

低压铸造 UNILIA 氢燃料电池堆系统盲端板冷却优化

刘鑫悦 苏小平

(南京工业大学机械与动力工程学院, 南京 211816)

摘要 以 UNILIA 氢燃料电池堆系统盲端板为对象, 根据其结构特点设计了底注式浇注系统。利用 ProCAST 软件对电池端板初始铸造工艺方案进行数值模拟, 并分析了其充型过程中的温度场和凝固过程的固相率, 预测了铸件中缩松、缩孔缺陷的位置。根据缺陷具体位置, 先后增加点冷却和线冷却系统, 同时调整工艺参数进行优化。通过对比发现, 添加线冷却系统的铸件缩松、缩孔缺陷消失, 且铸件的最大二次枝晶间距值优化后减小了 6.11%, 提高了铸件品质。

关键词 电池端板; 数值模拟; 低压铸造; 冷却工艺

中图分类号 TG249.2; TG146.21; TP311

文献标志码 A

DOI: 10.15980/j.tzzz.T20240195

Cooling Optimization of Blind End Plates for UNILIA Hydrogen Fuel Cell Stack System in Low Pressure Casting

LIU Xinyue, SU Xiaoping

(School of Mechanical and Power Engineering, Nanjing Technology University, Nanjing 211816)

Abstract: A bottom pouring system was designed based on the structural characteristics of blind end plate of UNILIA hydrogen fuel cell stack system. The initial process scheme was numerically simulated using ProCAST software, and the temperature field during the filling process and the solid fraction during the solidification process were analyzed. The location of shrinkage porosity and porosity defects in the casting was predicted. According to the specific location of the defects, spot cooling and line cooling systems were added successively, and the process parameters were adjusted for optimization. Comparison results reveal that the shrinkage porosity and cavity defects disappear in the castings with the addition of a linear cooling system, and the maximum secondary dendrite spacing value of the castings is decreased by 6.11% after optimization, improving the quality of the castings.

Key Words: Battery End Plate, Numerical Simulation, Low Pressure Casting, Cooling Process

UNILIA 氢燃料电池堆系统盲端板作为燃料电池堆的关键组成部分在燃料电池堆中起到了固定和保护的作用, 其紧密地与燃料电池堆的其他部件相连接, 确保燃料电池堆的结构稳定性和安全性。通过精确的设计和制造, 端板能够有效地承受汽车在运行过程中产生的振动和冲击, 从而保护燃料电池堆免受损坏。端板作为电池堆的重要组成部分, 不仅要有足够的强度和刚度, 还要满足质量轻、体积小的特点。在汽车轻量化的推动下, 铝铸件能减少车重的 30%~50%^[1], 因此目前电池堆端板多采用铝合金, 其制造工艺和质量直接影响了电池的性能和整车轻量化发展。低压铸造过程中可人为控制压力和速度等工艺参数, 能保证金属液充型平稳^[2], 有利于减少缩松、缩孔, 提高铸件质量。因此, 在实际生产中采用低压铸造工艺改善电池

端板铸件的性能和质量。

本研究以铝合金电池端板为对象, 利用低压铸造设计合理的工艺方案。使用 ProCAST 软件对铸件进行数值模拟, 并分析缩松缩孔缺陷出现的位置及产生的原因, 设计合适的冷却系统并对其进行优化和消除, 最终获得成形质量高的产品。

1 初始工艺分析

1.1 数值模拟模型建立

图 1 为电池端板三维模型。铸件轮廓尺寸为 440 mm×139 mm×20 mm, 平均壁厚为 20 mm, 铸件壁厚相对均匀, 质量为 2.39 kg。采用金属型低压铸造工艺生产。根据铸件结构, 为了使金属液有效进行压

收稿日期: 2024-05-10; 修订日期: 2024-05-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52175465)

第一作者简介: 刘鑫悦, 女, 1998 年出生, 硕士研究生, E-mail: 2917368251@qq.com

引用格式: 刘鑫悦, 苏小平. 低压铸造 UNILIA 氢燃料电池堆系统盲端板冷却优化[J]. 特种铸造及有色合金, 2025, 45(9): 1307-1311.

LIU X Y, SU X P. Cooling optimization of blind end plates for UNILIA hydrogen fuel cell stack system in low pressure casting[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2025, 45(9): 1307-1311.

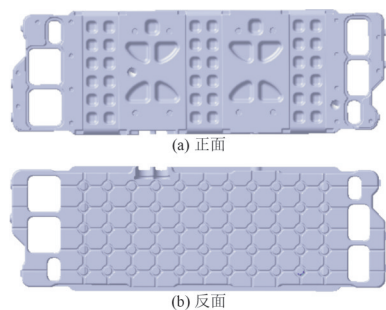


图1 电池端板三维模型

Fig.1 Three dimension model of battery end plate

力补缩,减少铸件缺陷,利用CATIA设计了底注式双浇道浇注系统,浇注系统的三维模型及装配图见图2。该浇注系统包含了2个尺寸相同的升液管,2个横浇道

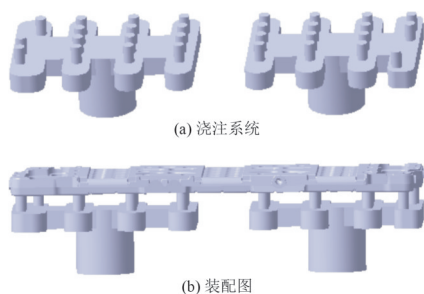


图2 端板铸件浇注系统及装配图

Fig.2 Gating system and assembly diagram of end plate

表2 初始方案工艺参数

Tab.2 Process parameters in primary scheme

浇注温度/℃	模具温度/℃	升液压力/Pa	升液时间/s	充型压力/Pa	充型时间/s	保压压力/Pa	保压时间/s
720	350	2 614.3	1.8	3 205	3.5	5 450	200

2 初始工艺数值模拟结果分析

2.1 充型过程分析

电池端板在低压铸造充型过程中的温度场见图3。从图3a可以看出,金属液从升液管依次流经横浇道、内浇道最后到达端板底面需要1.71 s,在这一过程中,金属液流速均匀、充型平稳,升液时间与压力曲线计算的升液时间 $t=1.8$ s基本一致,表明在升液阶段设计的升液速度合理;当 $t=2.58$ s时,由于该铸件设计为底注式双浇道浇注系统,液态金属先流经端板两端,最终在远离浇口的位置即端板中部汇合流动,并填充整个型腔底部,最后金属液均匀地充满整个铸型型腔,见图3b。但当 $t=5.57$ s以及 $t=7.32$ s时,圈出的电池端板中部以及两端可以明显地看见局部温度高,形成明显的热节,影响后续的凝固,此处可能会出现缺陷。总体而言,该铸件整体构造简单且壁厚相对均匀,在低压铸造作用下,根据铸件充型过程温度场的分析可知,金属液在充型过程中流动平

以及30个内浇道。将该模型导入ProCAST中的MESH模块进行网格划分,再对网格进行修补、优化确保没有错误,利用CAST模块设置不同的边界条件、初始条件和模拟参数,来模拟不同铸造条件下的铸件成形过程,最后通过VIEW模块直观地查看和分析模拟结果。

1.2 材料选择及工艺参数设置

在铝合金中,经过T6热处理的A356铝合金在延展性、可铸性、强度上都表现出理想性能^[3]。因此该电池端板采用A356铝合金,其化学成分见表1,模具材质为H13钢。

表1 A356铝合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of A356 alloy

w_B						
Si	Mn	Mg	Fe	Ti	Zn	Al
6.5~7.5	≤0.1	0.2~0.4	≤0.2	≤0.2	≤0.1	余量

金属液与铸型之间的传热系数为 $2\,000\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$,铸型间的传热系数为 $3\,000\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。低压铸造的工艺参数主要有浇注温度、模具温度、升液压力、升液时间、充型压力、充型时间、保压压力和保压时间等^[4],根据端板的结构、低压铸造工艺的特点以及经验公式,初步确定其工艺参数值见表2。

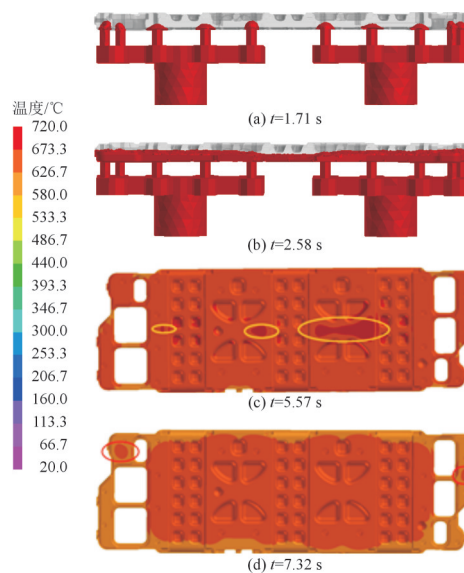


图3 铝合金电池端板低压铸造充型过程中的温度场

Fig.3 Temperature field of aluminum alloy battery end plates during low-pressure casting and filling process

稳^[5],气体和夹渣能被最大化地排出,可有效避免夹渣、卷气缺陷。

2.2 凝固过程分析

在凝固过程中,金属液存在一个临界固相率,当超过此临界值时,金属液流动性变差,无法对周围进行补缩,理论上取临界固相率为 70%^[6]。图 4 为铝合金电池端板凝固过程分析。一般来说,铸件若能实现顺序凝固,则不会出现单独的热节导致缩松缩孔缺陷。从图 4a 中可以看出,当凝固到 13.6% 时,能明显看到箭头所指向的部位出现热节,其固相率明显低于周围部位,该部位虽然没有出现完全液相孤立的情况,但是由于端板两端较窄,导致金属液补缩不及时,影响顺序凝固。当凝固到 28.4% 时,由于箭头指向的部位较薄、较窄且散热较快,其最先凝固,凝固分数达 80% 以上,此时金属液流动性变差,难以对端板左右两边进行补缩,端板两端易出现缩松缩孔缺陷。从图 4c 可以看出,端板两端出现了孤立液相区;从图 4d 可见,端板上表面中间的位置为金属液最后凝固的位置,传热面积较大,不利于凝固,因此,孤立液相区位置可能出现缩松和缩孔。

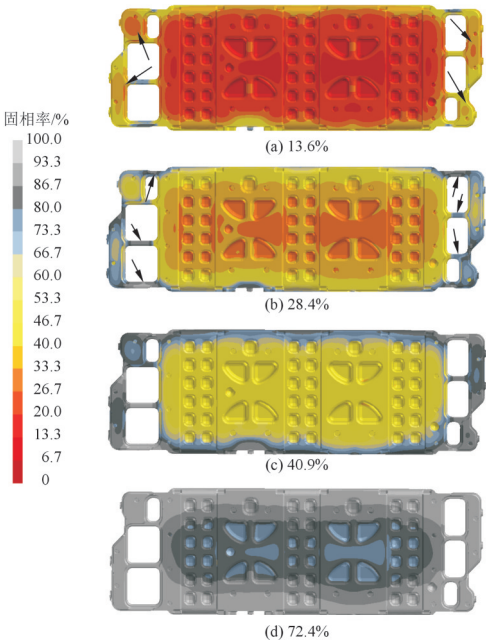


图 4 铝合金电池端板凝固情况

Fig.4 Solidification of aluminum alloy battery end plates

2.3 铸造缺陷分析

图 5 为铸件缩松缩孔缺陷分布情况。产生缩松缩孔的位置主要为两端金属液难以补缩的位置以及中间因传热面积大温度较高的位置,与预测的位置基本一致,最终铸件缺陷体积为 0.065 cm³。

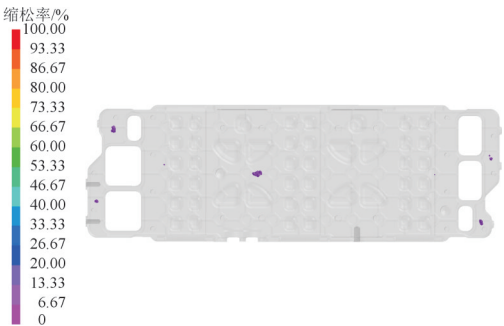


图 5 铸件缺陷分布情况

Fig.5 Distribution of casting defects

3 冷却工艺的设置

3.1 初始冷却工艺方案

通过充型过程和凝固过程分析发现铸件缺陷出现的主要原因是孤立液相区的存在。为了消除或减少铸件缺陷,冷却系统采用点冷,对出现缺陷的区域进行局部冷却,以改善铸件凝固温度梯度,使其实现顺序凝固。同时,封闭式系统能够减少水的蒸发量,节约水资源,且冷却水在密闭系统中循环使用,水质稳定且不易受到污染,能够提供较为稳定的冷却效果,其结构相对简单且维护方便,维护成本也相对较低。因此在冷却方案中利用封闭式循环水冷却方式,冷却管路的布置见图 6。

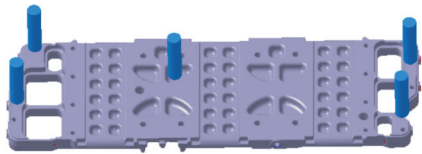


图 6 点冷却管路布置图

Fig.6 Layout diagram of spot cooling pipeline

初始冷却工艺参数见表 3。冷却管路与模具之间的传热系数为 5 000 W/(m²·K)。

表 3 初始冷却工艺参数

Tab.3 Initial cooling process parameters			
水流量/(m ³ ·h ⁻¹)	开启时刻/s	关闭时刻/s	水温/℃
2	3.5	108	20

3.2 缺陷分布分析

图 7 为初始冷却工艺下的铸件缺陷分布情况。铸件缺陷为 0.086 cm³,与之前相比缺陷反而增多了,影响了铸件的品质。由于采用点冷方式,导致模具特定位置的冷却范围受限,同时铸件传热面积较大。这种冷却方式限制了对热节的有效冷却作用,导致铸件在凝固过程中仍然出现热节,阻碍了顺序凝固的实现^[7]。冷却管道的开启时间、流量以及水温设置存在不合理之

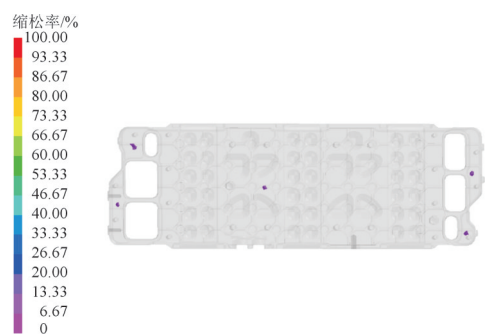


图7 点冷却工艺铸件缺陷分布情况

Fig.7 Distribution of casting defects during spot cooling process

4 冷却系统的优化

4.1 冷却系统的改进

初始冷却工艺方案使铸件表面缺陷增多,说明合理的冷却系统对铸件品质十分重要。根据初始冷却方案的分析结果,针对铸件热节部位采用线性冷却的方式,加快冷却速度、扩大冷却范围,以防止孤立液相区对顺序凝固过程产生的不利影响,图8为线冷却管路布置图。图9为模具结构及冷却系统的设置示意图。同时,适当调整冷却管道的开启时间,以防止过早地开启冷却管道导致铸件凝固过快,使周围金属液无法及时进行补缩,进而增加铸件出现缺陷的风险。在不断调

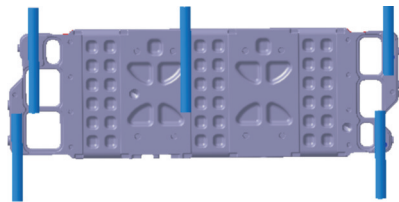


图8 线冷却管路布置图

Fig.8 Layout of line cooling pipeline

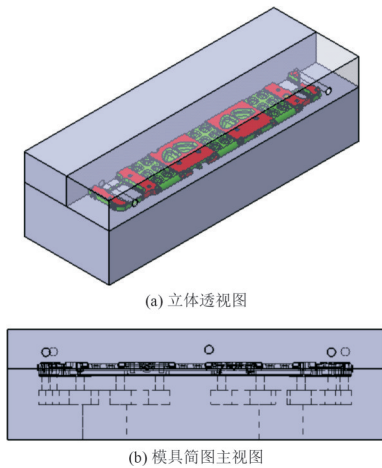


图9 模具结构及冷却系统设置示意图

Fig.9 Schematic diagram of mold structure and cooling system setting

整冷却水管的流速、水温以及开闭时间的过程中,进一步优化了冷却系统的效果。表4为改进后的冷却工艺参数。

表4 优化后的冷却工艺参数

Tab.4 Optimized cooling process parameters

流量/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	开启时刻/s	关闭时刻/s	水温/ $^{\circ}\text{C}$
2.5	2.8	90	15

4.2 温度场分析

图10和图11为不同冷却方式下21 s和40 s时的温度场。从图10a可以看出,在点冷却的温度场中,当 $t=21$ s时,可以观察到端板两端出现热节。采用线冷却后,由于线性冷却可以覆盖更大的表面积,因此可以更有效地排除热量,提高冷却效率,端板两端热节明显减少,见图10b。从图11a可以看出,当 $t=40$ s时,点冷却下端板中部仍然有部分热节存在,从图11b可以看出,使用线冷却后,冷却效果更均匀,冷却面积广,端板中部热节消失。

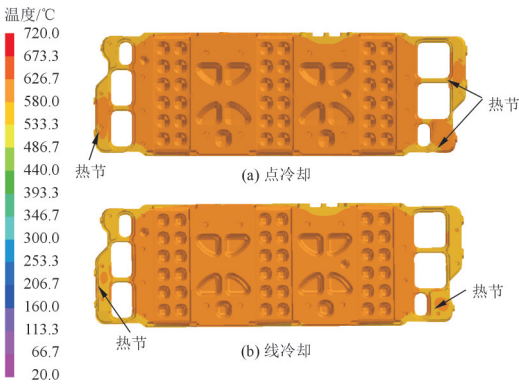


图10 不同冷却方式下 $t=21$ s时的温度场

Fig.10 Temperature field at $t=21$ s under different cooling modes

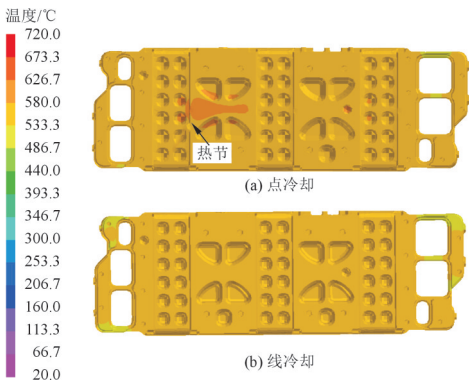


图11 不同冷却方式下 $t=40$ s时的温度场

Fig.11 Temperature field at $t=40$ s under different cooling modes

由于线冷却可以更好地控制铸件的冷却过程,减少铸件内部温度梯度,铸件可以实现顺序凝固,说明利

用线冷却的方式以及合理的工艺参数可以改善热节,减少缩松、缩孔的产生。

4.3 缺陷分布分析

图 12 为线冷却下的铸件缺陷分布图。可以看出,在线冷却方式下,电池端板两端的缺陷基本消除,端板中部缺陷跟点冷却相比也显著减少,所剩缺陷体积都较小。根据试验数据显示,铸件缺陷从最初的 0.065 cm^3 减少至 0.004 cm^3 ,降低了 93.85%,铸件铸造缺陷基本消失。优化前后的二次枝晶臂间距值(SDAS)见图 13。可以看出,铸件的最大二次枝晶臂间距值由初始工艺方案的 $41.18\text{ }\mu\text{m}$ 减少到 $38.66\text{ }\mu\text{m}$,减小了 6.12%。

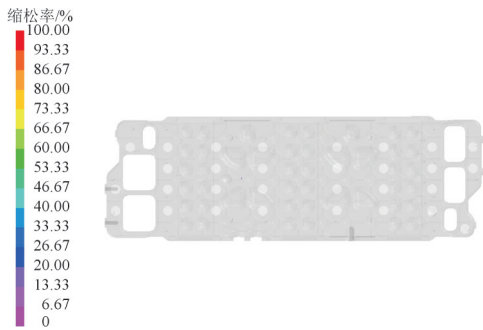


图 12 线冷却下的铸件缺陷分布图

Fig.12 Distribution of casting defects under line cooling

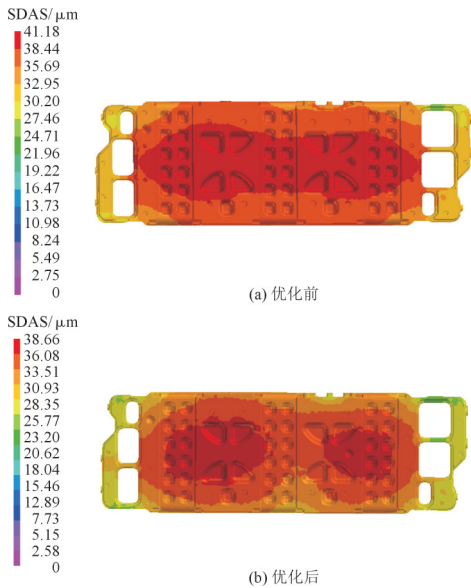


图 13 铸件的 SDAS

Fig.13 SDAS of casting

4.4 试验验证

经冷却优化后铸件缺陷基本消除,根据最优方案对该铸件进行生产试制,经检验分析铸件质量良好。在该产品易产生缺陷位置制取试样,见图 14。对该试样进行研磨、抛光和浸蚀,利用光学金相显微镜对制备好的试样进行观察。在显微镜下观察到的抛光面显微

组织见图 15。可以发现该壳体内部组织均匀分布、不存在裂纹、夹杂等缺陷,进一步证明该方案的可行性。

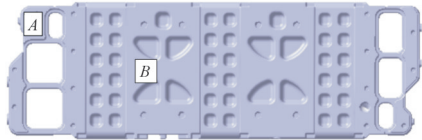


图 14 金相组织取样位置图

Fig.14 Sampling position of metallographic structure

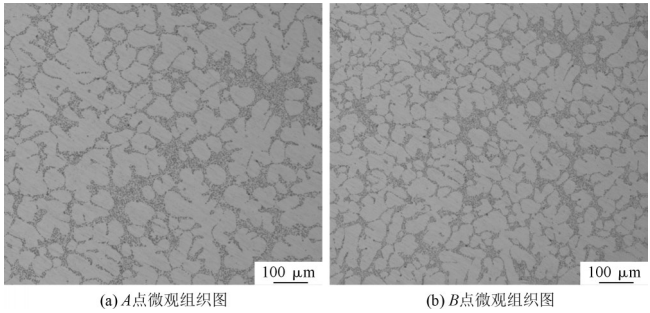


图 15 盲端盖板不同位置微观组织

Fig.15 Microstructure of the blind end cover plate at different positions

5 结 论

(1)利用 ProCAST 软件,分析铝合金端板充型过程中的温度场和凝固过程中的固相率,预测缩松缩孔缺陷出现的位置及大小,并根据所出现的问题分析原因。依据数值模拟结果,设计冷却形式为点冷的初始冷却系统。根据数值模拟分析,点冷工艺下的铸件缺陷为 0.086 cm^3 。

(2)对初始冷却系统进行优化,对比点冷却和线冷却两种方案,并对两种冷却系统的温度场进行分析,线性冷却在提高冷却均匀性、冷却效率以及减少热应力和缺陷方面具有明显优势。

参 考 文 献

[1] 罗爱华, ANIL K S, BOB R P. 汽车轻量化先进铸造技术[J]. 铸造, 2011, 60(2): 113-119.

[2] 单爱丽, 鲍培玮, 邢书明, 等. 基于 ProCAST 的摩托车车架低压铸造方案分析与优化[J]. 铸造, 2023, 72(10): 1 329-1 335.

[3] 李钟尧, 吴雪龙, 苗以升, 等. 低压铸造铝合金轮毂工艺参数对缩孔缺陷的影响[J/OL]. 铸造技术, 2024, 45(2): 163-172.

[4] 张响, 童水光, 朱训明. 基于 Taguch 方法的低压铸造铝合金车轮工艺优化[J]. 铸造技术, 2007, 28(9): 1 235-1 237.

[5] 何宇航, 卢德宏, 周振, 等. 冷却工艺对大型铝合金轮毂低压铸造缺陷的影响[J]. 铸造, 2023, 72(10): 1 336-1 344.

[6] 顾方秋, 苏小平. 铝合金变速器操纵箱体低压铸造工艺设计及其优化[J]. 铸造, 2022, 71(12): 1 542-1 547.

[7] 符继麟, 苏小平, 陈川川, 等. 铝合金制动器安装底板低压铸造冷却工艺优化[J]. 热加工工艺, 2020, 49(21): 60-63.

(编辑:张正贺)