

研究不同砂型厚度和结构对铸造A356 铝合金的显微组织和抗拉强度的影响

贺伟¹, 安治国¹, 贺月^{2, 3}, 余琴⁴

(1. 重庆交通大学机电与车辆工程学院, 重庆 400074; 2. 中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南长沙 410083;

3. 洛桑大学地球科学研究所, 瑞士洛桑 CH-1015; 4. 重庆理工大学, 重庆 400054)

摘要: A356合金具有优良的铸造特性, 常作为结构材料被广泛使用, 但其铸造性能取决于微观组织和尺寸, 不同砂型壁厚和结构对铸件微观组织和性能有何关联, 是否能够通过仿真技术提前预判力学性能等, 目前研究较少。本文选取某汽车零部件进行铸造工艺设计建模, 通过设计六种不同壳型砂型和实心、复合框架式结构砂型, 结合了hall-petch晶粒强化理论, 对仿真进行深度开发, 模拟了A356铝合金材料在不同砂型壁厚和结构下的微观晶粒尺寸、二次枝晶间距、凝固时间以及抗拉强度。研究表明, 复合框架砂型的晶粒尺寸最小, 抗拉强度最好, 微观组织尺寸与砂型壁厚呈抛物线关系, 二次深度开发成功仿真了铸件性能和微观组织, 为铸造高性能铝合金铸件和调整铸件力学性能提供一种可视化和数字化的方法, 填补了铸件在铸态下力学性能和微观组织仿真的空白。

关键词: 砂型; A356; 仿真; 晶粒; 性能

作者简介:

贺伟 (1987-), 男, 硕士生, 研究方向为铝合金材料和铸造工艺。E-mail: lszzhewei@126.com.

通信作者:

贺月, 女, 博士生。E-mail: Yue.He@unil.ch

中图分类号: TG156

文献标识码:

文章编号: 1001-4977(2025)04-0471-08

基金项目:

重庆市自然科学基金面上项目, cstc2021jcyj-msxmX1047, AZ31 镁合金薄壁零件数控渐进热成形机理与调控方法。

收稿日期:

2024-06-21 收到初稿,
2024-12-31 收到修订稿。

为构建环保绿色的出行方式, 降低燃油能耗和碳排放量, 轻量化材料代替传统黑色金属是实现汽车轻量化, 降低碳排放的关键举措之一。性能是保证产品结构和安全的前提^[1], A356铝合金作为一种常用的轻合金材料^[2], 具有良好的力学性能, 常作为安全结构类部件, 并且铸造性能好, 能通过强化处理达到使用要求。A356铝合金铸造成形工艺有很多, 包含重力铸造、挤压铸造、低压铸造、差压铸造和高压铸造等^[3], 其中重力铸造是低投入、低成本、高效率 and 铸造性能优异的一种铸造成形方式, 被广泛使用。重力铸造按照模具材料分类可以分为金属型重力铸造和非金属型重力铸造, 非金属型重力铸造中砂型重力铸造使用最多, 砂型铸造是一种传统的铸造方式, 适用于各类零部件的生产。

自20世纪80年代末, 德国问世了第一款铸造模拟商品化软件MAGMA SOFT, 铸造数值模拟技术就开始蓬勃发展^[4]。最初, 铸造模拟软件采用单一的有限差分法(FDM)算法进行计算, 到后来逐渐引入有限元法(FEM)、有限体积法(FVM)和细胞自动机法(CVM)等算法^[5]。市场上的铸造模拟软件种类也越来越多样化, 从最初的单一砂型铸造模拟发展到后来的壳型、金属型铸造模拟, 再到高(低)压铸和熔模铸造等特种铸造的模拟, 数值模拟的范围越来越广泛^[6], 现如今, 国内外铸造模拟软件已经能够满足大部分铸造领域的需求。然而目前铸造模拟分析软件主要分析流动、凝固、卷气和内部缺陷等, 然而对铸件内部晶粒尺寸和二次枝晶间距等影响铸件宏观力学性能的研究较少。A356合金的砂型铸造是典型的铸造方式, 由于砂型壁厚和结构容易调整, 可满足大部分零部件的工艺生产条件, 不同砂型壁厚和结构对铸件凝固时间和晶粒尺寸以及力学性能影响的研究鲜有报道, 微观组织

预测和力学性能预测,是本次研究的重点。本文利用Anycasting建立有限元模型,结合hall-petch晶粒细化理论研究了不同的砂型壁厚和砂型结构对A356合金零部件的微观尺寸和宏观性能的影响,有助于制备高性能铸件。

1 仿真分析介绍

有限元分析遵循一定的原理:质量体积守恒原理,能量守恒原理,牛顿第三定律等。有限元分析是将实物细化为微小有限元单元,各单元之间通过作用力和反作用力之间进行应力传递,可实现应力应变分析。对分析应变等情况,假设的前提条件为分子间的间距不变,整体的物质质量和体积不变,质量体积守恒原理是一种连续性运动方程,用于理想流体计算或具有粘稠特性的流体计算,满足方程:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

式中: ∂x 、 ∂y 、 ∂z 均为流体在三维方向上的速度,单位m/s。

对热态凝固传热在 x 、 y 、 z 、 t 上满足传热方程:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q \quad (2)$$

式中: C_p 为定压比热容,单位J/kg·K; ρ 为熔体的密度,单位g/cm³; T 为温度,单位K; t 为时间,单位s; 熔体的导热系数是 λ ,单位W/m·K; Q 为源项。

$$Q = \rho L \frac{\partial f_s}{\partial t} \quad (3)$$

式中: L 为熔化潜热(单位J/kg); f_s 为固相率^[7]。

在凝固阶段,假设外部能量总和为物质吸收或者散失的能量加上热辐射和结晶潜热,高温铝合金液凝固后变成较低温度的铸件,其热量损失一部分散入空气,一部分被模具型腔吸收。铸造温度场熔体内部和熔体与模具内壁及外界空气之间都存在热量交换过程,常用牛顿冷却定律描述这一规律:

$$q = a(T_f - T_w) \quad (4)$$

式中: a 为对流换热系数; T_w 为固相线温度; T_f 为熔体温度。

当合金温度进入凝固温度区间内时,潜热开始释放,假定潜热在整个结晶温度区间均匀释放:

$$\frac{\partial L}{\partial t} \Delta t = -\rho L \frac{\Delta T}{T_L - T_s} \quad (5)$$

式中: L 为比潜热(J/kg); T_L 为液相线温度; T_s 为固相线温度。因为是降温过程, $\Delta T < 0$ ^[8]。

2 试验方法

2.1 工艺设计和建模

本文以铝合金转向节铸件为例,设计的铸造工艺方案如图1所示。

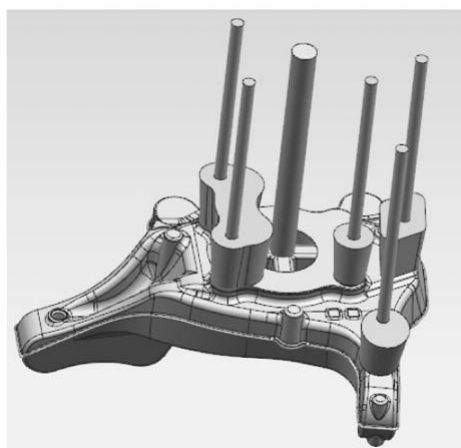


图1 铸造工艺图

Fig. 1 Casting process of parts

设计补缩冒口,根据热节的壁厚,选用圆柱形冒口,为了便于锯切,增加冒口颈部,当热节的尺寸为 D 时,冒口颈的尺寸为 $0.9D$,冒口颈的高度一般取2~3 mm,在加工面或者补缩效果不好区域可以不设计冒口颈,为了能达到补缩效果,普通冒口的尺寸通常比热节的尺寸大,取值为 $1.2 \sim 1.5D$,高度一般为 $1.5D$ 。

设计浇注系统,根据冒口的体积和铸件的体积,可得出铸件需要注入的金属量 m ,据此推算出阻流面积 $A_{阻}$,根据充型的质量公式 $u \times \rho \times A_{阻} \times v \times t = m$ 转换可得 $A_{阻}$,其中 m 为冒口和铸件的总质量, u 为系数,通常取 $0.4 \sim 0.7$, ρ 为金属密度, v 为浇注速度, t 为浇注时间, $v^2 = 2gh$, h 为静压头,采用顶注式, h 为砂型上部高度,本次选择的浇注方式为顶注式, $h = c$ 。根据铸件的尺寸,查铸造手册或根据经验确定砂型上部分的高度和浇口杯高度等数据。根据选用的 $A_{阻} : A_{横} : A_{内}$ 的比例关系,确定浇道面积,选定相关形状和尺寸结构。

金属液浇注过程中,不同砂型结构、金属液与砂型、金属液与外界空气等因素对于铸件成形的传热方式和吸热能力作用不同,不同的形核数量和过冷度直接影响晶粒大小和内部组织,从而影响铸件的宏观力学性能^[9]。为了得到最优的组织,设计了三类结构砂型:实心、壳型和复合框架,实心复合框架砂型为方形轮廓:750 mm × 650 mm × 550 mm;复合砂型为20 mm壳体,截面尺寸为50 mm × 50 mm的框架结合的砂型结构;壳体

砂型为铸件外部随形砂型结构。利用UG建模,分别设计壳型壁厚为10 mm、20 mm、30 mm、40 mm、50 mm和100 mm,实心砂型及“壳型和框架”

复合的砂型结构,依次编号a~h,图2为不同砂型厚度。

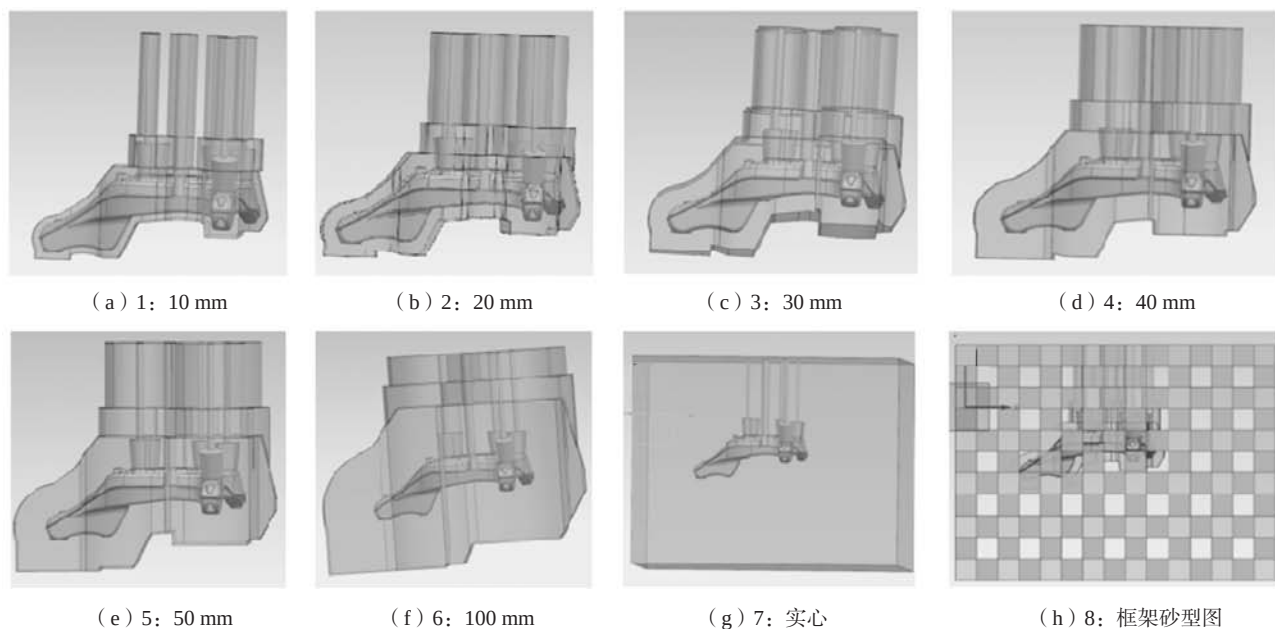


图2 不同砂型厚度

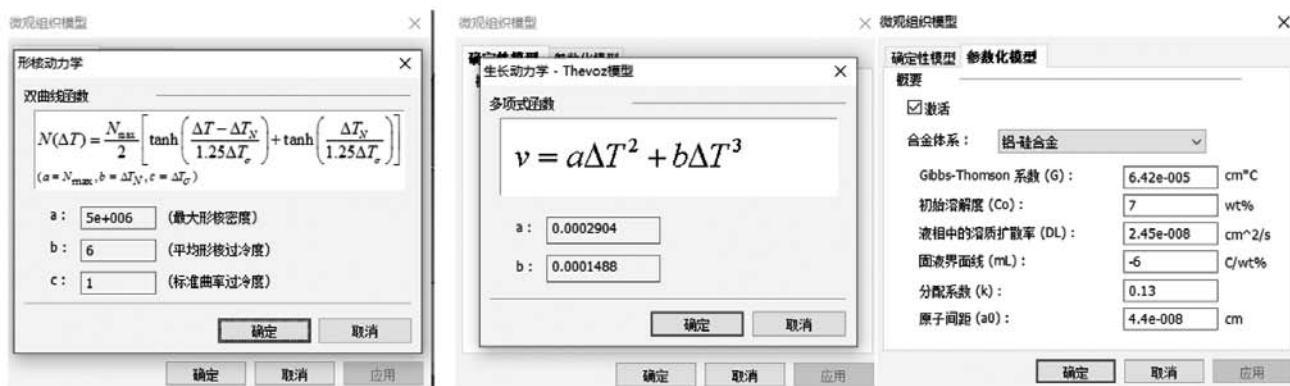
Fig. 2 Different sand mold thicknesses

2.2 仿真

使用anycasting对8种不同结构的砂型进行仿真分析,启动anypre导入设计3D模型数据,3D模型数据按照STL格式导入,均匀划分网格,网格数为5 000 000,单个网格体积约为2.7 mm³,X/Y/Z三个方向的网格长度约为1~2 mm。选择收缩模型和流体流动模型,激活了材料A356.0的凝固收缩体积变化7.14%,重力收缩补缩能力0.7%,流体表面张力模型采用标准CSF模型,表

面张力来源于数据库为698 dyne/cm,湍流也是用标准k-ε湍流模式。微观组织模型通过Al-Si合金体系的双曲线形核动力学函数和多项式生长动力学函数及参数化Al-Si合金体系模型,仿真设置参数见图3。

相关模块求解参数设置完成后,通过凝固率100%作为结束条件保存设置模块,anypre部分结束。启动anysolver,加载anypre保存的文件,进行求解,直至充型和凝固结束,该板块自动保存输出结果。



(a) 形核动力学

(b) 生长动力学

(c) 参数化模型

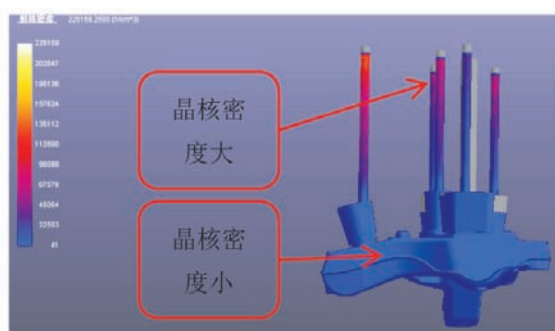
图3 仿真设置参数模型数据

Fig. 3 Simulation sets the parameters model data

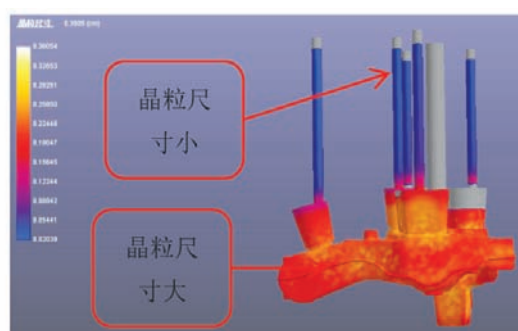
2.3 铸件内部组织和性能分析

通过anypost后处理模块, 激活实体模型, 传统的模拟分析主要针对充型、凝固和卷气等宏观结果及对内部质量缺陷和概率缺陷等进行分析^[10-11], 而极少对微观组织和具体宏观性能数据进行研究。在微观组织预测中, 从图4可以分析形核密度和晶粒尺寸, 单个铸件

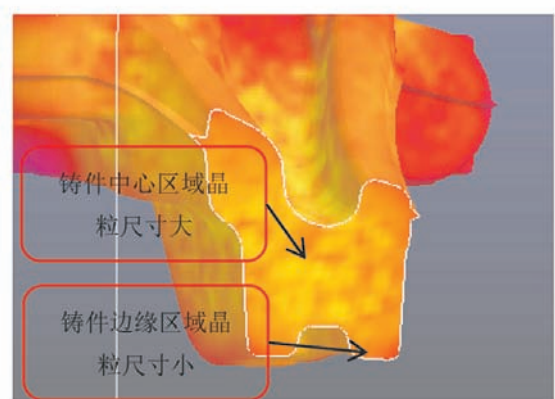
浇注可以看到, 形核密度在顶部排气孔位置密度大, 在铸件区域密度小, 晶粒尺寸刚好相反, 在铸件的区域晶粒尺寸大, 排气孔位置晶粒尺寸小, 在壁厚位置晶粒尺寸小, 在厚大部位晶粒尺寸大; 从内部剖面可以看出, 铸件最外层晶粒尺寸小, 中心区域晶粒尺寸大。



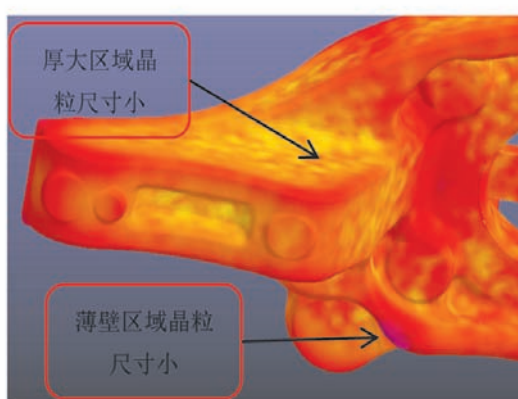
(a) 形核密度



(b) 整体晶粒尺寸



(c) 剖面晶粒尺寸



(d) 壁厚晶粒尺寸

图4 形核密度及晶粒尺寸

Fig. 4 Nucleation density and overall grain size

二次枝晶间距和抗拉强度预测, 二次枝晶间距公式 $PMS=b(X)^n$, 根据单位换算和查阅相关文献, 核算出 b 取值0.001, n 为1/3, 取值0.33, 如图5所示, 将取值运用在本次模拟分析中, 结果见图6。同理对于力学性能 $\delta=a+b(d)^c$, 该公式引用hall-petch公式 $\delta=\delta_0+k(d)^{-1/2}$, δ_0 、 k 为常数, $c=-1/2$, 抗拉强度 δ 与晶粒直径 d 成反比, 根据文献和计算, $\delta_0=98.25$ MPa, $k=6.8$, 可计算出铸件各区域的抗拉强度, 通过分析, 在晶粒尺寸小和二次枝晶间距小的区域, 铸件的力学性能最好。晶粒粗大区域, 力学性能相对较差, 在铸件的轮廓区域有一层较薄的性能优越区域。通过对液态金属形核理论分析, 这一层为细晶区域, 主要原因是形核数多, 过冷度好, 能够快速形成晶粒细小组织。从单

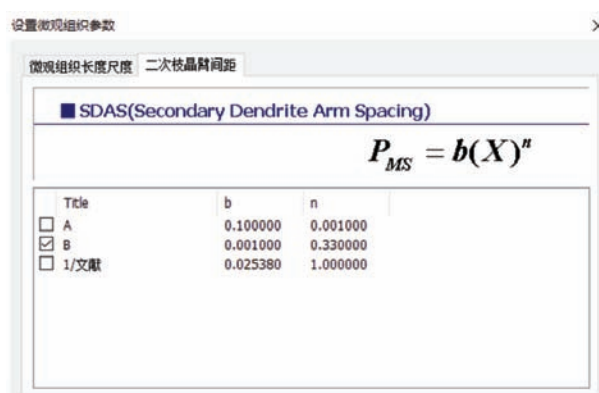


图5 二次枝晶取值 $b=0.001$, $n=0.33$

Fig. 5 Secondary dendrite value $b=0.001$, $n=0.33$

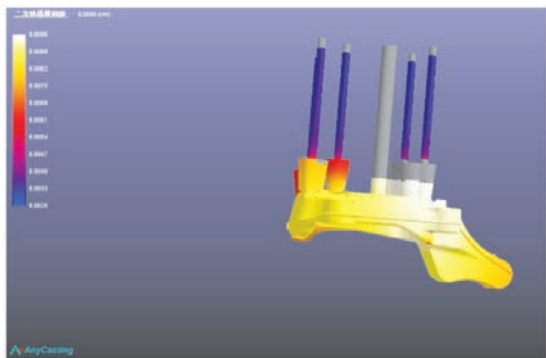


图6 二次枝晶间距分布图

Fig. 6 Distribution of secondary dendrite spacing

件模拟情况来看,铸件在壁厚薄、先凝固、排气孔和铸件内拐角区域二次枝晶间距小,性能好。在铸件壁厚大、后凝固和铸件外拐角区域二次枝晶间距大,抗拉强度低。

通过分析铸件充型、凝固顺序及时间可以预测铸件工艺设计的合理性,通过内部质量预判铸件合格率,通过对铸件内部微观组织的研究,可以预测铸件的晶粒尺寸、二次枝晶间距尺寸和分布,以及铸件各部位的细晶组织层和力学性能,可更好地分析和制备性能优良的铸件,对于设计工艺和选用铸型材料和结构有着全面的指导意义,对于不需要再进行热处理二次强化的零部件,准确模拟出铸件力学性能,可以用于CAE结构强度和疲劳等性能分析。

2.4 不同砂型厚度和结构仿真分析

对于不同结构和壁厚的砂型,分别对凝固时间、二次枝晶间距、晶粒尺寸和抗拉强度进行分析,结果如图7。

凝固时间:从图8凝固时间仿真结果看,砂型壳型厚度为20 mm时,凝固时间最短490 s,在壳型厚度为50 mm时,凝固时间最长为570 s,在壳型厚度为40 mm、100 mm及框架时凝固时间为510 s左右。二次枝晶间距:从图9二次枝晶间距分析看,砂型壳型厚度为50 mm时二次枝晶间距尺寸最大,在壳体厚度为10 mm时二次枝晶间距尺寸最小,实心壳体的二次枝晶间距与壳体厚度为40 mm的二次枝晶间距相差不多,框架结构的砂型与壳体厚度为20 mm的二次枝晶间距尺寸基本一致。

实心砂型凝固时间不是最短,实心砂型的二次枝晶间距也不是最小,实心砂型不是最优的砂型结构和厚度。框架复合式的砂型、砂型壳体厚度为20 mm的砂型两者凝固时间和二次枝晶间距一致,结构上可以互相替换,砂型壳体厚度为10 mm时二次枝晶间距尺寸最

小。

为了进一步验证框架的砂型是否可以代替壳型或实心的砂型,进一步对比分析不同砂型结构仿真的晶粒尺寸和力学性能。图10为平均晶粒尺寸,图11为力学性能对比,晶粒尺寸和力学性能两种趋势刚好相反,晶粒尺寸小,抗拉强度越好,平均晶粒尺寸最小的为框架复合结构砂型,为0.17 mm。砂型壳体厚度为50 mm的晶粒尺寸最大为0.24 mm,凝固时间最长,二次枝晶间距最大。微观晶粒尺寸大小决定宏观力学性能,抗拉强度最大的为框架砂型结构,达到104.8 MPa,抗拉强度最低的为砂型壳体厚度为10 mm和40 mm,砂型壳体厚度为50 mm抗拉强度也偏低,从凝固时间、性能、晶粒尺寸和二次枝晶间距综合分析,砂型壳体厚度为40~50 mm的综合性能较差,而抗拉强度最好的结构为框架结构的砂型。

3 分析与讨论

凝固时间越长,二次枝晶间距和晶粒尺寸越大。主要由于凝固时间长,晶粒形核后由于过冷度小,晶体逐渐长大,使得晶粒和二次枝晶也随之长大,尺寸变大。二次枝晶平均晶粒尺寸越小,性能越好,主要是由于小尺寸的晶粒晶界面多,变形抗力大。

不同砂型的壁厚,铸件的凝固速度不同,在40~50 mm的壳型凝固时间最长,40~50 mm壳型壁厚只能通过铸件传热至砂型,砂型温度又只能依靠外部空气传热散失,50 mm壳型壁厚蓄热能力强,单位散热面积小,导致其凝固时间最长。而100 mm的砂型在50~100 mm区域具有足够的外部砂型吸热,故散热系数高。砂型壁厚<40~50 mm时,砂型的蓄热能力有限,外部空气的温度为25 ℃,空气能带走薄壁砂型外壳的热量,可缩短铸件凝固时间,框架结构的复合砂型的凝固时间介于20 mm壳型和50 mm壳型之间也印证这一猜想,复合结构具有空气的吸热,也有50 mm框架的储热效果。

4 结论

(1) 通过anycasting对8种砂型进行分析,无论是不同壁厚的壳型砂型,还是实心与框架砂型,对于铸件凝固时间,并不与砂型厚度呈正比或者反比的关系,而是与砂型壁厚和结构有关。

(2) 框架+复合砂型具有较好的强度和传热性能,可以替代实心和壳体的砂型结构,对于实心砂型可减少砂使用量,对于壳型砂型又可增加不同框架结构提高砂型强度。

(3) 框架结构尺寸减小,砂型的总吸热能力降

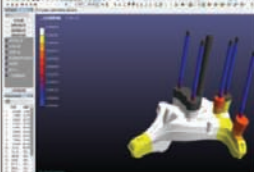
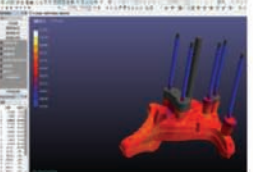
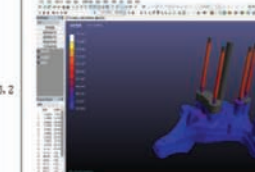
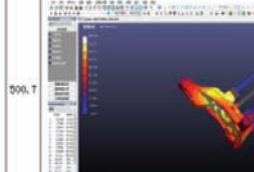
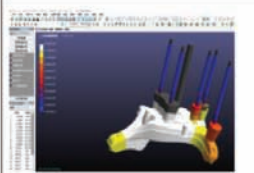
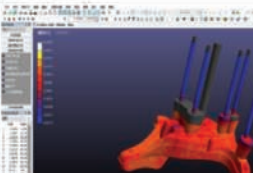
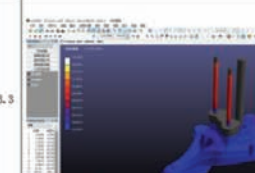
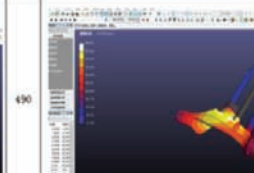
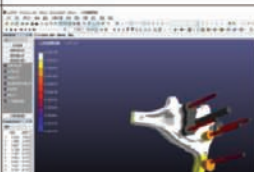
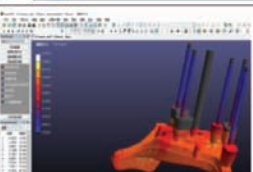
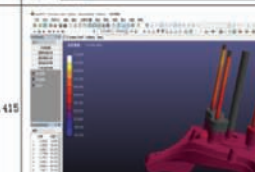
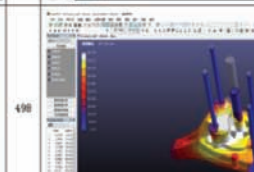
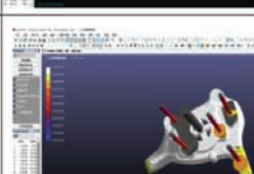
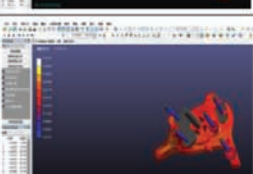
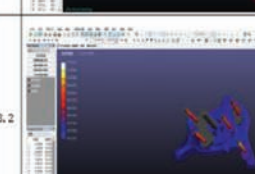
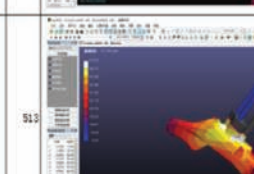
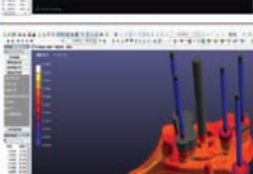
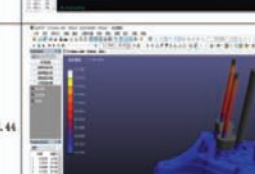
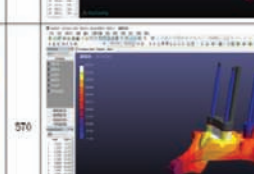
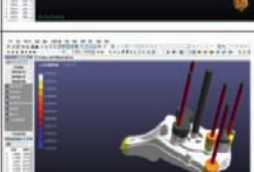
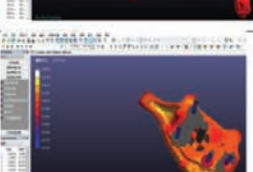
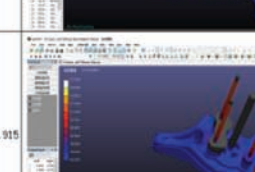
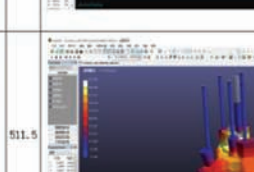
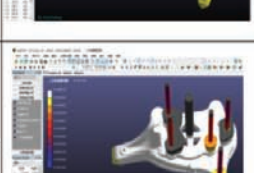
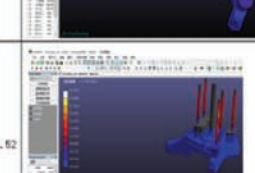
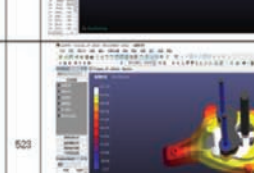
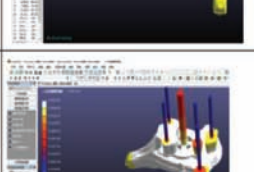
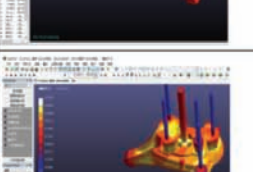
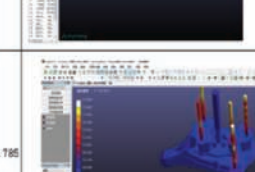
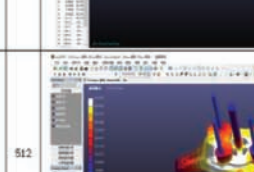
规格	二次枝晶间距 μm	图示	晶粒尺寸 μm	图示	抗拉强度 MPa	图示	凝固时间 s	图示
10	0.667		0.237		103.2		500.7	
20	0.672		0.235		103.3		490	
20	0.67786		0.26		103.415		496	
40	0.68184		0.231		103.2		513	
50	0.68714		0.2585		103.44		570	
100mm	0.6793		0.2408		103.915		511.5	
实心	0.68133		0.2093		104.82		529	
框架	0.67284		0.1829		104.785		512	

图7 不同砂型结构和厚度二次枝晶间距、晶粒尺寸、抗拉强度和凝固时间的仿真结果
 Fig. 7 Simulation results of secondary dendrite spacing, grain size, tensile strength and solidification time for different sand mold structure and thickness

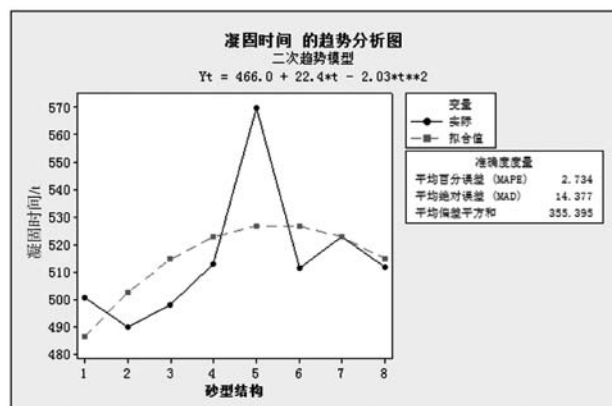


图8 不同砂型结构的凝固时间趋势

Fig. 8 Trend of solidification time of different sand mold structure

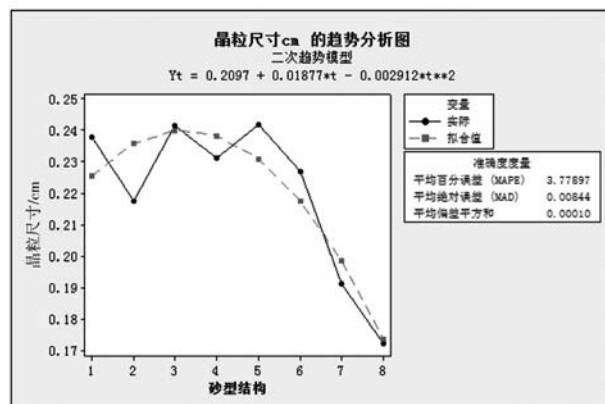


图10 不同砂型结构的晶粒尺寸趋势图

Fig. 10 Grain size trend of different sand mold structure

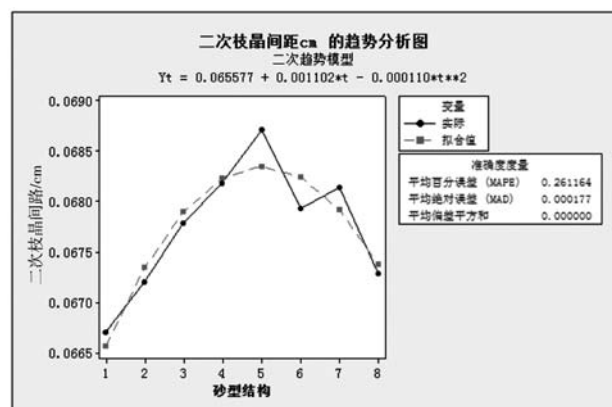


图9 不同砂型结构的二次枝晶间距趋势

Fig. 9 Trend of secondary dendrite spacing of different sand mold structure

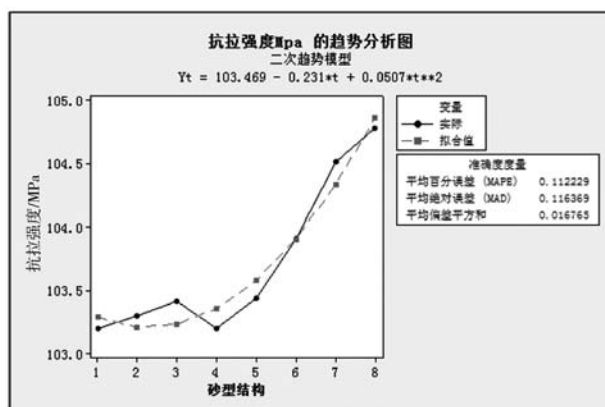


图11 不同砂型结构的抗拉强度趋势图

Fig. 11 Tensile strength trend of different sand mold structure

低,使得铸件的凝固时间延长,晶粒和二次枝晶间距增加,性能降低。

(4) 浇注温度对铝合金铸件的成形条件有显著影响,浇注温度低,铸件内部晶粒来不及长大,晶粒细小,组织致密,性能良好,同时凝固的时间也缩短,通过砂型轻量化设计和降低浇注温度是实现制备高性能铝合金的途径。

(5) 通过模拟微观组织结构,二次枝晶间距和晶

粒尺寸与铸件抗拉强度成反比,符合晶体强化理论和 hall-Petch公式,本次不仅宏观模拟A356铝合金充型及凝固状态,而且使用anycasting仿真的微观组织形貌和力学性能也符合晶体形核理论,能够准确模拟出铸件各部分的微观组织和力学性能,可以量化判定工艺设计方案和产品性能,对于铸造过程具有十分重要的指导意义。

参考文献:

- [1] 陈煌. 计算机模拟辅助技术在铸造工艺设计中的应用 [J]. 铸造, 2023, 72 (10): 1387.
- [2] 冯志军, 阮明, 李宇飞, 等. 铸造技术路线图: 半固态铸造 [J]. 铸造, 2017, 66 (6): 541-547.
- [3] XU Y, ZHAN H, TONG W, et al. To improve robustness of mechanical properties of semi-solid cast A356 alloy using taguchi design method [J]. China Foundry, 2024, 21 (2): 175-184.

- [4] 汪卫华. 非晶态物质的本质和特性 [J]. 物理学进展, 2013, 33 (5): 177-351.
- [5] 殷亚军, 刘振伟, 张勇佳, 等. 铸造数值模拟软件技术及应用进展 [J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43 (10): 1297-1311.
- [6] 张红松, 张希俊, 张方. 铸造过程计算机数值模拟的国内外研究概况 [J]. 昆明理工大学学报 (理工版), 2003, (2): 55-58.
- [7] 黄延禄, 邹德宁, 梁工英, 等. 送粉激光熔覆过程中熔覆轨迹及流场与温度场的数值模拟 [J]. 稀有金属材料与工程, 2003, (5): 330-334.
- [8] 李玉斌, 王巍, 何建军, 等. 亚共析U-Nb合金激光焊接接头的微观结构及力学性能 [J]. 金属学报, 2014, 50 (3): 379-386.
- [9] 任智勇. 绩效技术理论在砂型铸造模样及工装设计中的应用 [J]. 铸造, 2012, 61 (1): 69-73.
- [10] 刘洋, 侯佳新, 张志壮. A356铝合金低压铸造轮毂轮缘缺陷分析及改进 [J]. 铸造, 2017, 66 (10): 1112-1114.
- [11] 王振岭, 马晓锋, 吴江, 等. 型腔中气体对薄壁铝合金铸件充型能力的影响 [J]. 铸造, 2012, 61 (7): 768-774.

Effect on the Microstructure and Tensile Strength of Cast A356 Aluminum Alloy with Different Sand Mold Thicknesses and Structures

HE Wei¹, AN Zhi-guo¹, HE Yue^{2,3}, YU Qin⁴

(1. School of Mechatronics and Vehicle Engineering, Chongqing Jiao Tong University, Chongqing 400074, China; 2. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China; 3. Institute of Earth Sciences, University of Lausanne Lausanne, CH-1015, Switzerland; 4. Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

Abstract:

A356 is widely used as a structural material because of its excellent castabilities, but its castabilities depend on its microstructure and size, there are few researches on whether the mechanical properties can be predicted in advance by simulation technology. In this paper, six kinds of sand mold with different shell shape and two kinds of sand mold with solid and composite frame structure were designed for casting process design and modeling of an automobile part, based on hall-petch grain strengthening theory, the simulation is developed in depth, the micro-grain size, secondary dendrite spacing, solidification time and tensile strength of A356 aluminum alloy with different sand mold wall thickness and structure were simulated. The results show that the grain size of the composite frame sand mold is the smallest and the tensile strength is the best. The relationship between the microstructure size and the wall thickness of the sand mold is a parabola, it provides a visual and digital method for casting high-performance aluminum alloy and adjusting mechanical properties of castings, and fills the blank of mechanical properties and microstructure simulation of castings in as-cast state.

Key words:

sand mold; A356; simulation; grain; performance
