DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.02.006

脉冲波形对金属熔体内部电磁场分布的影响

赵　静[1],刘国超[1],秦红星[1],徐智帅[2]
(1.唐山学院 机电工程系,河北 唐山 063000; 2.上海大学 先进凝固技术中心,上海 200436)

摘　要:建立了金属熔体内部电磁场分布的3-D模型,运用Maxwell软件模拟了正弦波、方形波和三角波脉冲电流作用下熔体内部磁感应强度的分布情况。结果表明,脉冲波形对金属熔体内部电磁场的分布及金属凝固组织的细化效果有很重要的影响。相同脉冲电流峰值和脉宽时,方形波的脉冲电流在金属熔体内部产生的感应电磁场强度大于三角波和正弦波。

关键词:脉冲波形;金属熔体;电磁场;模拟

中图分类号:TG243　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2020)02-0121-05

Effect of Pulse Waveform on the Distribution of Electromagnetic Field in Melt

ZHAO Jing[1], LIU Guochao[1], QIN Hongxing[1], XU Zhishuai[2]
(1. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Tangshan University, Tangshan 063000, China; 2. Center of Advanced Solidification Technology, Shanghai University, Shanghai 200436, China)

Abstract: A 3-D model of the electromagnetic field distribution in the metal melt was established, and Maxwell software was used to simulate the distribution of magnetic induction intensity in the melt under the action of sinusoidal, square and triangular pulse currents. The results show that the pulse waveform has a very important effect on the distribution of the electromagnetic field inside the metal melt and the thinning effect of the solidification structure. When the pulse current peak and pulse width are the same, the induced electromagnetic field generated by the pulse current of square wave in the metal melt is stronger than that of triangle wave and sine wave.

Key words: pulse waveform; melt; electromagnetic field; numerical simulation

近年来,脉冲电磁场凝固细晶技术在工业生产中已得到了一定的应用[1,2]。脉冲磁致振荡技术(简称PMO)是脉冲电磁场凝固细晶技术中的一种,是将具有合理的安全电压和频率的脉冲电流通过感应线圈,使其产生的感应电磁场作用于金属熔体表面或固液界面附近,通过提高熔体内部的形核率,从而达到了细化金属凝固组织的目的[3-5]。脉冲电磁场是一种瞬态高强度输出电磁场,当其以不同形式施加到金属熔体上时将呈现不同的分布特性[6]。采用实验测定金属熔体内部的电磁场分布十分困难,成本又高。越来越多的人将数值模拟的方法应用到金属熔体内部的电磁场、流场以及温度场研究中,以达到预测实验和优化工艺的目的[7,8]。刘芳[9]等运用ANSYS软件对脉冲磁致振荡作用下纯铝熔体内部的电磁场和流场进行了数值模拟。程誉峰运用ANSYS软件模拟了液面脉冲磁致振荡作用下Al熔体内部的电磁场、流场和温度场的分布[10]。赵静等运用ANSYS软件对不同结构的PMO线圈作用下金属熔体内部的电磁场分布进行了数值模拟[11,12]。郝军利研究了PMO作用下圆坯连铸过程中电磁场、流场和温度场的分布情况[13]。前期的研究工作中脉冲电流的形式大多数采用正弦波形,并且大多数情况将三维几何模型简化为二维模型进行了计算。为了能够进一步提高计算的准确性,本文建立了PMO作用下金属熔体的三维模型,并针对不同波形的脉冲电流作用下纯铝熔体内部电磁场分布进行了计算。

1　数学模型的建立

此次模拟中所用到的模型其结构及几何尺寸如图1(a)。共包括金属熔体,线圈、坩埚及空气四个部分。为了简化计算过程,做出了如下假设:①假设工业纯铝为不可压缩导电流体,电导率为各向同性;②铸型周围为开放性磁场,用有限空间空气域并结合无限远边界条件来模拟无限大空间;③忽略金属熔体在电磁力作用下发生的形变。电磁场的模拟以麦

收稿日期:2019-10-21
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51704210);河北省自然科学基金资助项目(E2017105016)
作者简介:赵　静(1979-),女,河北吴桥人,博士,副教授.研究方向:金属凝固过程控制.电话:13733256956,E-mail:zhj7906@163.com

克斯韦方程组为基础，如式(1)~(4)。

$$\nabla \times E(r,t)=-\frac{\partial B(r,t)}{\partial t} \tag{1}$$

$$\nabla \times B(r,t)=\mu J+\mu\varepsilon\frac{\partial E(r,t)}{\partial t} \tag{2}$$

$$\nabla \cdot E(r,t)=\frac{\rho}{\varepsilon} \tag{3}$$

$$\nabla \cdot B(r,t)=0 \tag{4}$$

其中，E 为电场强度，B 为磁感应强度，J 为感应电流密度，ρ 为电荷密度，$\mu=\mu_r\cdot\mu_0$，μ_r 为相对磁导率，μ_0 为真空磁导率，$\varepsilon=\varepsilon_r\cdot\varepsilon_0$，$\varepsilon_r$ 为相对电容率，ε_0 为真空电容率。

采用 Maxwell 软件中的四面体单元进行计算，网格划分情况如图 1(b)所示。计算中所用到的电磁物性参数如表 1 所示。

表 1 电磁场计算所用物性参数

Tab.1 Physical parameters for electromagnetic field simulation

	电阻率/(Ω·m)	相对磁导率
铝(660 ℃)	2.42×10^{-7}	1
铜(25 ℃)	1.7×10^{-8}	1
空气(25 ℃)	-	1

由于脉冲电流具有周期性，因此研究熔体内部电磁场分布的情况，只需关注一个周期内的电磁场变化。图 2 为此次模拟中用到的正弦波、三角波和方波电流随时间的变化曲线，电流峰值和脉宽均相同。

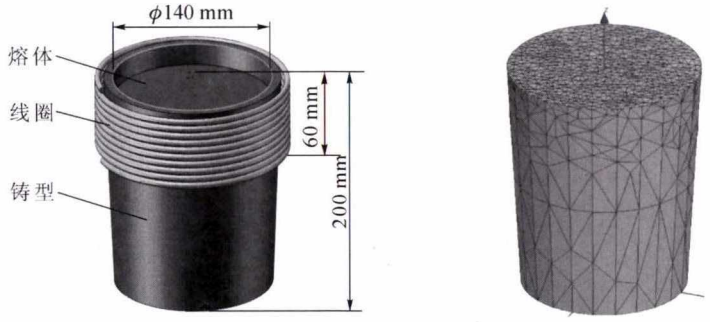
2 金属熔体内部电磁场分布的三维数值模拟

2.1 正弦波脉冲电流作用下金属熔体内部磁感应强度的分布

图 3 为正弦波脉冲电流作用于铝液时熔体内部磁感应强度在 T/4、T/2、3T/4 和 T（T 为脉冲电流的脉宽)时刻的分布情况。从磁感应强度的分布来看，感应磁场主要分布在金属熔体的上半部分。磁感应强度的大小和方向随着时间的变化不断变化，在 T/4 和 3T/4 时刻磁感应强度的数值大于 T/2 和 T 时刻的数值。在金属熔体内部的不同位置磁感应强度的大小和方向也呈现很大的不同，靠近铸型型壁处的磁感应强度的数值明显大于熔体心部的数值。这与理论解析及文献中报道的电磁波的传播特性是一致的。

2.2 三角波脉冲电流作用下金属熔体内部磁感应强度的分布

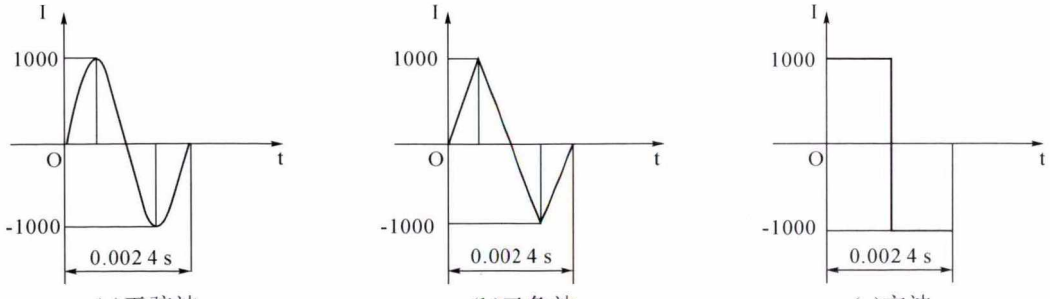
图 4 为三角波脉冲电流作用下金属熔体内部的磁感应强度分布情况。无论磁感应强度的方向和大小，三角波脉冲电流作用效果与正弦波基本相同。在输入电流达到峰值的时刻，熔体内部磁感应强度也达到极大值。磁感应强度的方向随时间不断变化，靠近线圈的位置在 T/4 和 3T/4 时刻平行于中心轴线方向，而在 T/2 和 T 时刻基本垂直于中心轴线方向。



(a)几何尺寸　　(b)有限元模型

图 1 几何模型

Fig.1 Geometrical model



(a)正弦波　　(b)三角波　　(c)方波

图 2 脉冲波形

Fig.2 Pulse waveform

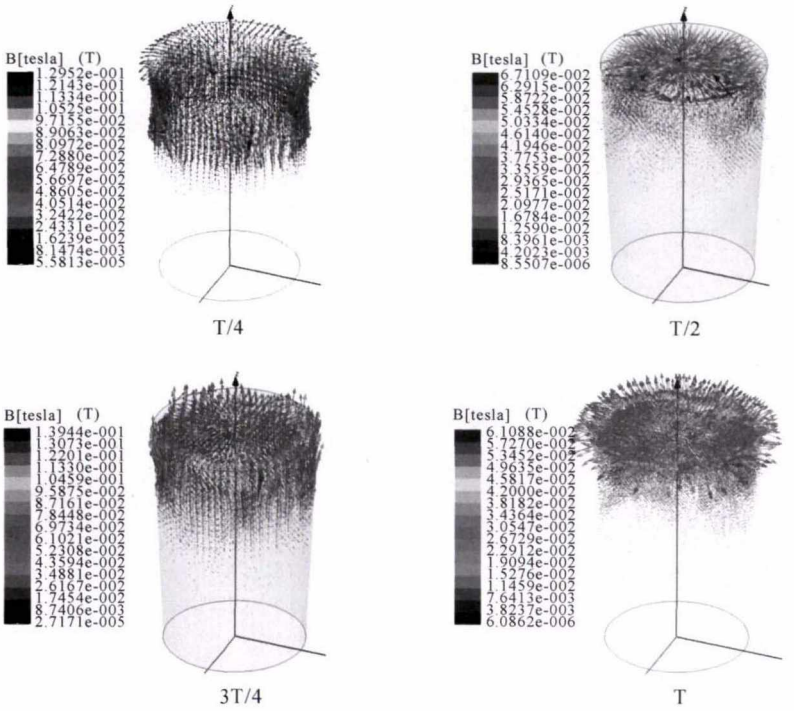


图 3 正弦波形式的脉冲电流作用下金属熔体内部的磁感应强度分布

Fig.3 Distributions of magnetic intensity in metal melt with sinusoidal pulse current

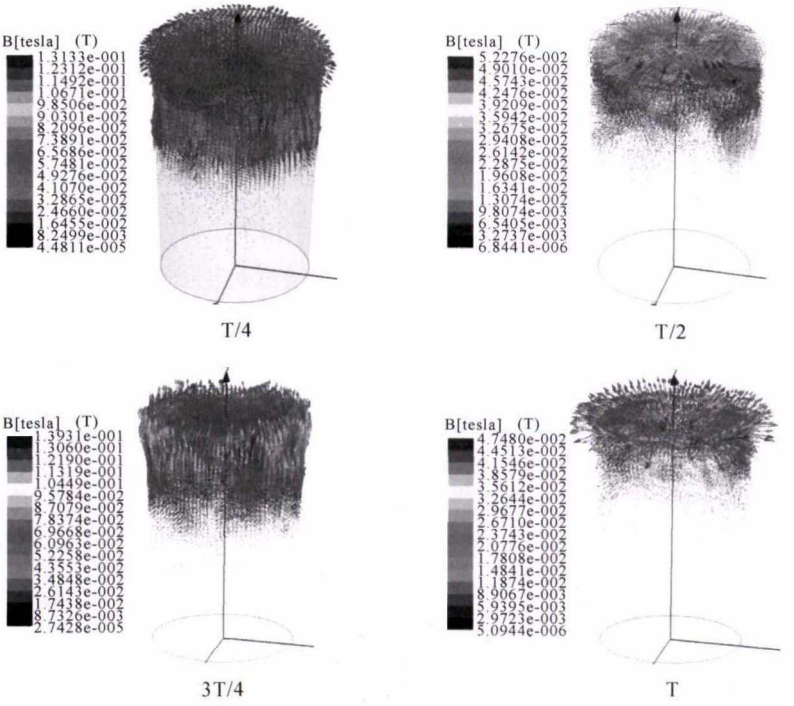


图 4 三角波形式的脉冲电流作用下金属熔体内部的磁感应强度分布

Fig.4 Distributions of magnetic intensity in metal melt with triangular pulse current

2.3 方波脉冲电流作用下金属熔体内部磁感应强度的分布

图 5 为方波脉冲电流作用下金属熔体内部磁感应强度的分布情况。与正弦波和三角波有所不同的是，方波脉冲电流作用下金属熔体内部磁感应强度的大小随时间的变化不是很明显。在 T/2、3T/4 和 T 时刻金属熔体内部磁感应强度的大小相差不大，但方向上有所变化。

3 脉冲波形对金属熔体内部电磁场分布的影响

取熔体内部线圈 1/2 高度半径方向上的 A、B、C 3 个点(如图 6)，比较 3 种波形脉冲电流作用下 3 个位置的磁感应强度随时间的变化曲线(如图 7)。从图 7 可以看出，3 种波形的脉冲电流在金属熔体内部产生的感应电磁场均存在一定的时空特性，靠近

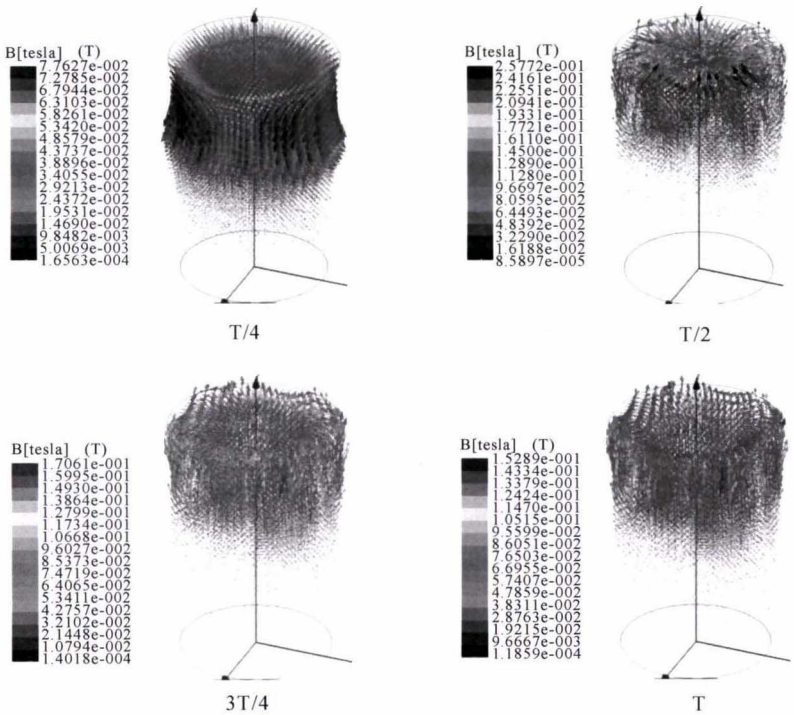


图 5 方波脉冲电流作用下金属熔体内部的磁感应强度分布

Fig.5 Distributions of magnetic intensity in metal melt with square pulse current

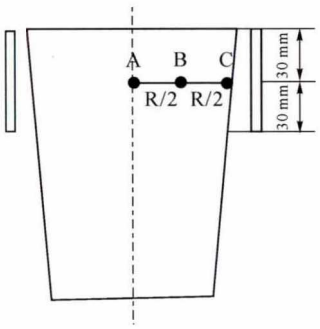


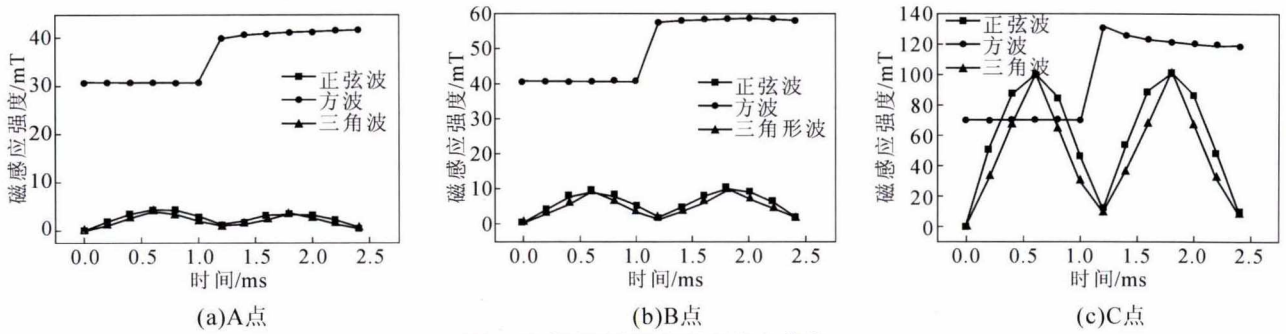
图 6 取点位置

Fig.6 Schematic of test point position

铸型型壁处磁感应强度相差不大，但熔体内部相差较大，在 $r=R/2$ 处相差最大，方形波脉冲电流产生的磁感应强度的最大值大约为另外两种波形的5~6倍。

4 讨论

通过对正弦波、三角波和方波 3 种波形脉冲电流作用下熔体内部磁感应强度分布的比较发现，正弦波和三角波形式的脉冲电流在金属熔体内部产生的磁感应强度的大小和方向基本相同，方波形式的脉冲电流有所区别。学者们认为，脉冲电磁场细化金属凝固组织的原因主要有两个[14-17]：①促进形核及晶核的运动；②打碎枝晶。从模拟结果来看，无论是正弦波、三角波还是方波，靠近型壁处的磁感应强度均大于熔体中心部分，有利于型壁处晶核的脱落及熔体的流动。在熔体内部，方波形式的脉冲电流产生的电磁场比正弦波和三角波要强，越靠近熔体中心处越明显，相对正弦波和三角波而言，衰减的要慢，这对金属熔体的运动及电磁场产生的热量都会产生一定的影响，应更有利于金属凝固组织的细化。



(a)A点 (b)B点 (c)C点

图 7 磁感应强度随时间的变化曲线

Fig.7 Magnetic intensity vs time at different position

参考文献：

[1] 赵广伟，樊建锋，张华，等. 电脉冲处理和等径角挤压对 AZ31

(下转第 128 页)

表 4 SLM 成形 1Cr18Ni9Ti 合金试棒力学性能
Tab.4 The tensile properties of 1Cr18Ni9Ti alloy samples by SLM

试样类型	抗拉强度 R_m/MPa	规定塑性延伸强度 $R_{p0.2}$/MPa	伸长率 A(%)
横向	728	574	43.5
	719	547	44.5
	726	564	41.0
纵向	709	571	42.0
	718	563	42.5
	714	578	41.5
QJ501A-98	≥540	≥196	≥40

光功率和扫描速度。在不同扫描速度下，致密度随着激光功率的增大而提高。扫描间距直接影响激光扫描线之间的搭接率；扫描间距较小时，激光熔覆道的搭接率高，成形件致密度较高；扫描间距过小时，成形表面形貌会呈现过熔状态。

(2)在激光功率 325~340 W、扫描速度 1 000~1 200 mm/s、扫描间距 0.12 mm 的工艺参数下，SLM 技术可成形出致密高于 99.9%的 1Cr18Ni9Ti 不锈钢零件。

(3)采用优化后的 SLM 工艺参数成形 1Cr18Ni9Ti 不锈钢试棒的力学性能优于 QJ501A-98 标准，抗拉强度 R_m≥709 MPa，规定塑性延伸强度 $R_{p0.2}$≥547 MPa，断后伸长率 A≥41%。

参考文献：

[1] 袁学兵，魏青松. 选择性激光熔化 AlSi10Mg 合金粉末研究[J].热加工工艺，2014，43(4)：91-94.

[2] 丁利，李怀学，王玉岱，等. 热处理对激光选区熔化成形 316 不锈钢组织与拉伸性能的影响[J]. 中国激光，2015(4)：1-7.

[3] 李晓琳，淡婷，邓丽芬，等. 1Cr18Ni9Ti 不锈钢球头表面腐蚀原因分析[J]. 失效分析与预防，2014，10(5):271-274.

[4] Guan K, Wang Z, Gao M, et al. Effects of processing parameters on tensile properties of selective laser melted 304 stainless steel [J]. Mater. Des., 2013, 50: 581-590.

[5] 靖冠乙，魏恺文，王泽敏，等. 激光选区熔化成形 S-04 钢的组织及性能[J]. 激光与光电子学进展，2016(11): 213-220.

[6] Averyanova M, Bertrand P, Verquin B. Studying the influence of initial powder characteristics on the properties of final parts manufactured by the selective laser melting technology [J]. Virtual and Physical Prototyping, 2011, 6(4): 1-9.

[7] 陈洪宇，顾冬冬，顾荣海，等. 5CrNi4Mo 模具钢选区激光熔化增材制造组织演变及力学性能研究[J]. 中国激光，2016(2): 60-67.

(上接第 124 页)

镁合金组织和性能的影响[J]. 铸造技术，2019, 40(4)：350-355.

[2] 梅国宏，张庆军，朱立光，等. 脉冲磁场细化钢材凝固组织的研究进展[J]. 铸造技术，2018，39(7)：2628-2631.

[3] 翟启杰，龚永勇，高玉来，等. 磁致振荡细化金属凝固组织的方法及其装置：中国，ZL200510030736.4[P].2005-10-27.

[4] Gong Y Y, Luo J, Jing J X, et al. Structure refinement of pure aluminum by pulse magneto-oscillation[J]. Materials Science and Engineering: A, 2008,497(1-2):147-152.

[5] Pei N, Gong Y Y, Li R X. Mechanism of pulse magneto-oscillation grain refinement on pure Al[J]. China Foundry, 2011,8(1): 47-50.

[6] 陈国军，张永杰，杨院生，等. 任意波形脉冲磁场下电磁力计算模型研究[J]. 金属功能材料，2014, 21(3)：19-24.

[7] 李桂东，麻永林，邢淑清，等. 连铸结晶器方波电流电磁搅拌电磁场-流场数值模拟[J]. 铸造技术，2019，40(4)：276-282.

[8] 王亚非，贾华，袁日栋. 电磁搅拌器磁场形态研究及选择[J]. 铸造技术，2018，39(7)：1549-1553.

[9] 刘芳，张璐云. 脉冲磁致振荡下纯铝凝固磁场与流场分布的数值模拟[J]. 铸造，2012，61(3)：285-290.

[10] 程誉峰. 脉冲磁致液面振荡作用下电磁场、流场及温度场的有限元分析[D]. 上海：上海大学，2013.

[11] Zhao J, Cheng Y F, Han K, et al. Numerical and Experimental studies of surface-pulsed magneto-oscillation on solidification [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 229：286-293.

[12] Zhao J, Yu J H, Han K, et al. Improving the Solidified Structure by Optimization of Coil Configuration in Pulsed Magneto-Oscillation [J]. Acta Metallurgical Sinica, 2018, 31(12): 1334-1344.

[13] 郝军利，赵静，仲红刚，等. PMO 作用下连铸二冷区电磁场—流场—温度场的数值模拟研究 [J]. 上海大学学报，2018, 24(3)：412-421.

[14] Yuhshiohara M N, Nakada M, Flemings M. Modification of Solidification Structures by Pulse Electric Discharging [J]. ISIJ International, 1990, 30(1):27-33.

[15] 班春燕，崔建忠，巴启先，等. 脉冲电流对Al 及 Al-5.3%Zn 合金宏观组织的影响[J]. 铸造技术，2004, 25(4)：238-239.

[16] Liao X L, Zhai Q J, Luo J et al. Refining mechanism of the electric current pulse on the solidification structure of pure aluminum [J]. Acta Materialia, 2007,55(9): 3103-3109.

[17] Li B, Yin Z X, Gong Y, et al. Effect of temperature field on solidification structure of pure Al under pulse magneto-oscillation [J]. China Foundry, 2011,8(2): 172-176.

欢迎到当地邮政局(所)订阅 2020 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:25 元/本　海外定价:25 美元/本