DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.08.002

ZL102 低压铸造电池包箱体组织与力学性能研究

徐文治[1],程永奇[1],陈宇航[1],罗　干[2]
(1.广东工业大学 材料与能源学院,广东 广州 510006;2.华南理工大学 材料与科学与工程学院,广东 广州 510006)

摘　要:对低压铸造 ZL102 新能源汽车电池包箱体的不同位置取样,利用金相显微镜、万能试验机和扫描电镜(SEM)等对该产品的组织与力学性能进行了研究。结果表明,箱体表面存在流痕、凹陷,内部存在缩松、夹杂等缺陷。显微组织由基体 α(Al)、块状初晶硅、粗大片状共晶硅[α(Al)+Si]和细小的化合物组成。箱体不同位置其力学性能存在明显差异,试样平均硬度值为 65.2 HBS,抗拉强度 178 MPa,冲击韧度 21.31 kJ/m^2。探讨了粗大硅相、凹陷,缩松、夹杂等缺陷的处理措施,提出了电池包箱体低压铸造工艺的改进方案,以提高低压铸造生产大型薄壁铝合金铸件的质量。

关键词:电池包箱体;ZL102;低压铸造;显微组织;力学性能

中图分类号:TG249; TG113　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2019)08-0759-05

Microstructure and Mechanical Properties of Low Pressure Casting ZL102 for New Energy Vehicle Battery Package

XU Wenzhi[1], CHENG Yongqi[1], CHEN Yuhang[1], LUO Gan[2]
(1. School of Materials and Energy, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. School of Materials Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: The microstructure and mechanical properties of low pressure casting ZL102 new energy automotive battery package were studied by means of metallographic microscope, universal testing machine and scanning electron microscope (SEM). The results show that there are flow marks and depressions on the surface of the box, and there are shrinkage defects and inclusions inside. The microstructure consists of matrix α (Al), massive primary silicon, thick lamellar eutectic silicon [α(Al)+Si] and small compounds. The average hardness value of the sample is 65.2 HBS, the tensile strength is 178 MPa, and the impact toughness is 21.31 kJ/m^2. The measures to deal with the defects such as coarse silicon phase, depression, shrinkage and inclusion are discussed. In order to improve the quality of large-sized thin-walled aluminum alloy castings produced by low-pressure casting, an improved low-pressure casting technology of battery package body is proposed.

Key words: battery pack case; ZL102; low pressure casting; microstructure; mechanical properties

随着现代社会对能源与环境要求的不断提升,车身轻量化已成为汽车行业的重要研究内容之一。新能源汽车电池包箱体是车身的重要构件,其轻量化对车身减重具有重要意义。电池包箱体是集成电芯与各种元器件的大型包覆件[1]。在凹凸路面、障碍物冲击以及转弯等动态载荷之下,箱体会受不规则交变力的作用;电池工作时高电压、高热量、化学成分泄漏等问题也直接关系到人员、车辆以及物资的安全,这就要求电池箱质量足够可靠,具有较高的安全性与防护等级。而采用低压铸造生产的铝合金电池包箱体具有比重低、强度高,耐蚀性好的特点,适应汽车轻量化与安全性的需求,受到越来越多研究学者和工程技术人员的关注[2]。经查证,关于低压铸造铝合金箱体组织与性能的研究性文献相对较少,因此开展关于低压铸造铝合金箱体相关研究工作具有重要的理论价值和实际应用价值。

如何有效的控制充型过程、优化工艺参数,以获得晶粒尺寸细小、成分均匀,微观结构致密的凝固组织,是利用低压铸造技术制备高质量大型薄壁复杂构件亟待解决的核心问题。为了为低压铸造工艺改进提供参考和技术依据,本文利用金相显微镜、万能试验机和扫描电镜(SEM)等,对某型号 ZL102 低压铸造铝合金电池包箱体不同位置进行显微组织观测与力学性能分析,探讨铸件粗大共晶组织的细化以

收稿日期:2019-03-25
基金项目:广东省应用型科技研发专项项目(2015B090926006);广东省公益研究与能力建设项目(2016A010103032)
作者简介:徐文治(1992-),河南信阳人,硕士生.研究方向:低压铸造工艺研究.电话:15626476962,E-mail:845990067@qq.com
通讯作者:程永奇(1980-),河南南阳人,博士,副教授.研究方向:成形设备、塑性成形技术、材料制备、模具 CAD/CAE/CAM 等研究.电话:13538871588,E-mail:Y.Q.Cheng@163.com

及气孔、夹杂等缺陷的改进措施，以此探讨提高低压铸造铝合金电池包箱体质量的技术途径。

1 实验

1.1 试样制备

实验用 ZL102 铝合金箱体铸件如图 1，铸件重 25.6 kg，外形尺寸约为 1 540 mm×1 265 mm×200 mm，平均壁厚 6 mm。通过 LEEMANLABS Pulsar 进行成分分析，铸件的实际成分如表 1，符合 GB/T 1173—1995 中 ZL102 的成分要求。

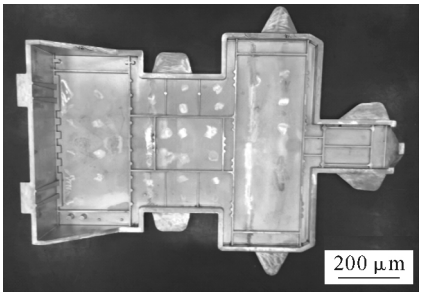


图 1 ZL102 箱体照片
Fig.1 ZL102 alloy battery package

表1 合金的化学成分 w(%)
Tab.1 Chemical composition of ZL102 alloy mass fraction

Si	Fe	Mn	Cu	Mg	Zn	Ca	Ti	V	其他	Al
11.37	0.44	0.33	0.15	0.06	0.04	0.02	0.02	0.01	<0.01	余量

1.2 实验内容及方法

金相组织采用 0.5 mm 粒度金刚石研磨膏在磨抛机进行抛光，并用科勒试剂腐蚀表面 10~15 s，在德国蔡司 Axiovert 40 MAT 金相显微镜上进行观察。然后进行 20 min 深度腐蚀，SEM 电子扫描观察试样表面形貌。

力学性能在 AGS-X 电子万能试验机上进行。依据实验需求取距离浇口 0、300、600 mm 的①②③位置取样（如图 2），并在铸件型壁位置④⑤进行取样，试样尺寸（如图 3）。

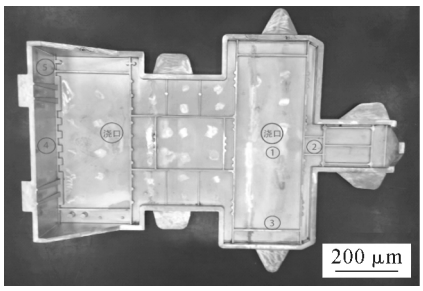


图 2 取样位置示意图
Fig.2 Schematic diagram of sampling position

2 实验结果与讨论

2.1 箱体铸造缺陷观察分析

分别观察取样位置，①②③号与箱体其余位置表面无明显铸造缺陷。④⑤号取样位置表面两块约 150 mm×50 mm 流痕，流痕沿金属流动方向呈现清晰纹路。初步推测流痕是由于脱模剂喷涂不均，在型壁位置受重力影响产生流动聚集，部分金属液流动受阻而造成的。流痕上方靠近型壁转弯位置存在垂直内陷 2 mm 凹痕如图 4(a)所示。凹痕与合金熔液凝固态收缩时没有得到有效的补缩有关。由于箱体是薄壁型铸件，型壁位置冷却速度比转弯处快，合金熔液由于冷却产生体积收缩，此时由于保压压力不够或者模具温度低，低温金属液流动性下降，无法完成补缩形成凹陷[3]。

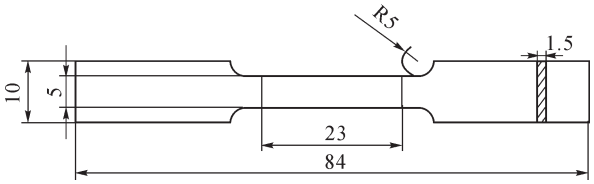
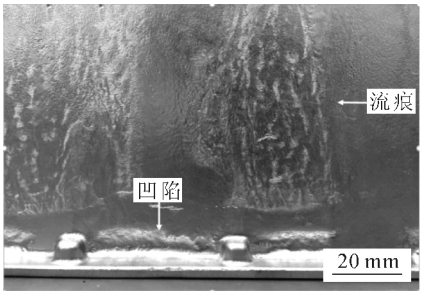


图 3 拉伸试样尺寸
Fig.3 Dimensions of tensile specimen

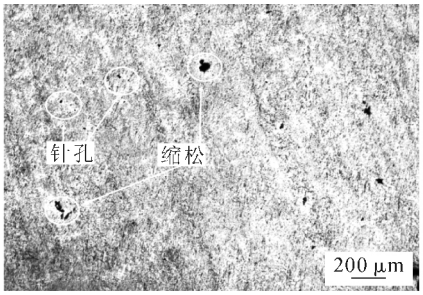
为进一步观察缺陷的形貌及化学成分以确定的类型及产生的原因，利用金相显微镜、扫描电子显微镜及 EDS 能谱分析仪，对五个取样位置进行了检测分析，缺陷分析结果如图 5 所示。底板②型壁④⑤位置组织较为致密，没有观察到明显的孔洞、夹杂等缺陷。①出现零散分布的细小孔洞，内部凹凸不平枝晶发达显示出缩松形貌。分析认为该位置靠近浇口，冷却时温度下降较慢。升液管中金属液回流之后，该位置继续冷却产生固态收缩形成较为细小的缩松。③靠近筋条凸起的地方出现圆形夹杂物与孔洞类缺陷。对圆形夹杂物进行成分分析，其主要成分为 C、O、Al，推测由于合金熔炼过程中扒渣残留、或者精炼不到位遗留的成分杂质在流动过程中卷入金属液形成球状夹杂物。观察孔洞内部，发现丝状物质，经推断是保温炉过滤网的耐热纤维丝由于受到金属液冲刷而混入流体中成为孔洞形核基底。

2.2 组织与力学性能分析

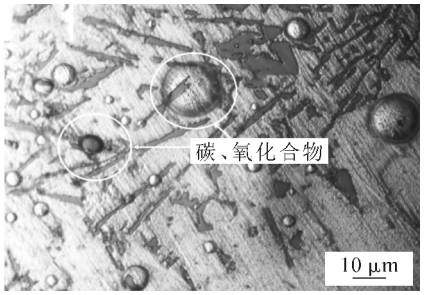
为了对箱体的组织进行分析，从上述位置中取样、制作金相，如图 5(a)(b)所示。试样是未经变质处理的铝合金 ZL102，硅含量 11.4%，是典型的二元共晶合金，其结晶过程为首先在基体为初生 α(Al)相上结晶出少量的初生硅相，然后有 L→α+Si 共晶反应，形成大量的 α(Al)+Si 共晶组织。金相组织存在 α(Al)、共晶体(α+β)及初晶硅。对各相进行能谱分析，可以观察到浅灰白色的基体部分为 α(Al)固溶体，浅灰色独立块状为初晶硅，深灰色板条状、不规则片状为共晶，细小点状的是少量 Mg，Cu 与 Si 的化合物。对试样进行深度腐蚀后，利用 SEM 扫描



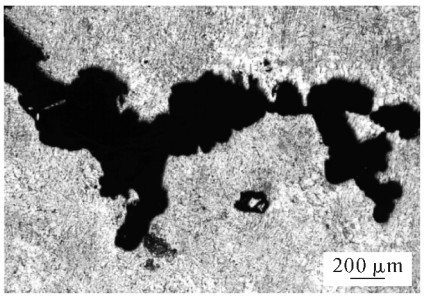
(a)型壁流痕与凹陷



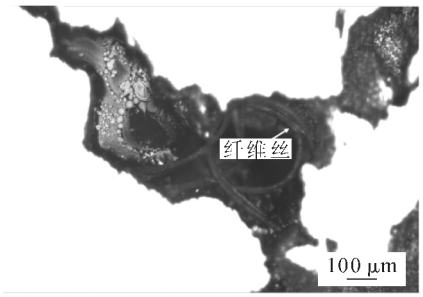
(b)①位置缩松与针孔



(c)③位置碳氧化物夹杂



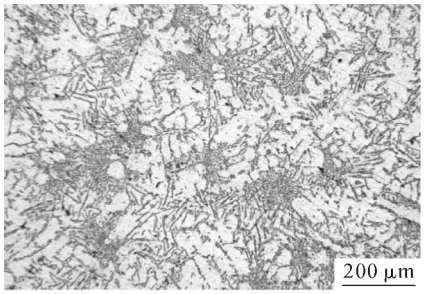
(d)③位置孔洞



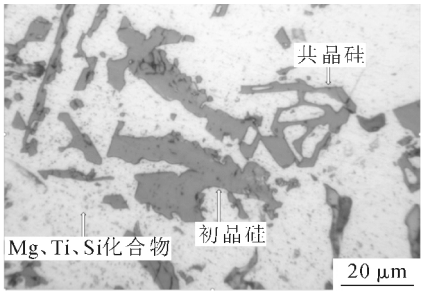
(e)③孔洞内纤维丝夹杂物

图 4　表面与微观缺陷图

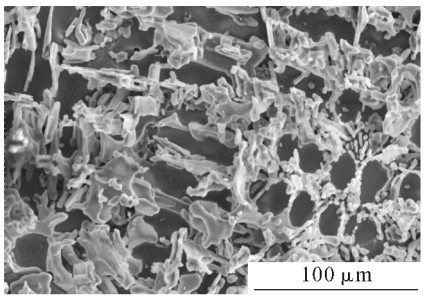
Fig.4　Defects of surface and microscopic



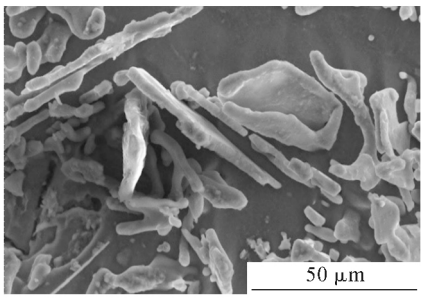
(a)光学显微组织1



(b)光学显微组织2



(c)深度腐蚀扫描电镜图1



(d)深度腐蚀扫描电镜图2

图 5　ZL102 合金铸件组织

Fig.5　Microstructure of as-cast ZL102 alloy

观测。结果如图 5(c)(d)所示条状，片状共晶硅整体呈枝状晶蔓延生长，延伸入基体内部，对组织整体连续性破坏较大。从图 5 看出，无论是初晶硅还是共晶硅，其本身形状不规则且呈现不均匀分布态势，严重割裂基体组织，对合金的力学性能有很大影响。

表 2 是不同位置的力学性能。箱体硬度平均值大于 60 HBS。首先由表 2 中抗拉强度数据可看出：①的抗拉强度平均值 89.6 MPa，同组数据变化较大且明显低于其他位置，冲击韧度平均值最低。结合图 4(b)分析是由于细小的针孔和缩松引起组织不连续而造成的性能降低。②③④⑤位置抗拉强度平均值分别为 174.6，193.6，164.7，179.6 MPa。分析表 4 中数据看出，①②③与浇口距离不同，其力学性能差异较大。①处于浇口位置，针孔、缩松等缺陷较多，性能受其影响最差；②是平板位置，位于①③之间，缺陷较少，性能较好；③处属于箱体平板与加强筋结合的部位，抗拉强度最高。虽然③加强筋位置出现明显的夹杂物和孔洞类缺陷，但平板位置的各项力学性能最好。④⑤为铸件型壁位置，④流痕与凹陷缺陷

表 2 不同位置力学性能表
Tab.2 Mechanical properties of different locations

	抗拉强度 /MPa	断裂伸长率 (%)	冲击韧度平均值 /(kJ/m²)	硬度平均值 (HBS)
①	118	3.12	18.22	65
	59.12	1.29		
	91.8	2.78		
②	179	5.31	18.95	62
	174	5.30		
	171	4.45		
③	188	5.51	20.07	70
	193	5.35		
	200	5.32		
④	165	3.16	24.23	63
	162	3.47		
	167	3.59		
⑤	186	6.55	23.08	66
	179	5.58		
	174	4.53		

明显，⑤缺陷较少。对比力学性能，这两处位置虽然未得到完全的补缩出现明显的流痕与凹陷，但力学性能未出现预期的性能最差的情况，说明其内部组织较为致密。不过也应该认识到该位置的宏观缺陷影响铸件整体的结构稳定性。查阅文献可知，Zl102 铝合金金属型重力铸件的平均抗拉强度为 155 MPa。表中低压铸件各项数据除①因缺陷明显低于其他水平外，其余数值均超过重力铸件，说明了低压铸件由于在压力下充型、补缩，其力学性能相对优于重力铸件[4]。

对拉伸断口进行扫描，在断口扫描图像中可以看到少量韧窝、大量平坦解理面与参差不齐的撕裂岭，初步判断断裂方式为准解理断裂。准解理断裂是一种穿晶断裂，沿着原子键合力最薄弱的晶面（解理面）进行[5]。ZL102 铸件中存在大量的片状共晶硅相分割基体，其他元素如 Fe、Mn 等会形成金属化合物，产生晶间偏析。所以在原子力键合较弱的晶面，易产生裂纹，多条裂纹沿晶面扩展，并穿过其他晶体，留下如图 6 的阶梯状解理面与大量撕裂岭。由此可判断 ZL102 拉伸断裂方式为准解理断裂，材料脆性程度较高。

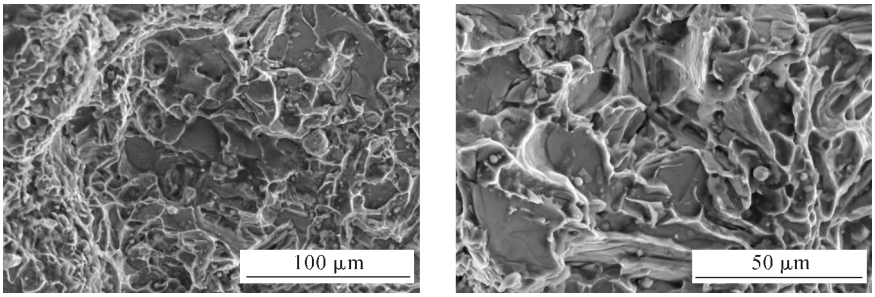


图 6 断口扫描图像
Fig.6 SEM Images of fracture

2.3 工艺改进措施

新能源汽车电池包箱体属于结构件，主要承担电芯及控制元件的集成工作，需要具有一定的强度、韧性，气密性与抗腐蚀能力。铸件外观质量要求无明显的熔接痕、龟裂纹，内部组织要求细小致密。通过上述对箱体的分析，ZL102 铝合金箱体存在气孔、缩松、夹杂、凹陷和流痕等缺陷；组织中存在粗大共晶体；力学性能上存在性能不均匀且波动较大的问题。为改善箱体的组织，提升力学性能，根据分析结果，可从以下几点对低压铸造工艺进行改进。

（1）选用高质量的 ZL102 铝锭原材料冶炼铝合金熔液，熔炼前清洁坩埚和炉体，减少扒渣时对熔液的搅动，避免氧化物卷入合金溶液内部。在熔炼的过程中加强对 碳、氧、铁等元素的控制，尽可能降低金属液中碳、氧、铁等元素的含量[6]。升液口位置采用陶瓷过滤网，一方面减少铝合金金属液中夹杂物的带入，达到净化金属液的目的；另一方面可以避免纤维丝脱落进入铝液形成夹杂，提升铝液熔炼和浇筑过程中的质量。

（2）对铝液进行精炼和变质处理。一方面合理的精炼工艺是提高铝液质量的必要条件，通过旋转喷吹技术和盐类精炼技术除去铝液中的杂质与气体，提升铝液的纯净度。另一方面，为改善硅相的聚集状态，降低对基体的割裂作用，使用 NaF，Sr 等变质剂，使粗大块状、珊瑚状、片状的硅相缩短变小甚至球化，得到均匀细化的组织[7]。同时严格控制精炼变质过程中的时间与温度，避免变质剂和精炼剂生成新的杂质[8-10]。

（3）优化铸造工艺设计，合理设置压力与温度等参数。如适当提高浇注温度与模温，确保其充型完整；适当加大保压压力，确保补缩到位，不出现表面凹陷；设置冷却温度梯度，对距离浇口不同位置进行分级冷却，保证铸件在凝固过程中获得有效补缩，以

（下转 771 页）

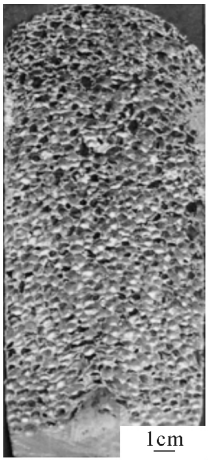


图 3　最优工艺参数下制得泡沫铝样品

Fig.3　The sample of foam Al by The optimal process parameters

理，2002，4:49-51.

[4]　Kennedy A R. The effect of TiH_2 heat treatment on gas release and foaming in Al-TiH_2 preforms [J]. Scripta Materialia, 2002, 47: 763-767.

[5]　Degischer H P. Innovative light metals: metal matrix composites and foamed aluminum [J]. Materials & Design, 1997, 18 (4/6): 221-226.

[6]　左孝青，Kennedy A R，王永胜，等. 小孔径泡沫铝的制备及压缩性能研究[J]. 稀有金属材料与工程，2009，38(z3): 254-259.

[7]　李兵，姚广春. 熔体发泡法制备泡沫铝过程中无泡层的形成与控制[J]. 中国有色金属学报，2008，18(7): 1268-1273.

[8]　刘培生，马晓明. 多孔材料检测方法[M]. 北京：冶金工业出版社. 2006：13-19.

[9]　左孝青，张金娅，王茗，等. 泡沫铝发泡过程热力学[J]. 昆明理工大学学报，2003，28(5)：45-51.

[10]　罗洪杰，姚广春，张晓明，等. 闭孔泡沫铝材料制备过程中气泡的形成与演化[J]. 中国有色金属学报，2004，14(8):1377-1381.

[11]　牛强，储少军，吴铿，等. 冶金熔体泡沫演化中的转型[J]. 北京科技大学学报，2000，2(22):109-112.

（上接 762 页）

减少内部针孔缩松等铸造缺陷的产生，确保各部位组织与力学性能基本一致。

3　结论

（1）综合箱体的观测分析结果，低压铸造铝合金电池包箱体存在的缺陷主要包括补缩不足造成缩松与凹痕，碳氧化物形成球状夹杂，纤维丝造成较大孔洞缺陷；组织中存在基体 α(Al)、不规则分布的粗大片状共晶体 <α+Si> 及块状初晶硅；平均硬度值为 65.2 HBS，抗拉强度 178 MPa，冲击韧度 21.31 kJ/m^2，不同位置力学性能差异较大。

（2）针对该产品的分析结果提出低压铸造工艺优化方案，有效处理缩松，流痕，氧化夹杂等带来的铸造缺陷，同时注意采取合理选用喷涂材料、科学把控冷却顺序、保证铸件正常脱模等策略。预防低压铸造铝合金电池包箱体缺陷的出现，提高产品质量，促进铝合金低压铸造产业实现可持续发展。

参考文献：

[1]　刘舒龙，夏顺礼，赵久志，等. 一种电动汽车电池组箱体轻量化设计[J]. 汽车实用技术，2016(11):10-12.

[2]　胡青君. 铸造铝合金箱体的失效分析[J]. 理化检验(物理分册)，2000(7):321-323.

[3]　韩茵，陈诗键. 铸造铝合金组织对力学性能的影响[J]. 理化检验(物理分册)，2003(11):555-559.

[4]　廖可，舒惠明，万慧，等. 低压铸造在大型复杂薄壁结构铝合金铸件的工艺研究[J]. 科技创新与应用，2017(30):78-79，81.

[5]　卫广智，朱建培. ZL102 铝合金中 Fe 元素的危害及其削弱措施[J]. 现代机械，1998(2):54-55，51.

[6]　石德全，李大勇，高桂丽，等. 变质工艺对 ZL102 铝硅合金表面张力的影响[J]. 特种铸造及有色合金，2006，26(9):550-552，532.

[7]　蔡郭生，吴龙，李新松，等. Sr 变质对 ZL102 组织和性能的影响[J]. 铸造技术，2013，34(12):1656-1658.

[8]　李英，徐磊，李双明，等. ZL102 铝硅合金的三维显微组织形态研究[J]. 铸造，2015，64(8):814-817.

[9]　Numerical simulation and optimization of Al alloy cylinder body by low pressure die casting[J]. China Foundry, 2008(2):99-103.

[10]　Pressurization control system for low pressure crucible casting[J]. China Foundry, 2011, 8(4):376-379.

欢迎到当地邮政局(所)订阅 2019 年《铸造技术》杂志

国内邮发代号：52-64　　国外发行号：M855　　国内定价：18 元/本　　海外定价：18 美元/本