DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.09.014

ZL114A 横梁铸造数值模拟及工艺优化

孙　策[1],盛文斌[2],阎思锦[1],张振波[1],陈宗民[1]

(1.山东理工大学 机械工程学院,山东 淄博 255049; 2.山东理工大学 分析测试中心,山东 淄博 255049)

摘　要:针对铝合金横梁进行结构分析,并设计了铸造工艺。利用 AnyCasting 软件对铸造过程进行模拟仿真,分析了冒口及冷铁位置对铸件凝固过程和缺陷产生概率的影响规律,据此对铸造工艺进行了优化。结果表明,当充型温度为 710 ℃,充型速度为 115 mm/s 时,铸件内部的温度分布均匀、整体缺陷产生概率较低,但由于铸件壁厚较薄且内部结构复杂易在多个位置产生热节,特别是铸件工作表面阶梯区域以及肋板与壁面的连接位置,而这些位置在凝固过程中出现缩松缺陷的概率也较大。根据模拟结果进行了针对性的工艺优化,以冒口处引出补贴的方式消除铸件侧壁缺陷,并在底部放置冷铁。优化后的方案使缺陷产生的概率显著降低。

关键词:ZL114A;砂型重力铸造;缝隙式浇注系统;铸造模拟

中图分类号:TG292　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2019)09-0941-05

Numerical Simulation and Process Optimization of Casting Process of ZL114A Beam

SUN Ce[1], SHENG Wenbin[2], YAN Sijin[1], ZHANG Zhenbo[1], CHEN Zongmin[1]

(1. School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China; 2. Center of Forecasting and Analysis, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

Abstract: The structural analysis of the aluminum alloy beam was carried out and the casting process was designed. The simulation process of the casting process was carried out by using AnyCasting software. The influence of riser form and chill position on the solidification process of casting and the probability of defect generation was analyzed. Based on this, the casting process was optimized. The results show that when the filling temperature is 710 ℃ and the filling speed is 115 mm/s, the temperature distribution inside the casting is uniform and the probability of overall defects is low. However, due to the thin wall thickness and complex internal structure of the casting, it is easy to produce hot joints in many positions, especially the working surface ladder area of the casting and the joint position between the ribbed plate and the wall, and the probability of shrinkage and loosening defects in these positions during solidification is also large. According to the simulation results, the defects of the side wall of the casting are eliminated in a way that a subsidy is led out at the riser, and the chill is placed at the bottom. The optimized scheme significantly reduces the probability of defects.

Key words: ZL114A; sand mold gravity casting; slot casting system; casting simulation

ZL114A 具有良好的铸造性能、耐腐蚀性,被广泛应用于航空、航天领域[1,2]。但合金元素的加入也降低了 ZL114A 合金的流动性、抗热裂性等铸造性能,使得铸件在铸造过程中极易产生金属夹杂物、浇不足、缩孔、缩松、裂纹、变形和气孔等缺陷。因此复杂铝合金铸件的铸造工艺设计通常较为困难。传统的铸造工艺设计对设计者从业经验要求较高,设计周期长且成本高。对于单件小批量生产的铝合金铸件来说,将大大增加生产成本,造成资源浪费[3]。铸造模拟软件可以模拟充型及凝固过程中流场、温度场的分布,预测铸件缺陷产生的位置,能够有效缩短铸件从设计到生产的研发周期,降低生产成本[4]。因此,在铸造模拟软件的辅助下进行铸造工艺设计是一种有效的方式。

本文在铸件结构分析的基础上进行工艺设计,利用 AnyCasting 软件对横梁的铸造工艺进行模拟,分析了铸件充型过程的速度场和温度场变化规律,预测了铸件最终缺陷可能出现的位置。最后,针对铸件缺陷部位对铸造工艺进行优化,最大程度降低铸件内部缺陷的产生概率,对指导实际生产具有一定意义。

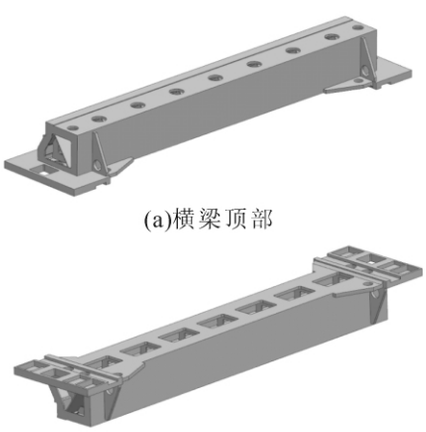
收稿日期:2019-05-16

作者简介:孙　策(1995-),河南确山人,硕士生.研究方向:材料加工数值模拟.电话:17530340661,E-mail:527770643@qq.com

通讯作者:盛文斌(1973-),吉林兆南人,博士,副教授.研究方向:金属材料与铸造工艺、先进制造技术与装备.电话:0533-2786609,E-mail:wb.sheng@aliyun.com

1 铸造工艺设计

横梁材质为 ZL114A,净重 76 kg,铸件工作表面需进行 X 射线探伤,内部不能存在裂纹、冷隔、浇不足及线性偏析等缺陷。横梁三维实体如图 1,整体轮廓尺寸为 2 480 mm×540 mm×278 mm,属于大中型铸件,结构较为复杂。内部有数个厚度为 5 mm 的环形肋板,以及一条厚度为 6 mm 的斜筋;顶部有 7 个 ϕ80 mm、2 个 ϕ60 mm 的圆孔,底部有 7 个 200 mm×180 mm 的方形孔;铸件壁厚变化过渡不均匀,与其他零件连接处的底座部分较为厚大,是主体壁厚的 4~5 倍,且底部有深度不同的凹槽,对顺序凝固的实现有一定影响。考虑到其为单件小批量生产,且内腔成型较为复杂,故采用砂型铸造手工造型,一箱一件。分型面确定在铸件顶部圆孔圆心连线处,也即铸件最大截面处。铸件主要工作表面及壁厚变化较大处均位于下部,确保铸件的表面质量和工作性能。造型材料选用发气量较小的碱性酚醛树脂自硬砂。铸件主要工作表面为侧壁阶梯状区域以及两侧底座配合面,其加工余量均取 5 mm。其余位置加工余量取 3 mm。考虑到横梁结构复杂,其凝固时收缩率不大于自由收缩率,故取铸造收缩率为 0.9 %。



(a)横梁顶部

(b)横梁底部

图 1 横梁三维实体图

Fig.1 The three-dimensional solid diagram of the beam

为了提高金属液的充型能力,采用开放式垂直缝隙浇注系统,浇注系统截面比取$\Sigma A_{直}:\Sigma A_{横}:\Sigma A_{过}=1:2:2$[6]。计算得阻流面积为 1 000 mm^2,为直浇道的截面积,故横浇道截面积为 2 000 mm^2,过渡浇道总截面积为 2 000 mm^2。计算得浇注时间为 18 s。合金熔液出炉温度应控制在 720±10 ℃,待进行合金组织细化、变质处理以及精炼除气后方可进行浇注,浇注温度控制在 710±5 ℃。

对于铝合金铸件,采用缝隙式浇注系统可以使金属液逐层、顺序、快速的充填型腔,防止金属液与空气过多接触而发生氧化[7]。图 2 为浇注系统的设计方案,在横梁工作位置顶部相对于内部肋板的位置开设 8 条缝隙浇道,确保铸件型腔能够完整充满。为了使金属液在充型过程中平稳上升,其余 2 条缝隙浇道设置在铸件两端底座部分,且过渡浇道截面积较大。横梁浇注位置顶部设有 6 个 ϕ50 mm 的压力冒口,冒口均匀分布在铸件内部肋板与顶部壁面的连接处,以实现补缩。

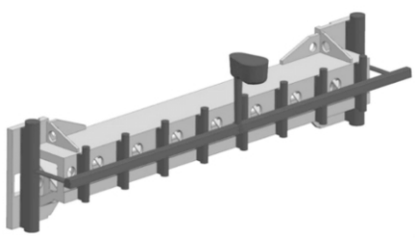


图 2 浇注系统示意图(红色部分)

Fig.2 Schematic diagram of gating system(the red part)

2 工艺数值模拟

2.1 前处理

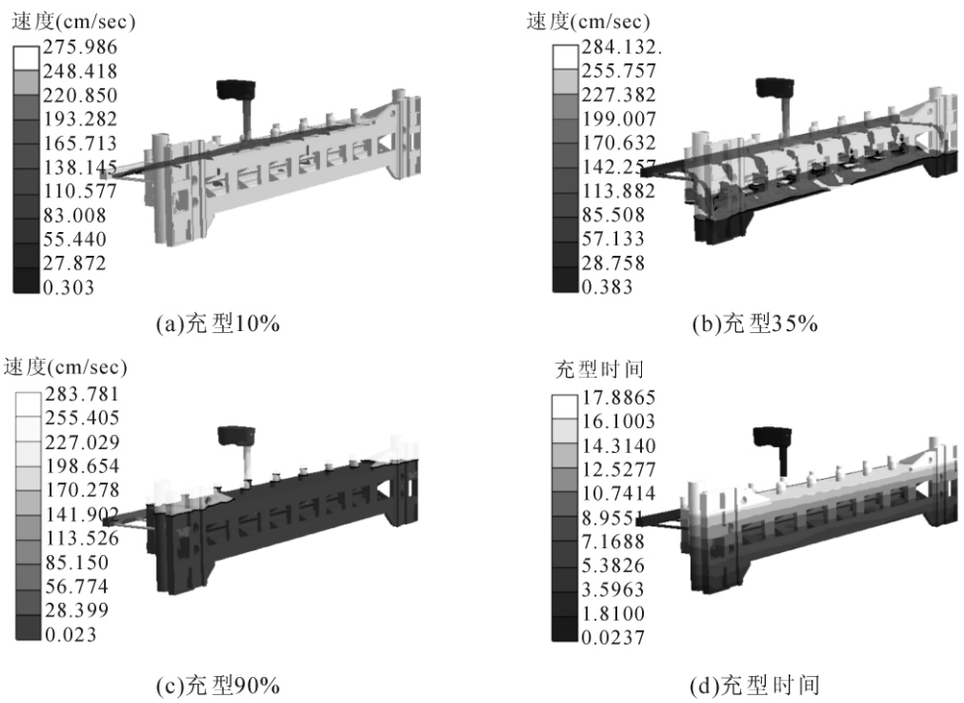
首先,利用 UG 三维设计软件对横梁、浇注系统以及冒口进行实体造型,并将实体文件转为 STL 格式,通过 AnyCasting 软件的外部文件接口,将实体文件导入。然后,通过 AnyPRE 模块对实体进行网格划分、工艺参数设置等前处理。模型共划分网格约 300 万个,网格边长 5.16 mm,主要壁厚处网格层数大于两层。充型温度设置为 710 ℃,充型速度为 115 mm/s,砂型初始温度为 25 ℃,铸件和砂型之间的热交换系数为 4 186 W/m^2·k [8]。铸造过程的模拟是在重力连续浇注的条件下进行的,重力值 9.8 m·s^{-2}。为了提高计算结果精度及计算速度,充型及凝固过程的计算均采用收敛速度较快的 SOR 迭代法 [9],最大迭代步数为 100 次。模拟结束条件为铸件凝固率达到 100%。

2.2 数值模拟结果分析

通过 anySOLVER 模块对横梁铸造充型过程进行模拟,得到充型时金属液速度场及温度场的分布情况,图 3 所示为充型过程中各个重要阶段的模拟结果。充型到达 1.8 s 时,金属液从浇口杯流入直浇道。与横浇道连接的过渡浇道将金属液合理分配至铸型各个不同部位并充填型腔,如图 3(a)所示。随后金属液注入集渣筒,待其上升一定高度后才经由缝隙浇道注入铸件型腔。在整个充型过程中,集渣筒中的金属液面始终高于铸件型腔内的金属液面,金属液与空气接触而产生的浮渣及其他杂质随之上浮

到液面上，起到撇渣的作用。图 3(b)所示为充型过程中型腔两端金属液与中间金属液交汇的时刻，未观察到金属液发生飞溅、卷气等现象。充型后期，大约 17 s 左右，金属液即将充满铸件型腔。由于顶部冒口的存在，铸件浇注位置上部大平面得以完整充型，如图 3(c)所示。图 3(d)中同种颜色的金属液成水平带状分布，相同颜色区域代表充型速度相同的金属液，由此可见整个充型过程平稳。

凝固过程模拟结果如图 4 所示，铸件充型完成之后约 23 s 时，局部金属液温度降到液相线以下，铸件开始凝固。远离浇注系统一侧带有方形孔的平面以及浇注位置顶部的大平面与砂型接触面积较大，热传导速度快，故先行凝固，如图 4(a)所示。在此过程中，两个方形孔中间狭长区域的两端由于与内部肋板相接，散热面积较周围壁面小，存在热节。在周围金属液率先凝固的情况下，该处金属液温度

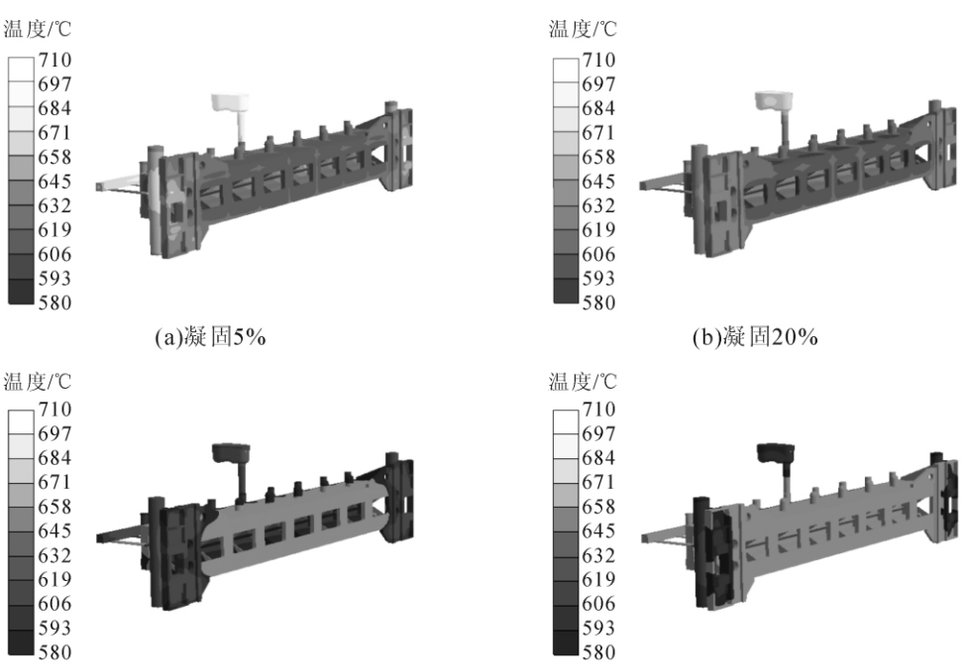


(a)充型10%　(b)充型35%

(c)充型90%　(d)充型时间

图 3 铸件充型过程模拟结果

Fig.3 Filling process simulation result of beam



(a)凝固5%　(b)凝固20%

(c)凝固60%　(d)凝固90%

图 4 铸件凝固过程温度场

Fig.4 Temperature field in solidification process of beam

仍高于液相线温度。于是被四周凝固区域隔离开，形成了数个孤立小熔池，如图 4(b)所示。由于金属液收缩现象，该处补缩不充分，易产生缩松、缩孔等缺陷。浇注位置底部的铸件壁厚较大，且远离浇注系统及冒口，难以得到有效补缩。在 468 s 时，冒口完成对铸件上部大平面的补缩，剩余金属液开始凝固。由于横梁内部结构复杂，存在多处热节，一旦凝固不均匀，铸件极易发生热裂及冷裂。但图 4(c)中显示，横梁主体部分几乎同时凝固，这对于降低铸件热裂、冷裂等倾向有着重要意义。在 1 397 s 左右，铸件两侧底座部位开始凝固，靠近缝隙浇道的位置最后凝固，对两侧具有一定的补缩作用，如图 4(d)所示。

3 工艺方案优化及模拟分析

通过对工艺方案的模拟结果进行分析，可以看出该方案设计的浇注系统较为合理。金属液完全充满型腔且充型过程平稳，未发生卷气、冲砂及飞溅现象。在完全凝固后能够确保铸件形状的完整性。为了进一步得知铸造工艺的不足，利用 AnyCasting 软件对铸件残余熔体模数进行计算，预测铸件可能出现缩松、缩孔等缺陷的部位。结果发现，在方孔中间的狭长部位上下两端多处位置可能产生缺陷，如图 5 所示。该处是铸件外壁大平面与内部肋板、斜筋相连的位置，极有可能在凝固过程中由于较大的温度梯度而出现开裂，导致废品的产生。

根据上述分析，确定工艺优化方向为改善铸件侧壁热节处的温度分布。由于顶部冒口补缩距离有限，无法实现对侧壁热节处(即图 5 所示上部 4 处圈出的红色斑点)的补缩，增大冒口则会降低铸件出品率，且有效补缩距离的提升有限，因此采用从冒口处延伸出一块补贴的方式。补贴呈梯形，厚度为 40 mm，从冒口处延伸至铸件侧壁。侧壁下部的缺陷无法通过设置冒口的方式消除，故在此处设置冷铁，冷铁的厚度取 10 mm。利用冷铁的激冷效果

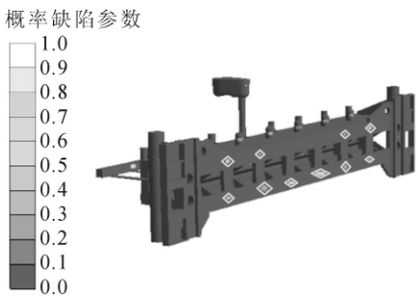
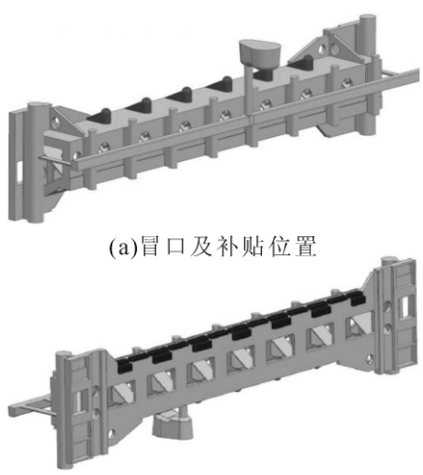


图 5 初始工艺缺陷分布
Fig.5 Distribution of initial process defects

加速冷却，降低该处温度梯度，使铸件均衡凝固。同时冷铁也可以与上部补贴联合，打开方孔间的补缩通道，消除该处的缩松。最终工艺优化方案如图 6 所示。

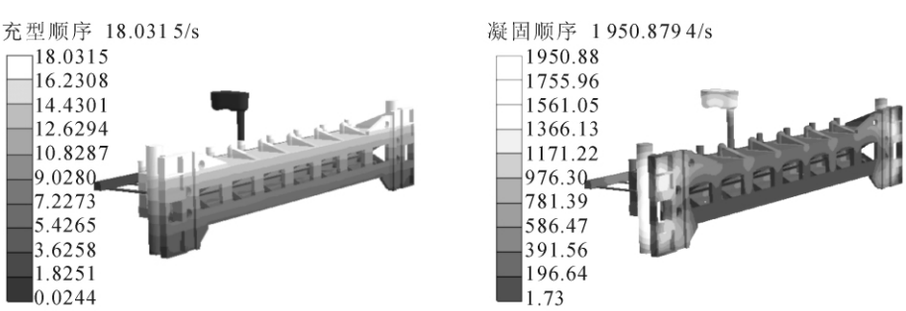


(a)冒口及补贴位置

(b)冷铁位置

图 6 优化工艺方案示意图
Fig.6 Schematic diagram of optimization process plan

再次使用 AnyCasting 软件对优化后的工艺方案进行模拟，其充型和凝固过程的模拟结果如图 7 所示。从充型过程的模拟结果来看，优化后整个充型过程约为 18 s。金属液仍呈现逐层填充铸件型腔的趋势，未出现金属液的飞溅、卷气、冲砂等现象，如图 7(a)所示。两侧集渣筒和顶部冒口为最后充满部位，在充型过程中由于铝液与氧气接触发生氧化而产生的浮渣均聚集于此处，提高了铸件整体质量。从图 7



(a)充型顺序　　(b)凝固顺序

图 7 优化工艺模拟结果
Fig.7 Simulation results of optimization process

(b)铸件凝固过程模拟结果中可以看出,相较于改进前,方孔之间薄壁处的温度梯度有所降低。

对工艺优化后的铸件缺陷产生概率进行分析,结果如图 8 所示。可以看出,通过添加补贴提高了冒口的补缩能力,成功将铸件侧面上部缺陷引入到补贴及冒口中。铸件底部冷铁也使方孔下部区域先凝固,打开了方孔之间的薄壁处通往铸件顶部的补缩通道,实现了对下部易形成缺陷的部位的补缩。优化后的工艺方案成功消除了原工艺方案中的缩松、缩孔缺陷。

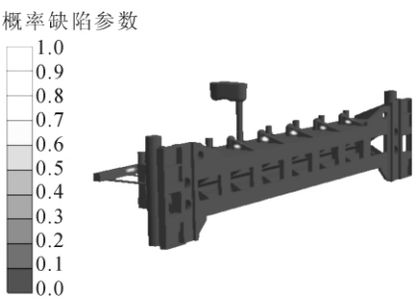


图 8 优化后缺陷分布

Fig.8 Defect distribution after optimization

4 结论

(1)设计了开放式垂直缝隙浇注系统,通过合理的集渣筒直径及缝隙浇道宽度,使金属液逐层充填铸件型腔,最终获得了轮廓完整的铸件。

(2)采用从冒口引出补贴的方式,成功消除了铸件侧面三壁连接处产生的缺陷;在铸件浇注位置下部放置冷铁,改善了该处的温度分布,打开了一条自上而下的补缩通道,避免了缩松、缩孔缺陷的产生。

参考文献:

[1] 刘斌,蒋业华,潘亮星,等. 共晶硅形貌对 ZL114A 合金拉伸断裂机制的影响[J]. 铸造技术,2010,31(5):612-615.

[2] Thomas F K.. The large-scale commercialization of aluminum-matrix composites[J]. JOM, 1994(11):49-53.

[3] 董文正,邓志儒,林启权,等. 基于 ProCAST 的熔胶座移动板浇注系统模拟优化[J]. 热加工工艺,2016,45(3):74-76,79.

[4] 赵明,盛文斌,李改玲,等. SKT 机床床身铸造过程模拟及工艺优化[J]. 特种铸造及有色合金,2013,33(9):812-815.

[5] 中国铸造协会,《铸造工程师手册》编写组. 铸造工程师手册[M]. 北京:机械工业出版社,2010.

[6] 杜旭初,洪润洲,陈邦峰,等. 铝合金铸件缝隙式浇注系统设计[J]. 特种铸造及有色合金,2014,34(7):767-769.

[7] 陈勇, 杨湘杰. 基于 AnyCasting 排气歧管砂型铸造数值模拟及试验研究[J]. 铸造,2009,58(3):249-252.

[8] 周扬, 申荣华. 基于 Anycasting 的汽轮机阀体浇注系统优化模拟[J]. 铸造技术,2010,31(11):1407-1411.

RX 榕霞®

福建省榕霞石英砂有限责任公司
漳浦县榕霞矿业开发有限公司

公司简介
Company

我公司创办于1976年，是国内较早从事石英砂系列产品生产、销售一体化经营的综合性企业。公司拥有丰富的优质石英砂矿产资源，矿区面积1000多亩，年开采量可达40万吨。公司生产的石英砂产品具有SiO2含量高，含泥量低、角形系数小等特点，是高品位的天然石英砂。

“榕霞”天然石英砂系列产品现广泛应用于国内铸造行业、机械制造行业、全国各水处理行业及玻璃制造、钢铁冶金行业等，质量达到国际先进水平。公司已通过ISO9001、ISO14001管理体系认证，先进的生产工艺及完善的品质保障体系确保了产品质量的长期稳定，专业的销售团队为客户提供优质完善的售后服务。





产品主要理化性能

Sio2＞98%	角形系数＜1.3
灼烧减量＜0.5%	含泥量＜0.3%
含水量(干砂)＜0.2%	耐温＞1700℃

地址:福建省晋江市金井　电话:0595-85332410 85332410　传真:0595-85331410　www.rxsgy.com　E-mail:rxsgy@163.com