模拟半固态成型时还需找到符合半固态材料实际情况的真实数学、物理模型。同时,针对粘度随时间的变化关系、模具内的热交换、触变成型时坯料和模具之间的摩擦及流变成形时浆料的凝固过程等复杂现象作出具体的理论计算。



[参考文献]

- [1] 罗守靖,田文彤,谢水生.半固态加工技术及应用[J].中国有色金属学报,2000,10(6):765-773.
- [2] 王渠东,等.镁合金及其成形技术的国内外动态与发展[J].世界科技研究与发展,2004,26(3):39-45.
- [3] 乐启炽,等.镁合金及其成形工艺与应用状况[J].材料导报,2002,16(12):12-16.
- [4] 肖泽辉,等.镁合金的应用前景和半固态成形的实践[J].机械工人(热加工),2003,(2):10-13.
- [5] 李元东,等.镁合金半固态成形的现状及发展前景[J].半固态加工特种铸造及有色合金,2002,压铸专刊:270-273.
- [6] 甄子胜,毛卫民,赵爱民,等.半固态镁合金的研究进展[J].特种铸造及有色合金,2001,(6):32-35.
- [7] Alishah, Edw in O Connor, Dem ot b rabazon, Lisa Looney, Design of a high shear rate capillary viscometer for semi-solid metals[A]. The 8th S2P International Conferences [C]. Limassol Cyprus, 2004. [8] M. PEREZ et al Computer simulation of the microstructure and rheology of semi-solid Al alloys under shear [J]. Semi-solid Alloys under shear, 2000, (48):3773-3782.
- [9] N. Tonm ukayakul Q. Y. Pan, A. N. Alexandrou, and D. Apelian. Transient flow characteristics and properties of semi-solid aluminum alloy A356 [A]. The 8th S2P International Conferences [C]. Limassol Cyprus, 2004.
- [10] P. Erre Cezard, V. éronique Favier, R. égis B. got, M. arce Berveiller, Marc Robelet Micro-Macro modeling of the steady state semi-solid behavior and finite elements in simulation [A]. The 8th S2P International Conferences [C]. Limassol Cyprus, 2004.
- [11] 廖敦明,林汉同等.镁合金半固态铸造工艺及其数值模拟研究进展[J].特种铸造及有色合金,2002,(压铸专刊):275-278.
- [12] 高志强,王云华,苏华钦.半固态合金触变铸造数值模拟方法的研究[J].特种铸造及有色合金,1997(6):8-12.
- [13] 沈健,谢水生,石力开.半固态金属加工工艺过程的模拟进展[J].稀有金属,1999,23(6):431-435.
- [14] C. G. Kanga, H. K. Jung, K. W. Jung. Thixoforming of an aluminum component with a die designed by process simulation [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, (111):37-41.
- [15] C. G. Kanga, P. K. Seob, M. D. Lim. b Forging process analysis with arbitrary shaped die in semi-solid material with high solid fraction [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2003, (45):1949-1974.
- [16] G. Fang, L. P. Le, J. P. Zeng. Three-dimensional rigid-plastic finite element simulation for the two-roll cross-wedge rolling process [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, (149):245-249.
- [17] X. ong Shangwu, J. M. C. Rodrigues, P. A. F. Martins. Simulation of plane strain rolling through a combined element free Galerkin-boundary element approach [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, (159):214-223.
- [18] Krzysztof Soek, Tomasz Stuczyński, Andrzej Bobrzeski et al. Detailed computer simulations of manufacturing of test incomplete casts [A]. The 8th S2P International Conferences [C]. Limassol, Cyprus, 2004.
- [19] D. H. Kirkwood and P. Ward. Modeling of the isotropic breakdown [A]. The 8th S2P International Conferences [C]. Limassol, Cyprus, 2004.
- [20] X. inggang Li, Shu sheng Xie, Yunxiu Wang. Rigid-viscoplastic finite element analysis on semi-solid thixoforming automobile wheel of AZ91D magnesium alloy [A]. The 8th S2P International Conferences [C]. Limassol, Cyprus, 2004.
- [21] 崔成林,毛卫民,钟雪友.半固态合金触变铸造成形充型过程数值模拟的初步研究[J].辽宁工学院学报,1999,19(1):7-12.
- [22] 齐乐华,崔培玲,史忠科,等.液-固挤压复合材料管材成形过程的数值模拟[J].机械工程学报,2002,38(7):102-106.
- [23] Michele Bellet, Steven Le Corre, Victor D. Fachinotti. A 2-phase finite element model to study concurrent fluid flow and solid deformation occurring in mushy during the solidification of metallic alloys [A]. The 8th S2P International Conferences [C]. Limassol, Cyprus, 2004.
- [24] Zhang Henghua, Shao Guangjie, Xu Luoping, Xu Lin, Tang Xuan. Simulation and optimization of induction heating process of A356 aluminum alloy to semi-solid state [A]. The 8th S2P International Conferences [C]. Limassol, Cyprus, 2004.
- [25] 李海江,夏巨湛,闫洪,等.半固态触变成型坯料感应加热的数值模拟[J].金属成形工艺,2003,21(1):30-34.
- [26] 管仁国,温景林,刘相华.单辊搅拌技术制备 2A11 半固态材料过程的数值模拟[J].东北大学学报(自然科学版),2002,23(3):255-259.
- [27] Dominique Bouchard, Jos é e Co bert Fr é d é ric P éneau. Characterization of contact heat transfer coefficients and mathematical modeling of a semi-solid aluminum die casting [A]. The 8th S2P International Conferences [C]. Limassol, Cyprus, 2004.
- [28] 姜巨福.新 SIMA 法制备 AZ91D 半固态坯及其触变模锻研究[D].学位论文,2005(6):89-90. (编辑 黄 荻)

作者简介:闫洪华(1981-),女,硕士研究生。

吉泽生(1962),男,博士学位教授,研究方向为有色金属压铸及金属改性。

收稿日期:2005-09-19