

基于有限元的压铸模寿命预测和工艺优化

刘明泽¹ 桑宝光¹ 陈国鑫¹ 封少波² 郝春磊¹

(1.大连工业大学机械工程与自动化学院;2.中国科学院金属研究所沈阳材料科学国家研究中心)

摘要 使用有限元数值模拟软件研究了压铸工艺参数对压铸模热疲劳性能的影响。首先通过 ProCAST 软件模拟了压铸循环热平衡状态下的温度场,然后将温度场热载荷作为 ABAQUS 软件的初始条件进行加载,并通过 ABAQUS 软件得到压铸循环过程中的热应力变化和热疲劳寿命结果。结果表明,由模拟得到的模具热疲劳最短寿命区域与压铸模进行疲劳失效试验获得的热疲劳裂纹产生区域相符合,验证了模拟结果的准确性。此外,设计了以热疲劳寿命为试验目标的压铸工艺参数的正交模拟试验,优化得出了合理的压铸工艺参数。

关键词 压铸模;ABAQUS;铝合金;温度场;ProCAST

中图分类号 TG249.2;TP311 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.02.005

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Service Life Prediction and Process Optimization of Die Casting Die
Based on Finite Element Method

Liu Mingze¹, Sang Baoguang¹, Chen Guoxin¹, Feng Shaobo², Hao Chunlei¹

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Dalian Polytechnic University;
2. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences)

Abstract: The influence of die-casting process parameters on the thermal fatigue performance of die-casting die was analyzed by means of numerical simulation. Firstly, the temperature field under the thermal equilibrium state of die-casting cycle was calculated by the ProCAST software, and then the thermal load of temperature field was loaded as the initial condition of ABAQUS software. The thermal stress change and thermal fatigue life during die casting cycle were obtained by ABAQUS software. The calculated minimum thermal fatigue life area of the die was compared with the thermal fatigue crack generation area obtained from the fatigue failure test of the die-casting die, and the accuracy of the simulated results was verified. Based on this, the orthogonal test of die-casting process parameters with thermal fatigue life as the test objective was designed, and the optimized die-casting process parameters were presented.

Key Words: Die Casting Die, ABAQUS, Aluminium Alloy, Temperature Field, ProCAST

铝合金压铸件在汽车、飞机以及小家电等领域应用广泛^[1],压铸是在高速、高压和高温条件下成形,导致铝合金压铸模具在压铸过程中承受高的冷热交变应力作用。当压铸模开模后,模具表面与空气接触,受到空气及脱模剂的冷却作用,模具表面温度迅速下降,模具内部温度下降缓慢,模具表面膨胀小于模具内部,因此在模具表面产生拉应力^[2-3]。合模之后,压铸模型腔再次受到金属液的冲击,随着压铸循环的不断进行,模具表面反复受到热冲击,会造成模具表面反复的热膨胀和收

缩,出现热裂纹和龟裂,直至失效。统计表明,铝合金压铸模的主要失效形式中热疲劳失效占 60%~70%^[4-6]。本研究使用 CREO 软件建立铝合金压铸件和压铸模的三维模型,利用 ProCAST 软件和 ABAQUS 软件,分析压铸循环热平衡状态下的温度场以及热应力分布和疲劳寿命预测,并基于应力疲劳寿命模型,采用正交试验研究不同压铸工艺参数对压铸模疲劳寿命的影响,通过模拟得到的计算结果,优化得到合理的压铸工艺参数。

收稿日期:2022-04-12;修改稿收到日期:2022-05-16
基金项目:广东省重点领域研发计划资助项目(2020B010184001);辽宁省教育厅自然科学基金资助项目(J2020050)
第一作者简介:刘明泽,男,1997 年出生,硕士研究生,辽宁大连(116000),E-mail: 1271003384@qq.com
通信作者:桑宝光,男,1980 年出生,副教授,辽宁大连(116000),E-mail: bgsang@163.com
引用格式:刘明泽,桑宝光,陈国鑫,等. 基于有限元的压铸模寿命预测和工艺优化[J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43(2):169-173.
LIU M Z, SANG B G, CHEN G X, et al. Service life prediction and process optimization of die casting die based on finite element method [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(2):169-173.

1 模拟模型的选用及参数的设置

1.1 模拟模型的建立

选用某工厂生产的铝合金泵体的三维模型为模拟对象,用 CREO 软件进行造型,铸件壁厚为 7.5~8.6 mm,见图 1,材质为 ADC12 铝合金,模具采用 H13 钢,在实际工况中模具裂纹一般发生在模具表面浇口附近。故本模拟试验只对整个模具进行分析。选择的具有代表性的分析点为内浇口 3 条流道附近对应的 A、B、C 点,见图 2。

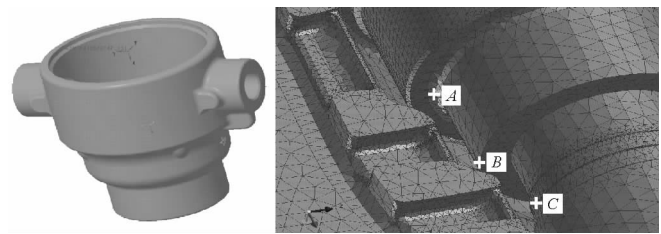


图 1 铸件三维模型 Fig.1 3D model of casting
图 2 选取的分析点 Fig.2 Selected analysis location point

1.2 ProCAST 模拟参数的设置

根据实际工况,压铸温度设为 670 ℃,模具预热温度为 220 ℃,空气环境设为 20 ℃,冷却水管直径为 10 mm,冷却水流速为 10 mm/s,一个压铸循环的生产周期为 42 s。压铸流程见图 3。

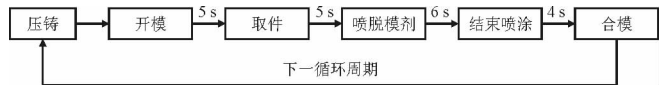


图 3 压铸循环流程 Fig.3 Die casting cycle flow

2 压铸模热平衡温度场计算

2.1 ProCAST 边界条件的设置

在压铸过程中,要设置多种边界条件,如模具与外界空气环境、模具与脱模剂、铸件与模具等。基于有关研究,将模具与铸件间的传热系数设为 1 500 W/(m²·K),模具与模具间的传热系数设为 1 000 W/(m²·K),模具与外界空气环境间的传热系数设为 10 W/(m²·K)。脱模剂与模具间一般采用水与模具间的传热系数,200~1 000 W/(m²·K)^[7]。影响水的传热系数的主要因素是水的流速。根据实际生产中脱模剂的喷涂速度以及有关研究,将脱模剂与模具间的传热系数设为 300 W/(m²·K)^[8]。在 ProCAST 的工艺条件管理器和模拟参数模块中进行脱模剂传热系数、脱模剂所需要喷涂的表面以及脱模剂在压铸循环中喷涂开始和结束的时间设置。

2.2 冷却水与模具间的传热系数

通过调节冷却水流动道内水的流速来改变水的流量,由此来实现冷却水对模具温度场的控制。在 ProCAST 软件中,不同水流速的冷却效果可以通过设置不同的传热系数来实现。冷却水和模具间的传热属于无相变强迫对流传热,在冷却水道中流体最常见的流动形式是旺盛紊流^[9,10]。冷却水与模具之间的传热系数可以由下式计算得到。

$$h = N_{\mu} \lambda / D \quad (1)$$

$$N_{\mu} = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (2)$$

$$Re = \rho \gamma D / \mu \quad (3)$$

$$Pr = \mu / a \quad (4)$$

式中, h 为冷却水与模具间的传热系数; N_{μ} 为努尔指数; Re 为雷诺数; λ 为水的系数; Pr 为普朗常数; ρ 为水的密度; γ 为水的流速; D 为冷却水管直径; μ 为动力粘度; a 为导热系数。

冷却水道的直径为 10 mm,冷却水流速为 1 m/s,通过计算得到的冷却水与模具的传热系数为 5 000 W/(m²·K)。

2.3 连续压铸达平衡态下温度场模拟分析

图 4 为试验的特征点温度-时间图。可以看出,随着压铸循环进行,温度增幅越来越小,大约 15 次压铸循环之后,压铸模进入了热平衡状态。从热平衡状态下可看到,A 点的温度上升较快,B 点的温度上升较慢,C 点的温度上升最慢。图 5 为试验的第 15 次循环特征点温度-时间图,可见在第 15 次循环周期中第 25 s 开始时,A、B、C 3 点的温度下降速度变快,是因为模具处开模状态,模具与空气接触,使温度下降;在第 30 s 时,温度下降速度最快,这是因为在第 30 s 时开始喷涂脱模剂,模具型芯温度开始迅速下降。分析得到的特征点温度-时间云图与实际工况中的特征点位置的温度循环变化基本一致,验证了有限元模型模拟的可靠性。

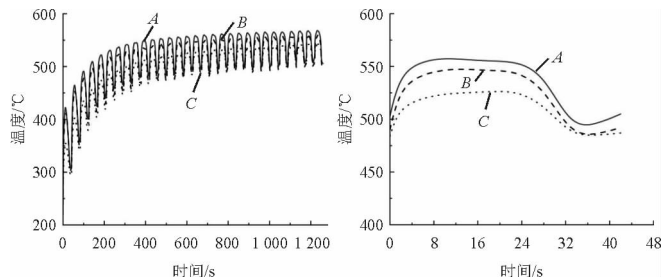


图 4 特征点时间-温度曲线 Fig. 4 Characteristic point time-temperature curve
图 5 第 15 次循环特征点时间温度曲线 Fig. 5 Characteristic point time-temperature curve of the 15th cycle

将热平衡状态下的第 15 次压铸循环的温度场的数值模拟结果导出,用模拟的结果为热循环载荷,导入到 ABAQUS 中进行下一步的热应力模拟。

2.4 ProCAST 温度场模拟结果的导出

在 ProCAST 的后处理界面中选定要导出的温度场结果及相应的时间步数区间,如第 15 次循环的温度场结果,在 Selection 工具栏 target list 黑色箭头选中 Node,然后在 Selection 工具栏最右端有一个向下箭头,用来确定选取模具表面节点的方式,然后将整个模具的节点进行框选,右键属性即可将所选的每个节点的温度以及节点对应的三维坐标结果进行提取显示,具体提取结果见图 6。

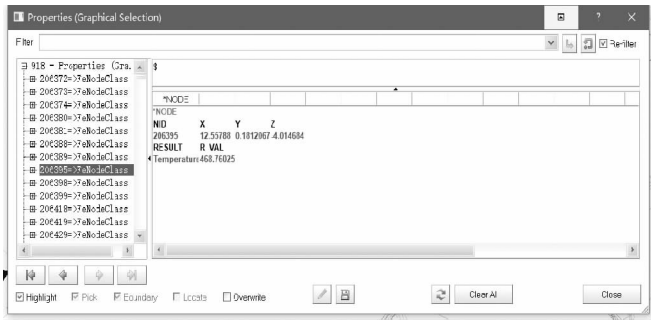


图 6 温度场结果的提取

Fig.6 Extraction of temperature field results

3 热应力数值模拟以及疲劳寿命计算

3.1 ABAQUS 材料属性设置

把 ProCAST 中划分好的网格模具模型直接进行保存,在 ABAQUS 中直接将保存好的模具网格文件打开,ProCAST 中导出的模型文件不包括模具的材料属性,所以要在 ABAQUS 中重新定义模具材料的属性,H13 钢密度为 $7\,876\text{ kg/m}^3$,杨氏模量为 210 GPa ,泊松比为 $0.3^{[11]}$ 。

3.2 温度载荷加载和边界条件设置

模具在实际服役过程中,最开始前几次循环的非热平衡状态下产生的热应力在整个模具服役过程中占比非常小,且对整个服役过程没有太大的影响,可忽略。模具绝大部分工作时间状态为热平衡状态,因此模拟模具热应力场的载荷选用热平衡状态下的温度载荷。将 ProCAST 计算得到的热平衡状态下的温度场结果和对应节点的三维坐标导入到 ABAQUS 的模型中作为温度载荷进行加载。在实际工况下,此模具的约束情况是两端固定,所以在 ABAQUS 中也进行两端固定的约束设置,见图 7。

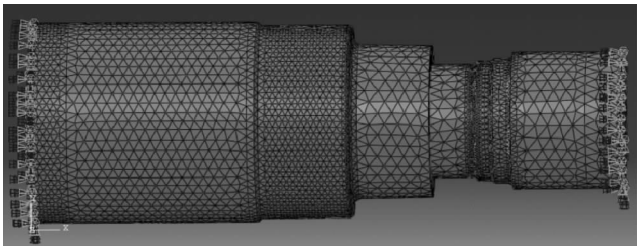


图 7 模具约束状态

Fig.7 Mold onstraint state

3.3 热应力的分析结果

整个模具表层在热平衡状态下的一个循环周期内的表层热应力变化情况见图 8。在循环周期内 A、B、C 点的最大等效热应力值逐渐减小,由 A 点的 943 MPa 降至 C 点的 756 MPa 。将热平衡状态下的循环周期的热应力结果文件导入到 ABAQUS 的 FE-safe 模块中进行疲劳仿真与计算。

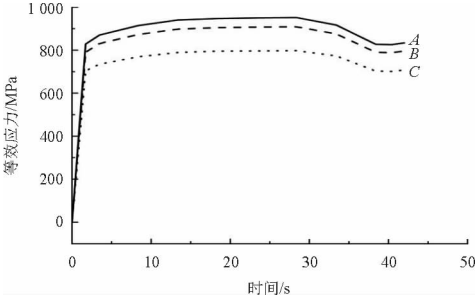


图 8 各节点等效应力与时间周期关系

Fig.8 Relationship between equivalent stress of each node and time period

3.4 FE-safe 的疲劳仿真与计算

疲劳分析以材料的 S-N 曲线为基础,使用疲劳累积损伤理论与名义应力,分析疲劳危险部位的疲劳强度,并预测材料结构的疲劳寿命^[12]。材料 S-N 曲线的获得,通常情况下有两种方法:一种是以材料的屈服强度、抗拉强度和杨氏模量为基础,通过算法计算获得;另一种是直接通过疲劳试验进行测得。以上两种方法均需要对获取的 S-N 曲线进行平均应力修正来达到计算的要求^[13-14]。对 S-N 曲线修正时,需要考虑各种因素的影响,各因素间的关系为:

$$S_a = \epsilon \beta C_L \sigma_a / K_f \tag{5}$$

式中, K_f 为疲劳缺口系数; ϵ 为尺寸系数; C_L 为加载系数; β 为表面系数; S_a 为零部件的 S-N 曲线应力; σ_a 是材料的 S-N 曲线应力。

模拟运用 FE-safe 软件中自带的 Seegers Method 算法进行 S-N 曲线的估算,并进行修正,见图 9。通过 FE-safe 软件进行疲劳分析计算后,得到模具的最短寿命为 $20\,847$ 循环次,实际模具的寿命在 $20\,000$ 次左右,

模型没有考虑金属液的冲刷和侵蚀,导致预测寿命偏大。

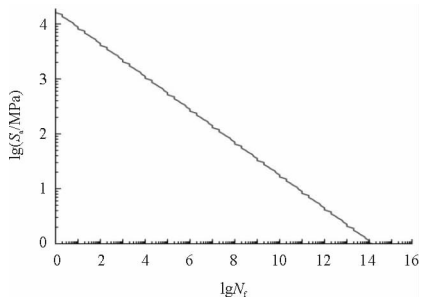


图 9 修正得到的材料 S-N 曲线
Fig.9 Corrected material S-N curve

将 FE-safe 计算得到的疲劳分析结果文件进行保存,在 ABAQUS 中观察模具疲劳寿命的分布云图,见图 10。可以看到,疲劳寿命较低的区域在 A 点区域。通过对 H13 模具进行疲劳失效试验获得的疲劳裂纹产生区域和 FE-safe 计算得到的疲劳最短寿命区域位置基本一致,见图 11,验证了有限元模拟结果的可靠性。

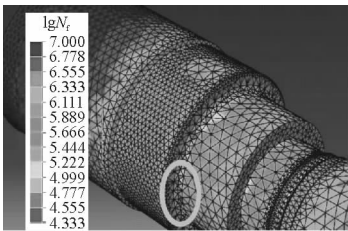


图 10 模具疲劳寿命分布云图

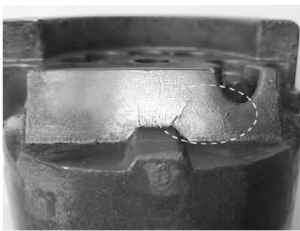


图 11 疲劳失效裂纹产生区域

Fig.10 Cloud diagram of fatigue life distribution of die
Fig.11 Fatigue failure crack generation area

4 正交试验设计及结果分析

4.1 正交试验设计

压铸过程中,影响模具表面温度和热应力的因素很多,主要为铸件浇注温度,模具预热温度以及脱模剂的传热系数,因此建立了 3 因素 3 水平的正交试验,见表 1。

表 1 因素水平表

Tab.1 Factor level table

水平	A(模具预热温度)/℃	B(脱模剂与模具间传热系数)/(W·m ⁻² ·K ⁻¹)	C(浇注温度)/℃
1	180	300	650
2	200	500	670
3	220	800	690

试验选择正交表 $L_{18}(3^7)$,见表 2。

表 2 正交试验表

Tab.2 Orthogonal test table

试验号	A	B	C	A×B	A×C	B×C	D
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	2	2	2	2	2	2
3	1	3	3	3	3	3	3
4	2	1	2	1	2	3	3
5	2	2	3	2	3	1	1
6	2	3	1	3	1	2	2
7	3	1	1	2	3	2	3
8	3	2	2	3	1	3	1
9	3	3	3	1	2	1	2
10	1	1	3	3	2	2	1
11	1	2	1	1	3	3	2
12	1	3	2	2	1	1	3
13	2	1	3	2	1	3	2
14	2	2	1	3	2	1	3
15	2	3	2	1	3	2	1
16	3	1	2	3	3	1	2
17	3	2	3	1	1	2	3
18	3	3	1	2	2	3	1

4.2 热应力疲劳结果分析

通过 ProCAST 软件对模具进行温度场的数值模拟,将热平衡状态下的模具温度场的模拟结果导入到 ABAQUS 中进行热应力场的模拟,最后将热应力的结果文件导入到 FE-safe 中进行疲劳分析和计算,在 FE-safe 中采用应力法对模具进行疲劳寿命的分析和计算^[15,16]。最终每次试验分析计算得到的模具疲劳寿命结果,见表 3。

表 3 正交试验结果

Tab.3 Orthogonal test results

试验号	A	B	C	A×B	A×C	B×C	D	寿命 N_f
1	180	300	650					15 010
2	180	500	670					16 540
3	180	800	690					19 275
4	200	300	670					17 286
5	200	500	690					19 206
6	200	800	650					25 043
7	220	300	650					21 506
8	220	500	670					24 066
9	220	800	690					28 434
10	180	300	690					14 126
11	180	500	650					17 137
12	180	800	670					19 935
13	200	300	690					16 760
14	200	500	650					20 526
15	200	800	670					24 110
16	220	300	670					20 847
17	220	500	690					23 236
18	220	800	650					30 601

4.3 模具疲劳寿命正交试验参数优化

根据正交试验的结果,采用正交试验中的极差分析法,对正交试验获得的疲劳结果进行分析,结果见表 4。

表 4 正交疲劳寿命试验结果分析表

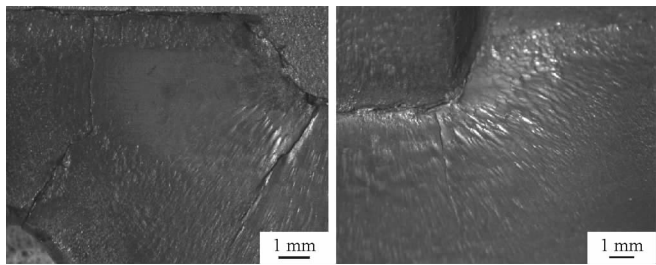
Tab.4 Analysis table of orthogonal fatigue life test results								
1	A	B	C	A×B	A×C	B×C	D	
K _{c1}	102 023	105 535	129 823	125 213	124 050	123 958	127 119	
K _{c2}	122 931	120 711	122 784	124 548	127 513	124 561	124 761	
K _{c3}	148 690	147 398	121 037	123 883	122 081	125 125	121 764	
K _{c1}	17 004	17 589	21 637	20 869	20 675	20 660	21 187	
K _{c2}	20 489	20 119	20 464	20 758	21 252	20 760	20 794	
K _{c3}	24 782	24 566	20 172	20 647	20 346	20 854	20 294	
Q _c	7 778	6 977	1 465	222	906	194	893	
最优水平	A ₃	B ₃	C ₁					
主次因素				ABC				
最优排列				A ₃ B ₃ C ₁				

从表 4 的极差 Q_c 的值可以得到,因素 A 的水平变动对模具的寿命影响最大,其次是因素 B,最小是因素 C,因素 A 与因素 C 的交互作用排第 4。

从表 4 可以得到,获得模具最大疲劳寿命的最佳参数组合为 A₃B₃C₁[模具预热温度为 220 ℃、脱模剂与模具间传热系数为 800 W/(m²·K)、浇注温度为 650 ℃]。

5 试验验证

选用模拟得出的泵壳压铸模具最优压铸工艺参数对其进行热疲劳试验。在模具分别进行了 10 000、20 000 和 30 000 次的压铸循环后,根据模拟结果对模具容易产生热疲劳裂纹的区域进行体显微观察,发现在 30 000 次压铸循环的时候,模具开始出现热疲劳裂纹,见图 12。可见实际得到的热疲劳寿命结果与模拟得到的结果基本一致。



(a) 模具左侧裂纹 (b) 模具右侧裂纹

图 12 热疲劳裂纹产生区域

Fig.12 thermal fatigue crack generation area

6 结 论

(1)根据工厂的实际压铸工艺参数,对泵壳铸件进行了压铸的周期性循环模拟,模拟计算得到的模具疲劳寿命和疲劳裂纹与工厂中生产验证得到的基本一致。

(2)建立了泵壳铸件压铸模具的正交试验,得到的最佳压铸工艺参数组合是:模具预热温度为 220 ℃,浇注温度为 650 ℃,脱模剂与模具传热系数为 800

W/(m²·K)。

(3)根据优化得到的泵体压铸模的压铸工艺参数,进行了压铸生产的热疲劳试验,得到的热疲劳寿命结果与模拟结果基本一致,验证了模拟结果的准确性。

参 考 文 献

[1] 谭建荣,吴培宁,张树有,等. 铸件凝固过程温度场变化的计算机模拟[J]. 农业机械学报, 2002(2): 105-108.

[2] 夏书文,左鹏鹏,吴晓春. 国内外压铸模具钢发展概述[J]. 模具制造, 2017, 17(7): 93-99.

[3] 闵永安. 热作模具钢(H13 型)表面处理及其热疲劳、热熔损性能研究[D]. 上海: 上海大学, 2004.

[4] FU M W, YONG M S, MURAMATSU T. Die fatigue life design and assessment via CAE simulation[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, 35(9): 843-851.

[5] 李朝霞,刘文辉,熊守美,等. 压铸镁合金模具温度场分布的研究[J]. 铸造, 2008, 57(8): 1 040-1 051.

[6] 王荣滨. 铝合金压铸模失效分析、选材与强化处理研究[J]. 模具制造, 2008, 8(2): 76-80.

[7] 韩雄伟,吴卫,冷真龙,等. 铝合金压铸模具温度场、热应力场的数值模拟及模具寿命预测[J]. 热加工工艺, 2009, 38(19): 60-63.

[8] 熊守美,曹尚铨. 铝合金 ADC12Z 高压铸造过程中铸件与铸型界面热交换系数的研究[J]. 金属学报, 2007(1): 105-108.

[9] 雷衡兵. 真空压铸铝合金副车架铸造工艺仿真与疲劳寿命研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2017.

[10] 柳百成,荆涛. 铸造工程的模拟仿真及质量控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.

[11] 周玉辉,吴卫,周华彬,等. 压铸模使用寿命与优化压铸过程控制[J]. 铸造设备研究, 2005(6): 43-45.

[12] 吴晓春,左鹏鹏. 国内外热作模具钢发展现状与趋势[1]. 模具工业, 2013, 39(10): 1-9.

[13] CHANDRAN K S R. A physical model and constitutive equations for complete characterization of S-N fatigue behavior of metals[J]. Acta Materialia, 2016, 121: 85-103.

[14] 雷志斌. 基于 ProCAST 铝合金压铸模热疲劳缓解机理研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2017.

[15] 夏伯忠. 正交试验法[M]. 长春: 吉林人民出版社, 1985.

[16] 潘成刚,雷志斌,周家林,等. 基于 ProCAST 和正交试验法优化压铸模具寿命[J]. 特种铸造及有色合金, 2017, 37(6): 611-614.

(编辑: 张正贺)

3C 领域镁合金关键材料应用
取得新进展

镁合金由于其轻量化、减震性好、散热快、电磁屏蔽性能等特点被广泛应用于 3C 产品中,被众多主流品牌认可。富士、索尼、尼康、佳能等数码相机中的骨架,华硕、联想、戴尔、微软等笔记本电脑外壳,苹果、华为等手机外壳等镁合金材料应用不断增加。瑞格金属提供的稀土镁合金被全新荣耀折叠屏手机外屏支撑结构采用、威海镁业开发的高导热镁合金新型材料已实现在 5G 通讯基站上批量化应用。

(摘自中国有色网)