

# 电动滑板车前叉的低含气量压铸工艺研究与实践

龚杰<sup>1,2</sup>, 龙文元<sup>1</sup>, 谢隆保<sup>2</sup>

(1. 南昌航空大学航空制造工程学院, 江西南昌 330063; 2. 厦门格耐尔科技有限公司, 福建厦门 361028)

**摘要:** 基于压铸CAE云计算平台智铸超云, 对电动滑板车前叉铸件的压铸工艺进行了设计及优化, 分析了不同压射工艺对铸件质量的影响, 同时进行了实际铸件生产的压射工艺试验验证。结果表明: 模拟结果与实际生产结果基本一致, 采用优化后的压射工艺设计获得了外形轮廓清晰、表面光滑、尺寸精度高、无缺陷的前叉铸件, 实现了铸件的T6处理, 从而进一步提高了其力学性能。经上机实测, 铸件达到了电动滑板车产品的前叉零件技术要求, 可实现“以铸代锻”。

**关键词:** 前叉; 低含气量压铸; 云计算; 工艺优化

压铸生产具有生产率高、尺寸精度高、成本低和近净成形等优点, 在交通工具、电子通信、仪器仪表、计算机和电器等领域获得了广泛应用。传统压铸技术具有高压高速的特点, 大多以喷射、紊流形式充填型腔, 导致普通铸件通常内部都存在卷气、氧化夹渣和缩松等缺陷。不但降低了铸件的力学性能和气密性, 而且不能进行较多余量的机械加工、焊接和热处理, 从而限制了铸件的应用范围<sup>[1-4]</sup>。

电动滑板车比传统电动自行车结构简单、车轮小、轻巧简便, 能节省大量社会资源。是现代人来作为代步工具、休闲娱乐的一种新型的绿色环保的产物。前叉部件在电动车结构中处于前方部位, 它的上端与车把部件相连接, 车架部件与前管配合, 下端与前轴部件配合, 组成电动车的导向系统。由于位置的特殊性, 因此对前叉零件的质量要求比较高, 特别是其强度。目前主要采用金属型重力铸造或锻造方法, 重力铸造电动车前叉零件致密性和强度不高, 生产效率较低, 而采用锻件性能好, 但是机械加工量大, 成本高。结构件的压铸生产多采用半固态<sup>[5-7]</sup>或真空压铸<sup>[8-10]</sup>, 这都会为压铸生产过程增加工序, 工艺更加复杂, 生产成本增加。为此, 本文通过采用低含气量压铸工艺为某高端电动滑板车生产企业开发前叉铸件, 基于智铸超云压铸CAE云计算平台进行压铸工艺的模拟仿真, 通过模拟分析可预测卷气、缩松、缩孔等缺陷<sup>[11-12]</sup>, 并进行工艺的优化, 从而可有效避免压铸缺陷的产生, 缩短开发周期, 提高铸件品质, 降低成本, 为该类铸件的压铸生产提供参考。

## 1 铸件分析及工艺设计

### 1.1 前叉铸件分析

该铸件是某公司生产的电动滑板车前叉三维实体, 如图1所示。最大外形尺寸为197 mm × 103 mm × 76 mm, 毛坯重520 g, 其结构适中, 但壁厚不均, 薄壁处约为4.5 mm, 厚壁部位超过12 mm, 平均壁厚约为7 mm。铸件要求没有气孔, 能进行T6处理, 需通过滚筒测试疲劳冲击20万次, 要求不会产生裂纹、变形和断裂。合金材料选择A380, 化学成分如表1所示。

#### 作者简介:

龚杰(1976-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为压铸工艺技术与流程、模具浇道技术、低含气量压铸工艺研究与应用、半固态压铸技术应用。电话: 13696954608, E-mail: xmgenaier@163.com / a.jie6@163.com

#### 通讯作者:

龙文元, 男, 教授。E-mail: longwy@nchu.edu.cn

中图分类号: TG249.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2024)

08-1131-06

#### 收稿日期:

2023-09-12 收到初稿,

2023-12-04 收到修订稿。

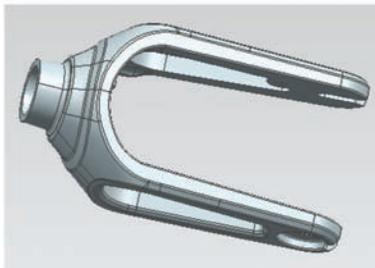


图1 前叉部件三维图

Fig. 1 3D model of the front fork

表1 A380铝合金化学成分

Table 1 Chemical composition of the A380 aluminum alloy

w <sub>B</sub> /%							
Si	Cu	Fe	Mg	Zn	Ni	Mn	Al
8.47	3.16	1.07	0.093	1.58	<0.2	0.28	余量

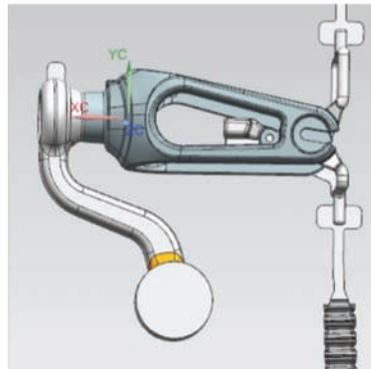


图2 前叉压铸工艺图

Fig. 2 Die casting process diagram of the front fork

## 1.2 压铸工艺设计

根据产品特点，内浇道设置在圆柱孔一侧，为减轻金属液高速充型产生紊流及冲击型芯，且又要保证让金属液尽可能均匀地流经内浇道的整个厚度，故内浇道采用环形进浇方式。同时，为了避免在浇口位置产生喷射，将内浇道的厚度设置为与产品浇口位置壁厚相等，浇注系统和排溢系统的设计如图2所示。产品最大的投影面积为79 cm<sup>2</sup>，浇注系统的投影面积约为81 cm<sup>2</sup>，产品为结构件，有强度要求，所以需选择较高的压实压力，因此选择250 t压铸机。

## 2 压铸工艺的数值模拟

采用压铸模拟仿真云计算平台（智铸超云）对前叉的压铸工艺进行模拟分析。浇注温度为660 ℃，模具工作温度设置为200 ℃左右，最大低速压射速度为0.57 m/s，低速采用匀加速压射工艺，高速压射速度为4 m/s。分别模拟了三种不同起高速位置对充填过程的影响。高速位置如图3所示。高速位置1设置在内浇道，高速位置2往前移到了前叉铸件圆柱孔末端，高速位置3则进一步将起高速位置前移到了铸件的分叉部位。高速位置1的充填过程模拟结果如图4所示，从图

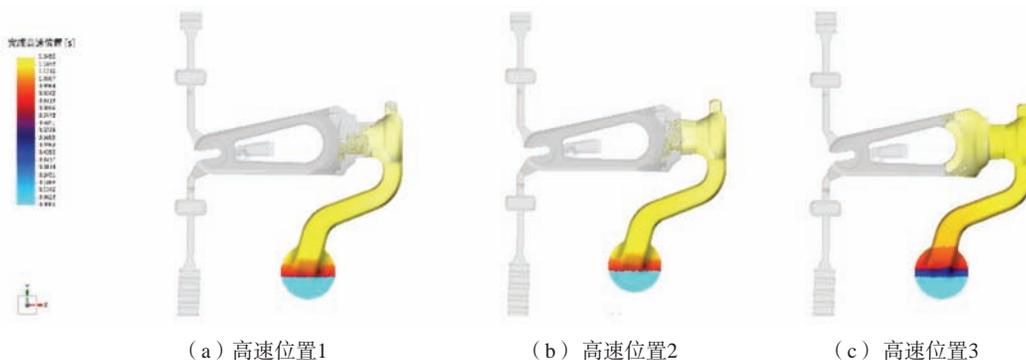


图3 起高速位置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the high-speed starting position

中可以看出，由于在低速压射阶段采用了匀加速压射技术，所以铝液在压室中运动平稳，没有出现翻滚或回流现象，从而避免了将压室气体卷入铝液中，最终带入铸件，如图4a、b、c和d所示。在内浇道位置起高速后，铝液进入型腔时流动平稳，由于采用了等壁厚的浇口，没有出现喷射现象，如图4e所示。但是，在铝液到达前叉铸件圆柱孔末端位置时，由于型腔空间增大，从而产生一定喷射现象，合金液在此处产生紊

流，如图4f所示。当铝液完成此部位填充后，后续的充填过程都比较平稳，如图4g和h所示。从图5a所示的高速位置1充填过程卷气压力分布也可以看出，在前叉铸件圆柱孔末端附近卷气压力较大，容易产生气孔和夹渣等缺陷。

为了消除前叉铸件圆柱孔末端位置的卷气，考虑将起高速位置往前移，如图3b和c所示。高速位置往前移后的充型过程卷气压力分布的模拟结果如图5所示。

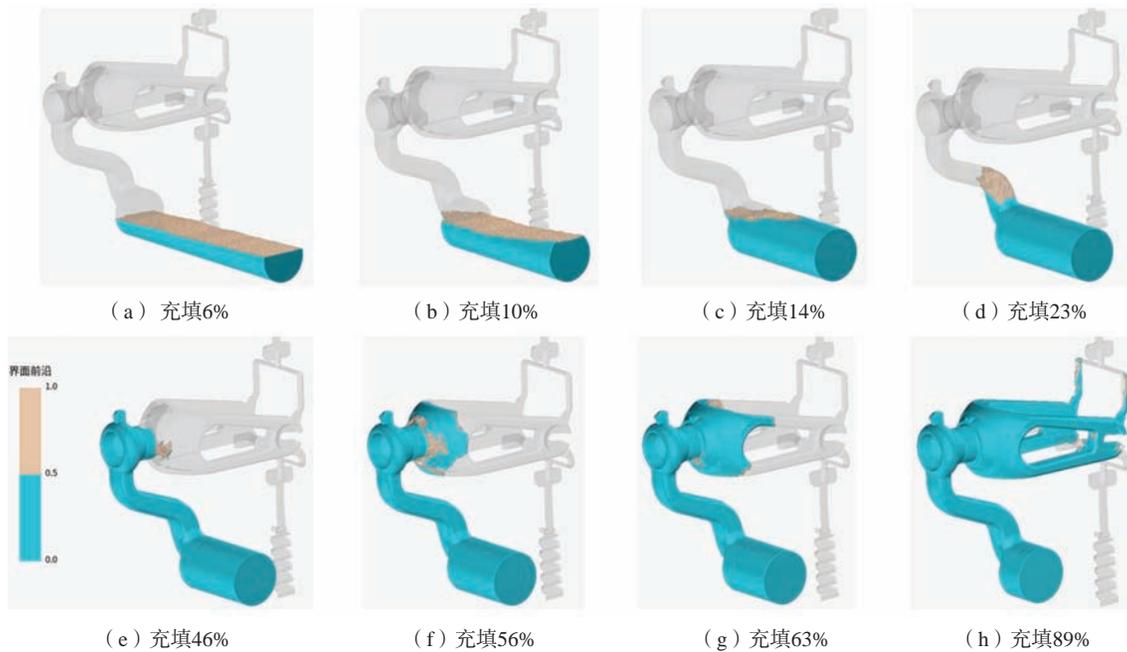


图4 高速位置1充填过程模拟结果

Fig. 4 Simulation results of the filling process at high-speed position 1

从图中可以看出,当起高速前移到位置2时,在前叉铸件圆柱孔末端位置的卷气压力有所改善,但是还没有完全消除,如图5b所示;当起高速前移到位置3时,在前叉铸件圆柱孔末端位置的卷气压力基本消除,如图5c所示。从图6所示高速位置3充填过程的温度分布图可以看出,合金液进入型腔后,流动平稳,由于高速位置前移到了零件型腔中,避免了在铸件圆柱孔末端

位置产生大的喷射流,从而可消除该处的卷气现象。另外,高速位置前移会延长充型的时间,增加形成冷隔、浇不足等缺陷的风险。但是,从其温度分布图可以看到,最后充填完型腔后合金液还具有较高的温度,基本上都在 $620\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,高于A380铝合金的液相线温度( $599\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),低温的合金液基本上都留在了料筒中,没有进入型腔。

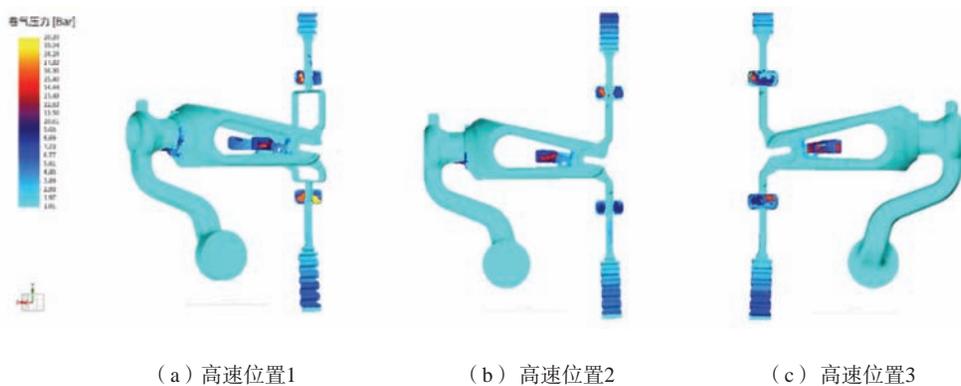


图5 充填过程卷气压力分布图

Fig. 5 Distribution diagram of the gas pressure during filling process

### 3 生产实践

为了进行验证模拟优化方案的可行性,采用该压铸工艺开发了压铸模具进行实际生产,具体压射工艺为:铝熔体出炉温度为 $660\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,低速压射采用匀加速压射工艺,其最高临界速度为 $0.57\text{ m/s}$ ,高速速度为 $4\text{ m/s}$ ,模具温度控制在 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。分别采用高速

位置2和3进行了生产实践验证,都获得了外形轮廓清晰、表面光滑、尺寸精度高的前叉压铸件,前叉压铸件的实物图如图7所示。通过对铸件整体的X光透射探伤发现,采用高速位置2进行生产的前叉压铸件在靠近圆柱孔末端位置存在较多的孔洞,如图8a所示。采用阿基米德法获得铸件的密度为 $2.718\text{ g/cm}^3$ ,孔隙率

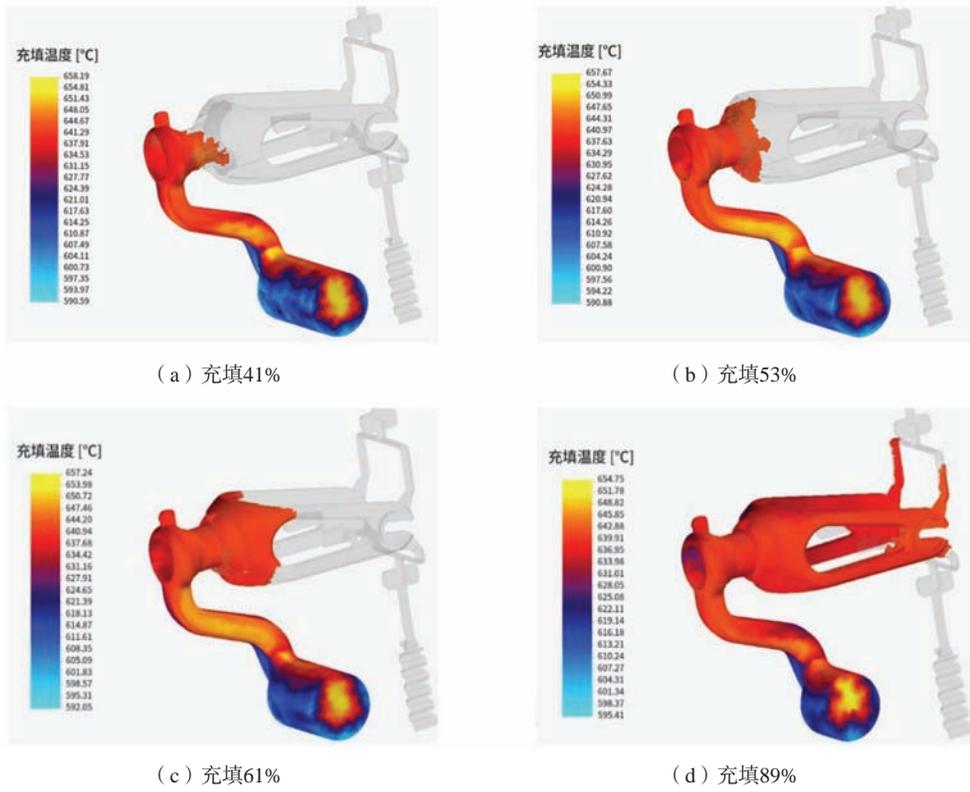


图6 高速位置3充填过程模拟结果

Fig. 6 Simulation results of the filling process at high-speed position 3



图7 前叉压铸件

Fig. 7 Castings of the front fork



图8 前叉压铸件X射线探伤图

Fig. 8 X-ray inspection images of the front fork die castings

为8.09%。而采用高速位置3所生产的铸件内部没有发现孔洞，如图8b所示，将铸件从中间剖开后也没有发现缩松、缩孔、气孔和氧化夹杂等缺陷，剖切面没有发现孔洞，组织致密，如图7b所示。铸件的密度达到

2.739 g/cm<sup>3</sup>，孔隙率仅为0.39%。由此可见，压铸件的孔隙率远小于2%的压铸件标准，同时也说明压铸件的含气量很低。

另外将高速位置3所生产的铸件进行525 °C+4 h固

溶处理和170 °C+2 h时效处理,其表面没有发现鼓泡现象。通过在前叉铸件本体取样进行了力学性能测试,铸态的抗拉强度260 MPa,屈服强度169 MPa,伸长率为2.2%,T6处理后强度和韧性都得到了较大的提升,即抗拉强度提高到342 MPa,屈服强度为222 MPa,伸长率为3.6%。铸件的组织如图9所示,从图中可以看出,铸态组织中 $\alpha$ -Al相呈颗粒状或近球状,经过T6处理后,硅相呈颗粒状或短棒状,同时有 $Al_2Cu$ 和 $Mg_2Si$

等颗粒增强相析出,在组织分布也较为均匀,从而使得铸件性能得到进一步的强化。最后前叉压铸件经实际装车经20万次疲劳冲击强度测试没有断裂或变形,符合电动滑板车产品的前叉零件技术要求。此件由2021年至2023年生产,已生产近4万台套。最后一批交货的铸件经超115万次负载疲劳实验(图10),铸件仍未发生断裂,远超前叉零件技术要求。

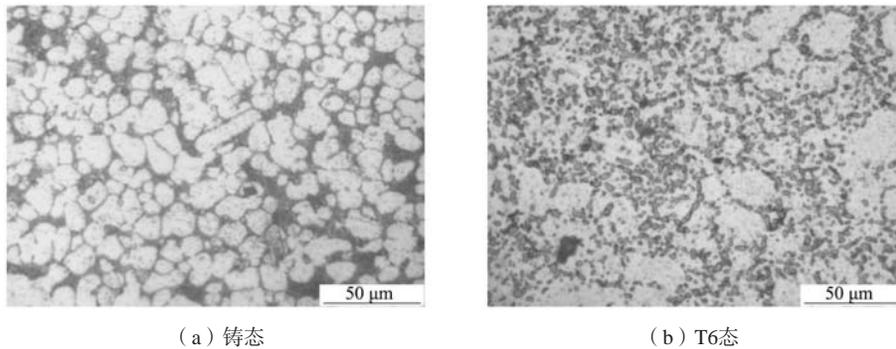


图9 压铸件显微组织  
Fig. 9 Microstructures of the die castings

#### 附录 试验现场图示

#### Appendix Illustration of the test site

滑板车负载疲劳实验报告					
				打印日期:	2023年2月22日
试验日期	测试编号	要求测试时间	设定里程 (km)	设定振动次数 (n)	
2023/2/21 11:19	布加迪B10	100000000	1000	3000000	
振动块个数	时速 (km/h)	实测试验用时 (s)	实测行驶里程 (km)	实测振动次数 (n)	
3	8.5	13202.85	1000	1152156	

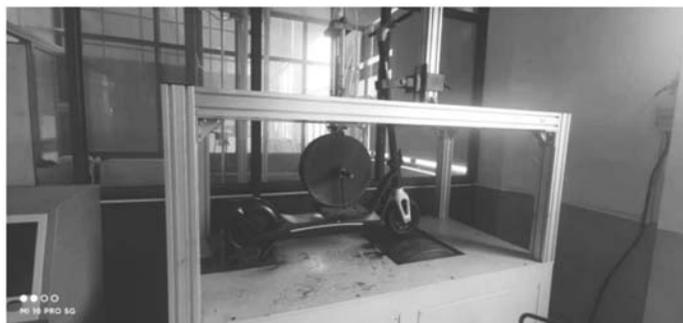


图10 前叉装配负载疲劳测试报告  
Fig. 10 Test report of the assembly load fatigue of the front fork

## 4 结论

(1) 基于智铸超云—压铸CAE云计算平台,对不同压射工艺方案进行压射过程的模拟分析,结果表明,采用高速位置3进行压射时,合金液进入型腔后,流动平稳,由于高速位置前移到了零件型腔中,避免

了在铸件圆柱孔末端位置产生大的喷射流,从而可消除该处的卷气现象。

(2) 压铸生产工艺为铝液浇注温度为660 °C,低速压射采用匀加速压射工艺,其最高临界速度为0.57 m/s,高速速度为4 m/s,模具温度控制在200 °C左

右,起高速在高速位置3,获得了外形轮廓清晰、表面光滑、尺寸精度高、无缺陷的前叉压铸件。

(3)前叉压铸件铸态的抗拉强度260 MPa,屈服强度169 MPa,伸长率为2.2%;T6处理后抗拉强度提高到342 MPa,屈服强度为222 MPa,伸长率为3.6%,满

足了电动滑板车产品的前叉零件技术要求。

(4)前叉压铸件的密度达到 $2.739\text{ g/cm}^3$ ,孔隙率为0.39%,压铸件的孔隙率远小于2%的压铸件标准,同时也说明压铸件的含气量很低,实现了压铸件的低含气量成形。

#### 参考文献:

- [1] 张伟,李忠林,张子珂,等.基于高性能计算的云原生超大规模压铸模拟技术[J].铸造,2023,72(4):451-454.
- [2] DONG Xi-xi, ZHU Xiang-zhen, JI Shou-xun. Effect of super vacuum assisted high pressure die casting on the repeatability of mechanical properties of Al-Si-Mg-Mn die-cast alloys [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 266: 105-113.
- [3] 董普云,赵海东,王芳.ADC12压铸件卷入氧化膜特征的研究[J].铸造技术,2011,32(8):1139-1142.
- [4] 杨金辉,薛斌,许忠斌.压铸工艺对压铸件质量影响的研究现状及发展[J].铸造技术,2020,41(1):62-65.
- [5] 祁明凡,李静媛,康永林,等.大体积流变浆料制备与压铸成形一体化工艺及其应用[J].精密成形工程,2020,12(3):12-19.
- [6] 张宇,王连登,许朋朋,等.薄壁铝合金滤波器散热壳体RSF半固态压铸工艺模拟[J].特种铸造及有色合金,2016,36(2):165-168.
- [7] 赵艳红,孟昭昕,黄勇,等.铝合金外壳半固态压铸数值模拟与工艺优化[J].铸造,2016,65(4):351-354.
- [8] 赵卫红,苏海章,黄志垣,等.高真空压铸技术在汽车变速箱壳体中的应用[J].特种铸造及有色合金,2018,38(5):514-516.
- [9] 桑卓越,周志明,陈建伟,等.真空压铸铝合金减震塔数值模拟工艺优化及应用[J].特种铸造及有色合金,2022,42(9):1185-1188.
- [10] 李建宇,管胜敏,吴树森,等.大型复杂离合器壳体高致密化压铸[J].铸造,2020,69(11):1198-1202.
- [11] 龙文元,龚杰,宋国金.基于云计算的路由器盒盖半固态压铸工艺设计及优化[J].特种铸造及有色合金,2021,41(5):638-640.
- [12] 龙文元,龚杰,宋国金.中小型铝合金铸件半固态流变压铸技术研究[J].铸造,2021,70(6):651-656.

## Research and Practice on Low Gas Content Die Casting Process for E-scooter Forks

GONG Jie<sup>1,2</sup>, LONG Wen-yuan<sup>1</sup>, XIE Long-bao<sup>2</sup>

(1. School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, Jiangxi, China; 2. Xiamen Genai Technology Co., Ltd., Xiamen 361028, Fujian, China)

#### Abstract:

Based on the die-casting CAE cloud computing platform SupreCast, the die-casting process of the e-scooters fork casting has been designed and optimized. The impact of different injection processes on the quality of die-casting parts has been analyzed, and the experimental verification of the injection process for actual casting production was conducted. The results showed that the simulation results were basically consistent with the actual production results. By using the optimized injection process design, the front fork die casting with clear contour, smooth surface, high dimensional accuracy, and no defects was obtained, which achieved T6 treatment of the die casting and further improved its mechanical performance. Through bench experiments, the casting met the technical requirements for the fork parts of e-scooter products, achieving the goal of "replacing forging with casting".

#### Key words:

fork; low gas content die-casting; cloud computing; process optimization