复合材料学报 Acta Materiae Compositae Sinica
第26卷 第4期 8月 2009年
Vol. 26 No. 4 August 2009

文章编号：1000-3851(2009)04-0089-06

数值模拟在金属基复合材料铸造性能研究上的应用

苏大为，赵玉涛*，陈 刚，周 堃，汪 旭
（江苏大学 材料科学与工程学院，镇江 212013）

摘 要： 研究了添加增强颗粒对复合材料铸造性能的影响。根据体积分数与各热物性参数之间的函数关系式对ProCAST的数据库进行二次开发，建立了金属基复合材料的物性参数数据库，从而得到增强颗粒的体积分数及合金成分对金属基复合材料的铸造性能的影响关系。以金属型重力铸造摩托车车轮为实际对象，研究了体积分数为5%的Al_2O_3颗粒增强铝基复合材料Al_2O_3/A356.2的铸造性能。计算结果表明：加入颗粒后熔体黏度明显增加，导致复合材料流动性降低，轮辐、轮辋薄壁处均出现了收缩缺陷。通过在合金含量允许的范围内提高硅的含量ω(Si)=7.5%可以延长浇注温度到液相线温度的时间，同时降低结晶温度间隔，缩短固液共存时间，提高熔化潜热，从而提高熔体的流动性，增加补缩能力，使轮辐、轮辋薄壁位置的缩松、缩孔明显减少、消失。

关键词： 金属基复合材料；颗粒增强；铸造性能；数值分析；二次开发
中图分类号： TG146.2+1 **文献标志码：** A

Application of numerical simulation in the casting properties of metal matrix composites

SU Dawei, ZHAO Yutao*, CHEN Gang, ZHOU Kun, WANG Xu
(School of Material Science and Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: The effect of the addition of reinforcing particles on the casting properties of metal matrix composites was studied by numerical simulation. A database of ProCAST was developed based on the function equation between the volume fraction of reinforcing particles and physical property parameters. Gravity die casting of motorcycle wheels was taken as an example to study the casting property of the 5% Al_2O_3 particle reinforced aluminum matrix composites. The calculated results indicate that the fluidity of the aluminum matrix composites tends to decrease because of the addition of the particles. Melt viscosity of the composite is higher than A356.2. Shrinkage porosity defect appears both in the spoke and rim of the wheel. The mass fraction of silicon is enhanced by 7.5% in the allowed range. The temperature interval from pouring temperature to liquidus temperature can be increased and the crystallization temperature interval can be reduced synchronously. The latent heat of fusion is increased, so as to shorten the solid-liquid coexistence time, enhancing the fluidity of melt and feeding capacity. The shrinkage porosity defect in the spoke and rim of the wheel is decreased and eliminated.

Keywords: metal matrix composites; particle reinforcement; casting property; numerical analysis; secondary development

金属基复合材料由于融合了金属与陶瓷、金属与金属间化合物的特性，因此既具有优异的力学性能，又具有导电、导热、耐磨损、尺寸稳定等一系列物理化学特性，是一种优良的结构材料[1-2]。其在航空航天、航海、建筑、医疗、电子和其它工业部门应用前景广阔，已成为近年来纳米复合材料及金属功能材料中的研究热点之一。在众多的金属基复合材料制备技术中，原位复合材料以其生产工艺简单、增强相与基体材料界面结合牢固及强化效果好而受到材料工作者的重视[3-4]。但由于增强颗粒的存在导致金属基复合材料黏度增加，流动性下降，铸造凝固过程与一般合金有很大的差异，更容易产生各种铸造缺陷，增加了实际生产的难度，提高了生产成本，从而限制了该材料的工业化大生

收稿日期： 2008-09-01；**收修改稿日期：** 2009-01-09
基金项目： 863国家高技术研究发展计划(2007AA03CZ548)
通讯作者： 赵王涛，教授，博士生导师，主要从事高性能金属材料、金属基复合材料、材料近成型加工技术的基础研究及其在航空、汽车、先进制造业上的应用研究 E-mail：zhaoyt@ujs.edu.cn

产。因此，铸造性能控制技术成为突破金属基复合材料实际应用瓶颈的关键技术，其研究有很大的实际价值。

利用计算机模拟技术显示铸件充型及凝固的全过程，可优化铸造工艺、减少或消除铸造缺陷、提高产品的成品率，缩短开发周期、降低成本，对颗粒增强金属基复合材料构件铸造性能的研究具有显著的优势和作用。本研究中选用 ESI 公司的 ProCAST 作为铸造充型凝固的计算工具。

1　金属基复合材料的物性参数

由于复合材料中含有一定体积分数的增强颗粒，材料的热物理性质、凝固潜热释放都发生了变化。这里将复合材料看作颗粒与基体的混合体，根据复合材料性能混合准则[5-6]对热物性参数作出如下修正。

（1）复合材料的导热系数 k_c 按下式计算：

$$k_c = k_m(1-\varphi_P) + k_P\varphi_P \tag{1}$$

式中：k_m 和 k_P 分别为基体金属和颗粒的导热系数；φ_P 为颗粒的体积分数。

（2）复合材料的密度 ρ_c，按下式计算：

$$\rho_c = \rho_m(1-\varphi_P) + \rho_P\varphi_P \tag{2}$$

式中，ρ_m 和 ρ_P 分别为基体金属和增强颗粒的密度。

（3）复合材料的比热容 c_c，按下式计算：

$$c_c = c_m(1-w_P) + c_P w_P \tag{3}$$

式中：c_m 和 c_P 分别为基体金属和增强颗粒的比热容；w_P 为颗粒的质量分数：$w_P=\rho_P\varphi_P/\rho_c$。

（4）增强体的体积分数 $\varphi_P<0.01$ 时，复合熔体的黏度可由 Einstein's 公式[6]近似表达为

$$\eta_c = \eta_m(1+2.5\varphi_P) \tag{4}$$

增强体的体积分数为 $0.01<\varphi_P<0.25$ 时[6]

$$\eta_c = \eta_m(1+2.5\varphi_P+10.52\varphi_P^2) \tag{5}$$

式中：η_c 为复合熔体的黏度；η_m 为未加颗粒前基体熔体的黏度。

当增强颗粒浓密时，就需要考虑诸如水力学的交互作用、颗粒的旋转、颗粒之间的碰撞、颗粒的结块等问题。颗粒体积分数较高时，黏度与浓度之间不再成线性关系。结果，流变问题的预测出现困难。Thomas[6]提出了黏度与高体积分数增强颗粒（60%）的复合材料的半经验公式：

$$\eta_c = \eta_m[1+2.5\varphi_P+10.25\varphi_P^2+0.00273\exp(16.6\varphi_P)] \tag{6}$$

颗粒形状的影响效应可以用颗粒几何形状的纵横比来表征，如椭圆体形状的颗粒对黏度的影响公式[6]：

$$\eta_c = \eta_m(1+2.5\varphi_P) + \frac{33}{15\pi}\left(\frac{1}{\xi-1}\right)\varphi_P \tag{7}$$

式中，ξ 是增强颗粒纵横比。

Wang 等人[6]发展了复合材料熔体的黏度与颗粒尺寸、形状和体积分数的等式关系：

$$\eta_c = \eta_m\left[\frac{\xi(1+D_P^{0.95})}{0.01+37.35D_P^{0.95}}\varphi_P\right] \tag{8}$$

式中，D_P 是球形颗粒的直径。

2　金属基复合材料性能计算程序的开发

为适应不同的性能需要可选用不同的颗粒作为增强体，主要选用的颗粒材料是现有陶瓷颗粒，常用的颗粒增强体的性能如表 1 所示。

表 1　常用颗粒增强体的物理性能[7]

Table 1　Physical property of frequent particle-reinforced[7]

Particle	Density/ ($g\cdot cm^{-3}$)	Melting temperature/℃	Coefficient of thermal expansion/$℃^{-1}$	Conductivity/ ($W(m\cdot ℃)^{-1}$)	Hardness/ ($kg\cdot mm^{-2}$)	Flexural strength/MPa	Young's modulus/GPa
SiC	3.21	2700	4.0×10^{-6}	0.18	2700	400～500	
B_4C	2.52	2450			3000	300～500	360～460
TiC	4.92	3300			2600	500	
Al_2O_3		2050					
Si_3N_4	3.20～3.35	2100		0.03～0.07	HRA 89～93	900	330
$Al_2O_3 2SiO_2$	3.17	1850			3250	～1200	
TiB_2	4.5	2980					

选定合适的基体和增强颗粒后，根据以上复合材料性能混合准则，可以计算得到任意体积分数下的复合材料的热物性参数，建立起体积分数与各热物性参数之间的函数关系式，对 ProCAST 的数据库进行二次开发，建立了金属基复合材料的数据库，从而得到复合材料的颗粒体积分数及合金成分对其铸造性能的影响，图 1 为二次开发的金属基复合材料性能计算程序。

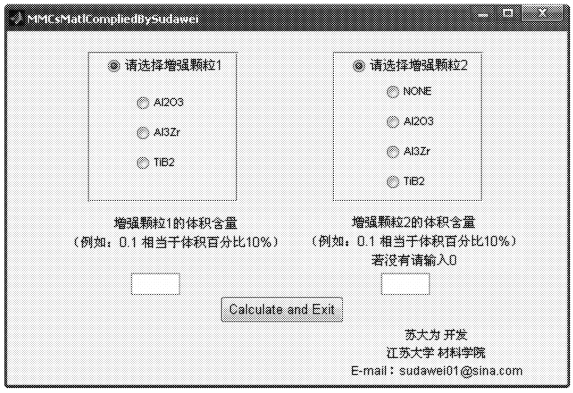

图 1　金属基复合材料性能计算程序

Fig. 1　Calculation program of physical properties for metal matrix composites

通过开发的金属基复合材料性能计算程序可以为铸造性能的研究提供流场、温度场的计算参数，进而深入研究金属基复合材料的铸造性能。采取相应的措施(包括在允许的范围内调解合金的成分、改变增强颗粒的体积分数/质量分数、调整铸造工艺等)以消除铸造缺陷，最终获得有良好铸造性能的复合材料，完成生产需要。整个分析流程如图 2 所示。

3　计算实例

本文中以某铝业 LMC499－2 型(15 inch×4.5 inch×9.76 kg)摩托车车轮为对象，研究了体积分数为 5%的 Al_2O_3 颗粒增强 A356.2 铝基复合材料的铸造性能。基体 A356.2 成分的质量分数为 $\omega(Si)=7\%$，$\omega(Mg)=0.33\%$。利用二次开发的金属基复合材料性能计算程序计算得到体积分数 5% Al_2O_3/A356.2 复合材料的导热系数、密度、黏度与温度之间的数值关系，如图 3 所示，并与基体材料 A356.2 的导热系数、密度、黏度相比，复合材料的密度和黏度明显比基体材料高，而导热系数有所下降，这充分说明了增强体的存在对复合材料的热物理性能有很大影响。

利用厂方提供的模具以及产品二维图纸，通过 CAD 软件做出模具和铸件的三维造型图，如图 4(模具)和图 5(铸件毛坯)，图 6 为 LMC499－2 铸件毛坯有限元网格剖分图[8]。

铸型材料上模、下模均为 35CrMoA 钢，侧模、冒口材料为 QT500－7A，浇口、下模芯、分流锥材料为 $3Cr_2W_8V$(H13)。

(1) 模具的预热温度。模具侧模预热温度为 340℃、下模 380℃、上模 400℃，模具的预热温度满足 $T_{侧模}<T_{上模}<T_{下模}$ 的原则，是合理的工艺设计。

(2) 浇注温度、速度。工艺工程师制定的生产 LMC499－2 的重力浇注时间为 6～7 s，生产周期为 3 分 20 秒(200 s)，浇注温度为 715℃±15℃，根据现场观察浇注时浇杯中放置了过滤网。

(3) 模具冷却系统的设置。图 7 为 LMC499－2 型号车轮的模具剖视图。目前，生产时使用的冷却系统设置为：1 分 30 秒到 2 分 30 秒下型芯冷却管道水冷的冷却方式。

4　计算结果及分析

金属基复合材料性能计算数学物理模型及具体

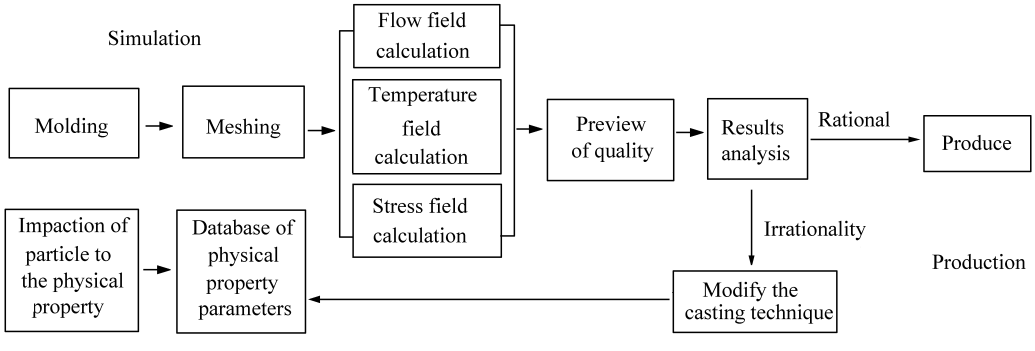

图 2　分析流程图

Fig. 2　Flow chart of analysis

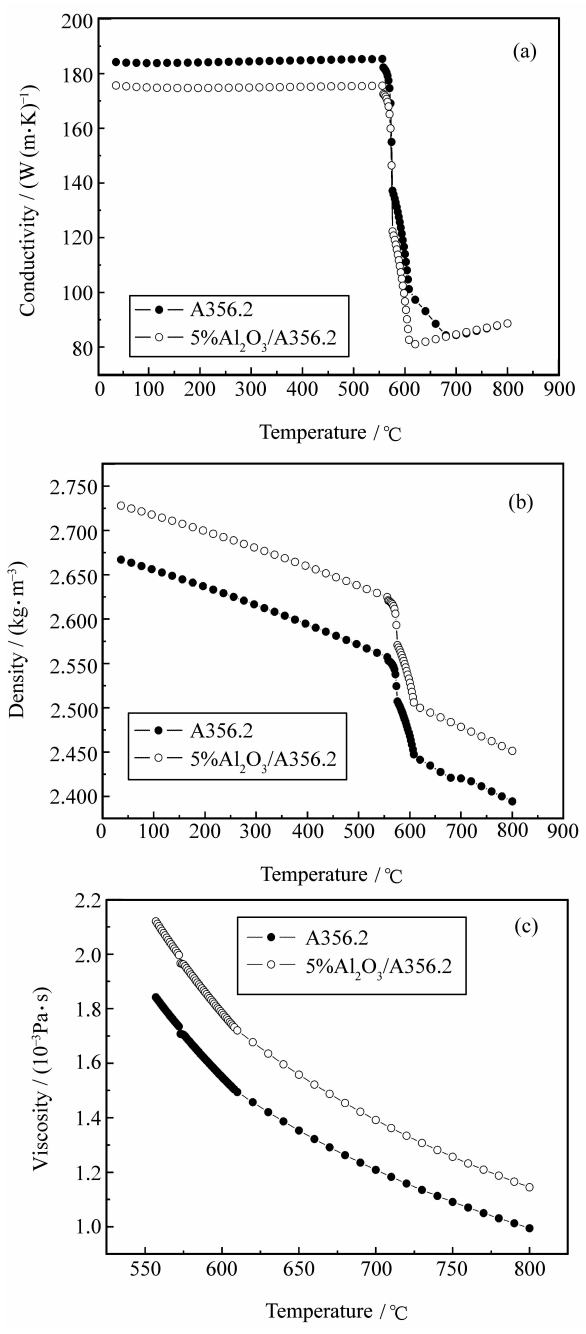

图 3　A356.2 及 5%Al_2O_3/A356.2 复合材料导热系数温度函数(a)、密度的温度函数(b)、黏度的温度函数(c)

Fig. 3　Temperature function of conductivity(a), temperature function of density(b), temperature function of viscosity(c) of A356.2 and 5%Al_2O_3/A356.2 composite

计算步骤见文献[9－10]。将上述各边值条件以及冷却参数附值进行计算，得到了 LMC499－2 的充型和凝固过程的温度场以及凝固时各部分的凝固比率与时间的关系。

图 8 为复合材料在模具型腔内凝固的过程，可

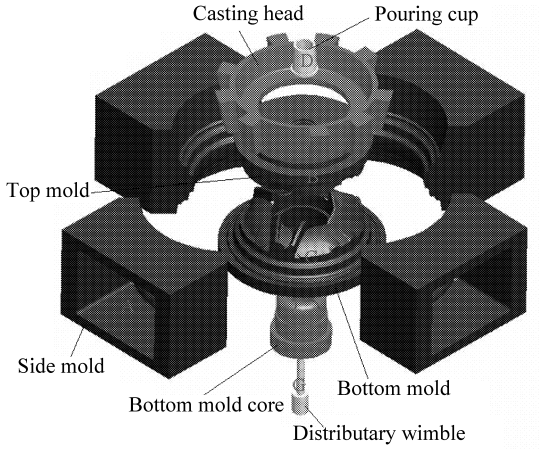

图 4　LMC499－2 模具造型图

Fig. 4　Molds of LMC499－2

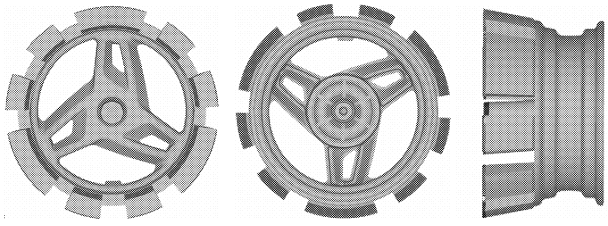

图 5　LMC499－2 车轮的计算机三维造型(含浇冒口)

Fig. 5　3D sculpt of LMC499－2 wheel

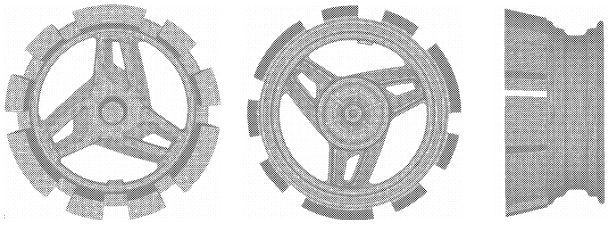

图 6　LMC499－2 铸件毛坯的有限元网格剖分图

Fig. 6　Mesh of LMC499－2 wheel

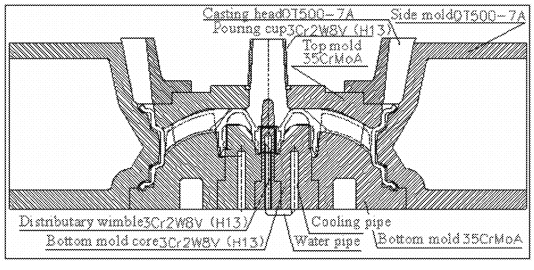

图 7　LMC499－2 的模具布置图

Fig. 7　Mold cooling system of LMC499－2

以看出，体积分数为 5%Al_2O_3/A356.2 颗粒增强铝基复合材料的流动性明显降低，尤其是轮辐、轮

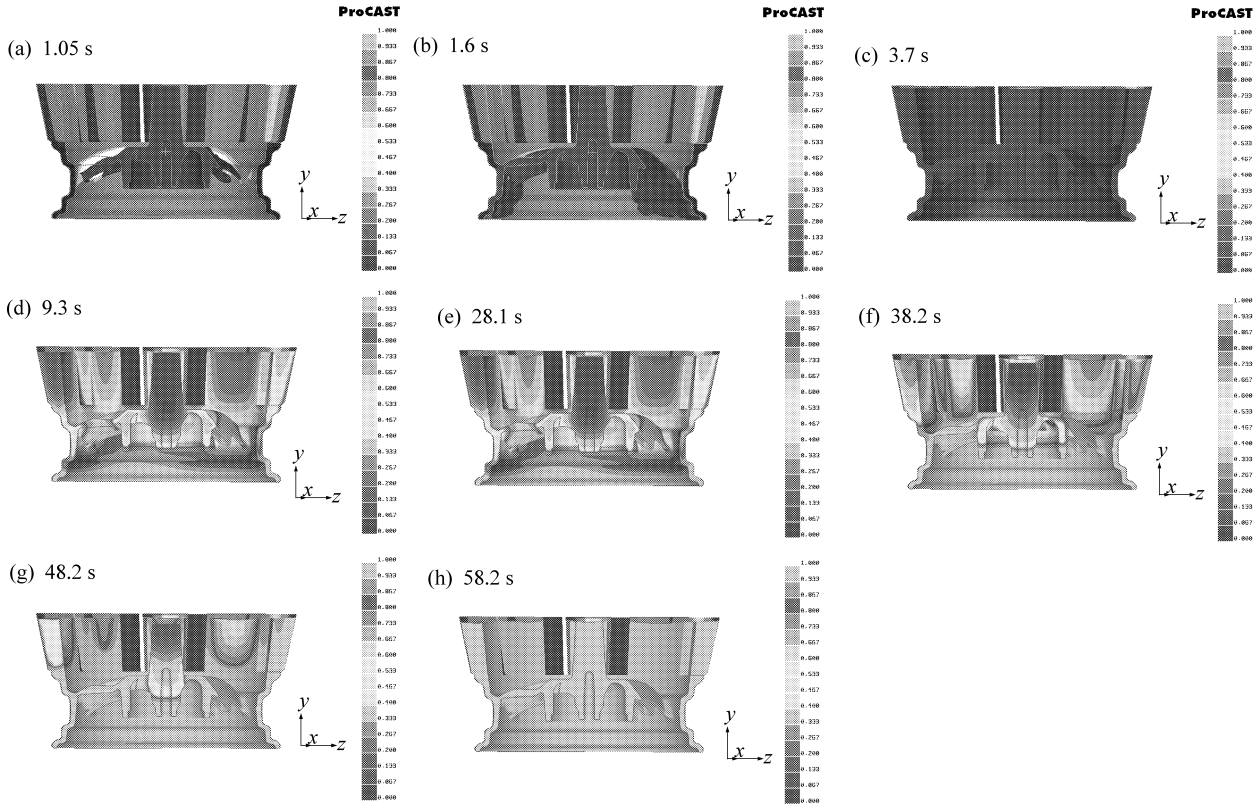

图 8　5%Al_2O_3/A356.2 复合材料的充型凝固过程(1.05～58.2 s)

Fig. 8　Filling and solidification process of 5%Al_2O_3/A356.2 composite(1.05～58.2 s)

辋薄壁处，由于复合材料黏度的增加，导致材料的补缩能力下降。

凝固过程中，每个单元均需经历液态/固液共存区和固态。而具有补缩能力的单元不仅仅是完全处于液态的单元，也不是所有的固液两相区的单元都具有补缩能力。正确的情况是：当单元的固相率高于一个临界值时，就不再具有流动能力，因此也就不再具有补缩能力。在收缩缺陷预测过程中首先要动态判断孤立热节，计算每个时间步长内各孤立热节的收缩量。多热节判断就是判断铸件凝固过程中被分隔的热节数目、大小和位置，在此基础上进行收缩量计算和补缩，从而确定出各热节的收缩量和收缩位置及大小。

图 9 为按照多热节判断车轮铸件凝固后最终收缩缺陷的结果。从图中收缩缺陷分布可以明显看出，除了浇、冒口产生正常的收缩缺陷外，轮辋、轮辐薄壁处均出现了收缩缺陷，这是由于加入增强颗粒后熔体的黏度明显增加，降低了流动性以及补缩能力。

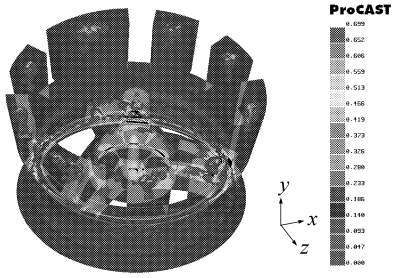

图 9　5%Al_2O_3/A356.2 复合材料的收缩缺陷分布图

Fig. 9　Distributing chart of shrinkage porosity of 5%Al_2O_3/A356.2 composite

5　工艺改进方案

提高硅的含量可以增加浇注温度到液相线温度的时间，同时降低结晶温度间隔(即准固相区温度范围缩小)，缩短固液共存时间，提高熔体的流动性；另外，Si 的熔化潜热比基体 Al 的熔化潜热大很多，因此流动性随着 Si 含量的增加而增加[11]，增加补缩能力，通过在允许的合金含量范围内提高硅的含量(取上限 ω(Si)＝7.5%；ω(Mg)＝0.33%)，

再次进行计算，收缩缺陷结果如图 10 所示。

适当增加硅的含量，提高复合材料熔体的补缩能力，轮辐、轮辋薄壁位置的缩松、缩孔明显减少、消失。

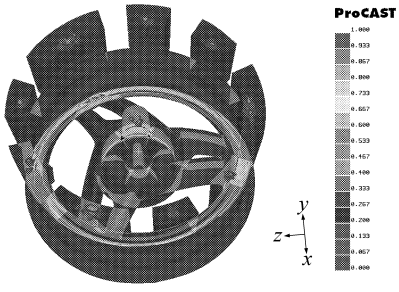

图 10　5%Al_2O_3/A356.2 ω(Si)=7.5%的收缩缺陷分布图

Fig. 10　Distributing chart of shrinkage porosity of 5%Al_2O_3/A356.2 ω(Si)=7.5%

6　结　论

（1）研究了增强颗粒的添加对复合材料铸造性能的影响，根据体积分数与各热物性参数之间的函数关系式对 ProCAST 的数据库进行二次开发，建立了金属基复合材料的物性参数数据库，从而得到增强颗粒的体积分数及合金成分对金属基复合材料铸造性能的影响关系。

（2）计算结果显示，加入颗粒后熔体黏度明显增加，导致复合材料流动性降低，体积分数为 5% Al_2O_3/A356.2 颗粒增强铝基复合材料金属型重力铸造摩托车车轮的轮辐、轮辋薄壁处均出现了收缩缺陷。

（3）在合金含量允许的范围内提高硅的含量，取上限 ω(Si)=7.5%，可以增加浇注温度到液相线温度的时间，同时降低结晶温度间隔（即准固相区温度范围减小），缩短固液共存时间，提高熔化潜热，从而提高熔体的流动性，增加补缩能力，使轮辐、轮辋薄壁位置的缩松、缩孔明显减少、消失。

（4）利用二次开发的金属基复合材料的物性参数数据库通过计算机可视化技术显示铸件充型及凝固的全过程，从而优化铸造工艺、减少或消除铸造缺陷、提高产品的成品率，缩短开发周期、降低成本，这对颗粒增强金属基复合材料构件铸造性能的研究具有显著的优势和作用。

参考文献：

[1] Pelleg J，Ashkenazi D. The influence of third element on the interface reactions in metal-composites：Al-graphite system [J]. Mater Sci Eng A，2000，281(1/2)：239-247.

[2] Chen J K，Beraun J E. A simple model for interfacial phase growth in metal matrix composites [J]. Composites Part A，2000，31(7)：727-731.

[3] 谢贤清，张　荻，刘金水. TiC/Za43 复合材料的组织及热膨胀性能研究 [J]. 热加工工艺，2001(3)：8-10.
Xie Xianqing，Zhang Di，Liu Jinshui. Study on microstructure and thermal expansion properties of TiC particulate reinforced ZA43 matrix composite [J]. Hot Working Technology，2001(3)：8-10.

[4] Orlave A. Sub grain size in view of composite model of dislocation structure [J]. Mater Sci Eng A，2001，297(1/2)：281-285.

[5] Shangguan D，Ahuja S，Stefanescu D M. An analytical model for the interaction between an insoluble particle and an advancing solid/liquid interface [J]. Metallurgical and Materials Transactions A，1992：23(2)：669-680.

[6] Ravi K R，Pillai R M，Amaranathan K R，Pai B C，Chakraborty M. Fluidity of aluminium alloys and composites：A review [J]. Journal of Alloys and Composites，2008，456(1/2)：201-210.

[7] 赵玉涛，戴起勋，陈　刚. 金属基复合材料 [M]. 北京：机械工业出版社，2007：22.
Zhao Yutao，Dai Qixun，Chen Gang. Metal matrix composites [M]. Beijing：China Machine Press，2007：22.

[8] 苏大为，赵玉涛，王雷刚. 前处理软件与 ProCAST 的接口连接方式 [J]. 特种铸造及有色合金，2007，27(5)：348-350.
Su Dawei，Zhao Yutao，Wang Leigang. Interface mode of preprocess software and ProCAST software [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys，2007，27(5)：348-350.

[9] 苏大为，赵玉涛. 低压铸造铝合金轮毂充型和凝固过程模拟分析 [J]. 特种铸造及有色合金，2007，27(9)：682-684.
Su Dawei，Zhao Yutao. Simulation of filling and solidification of aluminum alloy wheel in low pressure die casting [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys，2007，27(9)：682-684.

[10] Su Dawei，Zhao Yutao. Produces low pressure die casting aluminum alloy wheel aided by computer simulation [C]// The 5th Sino - Korean Conference on Advanced Manufacturing Technology. Guangzhou：Key Laboratory for Advanced Materials of Ministly of Education，Tsinghua University & South China University of Technology，2007：48-54.

[11] 罗启全. 铝合金熔炼与铸造 [M]. 广州：广东科技出版社，2002：8-9.
Luo Qiquan. Smelting and foundry of aluminum [M]. Guangzhou：Guangdong Science & Technology Press，2002：8-9.