

1000 型铝合金压铸梯级结构及压铸工艺优化

柯春松<sup>1</sup> 唐 杰<sup>2</sup> 庄 舰<sup>1</sup> 刘红娟<sup>1</sup>

(1.宁波职业技术学院机电工程学院;2.爱柯迪股份有限公司)

**摘 要** 在铝合金梯级结构设计中,既要考虑梯级的安全性和轻量化,又要考虑梯级的压铸成形工艺。采用 ABAQUS 有限元分析软件对梯级进行静态和动态分析,优化梯级结构。采用 MAGMA 软件,对梯级的浇注系统进行充型和凝固数值模拟分析,优化浇注系统和压铸成形工艺。通过产品试制验证,1000 型铝合金压铸梯级达到国家质量标准和企业生产要求。

**关键词** 梯级;有限元法;数值模拟;压铸工艺

**中图分类号** TG249.2 **文献标志码** A

**DOI**:10.15980/j.tzzz.2023.06.023

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Structure and Die Casting Process Optimization of Model 1000 Aluminum Alloy Die-cast Stair

Ke Chunsong<sup>1</sup>, Tang Jie<sup>2</sup>, Zhuang Jian<sup>1</sup>, Liu Hongjuan<sup>1</sup>

(1.School of Mechanical and Electrical Engineering, Ningbo Polytechnic; 2.IKD Co., Ltd.)

**Abstract:** For the design of aluminum alloy stair structure, it is necessary to consider not only safety and light-weight of the stair, but also the die casting process of the stair. By using ABAQUS software, the static and dynamic analysis of the aluminum alloy stair structure were carried out to optimize the stair structure. By using MAGMA software, the filling and solidification numerical simulation analysis of the stair gating system were carried out to optimize the gating system and die casting process. Through trial production verification, the stair meets the national quality standards and the production requirements of enterprises.

**Key Words:** Stair, Finite Element Method, Numerical Simulation, Die Casting Process

梯级是自动扶梯最主要的零件。梯级分为整体式和装配式,整体式梯级一般为铝合金整体压铸,由踏板、踢板及支架 3 部分组成,踏面和踢面铸有筋条,起防滑作用和相邻梯级导向作用。整体式梯级质量轻、刚度高、精度和外观品质高,便于制造、装配和维修。随着压铸技术发展,整体式压铸铝合金梯级逐渐取代装配式梯级,在自动扶梯中得到大量使用<sup>[1]</sup>。

1 梯级结构优化

梯级部件结构主要包括:梯级、梯级轴、主轮、辅轮等,见图 1。整体式压铸梯级的主要特点是体积大、长度长。国内自动扶梯一般采用 600、800、1 000 mm,一般双梯的梯级长度常用 1 000 mm。梯级铸件质量一般在 13 kg 左右,有的甚至达 15 kg,壁厚一般为 3 mm 左右。梯级要求安全、质量轻、刚度好,弹性变形小,耐腐蚀性强,装拆维护方便,制造成本及能耗低<sup>[2]</sup>。

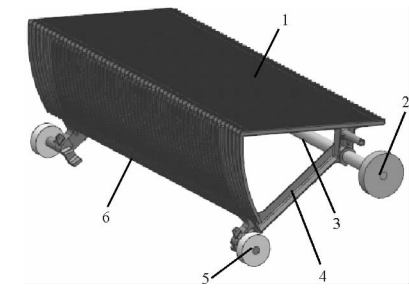


图 1 整体式压铸铝合金梯级部件结构图  
Fig.1 Structure diagram of integral die-cast aluminum alloy stair components

1.踏板 2.主轮 3.梯级轴 4.支架 5.辅轮 6.踢板

1.1 梯级材料特性

1000 型梯级选用 A380 铝合金,其化学成分和力学性能要求见表 1。该铝合金具有较高的强韧性能、良好的切削性和铸造性,其屈服强度为 160 MPa,弹性模量为 72 GPa,泊松比为 0.3,密度为 2.7 g/cm<sup>3</sup>。

收稿日期:2022-12-10;修改稿收到日期:2023-01-14  
第一作者简介:柯春松,男,1973 年出生,副教授,浙江宁波(315800),E-mail:846617345@qq.com  
引用格式:柯春松,唐杰,庄舰,等. 1000 型铝合金压铸梯级结构及压铸工艺优化[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(6):850-856.  
KE C S, TANG J, ZHUANG J, et al. Structure and die casting process optimization of model 1000 aluminum alloy die-cast stair[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(6):850-856.

表 1 A380 合金的化学成分及力学性能

Tab.1 The chemical composition and mechanical properties of A380 alloy

| w <sub>B</sub> /% |         |      |      |      |      |    | 力学性能                     |                            |          |          |
|-------------------|---------|------|------|------|------|----|--------------------------|----------------------------|----------|----------|
| Cu                | Si      | Mg   | Zn   | Fe   | Mn   | Al | 抗拉强度 σ <sub>b</sub> /MPa | 屈服强度 σ <sub>0.2</sub> /MPa | 伸长率 δ /% | 布氏硬度(HB) |
| 2.0~4.0           | 7.5~9.5 | ≤0.3 | ≤1.0 | ≤1.3 | ≤0.5 | 余量 | ≥320                     | ≥160                       | ≥3.5     | ≥80      |

1.2 梯级结构设计

在梯级结构设计中,既要考虑安全、技术要求符合国家标准,同时也要考虑整体式梯级的轻量化及压铸工艺。梯级最大外形尺寸为 1 009 mm×411 mm×340 mm,对 3 种不同的梯级结构设计进行比较,见图 2。

(1)结构 1 梯级壁厚为 1.8 mm,横向有 2 根主加强筋,筋板厚度为 3.5 mm,高度为 45 mm,长度为 810 mm。同时为加强踏板的刚度,在踏板中间设计了一根小的加强筋。纵向有 4 根主加强筋,筋板厚度为 2 mm,见图 2a。

(2)结构 2 梯级壁厚为 1.8 mm,横向有 1 根主加强筋,筋板厚 3 mm,高度为 65 mm,长度为 810 mm。纵向有 5 根主加强筋,筋板厚度为 2.5 mm,见图 2b。

(3)结构 3 梯级壁厚为 1.8 mm,横向筋板最小端壁厚为 3 mm,高度为 85 mm,长度为 810 mm。纵向有 3 根主加强筋,筋板厚度为 2 mm,见图 2c。

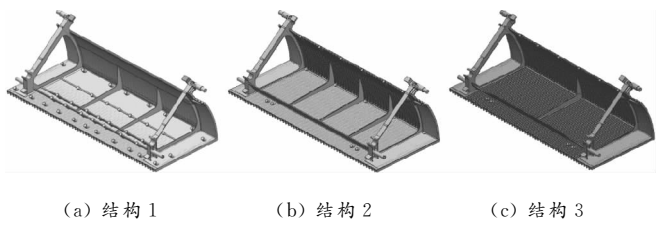
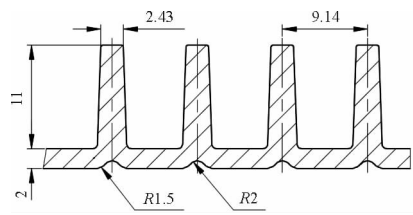
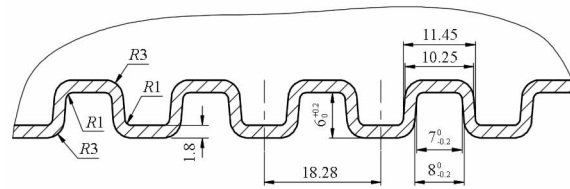


图 2 3 种不同的梯级结构设计  
Fig.2 Different stair structures

梯级踏板(结构 3)的梳齿结构见图 3,踏板的壁厚为 2 mm,梳齿高度为 11 mm,单个梳齿小端厚度为 2.43 mm,



(a) 踏板梳齿截面图



(b) 踢板梳齿槽截面图

图 3 梯级踏板、踢板细节尺寸示意图(结构 3)

Fig.3 Schematic diagram of pedal, kick plate of stair detail size

踏板上共有 111 个梳齿,相邻 2 个梳齿之间的中心距为 9.14 mm。踢板梳齿槽结构见图 3b,梳齿槽壁厚为 1.8 mm,梳齿槽深度为 6 mm,相邻 2 个梳齿槽之间的中心距为 18.28 mm。3 种不同的整体式梯级结构设计对比分析见表 2。

表 2 3 种不同的整体式梯级结构设计对比分析

Tab.2 Comparative analysis of different integral stair structures

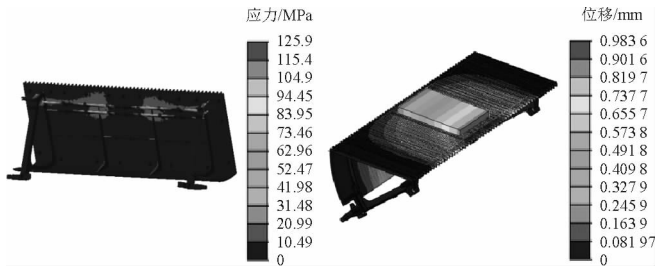
| 结构 | 说明                                                | 质量/kg | 体积/cm <sup>3</sup> |
|----|---------------------------------------------------|-------|--------------------|
| 1  | 横向主加强筋为 2 根,辅加强筋为 1 根,纵向主加强筋为 4 根,踏板、踢板内表面均为平面结构。 | 12.7  | 4 710              |
| 2  | 横向主加强筋为 1 根,纵向主加强筋为 5 根,踏板内表面为平面结构、踢板内表面为梳齿槽结构。   | 11.0  | 4 064              |
| 3  | 横向主加强筋为 1 根,纵向主加强筋为 3 根,踏板内表面为波形槽结构、踢板内表面为梳齿槽结构。  | 10.5  | 3 888              |

1.3 梯级静力学分析

根据 GB 16899-2011,梯级应进行抗弯变形试验,梯级踏板中央放置一块钢板,钢板尺寸为 0.2 m×0.3 m,厚度为 28 mm,并使其 0.2 m 的边与梯级前缘平行,0.3 m 的边与梯级前缘垂直,乘客载荷为 3 000 N,垂直作用在钢板上,梯级踏板的变形量不应大于 4 mm,且应无永久变形<sup>[3]</sup>。

采用 ABAQUS 有限元分析软件对 3 种不同结构的梯级进行静力学分析。根据梯级的实际工况,将主轮位置所在的轴套内表面施加固定约束,钢板置于梯级中间,施加 3 000 N 载荷,静力学分析见图 4~图 6。

(1)结构 1 梯级的等效应力见图 4a,最大应力为 125.90 MPa,发生在两边斜支架与踏面筋板交汇附近,小于梯级屈服强度 160 MPa。梯级的等效位移见图 4b,最大位移为 0.98 mm,发生在踏面边缘的中间位置,小于国家标准要求的不大于 4 mm 变形量。



(a) 梯级等效应力云图 (b) 梯级等效位移云图

图 4 梯级结构 1 静力学分析

Fig.4 Statics analysis of the first stair structure

(2)结构 2 梯级的等效力见 图 5a,最大应力为 50.18 MPa,发生在两边主动轮轴轴套附近。梯级的等效位移见图 5b,最大位移约为 0.41 mm,发生在踏面边缘的中间位置。

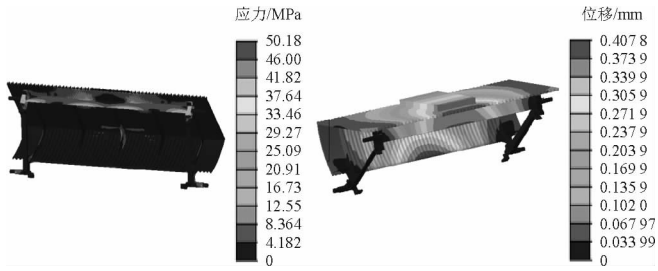


图 5 梯级结构 2 静力学分析

Fig.5 Statics analysis of the second stair structure

(3)结构 3 梯级的等效力见 图 6a,最大应力为 49.20 MPa,发生在两边斜支架与踏面筋板交汇附近。梯级的等效位移见图 6b,最大位移约为 0.34 mm,发生在踏面边缘的中间位置。

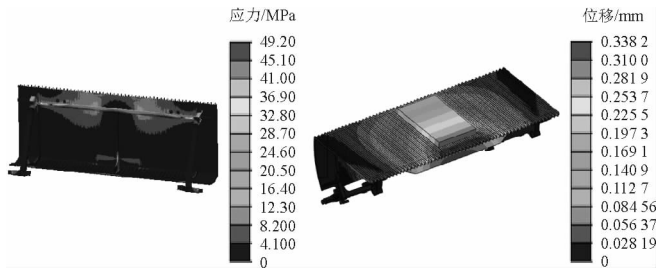


图 6 梯级结构 3 静力学分析

Fig.6 Statics analysis of the third stair structure

通过以上对比分析,发现结构 3 在最大应力和最大位移上均小于结构 1 和结构 2,安全系数为 3.25。同时在质量上,结构 3 比结构 1、2 分别减少了 21%和 5%,有效实现了“轻量化”设计。因此,结构 3 的结构更加合理,成本更低,安全系数更高,为最优设计方案。

1.4 梯级模态分析

利用 ABAQUS 软件对梯级(结构 3)进行模态分析,在主轮和辅轮所在的轴套施加固定约束,铝合金梯级前 6 阶模态的振型和振幅见图 7。其中第 1 阶模态,频率为 101.60 Hz,振幅为 1.032 mm;第 2 阶模态,频率为 186.95 Hz,振幅为 1.028 mm;第 3 阶模态,频率为 215.56 Hz,振幅为 1.035 mm;第 4 阶模态,频率为 248.53 Hz,振幅为 1.041 mm;第 5 阶模态,频率为 257.62 Hz,振幅为 1.613 mm;第 6 阶模态,频率为 281.39 Hz,振幅为 1.352 mm。通过模态分析可知,梯级的固有频率大于 20 Hz<sup>[4]</sup>。

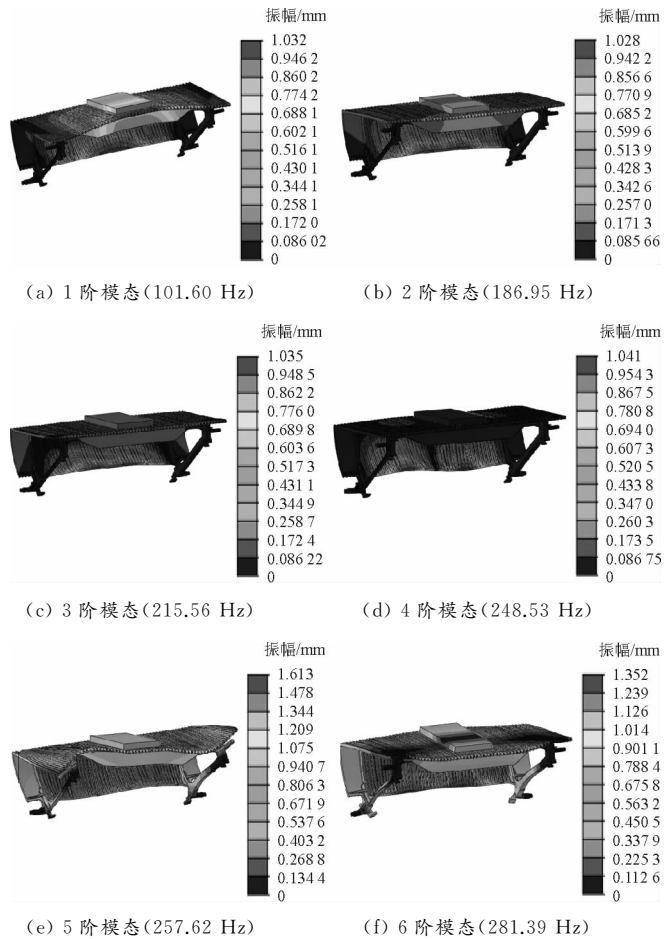


图 7 1000 型铝合金梯级前 6 阶模态分析

Fig.7 The first six stepmodal analysis of model 1000 aluminum alloy stair

1.5 梯级谐响应分析

除了静载荷试验和模态分析以外,梯级还应进行动载荷试验,模拟实际使用的工况,验证梯级的实际性能。试验应以 5~20 Hz 的任一频率的无干扰的谐振力波,施加 500~3 000 N 的动态载荷进行试验,发现梯级不产生裂纹,踏面表面变形不大于 4 mm<sup>[5]</sup>。在 ABAQUS 软件对梯级(结构 3)进行谐响应分析,20 Hz 谐振力波时,梯级最大等效位移为 0.64 mm,变形量小于 4 mm,见图 8,最大等效力为 51.75 MPa,低于铝合金 A380 的屈服强度 160 MPa,见图 9。通过谐响应

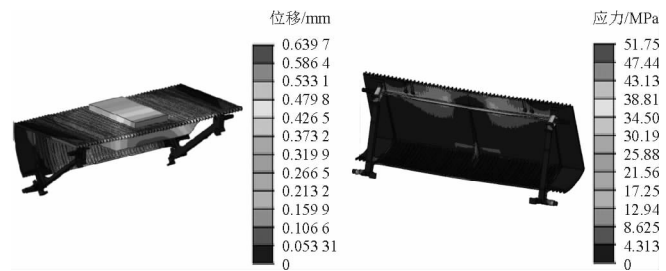


图 8 等效位移云图

Fig.8 Nephogram of e-equivalent displacement

图 9 等效应力云图

Fig.9 Nephogram of e-equivalent stress

分析,梯级动载荷下,满足梯级的国家安全标准。

2 梯级压铸工艺优化

梯级外形结构复杂,体积大、壁厚薄,分布有许多梳齿结构和加强筋板,尺寸精度和变形控制要求高,铸件成形难度大,容易产生气孔、缩孔、冷隔、粘模、铸不足和裂纹等压铸缺陷,主要缺陷是冷隔<sup>[6]</sup>。梯级收缩率为0.55%,温差控制在 40 ℃之内,投影面积为 4 336 cm<sup>2</sup>,选用 30 000 kN 压铸机。梯级气密性没有要求,铸造压力适当降低。铝液充填过程中,让铝液进入型腔后,再切换成高速充填,高速行程短一点。通过对梯级铸件压铸成形工艺进行分析,确定压铸工艺参数见表 3<sup>[7]</sup>。

表 3 A380 铸件的压铸工艺参数

| Tab.3 Die casting parameters of A380 casting |           |         |                            |                            |                       |
|----------------------------------------------|-----------|---------|----------------------------|----------------------------|-----------------------|
| 初始温度/℃                                       | 液相线温度/℃   | 固相线温度/℃ | 压室长度/mm                    | 压室直径/mm                    | 压室截面积/cm <sup>2</sup> |
| 650±10                                       | 578       | 515     | 700                        | φ180                       | 254.34                |
| 料饼厚度/mm                                      | 压射料重/kg   | 充填率/%   | 低速区速度/(m·s <sup>-1</sup> ) | 高速区速度/(m·s <sup>-1</sup> ) | 增压区压力/MPa             |
| 35~50                                        | 39.1~62.7 | 40~50   | 0.2~0.3                    | 3.0~4.0                    | 80                    |

2.1 浇注系统设计

(1)内浇口位置选择 梯级(结构 3)上有多条纵向加强筋,在设计浇注系统时,铝液的填充方向要与加强筋方向一致,使加强筋整条都能得到填充,避免充型过程中出现压铸缺陷。梯级踏板内侧有一条横跨梯级的加强筋,此筋板凹陷在型腔内部,若强度不足,会出现粘模情况,模具极难处理。因此,铝液需对其进行正向充填,以使更多的铝液优先填充加强筋的底部,从而排出加强筋内部的气体。图 10 为内浇口位置选择。从图 10a 可知,如果选择在梯级踏板长边进料,铝液填充方向在加强筋填充方向上流量过小,铝液很难冲入加强筋,仅靠压力流,难以保证加强筋的致密性。从图 10b 可知,如果选择在梯级踢板长边进料,铝液填充方向在加强筋填充方向上流量较大,能有比较好的填充效果。所以,内浇口位置选择在踢板长边位置<sup>[8]</sup>。

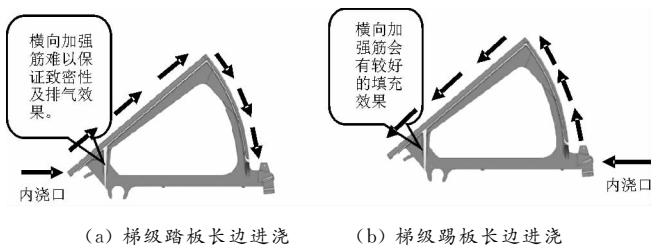


图 10 内浇口位置选择

Fig.10 Ingate location selection

(2)内浇口截面积计算和充填速度验算 内浇口截面积计算如下:

$$A_{内} = \frac{km}{\rho vt} \tag{1}$$

式中, $A_{内}$  为内浇口截面积,cm<sup>2</sup>;  $k$  为倍数系数,一般为 1.1~1.3;  $m$  为产品质量,g;  $\rho$  为铝合金液密度,g/cm<sup>3</sup>;  $v$  为内浇口处铝液的充填速度,m/s;  $t$  为铝液充满型腔所需的时间,s。

充填速度对铸件成形质量和模具寿命有着重要影响,一般充填速度控制在 30~60 m/s 范围内,充填速度计算如下:

$$A_{冲} v_{冲} = A_{内} v_{充} \tag{2}$$

式中, $A_{冲}$  为压射冲头截面积;  $v_{冲}$  为压射冲头速度;  $v_{充}$  为充填速度<sup>[9]</sup>。

针对梯级(结构 3),计算内浇口截面积和验算充填速度。梯级体积为 3 888 cm<sup>3</sup>,质量  $m$  为 10.5 kg,一般壁厚为 1.8 mm,筋板壁厚为 2.43 mm,最大壁厚为 25.45 mm。

根据经验,一般溢流槽质量占产品质量的 20% 左右,系数  $k$  取 1.2。根据产品的壁厚,充填速度  $v$  取 40 m/s,充型时间  $t$  取 0.06 s。铝合金液态密度  $\rho = 2.4$  g/cm<sup>3</sup>。代入式(1),内浇口截面积为 21.88 cm<sup>2</sup>。

采用 30 000 kN 压铸机,压射冲头直径选为 φ180 mm,高速压射阶段,压射冲头的速度选为 4 m/s,根据式(2),验算充填速度:

$$v_{充} = (A_{冲}/A_{内})v_{冲} = 46 \text{ m/s}$$

通过计算,充填速度小于 60 m/s,充填速度合理,也说明内浇口截面积合理。

(3)3 种不同的浇注系统设计 根据内浇口截面积,结合梯级的结构特征,设计 3 种不同的浇注系统进行分析比较,见图 11。①方案 1,梯级属于结构件中大范围平板类型零件,此类产品通常采取平铺进料的方案。浇口布置采用均匀分布的梳形浇口的形式,进浇位置选择在踢板侧,设计 10 支分流道,便于浇注系统与梯级形成断口,减少浇注系统对产品变形的影响,见图 11a。②方案 2,根据梯级的壁厚和结构特征,浇注系统采用梳形结构,开设 10 支分流道,内浇口厚度为 3 mm,宽度为 730 mm,长度为 1.5 mm。料饼厚度为 50 mm,便于产品补缩,见图 11b。③方案 3,浇注系统采

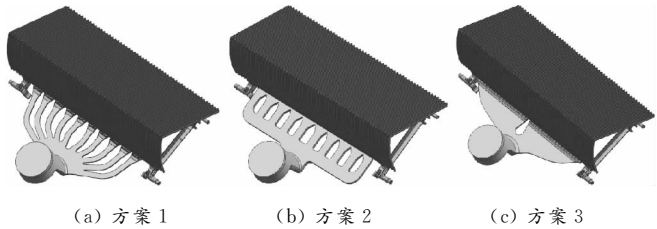


图 11 梯级浇注系统设计

Fig.11 Gating system design of the stair

用长锥形切线流道,浇口沿分型面开设,在浇口宽度方向,填充范围宽,铝液填充流动较均匀。内浇口厚度为 2.8 mm,宽度为 780 mm,长度为 1.5 mm,见图 11c。

2.2 数值模拟仿真分析

采用 Magma 软件对梯级的 3 种浇注系统设计方案进行模流分析<sup>[10]</sup>,结果分别见图 12~图 14。

(1) 充填过程分析 方案 1,从图 12 可以看出,充填达 46% 时,中间的 6 支分流道,铝液已经到达内浇口,但两边的分流道充填距离长,铝液明显滞后。充填达 62% 时,两边分流道散热快、料温低,同时在铸件梯级轴区域出现裹气,此处存在卷气风险。充填达 82% 时,踏板中间区域填充完毕,两侧区域尚未完全填充,铝液温度偏低,易产生冷隔。充填达 98% 时,铸件内部大部分区域均低于液相线,冷隔浇不足风险高。

方案 2,从图 13 可以看出,充填达 46% 时,铝液在中间分流道充填速度快,两边分流道充填速度慢。充填达 62% 时,流道内有卷气,铸件内部卷气严重,料温较

低。充填达 82% 时,在产品转角部位出现明显裹气,此处存在卷气风险。充填达 98% 时,铸件末端部位出现低于液相线的冷料,此处冷隔风险较高。

方案 3,从图 14 可以看出,充填达 46% 时,铝液充填均匀、充填范围较宽,有利于铸件成形。虽然流道部位出现滞留气体,但模流分析显示气体并未随铝液进入产品。充填达 62% 时,充型温度较好,各部位温度高于液相线,前锋冷料可通过溢流槽排出,产品内卷气风险较低。充填达 82% 和 98% 时,铸件末端有些地方出现卷气,但可以通过溢流槽排除。

(2) 凝固过程分析 对 3 种浇注系统设计方案的凝固过程进行分析,见图 15。可以看出,3 种浇注系统的凝固过程基本相似。凝固温度分析显示,两侧初始温度较低,凝固速度最快。踏面和踢面依次凝固,浇注系统最后凝固,起到补缩作用。梯级铸件具有薄壁的特点,凝固顺序对铸件质量影响不大<sup>[11]</sup>。

通过以上 3 种浇注系统充填过程和凝固过程的模

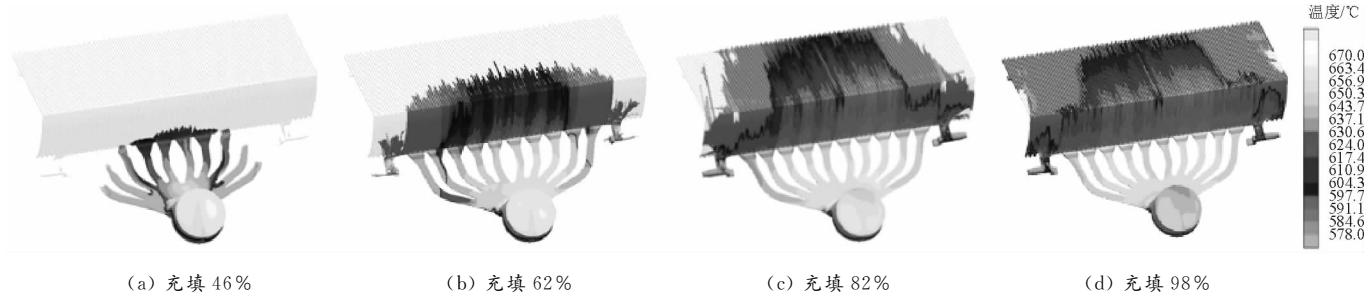


图 12 方案 1 充填过程分析  
Fig.12 The filling process analysis of the first scheme

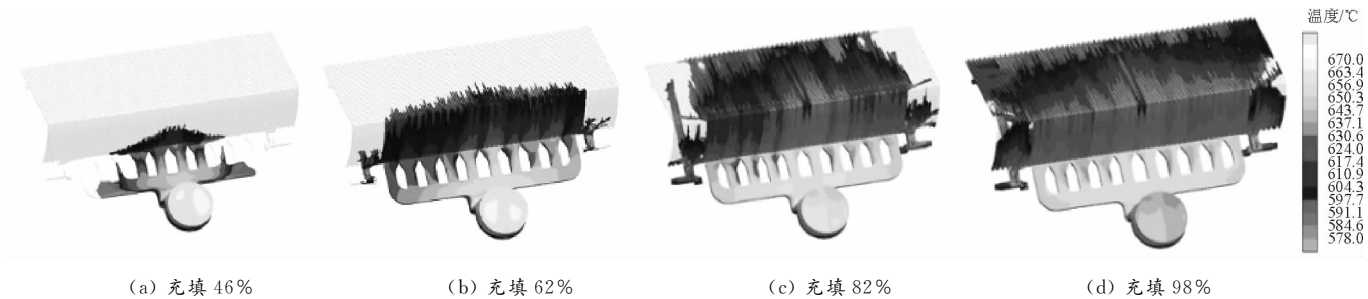


图 13 方案 2 充填过程分析  
Fig.13 The filling process analysis of the second scheme

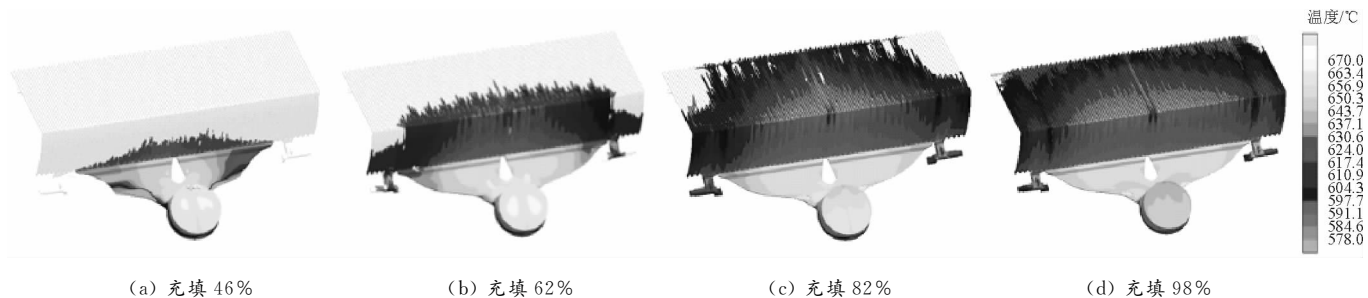


图 14 方案 3 充填过程分析  
Fig.14 The filling process analysis of the third scheme

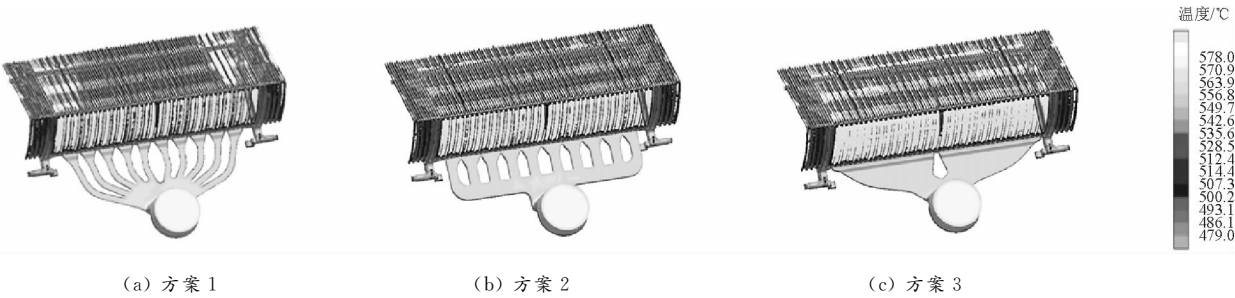


图 15 3 种方案凝固过程分析(凝固 45% 状态)

Fig.15 The solidification process analysis of three schemes

流分析,发现方案 3 为最优方案。因此,选择方案 3 作为梯级的浇注系统最终设计方案。

2.3 排溢系统设计

在压铸过程中,铝液通过内浇口进入型腔,其最后充填的部位是踏板的底部边缘,易形成夹渣和气孔。由于铸件要求表面光滑平整,无冷隔、气孔等,设计时,在踏板的底部边缘分型面处布置尺寸为 270 mm×20 mm×15 mm 溢流槽 2 个,460 mm×20 mm×15 mm 溢流槽 1 个,以充分排气和溢料,见图 16。根据模流分析结果,在踏板的两侧边,合理布置尺寸为 80 mm×50 mm×10 mm 溢流槽各 2 个。在两边支架处,合理布置尺寸为 60 mm×40 mm×12 mm,30 mm×30 mm×12 mm 和 90 mm×15 mm×3 mm 溢流槽各 1 个,溢流口厚度设计为 1.5 mm。溢流槽后面开设排气槽,排气槽深度设计为 0.18 mm,排气槽形状为“Z”字形,防止铝液从排气槽直接喷射出来。

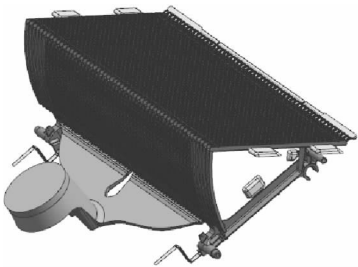


图 16 梯级溢流系统和排气系统设计

Fig.16 Overflow system and exhaust system design of stair

3 产品试制

大型复杂压铸模具的制造难度大,1000 型梯级压铸模梯级尺寸大,长度 1 009 mm,模芯采用镶拼结构,分段加工好后再进行组装。根据梯级结构,动、定模芯各采用 8 块镶件组成。为了提高梯级表面光滑平整度,减少压铸飞边,需提高镶件的加工精度和装配精度,镶件采用五轴加工中心加工,产品加工精度达到 0.003~0.005 mm,保证镶件加工精度的稳定性,模框采用整体式,以提高模架的整体刚性。梯级选用 30 000 kN 压铸

机,模具温度为 (200±10)℃,低速压射速度为 0.2 m/s,高速压射速度为 4.0 m/s,增压阶段的铸造压力为 80 MPa。梯级铸件见图 17,通过检验,铸件品质满足国家标准<sup>[12]</sup>。



(a) 铸件外部结构 (b) 铸件内部结构

图 17 1000 型梯级压铸件

Fig.17 Model 1000 stair die casting

4 结 论

(1)针对不同的梯级结构设计,通过有限元分析,对梯级的最大变形和最大应力进行分析,优化了梯级结构,实现了梯级轻量化设计,降低了梯级成本。

(2)通过充填过程和凝固过程数值模拟分析,优化了浇注系统,解决了梯级易产生气孔、冷隔等铸造缺陷。

(3)通过试模,优化压铸工艺参数,铸件的各项指标满足国家标准,产品顺利实现量产。

参 考 文 献

[1] QING G W, WANG H F, HU J B. Study on fuzzy integrated assessment method for safety level of traction elevators and its application[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2013, 9(4): 129-134.

[2] 陈涛, 吴斌, 李伟忠等. 基于有限元的重载自动扶梯桁架及梯级的安全性能分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2014, 10(10): 62-67.

[3] 张峰, 李灌辉. 地铁用自动扶梯梯级的有限元分析[J]. 特种设备安全技术, 2021(3): 30-32.

[4] 徐伟通, 高旭东, 叶志峰. 基于有限元的自动扶梯梯级安全性能研究[J]. 机械工程与自动化, 2019(2): 64-66.

[5] 顾立华, 何新民. 自动扶梯铝合金梯级踏面动态载荷试验方法研究[J]. 中国电梯, 2020, 31(5): 6-11.

[6] 日本铸造工学会. 压力铸造缺陷、问题及对策实例集[M]. 北京: 机械工业出版社, 2019.

石墨砂在精铸型壳中应用机理探讨

陈建华<sup>1</sup> 阳 鹏<sup>2</sup> 罗锐祥<sup>1</sup> 翁福君<sup>1</sup>

(1. 中山市广重铸轧钢有限公司; 2. 台州量晟精密机械有限公司)

**摘 要** 利用石墨在高温下氧化的特性,将颗粒状的石墨砂替代耐火砂粒应用到型壳的某一层或某两层,可改变型壳的潜热、热导率、蓄热系数等指标,使浇注的铸件温度场改变,延长金属液的补缩时间和扩大补缩面积;石墨砂氧化后在铸件的界面形成还原性气氛,使铸件表面粗糙度降低,麻点和脱碳层减少;石墨的烧蚀和烧失过程可减少铸件的收缩阻力,形成的空隙有助于解决清砂难的问题。在实际的硅溶胶型壳精密铸造生产中,通过对前板、套筒、双流道泵体等典型铸件制壳时采用的石墨砂工艺,均达到了预期的效果,体现了石墨砂的应用优势。

**关键词** 石墨; 热交换; 铸件凝固; 压力; 裂纹

**中图分类号** TG249.5 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.06.024

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Application Mechanism of Graphite Sand in Shell Mold by Investment Casting

Chen Jianhua<sup>1</sup>, Yang Peng<sup>2</sup>, Luo Ruixiang<sup>1</sup>, Weng Fujun<sup>1</sup>

(1.Zhongshan Guangzhong Foundry&Rolling Co., Ltd.; 2.Taizhou Liangsheng Precision Machinery Co., Ltd.)

**Abstract:** Owing to the characteristics of graphite oxidation at high temperature, granular graphite sand instead of refractory sand was applied to one or two layers of shell mold to change the thermal performance indicators such as latent heat, thermal conductivity, heat storage coefficient, and pouring temperature field, thus extending the feeding time and distance of metal liquid. A reducing atmosphere is formed on the interface of casting after graphite sand oxidization, which improves the surface roughness and reduces oxygen pitting and decarburization layer. The graphite ablation and loss process can reduce the shrinkage resistance of the casting, helping to solve the problem of sand removal. In the actual investment casting production of silica sol shell, graphite sand was adopted during the shell making of typical castings such as slide plate, sleeve, double channel pump body, etc, and the expected effect was achieved, reflecting the advantages of graphite sand.

**Key Words:** Graphite, Heat Transfer, Casting Solidification, Fracture, Cracks

石墨是一种晶质形碳,为六方晶系,外表呈铁墨色至深灰色<sup>[1]</sup>。用天然的晶质块状石墨或人造石墨电极加工的石墨砂,用到精铸型壳的加固层中以相同目数替代原耐火砂的一层或两层,可达到改善精铸件品质,延长浇注系统的补缩时间和距离及扩大面积,提高工艺出品率。

石墨砂对一些金属熔点低或浇注温度不高的铸件,可降低型壳的焙烧时间、降低焙烧温度。天然石墨大约在 750 ℃开始去除有机物及其他挥发物<sup>[1-2]</sup>;人造石墨出现固-气反应的温度约为 850 ℃,在此温度下石墨开始氧化,可使型壳中的结晶水及早去除。将石墨砂用到第二层型壳,浇注的铜件特别是紫铜件具有非常好的效

收稿日期:2022-11-10;修改稿收到日期:2022-12-20

第一作者简介:陈建华,男,1974 年出生,工程师,广东中山(528429),E-mail:chenjianhua86@163.com

引用格式:陈建华,阳鹏,罗锐祥,等. 石墨砂在精铸型壳中应用机理探讨[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(6):856-859.

CHEN J H, YANG P, LUO R X, et al. Application mechanism of graphite sand in shell mold by investment casting[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(6):856-859.

[7] 吴玲,于树洪,赵磊等.A380 合金薄壁壳体压铸工艺研究[J].特种铸造及有色合金,2022,42(5):655-657.  
[8] 柯春松,唐杰,庄舰等.八挡自动变速器主壳体压铸工艺优化[J].铸造,2022,71(8):997-1 004.  
[9] 刘红娟,刘海.汽车发动机铝合金前盖的压铸工艺优化[J].特种铸造及有色合金,2019,39(12):1 305-1 308.  
[10] 李彬.基于 Magma 软件的支架压铸数值模拟及工艺优化[J].特种

铸造及有色合金,2019,39(9):952-955.  
[11] 徐秋湘,赵占西.工艺参数对铝合金梯级铸件压铸过程的影响[J].特种铸造及有色合金,2018,38(5):518-521.  
[12] 邹如峰,赵占西,徐秋湘.YL102 梯级压铸工艺方案分析及数值模拟[J].信息记录材料,2019,20(3):245-248.

(编辑:张正贺)