

基于 SLM 技术的随形水路镶块的制备及其在 OBC 壳体铸件的应用研究

王宪宇^{1, 2}, 吴涵超^{1, 2}, 刘立君², 贾志欣², 李继强²

(1. 浙江理工大学, 浙江杭州 311121; 2. 浙大宁波理工学院, 浙江宁波 315100)

摘要: 针对新能源汽车车载充电器 (OBC) 的冷隔缺陷进行了分析, 发现螺孔处成形时模具温度过低, 导致金属液流动受阻是形成缺陷的主要原因。通过选择性激光熔化 (SLM) 制备随形水路镶块并对其进行拉伸、冲击、电化学腐蚀等性能测试及质量效果验证, 对缺陷部位进行随形加热, 来降低此处缺陷。最终对实际生产出的试样进行 X 射线探伤观察。结果表明, 镶块随形水路的加热有效, 可基本消除冷隔缺陷。

关键词: 车载充电器壳体; 随形水路镶块; 3D 打印; 冷隔缺陷

作者简介:

王宪宇 (2000-), 男, 硕士生, 主要研究方向为压铸工艺。E-mail: 2226432769@qq.com

通信作者:

刘立君, 男, 博士, 教授, 硕士研究生导师。E-mail: 888liulijun@163.com

中图分类号: TG241

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977 (2025)

02-0158-08

基金项目:

宁波市北仑区关键核心技术攻关项目 (2021BLG003); 宁波创新联合体项目 (2022H001); 宁波市科技创新 2025 重大专项 (2023Z037)。

收稿日期:

2024-05-24 收到初稿,
2024-07-15 收到修订稿。

新能源汽车车载充电器 (OBC) 是一种将外部电源转换为适合电动汽车电池充电的设备。其组件内部一共承载了车载充电器、电机控制器、降压斩波电源、整车控制器和高压配电箱^[1], 所以 OBC 壳体需满足强电、弱电、冷却、承载和结构等性能指标需求。因此, 在设计和使用车载充电器时, 选择高品质的车载充电器壳体非常重要^[2]。然而铝合金铸件的气孔、缩孔和冷隔等孔洞状缺陷一直是铸造行业关注的焦点^[3]。这些缺陷不仅影响铸件的质量和性能, 还可能导致铸件报废, 增加生产成本^[4], 因此, 对铝合金铸件冷隔缺陷的研究具有重要的实际意义。

激光选区熔化 (Selective Laser Melting, SLM) 作为增材制造技术的重要分支, 可以快速制造复杂精密的金属结构^[5]。目前比较常见的为随形冷却水路, 然而在实际生产中, 为了应对温度不均匀引起的冷隔、变形缺陷, 也可设计制作随形加热水路来提升加热效率。常规的直线加热水路可能无法充分覆盖复杂形状的工件或部件, 无法提供均匀的加热效果^[6], 而随形加热水路设计可以根据工件的形状和加热需求进行优化, 使加热水路更好地贴合工件的表面, 并在整个表面上提供均匀地加热, 提高生产效率并确保制造出高质量的工件^[7]。

本文主要研究新能源汽车车载充电器壳体, 为了消除铝合金铸件冷隔缺陷, 设计了 3D 打印 SLM (selective laser melting) 随形水路镶块, 并对提升壳体质量效果进行验证。

1 车载充电器铸件冷隔缺陷位置及分析

在 OBC 铸件的實際生产时发现, 在图 1 中的画圈位置的螺孔外部存在冷隔缺陷。图 2 为冷隔缺陷的 X 光图。

针对 OBC 铸件螺孔处存在的冷隔缺陷, 经过对壳体的整体分析, 发现主要问题在于此处成形时模具温度过低, 该处金属流在分成若干股地流动时, 各股的流动前沿已呈现冷凝状态, 称为凝固前沿, 但在后面的金属流的推动下, 仍然进行填充。当与其相遇的金属流同样具有凝固前沿时, 则相遇的凝固层不能再熔合, 其接合处便呈现缝隙, 产生缺陷。综合已存在的设计缺陷, 设计了一款 3D 打印随形水路镶块, 对该部位进行随形加热, 通过提升模具温度来降低此处缺陷。

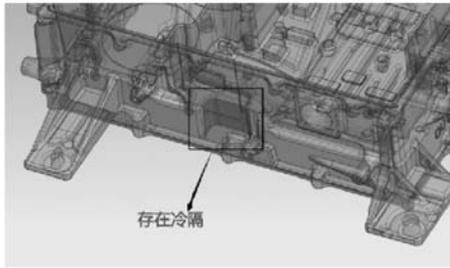


图1 存在冷隔的位置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the location with cold shut

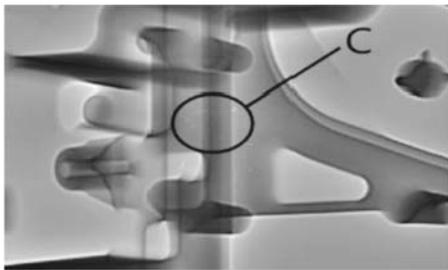


图2 冷隔缺陷局部探伤图

Fig. 2 Local flaw detection diagram of cold shut defects

2 车载充电器随形水路镶块设计与制造

2.1 随形水路设计

随形水路镶块设计思路如下：OBC壳体铸件的螺孔深腔结构深65 mm，传统的型芯虽然可以成形此深腔结构，但是模具水路无法针对性地经过此处，因此原模具上采用动模上的凸起状型芯成型的方法无法达到成形质量需求，原模具上的传统型芯成型，如图3所示。现改用随形水路镶块，确保该部位成形的同时进行局部加热，随形水路镶块位置，如图4所示。

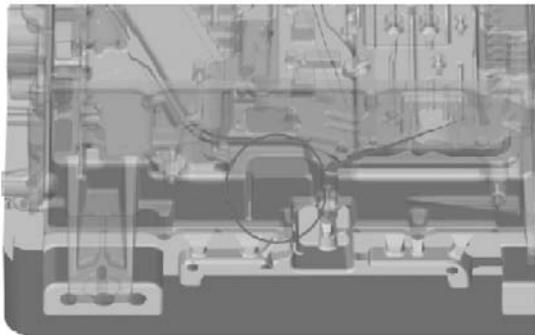


图3 传统型芯成形示意图

Fig. 3 Schematic diagram of traditional core forming

采用激光选区熔化（Selective laser melting, SLM）技术打印镶块，如图5（a）所示，在SLM打

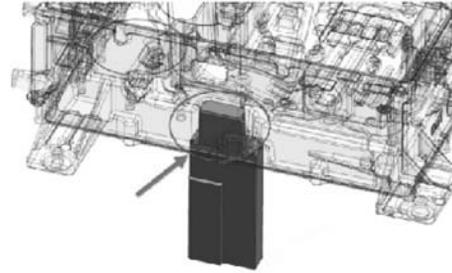
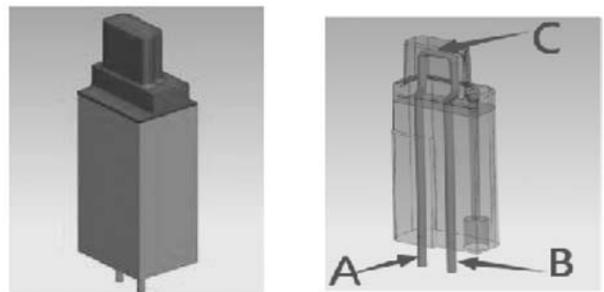


图4 随形水路镶块成形示意图

Fig. 4 Schematic diagram of forming shaped waterway inlay blocks



(a) 镶块整体图

(b) 镶块内部细节图

图5 镶块整体和内部细节图

Fig. 5 Overall and internal detailed drawings

印镶块的基础上，又在其内部增加了随形加热水路，通过温度传感器和加热模温机与随形水路连接，实现对模具表面或局部区域的加热和温度控制。在随形加热水路中，选择油为工作介质，模温机的出油口连接加热随形水路的进油口，加热随形水路的出油口连接模温机的回油口。镶块内部随形水路，如图5（b）所示，油道直径为8 mm，加热油从A口进，B口出，加热油到达C处时，对缓解缺陷处的冷隔缺陷有很大帮助。

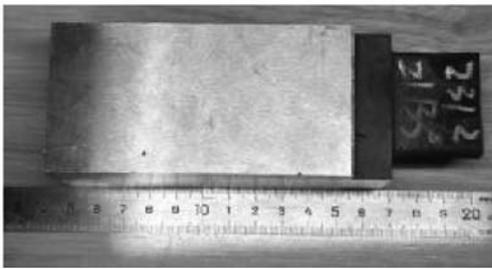
2.2 模具随形水路镶块制造

在DLM-280金属SLM 3D打印机上制造随形水路镶块。DLM-280打印机参数：设备尺寸为1 700 mm × 3 140 mm × 3 220 mm；设备重量约为1 500 kg；制作缸标准容积约25 L；打印范围280 mm × 280 mm × 350 mm；光学扫描系统光斑直径为0.06~0.20 mm；扫描振镜为高速扫描振镜，激光扫描速度1.0~4.0 m/s，激光跳跨速度10.0 m/s。

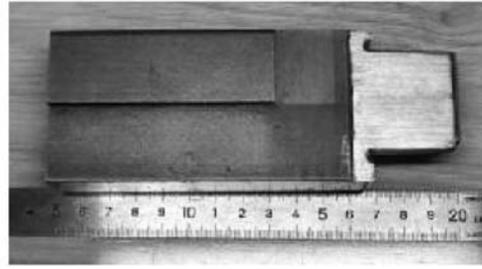
在打印随形水路镶块时，用到了H13模具钢粉末和以及18Ni300钢粉末，考虑到经济原因，镶块的底座部分使用了H13模具钢粉末，而镶块头部部分使用了18Ni300钢粉末。具体的工艺参数为：涂铺粉厚度0.05 mm，激光光斑直径0.06 mm，激光扫描速度1 000 m/s，功率200 W。打印完成后，通过线切割技术将镶块从基板上取下。

基于压铸零件的几何形状、尺寸和模具结构强度确定镶块尺寸。SLM 3D打印随形水路镶块毛坯件,如图6(a)所示。其外型尺寸为153 mm × 59 mm × 40 mm。采用线切割技术对毛坯件进行加工,切去镶块表面的

衬套,得到随形水路镶块加工件,如图6(b)所示,其尺寸为153 mm × 59 mm × 27 mm。对加工件做表面处理,进行打磨、抛光去除粗糙、毛刺,然后进行热处理,改变钢的内部结构,提高其力学性能和耐腐蚀性。



(a) SLM镶块毛坯件



(b) 随形水路镶块加工件

图6 镶块毛坯件和加工件

Fig. 6 Insert block blanks and machined parts

H13模具钢部分进行淬火后回火处理。淬火时先在 $790\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 预热,然后继续升温到 $1\ 020\sim 1\ 060\text{ }^{\circ}\text{C}$,空冷或油冷;淬火结束后应立即进行2~3次回火处理,选择 $540\sim 650\text{ }^{\circ}\text{C}$ 保温2 h,然后空冷。淬火后回火处理试样的最终硬度为HRC48~52^[8]。18Ni300钢部分热处理工艺为 $840\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下固溶处理1 h后空冷或水冷,然后在 $450\sim 520\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时效3~12 h^[9]。最后为了满足外观和防腐的需要,对镶块进行喷漆或涂装处理,提高其耐腐蚀性能。

随形水路镶块的X光透视图,如图7所示,从镶块头部可以清楚看出镶块内部的随形水路。

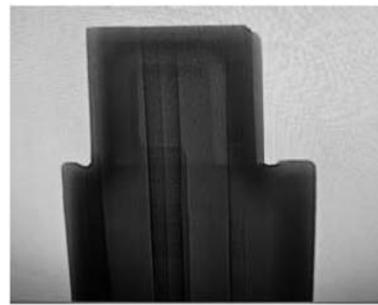


图7 镶块随形水路的X光透视图

Fig. 7 X-ray perspective view of embedded block shaped waterway

试样做对照的金属材料是模具H13钢。

3 镶块力学性能测试试验

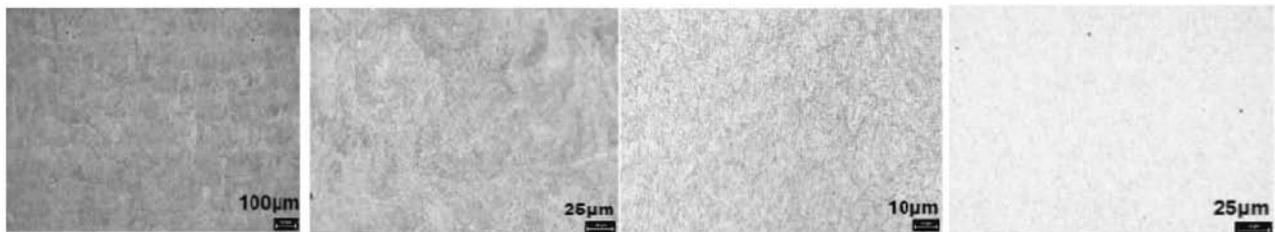
3.1 试验材料及试样制备

试验材料主要是18Ni300钢模具钢粉末,采用激光选区熔化(SLM)方法,使用激光束将金属粉末熔化成固体层,逐层堆叠形成长方块,粉末及其颗粒大小分布会影响SLM的成形质量。打印完成后,将打印的金属长方体块用线切割机切成预定尺寸的试样并进行表面处理和淬火热处理。本次试验中与18Ni300钢粉末

3.2 3D打印镶块的试样微观组织

为了便于打磨金相试样,首先用XQ-2B镶嵌机镶嵌试样,然后在GP-2A全自动磨抛机上,按照200目到3 000目的顺序用砂纸打磨金相试样后,再用抛光机抛光。抛光后用4%硝酸酒精试剂腐蚀金相试样约5 s,使金属细微组织和晶粒清晰可见。

用徕卡DM1750光学金相显微镜观察金相和金相显微组织,如图8所示。图8(a)和图8(b)处组织分



(a) 18Ni300钢试样1

(b) 18Ni300钢试样2

(c) H13钢试样1

(d) H13钢试样2

图8 金相显微组织

Fig. 8 Metallographic microstructure

布均匀细密,无明显缺陷,说明18Ni300钢成形质量较好;而图8(c)和图8(d)处局部有细微缩孔,说明该处成形质量一般。

3.3 拉伸试样与试验

以GB/T 228.1—2021金属材料拉伸试验第1部分试样标准作为参考,具体尺寸选用室温试验方法(1506892—1:2009,MOD)中的附录B:厚度0.1 mm、<3 mm薄板和薄带使用的试样类型。拉伸件的试样示意图,如图9所示,其中平行长度 $L_0=25.27$ mm,原始标距 $L_c=30.27$ mm。试件的横截面尺寸为8 mm×1 mm。

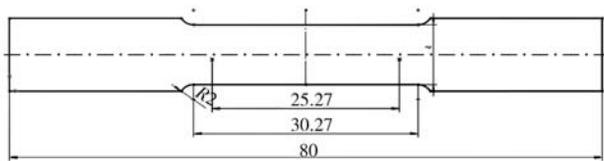


图9 拉伸试验试样示意图

Fig. 9 Schematic diagram of tensile test specimen

试样拉伸试验采用万能试验机设备,型号为WE-100B。设备输出最大拉伸力为100 kN。屈服点速度为 $0.000\ 25\ s^{-1}$,弹性模量测量速度为 $0.000\ 25\ s^{-1}$,试验速度 $0.006\ 7\ s^{-1}$,预载为50 N。试验在室温 $25\ ^\circ C$ 下进行,试样数量为10片板状试样,其中5片为18Ni300钢板状试样,5片为H13钢板状试样。试验结果如图10所示,其中, $R_{p0.2}$ 为屈服强度, R_m 为抗拉强度。

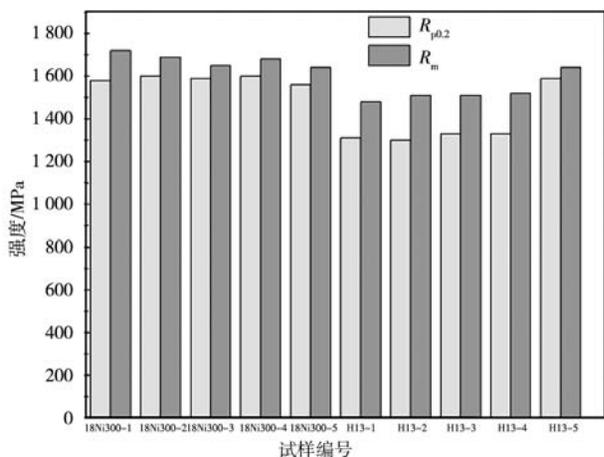


图10 拉伸试验数据图

Fig. 10 Tensile test data graph

在18Ni300钢与H13钢中各去除2组误差较大的数据,去除的数据为第三组和第五组。剩余的3个18Ni300钢试样中屈服强度从高到低依次为1 600 MPa、1 600 MPa、1 580 MPa,抗拉强度依次为1 720 MPa、

1 690 MPa、1 680 MPa;对照组H13件中屈服强度从高到低依次为1 330 MPa、1 310 MPa、1 300 MPa,抗拉强度依次为1 520 MPa、1 510 MPa、1 480 MPa。18Ni300钢的屈服强度平均值比H13件高103.3 MPa,抗拉强度平均值比H13件高190 MPa。更高强度的模具钢材料有抗变形性好、抗磨损性优、增加模具寿命、保证产品质量的好处,能够满足不同环境温度和工件的压铸需求。

根据图11中试验前后板状试样标距图,去除第三组和第五组的数据后,经过计算得到:3个18Ni300钢试样中,伸长率从高到低依次为4.95%、4.94%、4.75%,对照组H13件中伸长率从高到低依次为6.33%、6.32%、6.17%。

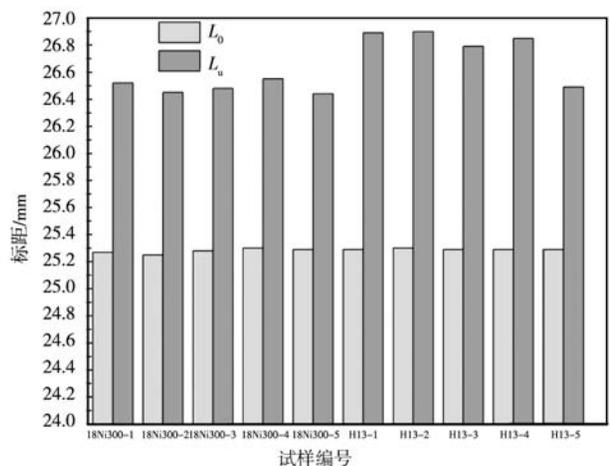


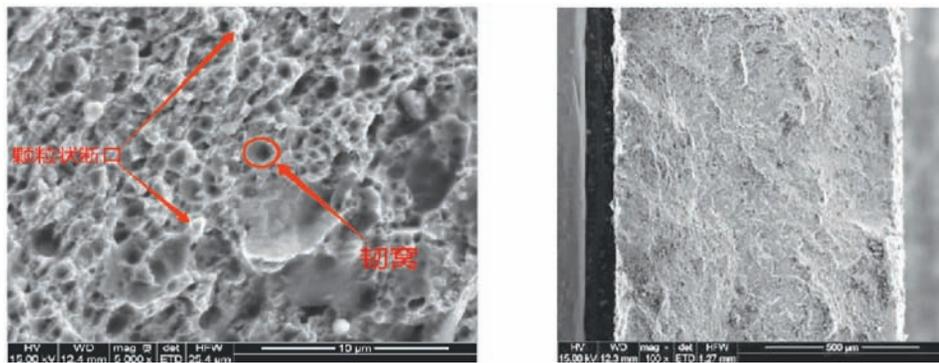
图11 试验前后板状试样标距图

Fig. 11 Gauge distance diagram of plate-like specimens before and after the experiment

根据图11中试验前后板状试样标距图,去除第三组和第五组的数据后,经过计算得出18Ni300钢拉伸断面面积平均值为 $7.85\ mm^2$,H13钢断面面积平均值为 $7.70\ mm^2$ 。

从试验数据中可以看出,18Ni300钢的伸长率平均值比H13件低1.39%,说明18Ni300钢钢有更高的硬度和抗变形性,可以在高压和高温条件下保持形状稳定,不易发生变形和磨损,能够提高模具的耐用性和成形质量。断面收缩率比H13钢低1.9%,较低的收缩率意味着模具在冲击过程中产生的内部应力也较小,能够减少钢材的变形和裂纹的风险,因此产品的综合性能会有所提高。

使用蔡司FEG250扫描电镜仪对拉伸试样断口进行SEM观察,通过观察18Ni300钢断口,断口形貌如图12所示。图12(a)中,存在几处颗粒状断口,金属断裂面呈现出一些不规则形状的颗粒,说明该模具钢具有良好的塑性和拉伸性能,从断口深处能观察到多处韧



(a) 断口形貌A

(b) 断口形貌B

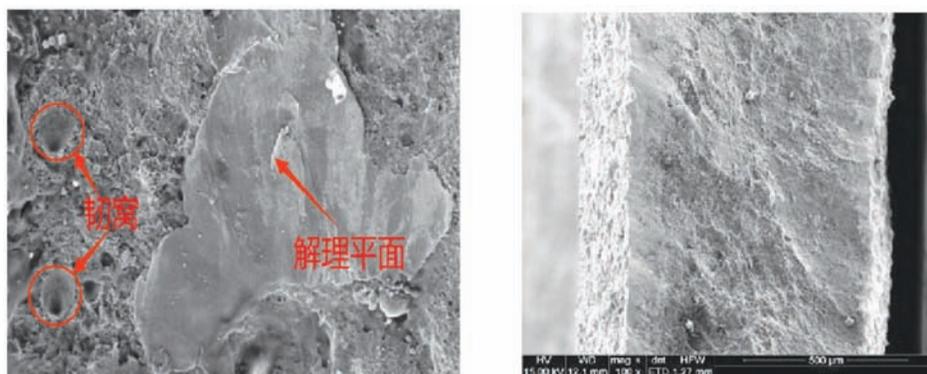
图12 18Ni300钢拉伸断口SEM断口形貌

Fig. 12 SEM morphology of tensile fracture surface of 18Ni300 steel

窝，韧窝形状较小，说明材料韧性较高。从图12 (b) 可以看出，断口表面比较平滑，反映了该金属材料的高质量和均匀性。

用扫描电镜观察H13断口形貌，如图13所示。从图13 (a) 可以看出，断面存在大量解理平面及撕裂棱，解理面较小，有少量韧窝，介于解理断裂和韧窝断裂之间，在不同部位产生解理裂纹核，扩展成解理

刻面，最后以塑性方式撕裂，判断此处属于准解理断裂。准解理断裂的断口形貌比较平整，但微观形貌有河流花样，舌状花样及韧窝与撕裂棱等，说明该材料韧性相对较低。从图13 (b) 可以看出，断口表面较粗糙，粗糙部分是脆性断裂的解理断裂而形成的结晶状断口。



(a) 断口形貌C

(b) 断口形貌D

图13 H13钢拉伸断口SEM断口形貌

Fig. 13 SEM morphology of tensile fracture surface of H13 steel

3.4 冲击试样与试验

以GB/T 229—2020《金属材料夏比摆锤冲击试验方法》作为试样标准参考。试样尺寸如图14所示。

试样冲击试验设备采用ZBC-300B的冲击试验机。本次试验在室温25℃下进行，试样块数量为6，其中3块为18Ni300钢试样，其余3块为H13钢试样。试验结果如图15所示，3块18Ni300钢试样试验时摆臂最高点与水平线的角度 β 平均值比对照组H13钢小 2.33° ，断面处测量的面积平均值比对照组H13钢大 1.93 cm^2 。

对于同一批试验条件冲击韧性值计算公式如下：

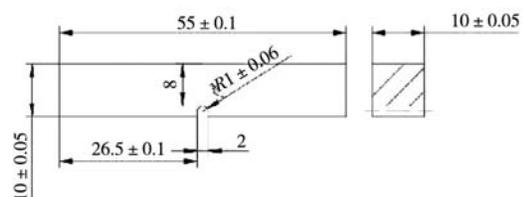


图14 冲击试验试样尺寸图

Fig. 14 Size diagram of impact test specimen

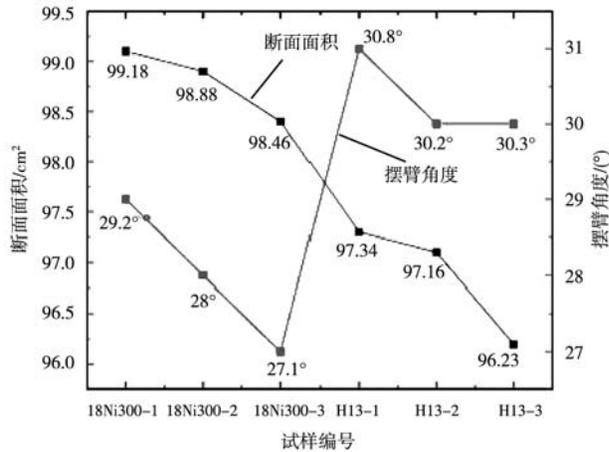


图15 冲击试验结果图

Fig. 15 Results of impact test

$$\sigma_k = \frac{w_k}{A} \quad (1)$$

式中： σ_k 为冲击韧性值， w_k 为冲击功， A 为断面面积

最终计算得18Ni300钢平均冲击韧性值为28.27 J/cm²，H13钢平均冲击韧性值为27.28 J/cm²。

试验结果对比得出，18Ni300钢的冲击韧性值比H13钢高0.99 J/cm²，越高的冲击韧性值说明材料塑性变形和断裂过程中吸收能量的能力越强，发生脆性断裂的可能性越小。

3.5 电化学腐蚀试样与试验

以GB/T 40299—2021金属和合金的腐蚀试验电化学测量方法作为试样标准参考，试样尺寸为10 mm × 10 mm × 10 mm，形状呈正方体状。

首先在电化学工作站上设置电化学腐蚀系统，准备电化学腐蚀试验所需的电化学池，将参考电极和工作电极（即金属试样）浸入NaCl溶液中，确保金属试样与电解质充分接触。为了保护参考电极不受电流影响，在溶液中浸入辅助电极，组成一个电化学腐蚀三级系统。接着控制外加电压或电流，测量试样表面的电压、电流和温度等参数，记录试验数据。

18Ni300钢与H13钢的极化曲线如图16所示。从图16中可以看出18Ni300钢自腐蚀电位高于H13钢，说明其相对与H13钢发生电化学腐蚀的可能性更低，耐腐蚀性能更好。

4 镶块随形水路提升车载充电器质量效果验证

4.1 壳体压铸件生产试验

在大型压铸工厂中对车载充电器（OBC）壳体做完整的生产试验，以此来验证镶块随形水路提升壳体

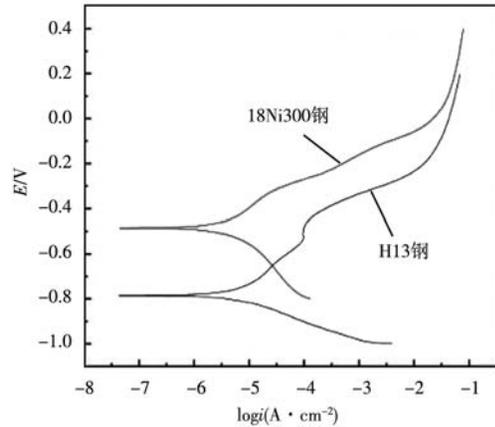


图16 18Ni300钢与H13钢的极化曲线

Fig. 16 Polarization curves of 18Ni300 steel and H13 steel

质量的实际效果。

将符合要求的高纯度AlSi10MgFe铝锭投入熔炼炉中进行预热，并高温熔化成液态铝合金，放置在保温炉中，并在炉中采取除气措施，去除熔池中的气泡和气体，以保证熔池质量。然后将液态铝合金通过DCC1600压铸机注射到金属模具的腔体中，充满整个模具腔室，在模具内等待足够时间，让铝合金冷却凝固成形，并且保证铸件表面光洁和尺寸精确。待铸件冷却后，打开模具，取出成形的铸件。OBC壳体压铸模具，如图17所示。

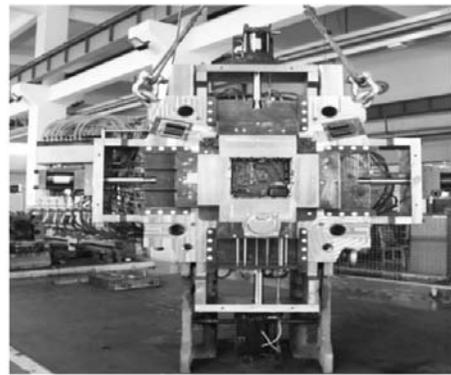
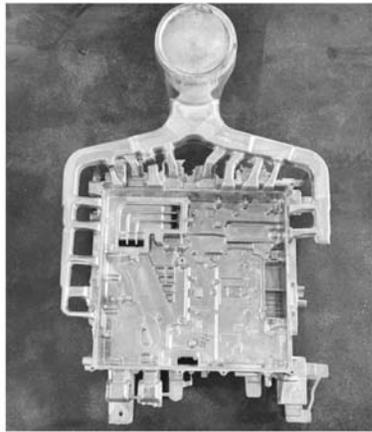


图17 OBC壳体压铸模具实物图

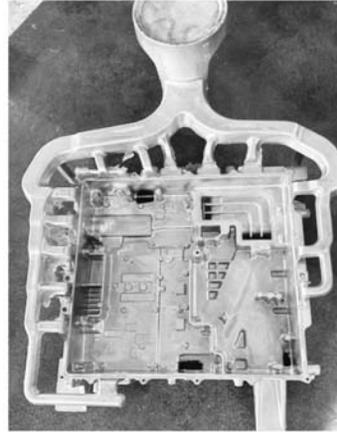
Fig. 17 Physical image of OBC shell die-casting mold

自动机械手将OBC壳体脱模，在脱模后，对取出的铸件进行修整和切割，然后利用冲压机去除OBC壳体上带着的排气槽与浇道，得到成品的形状。将得到的毛胚OBC壳体放入加工中心中清理成品表面的毛刺和残留物，并根据需要进行热处理、表面处理或其他加工。最后对压铸件进行质量检测，包括尺寸测量、表面检查、材料成分分析等。

将原方案和设计方案的铸件在工厂中实际生产出来，如图18所示，其中图18(a)为采用传统成形方式



(a) 采用传统镶块成形的铸件



(b) 采用镶块随形水路的铸件

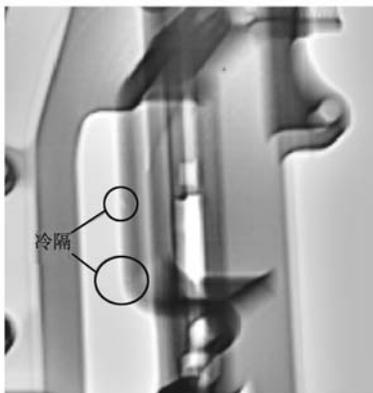
图18 OBC铸件
Fig. 18 OBC Castings

的铸件，图18(b)为采用镶块随形水路的铸件。

4.2 X射线探伤

分别对两个铸件的冷隔缺陷处进行X射线探伤，如图19所示。从X射线图中看出，采用传统的冷却方式

的铸件冷隔缺陷位置有明显的孔洞状，呈现不规则形状；采用镶块随形水路设计的铸件，该位置是光滑平整的，说明缺陷得到了明显改善，镶块随形水路的加热是有效的。



(a) 采用传统镶块成形的铸件



(b) 采用镶块随形水路的铸件

图19 铸件冷隔缺陷处X射线探伤对比图

Fig. 19 Comparison diagram of X-ray inspection at the cold shut defect of castings

5 结论

(1) 通过对微观组织和断口形貌进行观察，对比H13钢和18Ni300钢材料，可知18Ni300钢成形质量较好，具有良好的塑性和拉伸性能，韧性较高，质量更高和均匀性更好。

(2) 对采用18Ni300钢材料3D打印的随形水路镶块进行力学性能测试，并以H13钢作为对照，发现18Ni300钢的屈服强度和抗拉强度高于H13钢，18Ni300

钢的冲击韧性值比H13钢高 0.99 J/cm^2 ，断面收缩率比H13钢低1.8%，18Ni300钢自腐蚀电位高于H13钢，证明此镶块性能强于原模具钢镶块。

(3) 针对OBC壳体特定位置冷隔缺陷的问题，设计并制造3D打印随形水路镶块，通过对比X射线探伤图，发现镶块随形水路可以基本消除因冷隔而产生的孔洞缺陷，解决了铸件某些深腔位置的孔洞状缺陷问题，提升了铸件质量和使用寿命。

参考文献:

- [1] 梁锋林, 郑德山, 黄松峰, 等. 车载电动汽车充电器的研究与设计 [J]. 辽宁工业大学学报(自然科学版), 2021, 41(1): 28-33.
- [2] 戴慧纯, 叶雪韬, 寿以宁, 等. 基于PFC与LLC两级结构的车载充电机(OBC)控制策略研究 [J]. 电工技术, 2020(11): 38-42.
- [3] PATIL S A, DARADE P D. Application and performance frequency response method as NDT tool to detect defects in castings [J]. Materials Today Proceedings, 2017, 4(8): 8463-8468.
- [4] 李斌. 金属铸件常见缺陷与工艺对策分析 [J]. 世界有色金属, 2017(24): 272-274.
- [5] 王武. SLM技术在注塑模具中的应用及安全评价 [D]. 上海: 上海应用技术大学, 2020.
- [6] 郑家峥, 吕宏贵. 3D打印随形水路在铰链盖模具上的应用 [J]. 模具制造, 2022, 22(7): 74-78.
- [7] 韦怡. 选区激光熔化成形随形水路模具的试验研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
- [8] 郑小燕. H13 模具钢热处理工艺优化及表面渗氮处理研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2008.
- [9] 田杰. 模具钢选区激光熔化工艺及组织性能研究 [D]. 济南: 山东大学, 2018.

Preparation of Conformal Waterway Inserts Based on SLM Technology and Its Application in OBC Shell Castings

WANG Xian-yu^{1,2}, WU Han-Chao^{1,2}, LIU Li-jun², JIA Zhi-xin², LI Ji-qiang²

(1. Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 311121, Zhejiang, China; 2. Ningbo Tech University, Ningbo 315100, Zhejiang, China)

Abstract:

An analysis was conducted on the cold shut defects of the on-board charger(OBC)for new energy vehicles, and it was found that the main reason for the defects was the low mold temperature during the formation of the screw hole, which hindered the flow of molten metal. By using selective laser melting(SLM)to prepare conformal waterway inserts and conducting performance tests such as tensile, impact, and electrochemical corrosion, as well as quality effect verification, the defect area was heated in a conformal manner to reduce the defect. Finally, X-ray inspection was conducted on the actual produced samples, and the results showed that the heating of the embedded block along the water path was effective and can basically eliminate cold shut defects.

Key words:

car charger housing; shaped waterway inlay block; 3D printing; cold shut defect