

6061 与 7075 铝合金砂型铸造工艺及铸件疲劳性能研究

顾杰, 朱洪宇, 刘亮, 孟佳

(常州博瑞电力自动化设备有限公司, 江苏常州 213025)

摘要: 某电力设备含有复杂薄壁结构零件, 为优化其加工工艺, 降低生产成本, 采用砂型铸造工艺成形制造。铸件材料基于6061和7075铝合金熔配, 通过优化铸件结构、铸造工艺和生产过程, 形成了满足铸件质量要求的砂铸工艺。针对该零件在实际工况中所承受的循环冲击载荷, 研究了铸件材料的疲劳性能。结果表明: 工艺优化后铸件内部致密, 无缩孔和微裂纹等缺陷; 基于6061的铸件材料疲劳极限为47 MPa; 在200~105 MPa应力幅范围内拟合出基于7075的铸件材料的S-N曲线, 其疲劳极限约为112 MPa; 通过Haigh图分析得出, 基于6061和7075的铸件材料可承受的最大循环冲击应力幅分别为40.2 MPa和93.2 MPa, 为其工程应用提供了关键设计参数。

关键词: 铝合金; 砂型铸造; 疲劳性能; S-N曲线; 循环冲击载荷

中图分类号: TG242.1; TG115.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2026) 02-0202-06

DOI: 10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0029

作者简介:

顾杰 (1990-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为智能电力装备。E-mail:

guj_br@nrec.com

通信作者:

朱洪宇, 男, 中级工程师。

E-mail: zhuhongyu_br@

nrec.com

收稿日期:

2025-09-10 收到初稿,

2025-10-28 收到修订稿。

引用格式:

顾杰, 朱洪宇. 6061 与 7075 铝合金砂型铸造工艺及铸件疲劳性能研究 [J]. 铸造, 2026, 75(2): 202-207.

GU Jie, ZHU Hongyu. Study on sand casting processes of 6061 and 7075 aluminum alloys and fatigue properties of the castings [J]. Foundry, 2026, 75(2): 202-207.

某电力设备为应对复杂多变的工况, 其运动机构中承力零件选用了质量轻、强度高、韧性好的6061-T6和7075-T6铝合金。在小批量生产阶段, 采取了对板料型材直接机加工的成形工艺。

对于复杂异形薄壁零件, 当前业内常采用压铸成形, 如变速箱壳体; 低压铸造则侧重加工高强度中大型零件, 如汽车轮毂; 半固态、液态模锻等特种技术也有应用于6系、7系变形铝合金的加工成形^[1-3]。为达到降本预期, 本研究采用“材料配制+砂型铸造+热处理+精加工”的工艺方案生产设备承力零件。在高纯铝熔化后, 基于6061、7075铝合金成分分别配制6系和7系铝铸液, 通过砂型铸造工艺制备出零件毛坯, 经固溶时效热处理后再进行少量机加工完成零件最终成形, 以期在加工成本、零件性能等方面对标“型材+机加工”所生产的零件。

该电力设备在执行任务过程中, 承力零件因交替拍打地面而承受冲击载荷。因此, 在交变冲击应力下零件面临疲劳损伤进而发生断裂的风险。常规表征材料力学性能的拉伸试验无法直接反映耐此类疲劳损伤的能力^[4-5], 而疲劳试验可以通过循环载荷持续施加模拟材料在实际使用环境下所承受的各种载荷, 其与材料应对冲击、疲劳等复杂工况的相关性高。此外, 根据疲劳试验结果可以进行耐久性寿命设计, 评估出所用材料和工艺的合理性。

本研究开展基于6061、7075铝合金的砂铸工艺试制工作, 并根据试制结果实施改善措施。然后, 在上述“材料配制+砂型铸造+热处理+精加工”工艺方案生产的成品零件上截取试样, 重点研究基于6061配制的铸件材料的疲劳强度, 以及基于7075配制的铸件材料的应力-寿命(S-N)曲线^[6-7]。同时, 借助Haigh图分析材料可承受的最大循环冲击应力幅, 为工程应用提供关键设计参数。

1 铸件砂铸与工艺改善

根据GB/T 3190—2020中6061、7075铝合金主要成分, 采用熔铝炉, 在高纯铝熔体内依次熔配相应的合金元素。因产品最薄壁厚仅2.5 mm, 采用砂型铸造难以完整

成形,在薄壁处表面向外偏置增加壁厚至4 mm,后续机加工去除。合理布置浇道、冒口,初步采用“一模两腔”设计方案,满足铸件完整成形要求。首批试制

铸件的X射线探伤结果如图1所示。可见零件虽充型完整,无死区,但在零件的平面、拐角处,存在密集的点状缩孔、气孔缺陷。

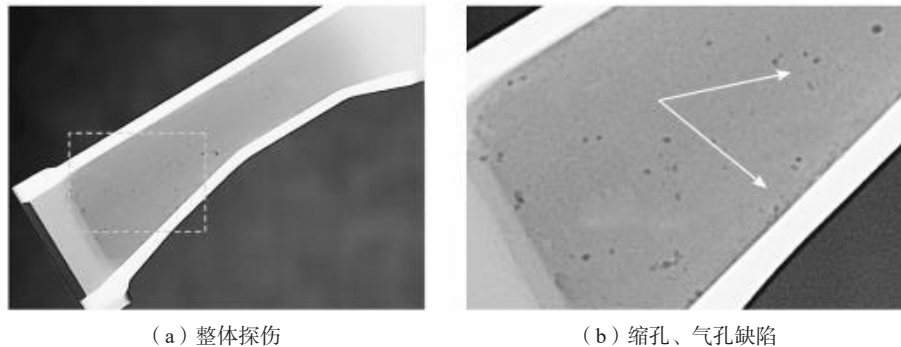


图1 承力零件首批试制铸件探伤

Fig. 1 Flaw detection of the first batch of trial-produced load-bearing parts

针对首批试制铸件的缺陷进行工艺改善^[8-11]。在材料制备阶段,电磁搅拌熔体时间由6 min延长至10 min,充分保障熔体内合金元素分散、温度一致,避免熔体上下成分不均匀,局部温度过低,最终影响金属液的流动性而造成充型不佳。重新设计加工型模,将铸件壁厚由4 mm调整至5 mm,利于铝合金液的流动。按 $\Sigma F_{直} : \Sigma F_{横} : \Sigma F_{内} = 1 : 2 : 3$ 优化浇道截面积比值,将直浇道、横浇道截面积分别设为4 cm²、8 cm²。另外,含

直浇道在内共设计4个冒口,其中两个为直径40 mm、高度120 mm的暗冒口,直至充型凝固数值模拟和缺陷预测结果通过。浇注前将铸模稍垫高倾斜,避免铸件平面与液面平行,利于气体排出。工艺改善后试制铸件并进行X射线探伤,结果如图2所示,铸件内部完整致密,一致性好,无任何缩孔、气孔缺陷,也未见微裂纹等缺陷,改善效果明显。

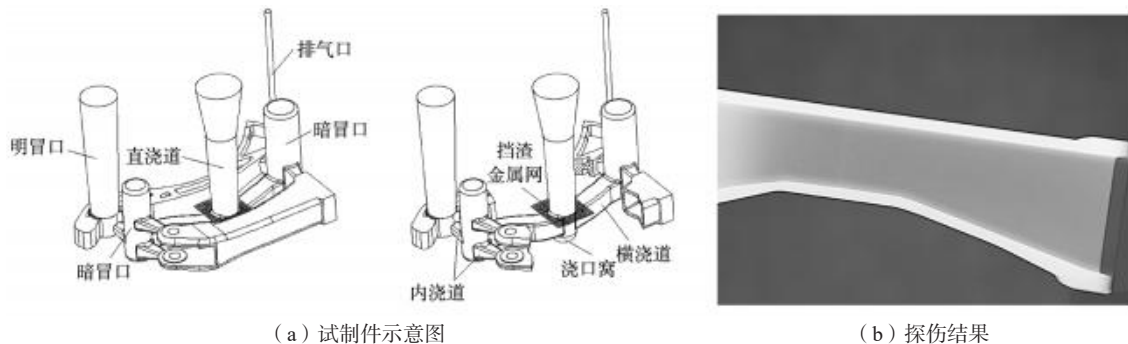


图2 工艺改善后试制铸件探伤

Fig. 2 Flaw detection of trial-produced part after improving process

2 试样制备与测试方法

在首批和改善后的铸件上截取试样进行化学成分分析,结果如表1所示。可以看出,工艺改善前后铸件化学成分差异并不显著,除基于6061配制材料的Mn元素和基于7075配制材料的Ti元素略高,其余均符合标准。

铸件经热处理后进行机加工,热处理参数为固溶520 ℃/14 h,时效120 ℃/2.5 h+175 ℃/6.5 h。取首批和改善后试制零件的成品,从其上截取试样(尺寸同疲劳试验试样)进行拉伸性能测试,结果如表2所示。可见,工艺优化后材料力学性能改善显著,基于6061和7075配制的铝合金抗拉强度分别达到276 MPa、531 MPa,接

近标准要求。

从工艺改善后加工出的零件成品上取样,开展疲劳试验^[12-14]。对基于6061的铸件测试其疲劳极限,共12个试样;对基于7075的铸件,测试其S-N曲线,共37个试样。取样位置为零件顶面、底面和侧面的三段平面,试样形状为板状哑铃,尺寸符合GB/T 3075—2021要求,见图3。在室温环境下采用长春仟邦QBG-300H试验机进行疲劳试验,频率为15 Hz,应力比 $R=-1$,条件疲劳极限的周次取 10^7 次。增加工装防止试验中试样发生弯曲,工装与试样间采用聚四氟乙烯薄膜防摩擦,如图4所示。

表1 铸件合金元素含量
Tab. 1 Alloying element contents in the castings

材料	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al	$w_B/\%$
基于6061配制的铝合金(首批)	0.685	0.397	0.258	0.305	0.951	0.038	0.102	0.029	余	
基于6061配制的铝合金(工艺改善后)	0.718	0.478	0.231	0.297	0.866	0.042	0.100	0.034	余	
6061铝合金(GB/T 3190—2020)	0.40~0.8	0.7	0.15~0.40	0.15	0.8~1.2	0.04~0.35	0.25	0.15	余	
基于7075配制的铝合金(首批)	0.205	0.315	1.632	0.145	2.487	0.203	5.664	0.036	余	
基于7075配制的铝合金(工艺改善后)	0.117	0.285	1.516	0.132	2.563	0.200	5.838	0.035	余	
7075铝合金(GB/T 3190—2020)	0.40	0.50	1.2~2.0	0.30	2.1~2.9	0.18~0.28	5.1~6.1	0.2	余	

表2 试样与标准型材的力学性能
Tab. 2 Mechanical properties of specimens and standard profiles

材料	试样	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	断后伸长率/%
基于6061配制的铝合金 (首批+热处理)	1	235	193	5.6
	2	227	185	5.3
	3	240	196	5.5
	均值	234	191	5.5
基于6061配制的铝合金 (工艺改善后+热处理)	1	276	228	7.6
	2	270	223	7.0
	3	281	232	7.2
	均值	276	228	7.3
6061-T6板材(GB/T 3880.2—2024)		290	240	10
基于7075配制的铝合金 (首批+热处理)	1	485	433	6.5
	2	473	424	6.7
	3	490	435	6.2
	均值	483	431	6.5
基于7075配制的铝合金 (工艺改善后+热处理)	1	539	486	9.0
	2	508	453	5.0
	3	547	478	7.5
	均值	531	472	7.2
7075-T6板材(GB/T 3880.2—2024)		545	475	8

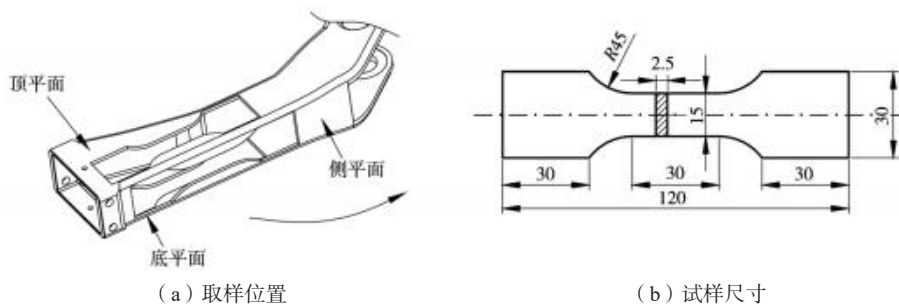


图3 拉伸和疲劳试验取样位置及试样

Fig. 3 Sampling locations and specimen for tensile and fatigue testing

3 铸件疲劳性能测试结果与分析

3.1 铸件材料的疲劳性能

如表3所示, 应力幅为70 MPa时, 基于6061配制的铸件试样在约43.5万次后发生断裂; 应力幅降至60 MPa、

50 MPa和40 MPa时, 断裂分别发生在约198万次、463万次和 10^7 次后。接着应力幅在40 MPa与50 MPa间升降, 测试材料疲劳极限, 见图5: 3个试样40 MPa下, 10^7 次时均未断裂; 4个试样50 MPa下, 仅1个试样到 10^7 次仍未断裂, 其余均在383万至591万次间断裂。通

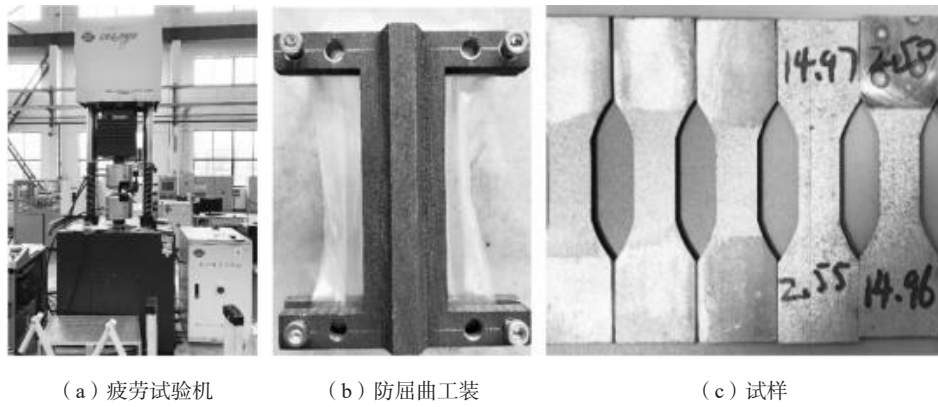


图4 疲劳试验机与防屈曲工装
Fig. 4 Fatigue testing machine with anti-buckling fixture

表3 基于6061铝合金配制的铸件材料疲劳试验数据
Tab. 3 Fatigue test data of the casting material dosed basing on 6061 aluminum alloy

序号	应力幅/MPa	载荷幅值/kN	循环数N/次	状态
1	70	2.94	435 359	断裂
2	60	2.52	1 981 724	断裂
3	50	2.10	4 627 800	断裂
4	40	1.68	10 000 000	越出
5	50	2.10	4 893 100	断裂
6	40	1.68	10 000 000	越出
7	50	2.10	3 826 200	断裂
8	40	1.68	10 000 000	越出
9	50	2.10	10 000 000	越出
10	60	2.52	2 178 001	断裂
11	50	2.10	5 910 100	断裂
12	40	1.68	10 000 000	越出

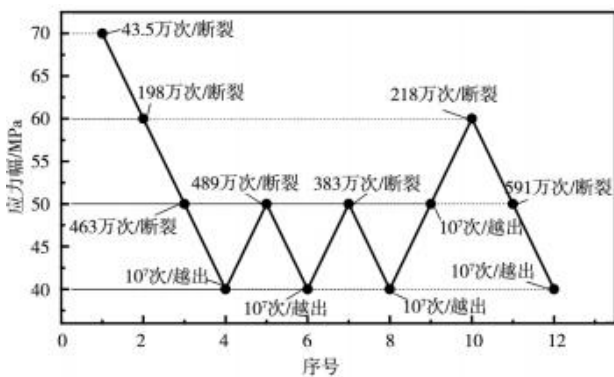


图5 基于6061配制的铸件材料的疲劳极限 (升降法)
Fig. 5 Fatigue limit of the casting material dosed basing on 6061 (lifting and lowering method)

过小子样升降法对试验结果进行配对, 得出中值疲劳极限为47 MPa。

基于7075配制的铸件材料的疲劳试验数据如表4所示。试验应力幅从200 MPa依次下降至140 MPa, 梯度

为20 MPa, 每个应力幅均测试6个试样。可以看出, 发生断裂时的循环次数从1万余次提高到约189万次, 远低于 10^7 次。接着在120 MPa、115 MPa、110 MPa和105 MPa应力幅下进行疲劳测试, 结果发现: 115 MPa共5个试样, 仅1个试样 10^7 次时未断裂; 110 MPa共6个试样, 有5个试样 10^7 次时未断裂, 说明该材料的疲劳极限在110 MPa与115 MPa之间。对整个测试过程的试验数据进行图形绘制并拟合, 获得基于7075配制的铸件材料的S-N曲线, 如图6所示, 其疲劳极限约112 MPa。

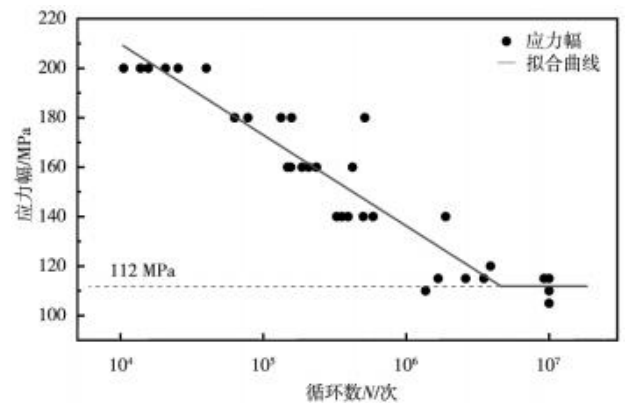


图6 基于7075配制的铸件材料的S-N曲线
Fig. 6 S-N curve of the casting material dosed basing on 7075

3.2 铸件材料的 Haigh 图与最大循环冲击应力

根据上述试验结果, 获取了工艺改善后基于6061和7075的铸件材料的抗拉强度、屈服强度, 以及在标准循环应力 (平均应力为0, 应力比 $R=-1$) 下 10^7 次时未发生断裂的疲劳极限, 进一步绘制这两种材料的应力幅与平均应力曲线, 即Haigh图, 据此可推算出承力零件材料在承受 10^7 次冲击载荷下的最大应力幅。

为简化计算, 在Haigh图中连接疲劳极限和抗拉强度作Goodman直线代替Haigh曲线, 又因材料在使用中承受的应力应小于屈服强度, 作屈服强度界线。这

表4 基于7075配制的铸件材料疲劳试验数据
Tab. 4 Fatigue test data of the casting material dosed basing on 7075

序号	应力幅/MPa	载荷幅值/kN	循环数 <i>N</i> /次	状态
1	200	8.4	15 669	断裂
2	200	8.4	25 346	断裂
3	200	8.4	10 550	断裂
4	200	8.4	13 843	断裂
5	200	8.4	39 886	断裂
6	200	8.4	20 686	断裂
7	180	7.56	78 000	断裂
8	180	7.56	513 900	断裂
9	180	7.56	157 800	断裂
10	180	7.56	62 954	断裂
11	180	7.56	63 300	断裂
12	180	7.56	133 100	断裂
13	160	6.72	186 800	断裂
14	160	6.72	420 800	断裂
15	160	6.72	235 700	断裂
16	160	6.72	155 664	断裂
17	160	6.72	208 100	断裂
18	160	6.72	147 800	断裂
19	140	5.88	1 886 600	断裂
20	140	5.88	391 500	断裂
21	140	5.88	326 400	断裂
22	140	5.88	500 600	断裂
23	140	5.88	587 500	断裂
24	140	5.88	354 000	断裂
25	110	4.62	1 364 300	断裂
26	105	4.41	10 000 000	越出
27	110	4.62	10 000 000	越出
28	115	4.83	9 215 200	断裂
29	110	4.62	10 005 000	越出
30	115	4.83	1 675 300	断裂
31	110	4.62	10 005 000	越出
32	115	4.83	10 005 000	越出
33	120	5.04	3 885 600	断裂
34	115	4.83	2 604 300	断裂
35	110	4.62	10 005 000	越出
36	115	4.83	3 492 300	断裂
37	110	4.62	10 005 000	越出

样, Goodman线、屈服强度界线和坐标轴围成了疲劳安全区^[15-17]。以应力比为0、平均应力=应力幅为特征的循环冲击载荷线, 其与疲劳安全区边界交点的纵坐标值, 就是材料在承受 10^7 次冲击载荷下不发生断裂的最大应力幅。如图7、8所示。可见, 基于6061和7075的铝合金铸件材料可承受的最大循环冲击应力分别为

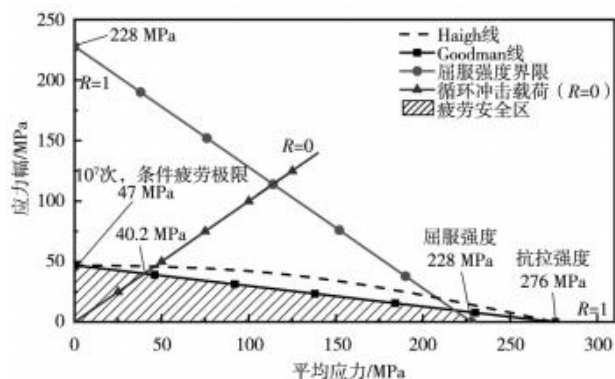


图7 基于6061的铸件材料Haigh图

Fig. 7 Haigh diagram of 6061-based casting material

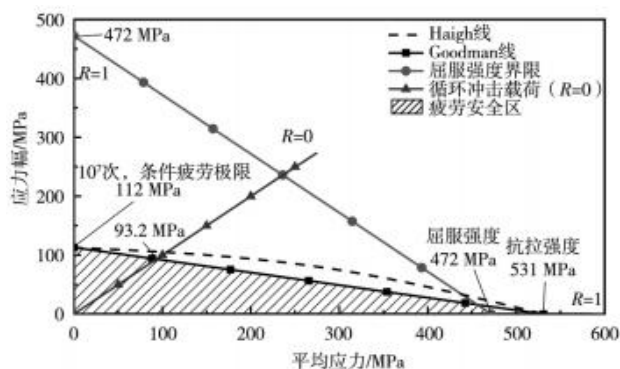


图8 基于7075的铸件材料Haigh图

Fig. 8 Haigh diagram of 7075-based casting material

40.2 MPa、93.2 MPa, 这给材料在工程中的可靠使用提供了参考设计值。

4 结论

为达到产品降本需求并保障其承受循环冲击载荷下的性能, 开展了基于6061、7075铝合金的砂铸工艺试制和工艺改善, 研究了材料的疲劳性能, 主要结论如下:

(1) 通过将搅拌时间从6 min延长至10 min, 将壁厚由4 mm增加至5 mm, 同时优化浇注系统、明暗冒口设计, 采用倾斜浇注方案, 可有效消除铝合金砂型铸件的缩孔与气孔缺陷。

(2) 采用小子样升降法测得基于6061配制的铸件材料的疲劳极限为47 MPa; 在200 MPa至105 MPa应力幅下, 完整测试了基于7075配制的铸件材料发生断裂时的周期数, 结合*S-N*曲线, 推测出其疲劳极限约112 MPa。

(3) 基于6061和7075配置的铝合金铸件材料可承受的最大循环冲击应力分别为40.2 MPa、93.2 MPa。以上数据能够为铝合金铸件在冲击载荷工况下的性能评估与可靠使用提供参考依据。

参考文献:

- [1] 杜旭初, 黄粒, 厉沙沙, 等. 大型ZL205A铝合金舱体铸件铸造工艺研究 [J]. 铸造, 2024, 73 (6): 859-864.
- [2] 李春林, 张志峰, 樊建中. 高强铝合金半固态精密成型技术应用研究 [J]. 电子机械工程, 2016, 32 (3): 49-51.
- [3] 谭建波, 刘雪萍, 李立新. 合金温度对7075半固态模锻液相偏析的影响 [J]. 铸造, 2016, 65 (6): 538-541.
- [4] 冯剑. Al-Si-Cu-Ni-Mg系铸造耐热铝合金高温疲劳性能及强化研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2018.
- [5] 庞嘉尧, 张萃, 程伟. 铝合金疲劳性能研究进展 [J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42 (6): 717-726.
- [6] 吴私, 王旭, 周吉学, 等. 铝合金疲劳性能的研究进展 [J]. 金属世界, 2013 (4): 64-68.
- [7] 高宏伟. 铸造铝合金减速器箱体疲劳寿命分析与结构优化研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2023.
- [8] 董溟, 侯明君, 计效园, 等. 铸件X射线检测虚拟探伤图像生成方法 [J]. 铸造, 2024, 73 (6): 835-842.
- [9] 熊仁龙, 王荣昌, 吴和保, 等. 重卡轮毂的缩松缩孔形成机理及工艺优化 [J]. 铸造, 2024, 73 (4): 551-555.
- [10] 宋学恩, 张鑫, 李锋, 等. 一种V型气缸体缸孔夹渣缺陷的原因分析及工艺优化 [J]. 铸造, 2024, 73 (3): 407-409.
- [11] 张广泰, 陆凯雷, 朱洪宇, 等. 6061及7075铝合金复杂薄壁件的铸造与性能研究 [J]. 铸造, 2025, 74 (9): 1263-1270.
- [12] 韩剑, 戴起勋, 赵玉涛, 等. 7075-T651铝合金疲劳特性研究 [J]. 航空材料学报, 2010, 30 (4): 92-96.
- [13] 俞俊, 袁承麟, 陈锴, 等. 单轴拉-拉条件下7075-T651铝合金疲劳行为的研究 [J]. 农业装备与车辆工程, 2023, 61 (3): 107-109.
- [14] 刘泽鹏. 高强铝合金超高周疲劳特征研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2023.
- [15] 周爱博, 孙嵩松, 张营. 基于联合仿真与Haigh模型的连杆疲劳强度分析 [J]. 农业装备与车辆工程, 2021, 59 (5): 11-13.
- [16] 王悦东, 张佳宇. 基于改进的Goodman曲线的车轮疲劳强度评估方法研究 [J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14 (4): 827-832.
- [17] 何紫薇. Goodman-Smith疲劳方法研究及其在轨道车辆的应用 [D]. 大连: 大连交通大学, 2022.

Study on Sand Casting Processes of 6061 and 7075 Aluminum Alloys and Fatigue Properties of the Castings

GU Jie, ZHU Hong-yu, LIU Liang, MENG Jia
(NR Electric Power Electronics Co., Ltd., Changzhou 213025, Jiangsu, China)

Abstract:

In order to optimize the manufacturing process and reduce production cost, the parts with complex thin-walled structures in a certain power equipment were formed by using of sand casting technique. The casting materials were dosed and melted based on 6061 and 7075 aluminum alloys, and a set of sand casting process that meets the quality requirements of the castings was formed through improving the casting structures, casting processes, and production process. In view of the complex working conditions of cyclic impact loads on the parts, the fatigue performances of the casting materials were also investigated. The results show that after the process optimization, the interior of the casting is dense, without defects such as shrinkage cavities and microcracks. The fatigue limit of the casting material based on 6061 is 47 MPa. The *S-N* curve of the casting material based on 7075 is fitted within the stress amplitude range of 200-105 MPa, and the fatigue limit is approximately 112 MPa. In addition, the Haigh diagram analysis shows that the maximum allowable cyclic impact stress amplitudes of the materials based on 6061 and 7075 are 40.2 MPa and 93.2 MPa, respectively, providing key design parameters for the engineering applications.

Key words:

aluminum alloy; sand casting; fatigue performance; *S-N* curve; cyclic impact load