

智能插座外壳注塑模具设计

余联庆 刘明天*

武汉纺织大学

DOI:10.32629/etd.v6i7.18214

[摘要] 智能插座外壳的模具设计与选材直接影响设备可靠性。本文提出一种基于碳纤维复合材料的模具设计方案,通过牛角式潜伏浇口优化浇注系统,结合环绕式冷却水路提升成型效率。实验表明,优化后的浇注时间仅需 8.15 ± 0.42 s,充填率超过96.5%,且碳纤维复合材料的拉伸强度(209MPa)与弯曲强度(268MPa)均优于传统材料,同时模具使用寿命提高至8年,为高精度智能插座外壳注塑模具设计提供了技术参考。

[关键词] 模具设计; 插座外壳; 复合材料; 牛角式潜伏浇口

中图分类号: TB33 **文献标识码:** A

Design of Injection Molding Die for Smart Socket Shell

Lianqing Yu Mingtian Liu*

Wuhan Textile University

[Abstract] The mold design and material selection for the smart socket shell directly affect the reliability of the equipment. This paper proposes a mold design scheme based on carbon fiber composite materials, optimizing the injection system with a horn-type submerged gate and enhancing the molding efficiency with a surrounding cooling water channel. Experiments show that the optimized injection time is only 8.15 ± 0.42 seconds, the filling rate exceeds 96.5%, and the tensile strength (209 MPa) and flexural strength (268 MPa) of the carbon fiber composite material are superior to those of traditional materials. Meanwhile, the mold service life is extended to 8 years, providing a technical reference for the design of high-precision injection molding dies for smart socket shells.

[Key words] Mold design; Socket shell; Composite materials; Horn-type submerged gate

引言

随着全球智能化浪潮的推进与电力电子技术的快速发展,智能家居、电力分配终端等领域对用电设备的可靠性与适配性提出了更高要求^[1]。智能插座作为衔接用电设备与供电系统的核心组件,其外壳塑件需长期适应家庭、办公等场景中潮湿、多尘的复杂环境,因此必须具备优良的绝缘性、较高的结构强度、优异的耐腐蚀性及稳定的耐热变形性,以保障用电安全与设备长期服役稳定性^[2]。

陈丽等优化模具结构及注塑工艺参数,实现降翘曲、提效率的目标。他们先分析模具结构与工艺参数对成型的影响,再基于正交试验结合Moldflow软件仿真,通过信噪比、均值及极差计算确定翘曲关键影响因素与最优参数^[3]。赵利平等以碎纸机外壳塑件为研究对象,设计了一副大型复杂热流道塑胶模具。模具采用两点热咀进胶以保障进胶均衡性;配备定模隧道滑块、天侧油缸滑块、地侧斜销滑块(含延时弹针)及5个斜顶抽芯机构,解决塑件全倒扣脱模难题。定模、动模及滑块分别采用U形水路、

水井均布及单独水路冷却设计,保障了塑件成型周期与品质;顶出机构则以直顶块配合斜顶实现^[4]。黄蓓为保障手动电钻外壳尺寸稳定性,结合其结构特点,采用正交试验法,以熔体温度、模具温度、保压时间及保压压力为变量,通过模流分析软件优化注塑成型缺陷,探究工艺参数对翘曲变形量的影响。结果显示,当熔体温度220℃、模具温度60℃、保压时间14s、保压压力18MPa时,外壳翘曲变形量最小,较优化前降幅达38.87%^[5]。

现有模具材料在耐腐蚀性、轻量化及力学性能方面存在不足,且浇注系统的运行效率偏低。本塑件外形采用螺孔固定的防脱结构设计,在模具研发过程中,综合考量材料性能需求、塑件结构特点及制造工艺要求,在分型面选取、脱模顶出机构设计、浇注系统优化、冷却水路排布、模具材料选型及精度控制等关键环节进行了科学设计与改进,最终研发出适配该塑件的高效注塑模结构,可为同类型电器外壳注塑模具的设计开发提供技术参考。

1 智能插座外壳模具结构设计

1.1 外壳结构

智能插座外壳如图1所示,其功能可实现通电指示灯、两个五孔插座、两个USB口以及一个电源开关。其结构为一体化设计,整体尺寸为190mm×28.5mm×46mm,插座外壳的厚度取值为2mm,塑件在脱模过程中存在一定的角度,该角度通常设置为1.5°。

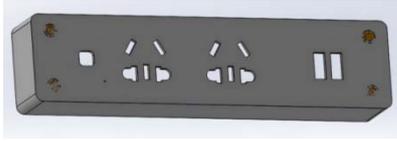


图1 智能插座外壳

1.2 浇注系统

在模具型腔选择一模二腔结构,选取牛角式潜伏浇口,整个进胶过程采用单浇口完成^[6]。将牛角式潜伏浇口优化为嵌件结构,促进熔体成型,在拉料杆的作用下将塑件从模具中顶出。

不受吸引力束缚的剪切速率为:

$$\gamma = \frac{3n+1}{n} \cdot \frac{Q}{\pi R^3} \quad (1)$$

γ 表示熔液流动剪切速率,基于幂律流体本构方程,取值范围为1000-5000s⁻¹; Q 表示熔液体积流率,由注塑机参数校准确定; n 表示熔体自由流动剪切速率,受到熔液温度以及相关因素影响,由毛细管流变仪得到; R 表示流道半径,基于Moldflow流道设计规范,范围为2-4mm。

主流道直径计算过程中,浇注系统主流道直径计算公式为:

$$d_s = 0.08 \left(\frac{3n+1}{n} \cdot Q \right)^{1/3} \quad (2)$$

其中, d_s 表示圆形主流道直径,一般在4-8mm范围内, Q 表示熔液体积流率, n 表示熔液不受重力限制指数。

分流道直径浇注系统分流道直径计算公式为:

$$V = \frac{G \cdot \Delta \tau}{60C \cdot \rho (t_1 - t_2)} \quad (3)$$

其中, d_r 表示分流道截面直径,一般不超过8mm, Q_r 用于描述分流道塑料熔液体积率, n 表示熔液不受重力限制指数。

主流道浇口截面直径计算公式为:

$$d_G = 0.037 \left(\frac{3n+1}{n} \cdot Q_G \right)^{1/3} \quad (4)$$

其中, d_G 表示主流道浇口的截面直径,本文取值范围为3.2mm-28.19mm, Q_G 表示流过浇口的熔液体积率, n 表示熔液不受重力限制指数,完成浇注系统设计,如图2所示。

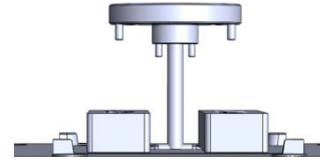


图2 浇注系统

1.3 冷却系统

为提升电气设备外壳模具的冷却性能,本设计采用差异化水路布局方案:定模侧布设环绕式冷却水路,动模侧则以水井式冷却水路为核心,整体水路排布如图3所示。其中,环绕式水路可使型腔表面温度均匀降低,有效抑制塑件因收缩不均而产生的翘曲变形缺陷;水井式水路具备局部快速降温的优势,能够显著缩短塑件的成型周期,助力提升生产效率。

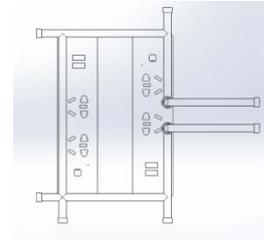


图3 冷却水路布局

冷却水道直径取值范围为8-10mm,型腔与冷却水道的间距控制在11-14mm;冷却水道的进水管均布置于模具同侧,系统设计需明确冷却水体积与冷却水路导热面积,相关公式如下:

$$V = \frac{G \cdot \Delta \tau}{60C \cdot \rho (t_1 - t_2)} \quad (5)$$

公式中, G 和 $\Delta \tau$ 分别表示规定时间内模具内部的塑料熔体质量、成型后释放的容量,所释放的容量取值范围为1.9-2.1 J/(g·°C);表示冷却水的比热容、密度、出口温度以及入口温度,本文出口温度范围为10-15°C,入口温度范围为15-25°C。

冷却水路的导热面积为:

$$A = \frac{G \cdot \Delta \tau}{3600\alpha (T_w - T_Q)} \quad (6)$$

A 表示冷却水的热导率,本文冷却水热导率取值45W/(m·K), T_w 和 T_Q 分部表示

塑件成型后表面温度40-80°C和冷却水平均温度取值25°C。通过确定冷却水体积、冷却水路导热面积,实现冷却系统设计。

1.4 顶出系统设计

鉴于插座尺寸偏大,为确保脱模过程受力均匀,顶出系统采用圆顶杆结构设计,其具体布局如图4所示。本设计选用5根直径为Φ10mm的圆顶杆,均布于模具分型面处;依据五孔与开关电源

按键的间距差异,5根顶杆的间距分别设为45mm、45mm、45mm及25mm,以此推动插座外壳塑件实现快速脱模^[7]。

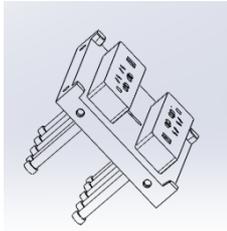
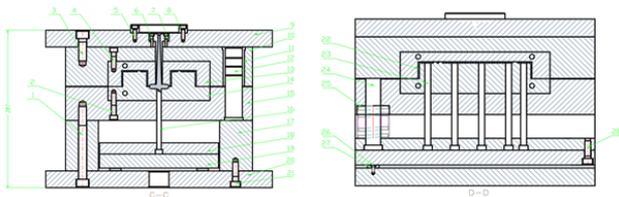


图4 顶出系统

1.5 模具整体结构

模具型号命名为 CWH-0,整体外壳模具结构如图5所示。该模具采用镶嵌式结构,通过顶杆顶出的方式完成脱模流程;模具主体包含弹簧、定模板、型芯、型腔、拉料杆、定位环等核心部件。



(1-内六角螺钉M14 2-内六角螺钉M8 3-内六角螺钉M144-内六角螺钉M85-内六角螺钉M66-内六角螺钉M47-浇口套8-定位圈9-定模座板10-定模板11-导套12-导柱13-型腔14-型芯15-动模板16-拉料杆17-垫块18-顶针固定板19-顶针支撑板20-动模座板21-内六角螺钉M1022-塑件23-推杆24-复位杆25-复位弹簧26-平头螺钉M527-垃圾钉28-内六角螺钉M10)

图5 整体外壳设计

2 外壳模具材料选择

传统金属模具因自重较大、耐腐蚀性欠佳,难以满足电气设备对高精度外壳的制造需求,因此亟需探索轻量化的复合材料替代方案。

2.1 碳纤维复合材料的性能优势与选型依据

碳纤维复合材料以聚丙烯腈(PAN)为前驱体,经预氧化、高温碳化及石墨化工艺处理形成石墨微晶结构,再与树脂基体复合增强后,兼具高比强度与优异耐腐蚀性能。该材料兼具柔韧性 with 高强度,自重轻于铝材、硬度优于钢材,属于新型高性能增强纤维材料。本文选用双酚 A 型环氧树脂作为基体,以甲基四氢苯酚为主要固化剂(二者质量配比1.176:1),纤维采用三维五向编织结构,此设计可有效提升材料黏度、促进玻璃化转变,进而保障模具成型过程中尺寸收缩均匀合理。

2.2 耐腐蚀特性

插座是电力系统的核心组件,其导电性能与载流稳定性直接决定载荷承受能力。注塑模具作为插座外壳的核心生产工具,除需满足高模量、轻量化的基础要求外,还需具备优异的强度与

耐腐蚀性。碳纤维复合材料注塑模具可耐受酸碱盐等恶劣环境侵蚀,有效降低环境因素对生产的干扰,既提升生产效率,又显著延长模具使用寿命。同时,该材料耐高温性能优异,可避免高温注塑工况下模具热变形引发的塑件尺寸偏差,保障产品精度。

3 实验分析

本文实验相关数据均采用SPSS软件进行统计分析,计量资料以均值±标准差表示,耐腐蚀电位变化则通过线性回归分析处理;P<0.05表示差异具有统计学意义。

3.1 注塑机的选择

为预留装配间隙,模具型腔尺寸设定为218mm×180mm×70mm。注塑机选用震雄JM368-SVP型号,其注射量为480g,锁模力达360ton。

3.2 浇注效果

采用注塑机定时记录浇注时间,熔体温度设定为220℃、注塑压力17.5MPa,实时抽取熔体样本,通过旋转流变仪(MCR302)测定剪切速率。表1为浇注过程的性能对比数据,所有实验数据均为10次重复性实验的平均值。结果显示,牛角式潜伏浇口在浇注过程中平均用时最短,仅为8.15±0.42;其平均熔体剪切速率达 $3.2 \times 10^5 \pm 18652 \text{ s}^{-1}$,流动速率表现最优;充填率稳定在96.5%左右,模具浇注效果最为理想。各指标差异(P<0.05)具有统计学意义。

表1 浇注过程对比

浇口模具类型	浇注时间 /s	剪切速率 / s^{-1}	充填率 /%
直接浇口模具	16.25±0.58	$3.5 \times 10^3 \pm 192$	88.24±1.42
侧浇口模具	16.51±0.65	$5.2 \times 10^3 \pm 287$	88.56±1.39
点浇口模具	12.83±0.52	$4.3 \times 10^4 \pm 1986$	92.78±1.65
扇形浇口模具	13.72±0.49	$6.1 \times 10^4 \pm 2975$	92.51±1.12
牛角式潜伏浇口模具	8.15±0.42	$3.2 \times 10^5 \pm 18652$	96.50±0.88
P 值	0.027	0.016	0.048

3.3 强度分析

采用万能材料试验机测试镍合金、钛合金、不锈钢型钢及双酚A型环氧树脂模具的拉伸与弯曲强度,通过摆锤式冲击试验机测定其冲击韧性,每组实验重复10次,力学性能测试结果见表2。

测试显示:双酚A型环氧树脂模具拉伸强度(209±3.3MPa)与弯曲强度(268±3.1MPa)均居首位,不锈钢型钢模具弯曲强度垫底;碳纤维复合双酚A型环氧树脂模具冲击韧性最优(32.5±0.9kJ/m²),综合力学性能优异。各组数据差异具有统计学意义(P<0.05)^[8]。

表2 不同材料模具力学性能测试表

材料模具种类	拉伸强度 / MPa	弯曲强度 / MPa	冲击韧性 / (kJ/m ²)
不锈钢型钢模具	192±4.9	251±4.3	29.5±1.4
钛合金材料模具	201±5.1	262±4.8	28.9±1.2
镍合金材料模具	195±4.6	259±4.6	28.3±1.5
P20 模具钢	177±3.1	232±3.7	26.3±1.3
H13 模具钢	191±4.3	246±3.3	26.9±1.4
双酚 A 型环氧树脂材料模具	209±3.3	268±3.1	32.5±0.9
P 值	0.041	0.036	0.027

3.4 碳含量对翘曲和使用寿命影响

碳纤维含量对塑件翘曲变形及模具使用寿命影响显著。本文选取双酚A型环氧树脂中碳纤维占比为10%、15%、20%、25%、30%的复合材料,在注射温度260℃、注射速度48cm³/s、碳纤维长径比25且纤维间影响系数恒定的条件下开展实验,结果如图6所示。研究发现,随着碳纤维含量的增加,塑件翘曲量呈逐渐降低趋势,模具使用寿命则显著延长:当碳纤维含量从10%提升至30%时,注射方向垂直界面翘曲量由0.1689mm降至0.1414mm,平行界面翘曲量由0.1649mm降至0.1413mm,模具使用寿命亦从2.8年提升至8年。由此可见,提高碳纤维含量可有效优化复合材料界面性能,进而延长模具使用寿命。

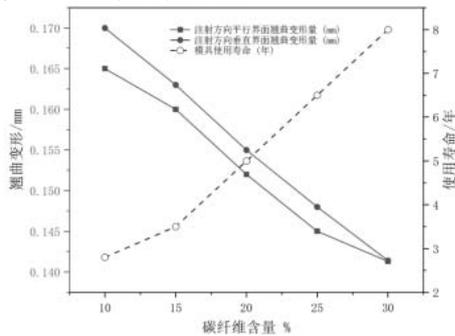


图6 碳含量对塑件翘曲情况和使用寿命影响

4 结论

本文针对智能插座外壳模具浇注效率偏低、材料使用寿命有限的问题,提出基于碳纤维复合材料的优化设计方案。实验结果表明,采用牛角式潜伏浇口可将成型时间缩短至8秒左右,充填率提升至96.5%;与此同时,碳纤维复合材料的耐腐蚀性与力

学性能显著优于传统材料,为高精度、长寿命插座外壳电器模具的研发设计提供了全新思路。

[参考文献]

- [1]谭波.ABS自动化设备电子元器件外壳注塑成型工艺优化研究[J].塑料科技,2023,51(06):75-79.
- [2]李齐新.智能开关插座的发展探讨[J].中国照明电器,2023,(07):42-44.
- [3]陈丽,任小鸿,刘愷,等.深腔壳体注塑件翘曲变形分析及优化[J].塑料,2025,54(03):135-140+152.
- [4]赵利平,张小娟,彭新华.碎纸机塑件外壳大型注塑模具设计[J].中国塑料,2024,38(07):106-111.
- [5]黄蓓.手动电钻外壳注塑模具工艺参数优化研究[J].塑料科技,2022,50(02):89-92.
- [6]赵利平,杨展朋,陈盈华,等.汽车收纳盒塑件注塑模具设计[J].中国塑料,2025,39(10):129-134.
- [7]唐春华,张斌,李军利.叶轮注塑模具随形冷却水道设计与分析[J].塑料,2022,51(03):133-136.
- [8]吴玲,董国疆,沈艳芝,等.基于布氏硬度的A356.2铝合金屈服强度预测研究[J].模具技术,2022,(04):26-29.

作者简介:

刘明天(1995--),男,湖北天门人,硕士,研究方向:机器人驱动与控制与深度学习。

余联庆(1972--),男,湖北咸宁人,教授,博士,研究方向:机器人机构学、移动机器人技术与应用、纺织轻工机械、制造系统建模与仿真等。