● 试验研究 Experimental Research ●
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2021.01.001

Fe 和 Cu 对 6061 再生铝合金凝固行为和热裂倾向的影响

何健松[1],史明波[2],杜 军[2]
(1. 清远市正通金属制品有限公司,广东 清远 511515;2. 华南理工大学 材料科学与工程学院,广东 广州 510640)

摘 要:利用双电偶热分析和约束杆模具热裂评价法,研究了 Fe 和 Cu 杂质元素对 6061 再生铝合金凝固特性和热裂倾向(HTS)的影响。结果表明,随着 Fe 和 Cu 元素含量的增加,再生铝合金的热裂倾向逐渐增大。Fe 元素主要影响再生铝合金初期凝固行为,提高 $Al_{13}Fe_4$ 富铁相的形核温度和含量,促使凝固过程中枝晶搭接完成,阻碍液相流动补缩。Cu 元素主要影响再生铝合金末期凝固行为,低熔点 $Al_5Cu_2Mg_8Si_6$ 相显著降低脆性温度区间的下限,并降低固相线附近糊状区强度,导致热裂性能恶化。

关键词:6061 再生铝合金;热裂;热分析;合金化;凝固过程
中图分类号:TG146.2 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2021)01-0001-05

Effect of Fe and Cu on Solidification Behavior and Hot Tearing Sensitivity of Recycled 6061 Aluminum Alloy

HE Jiansong[1], SHI Mingbo[2], DU Jun[2]
(1. Qingyuan Zhengtong Metal Products Limited Company, Qingyuan 511515, China; 2. School of Materials Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The influence of Fe and Cu impurity elements on the solidification characteristics and hot tearing sensitivity (HTS) of 6061 regenerated aluminum alloy was studied by using the double thermocouples thermal analysis and the constrained rod casting mold. The results show that with the increase of Fe and Cu content, the hot tearing sensitivity of recycled aluminum alloy increases gradually. Fe mainly affects the initial solidification behavior of the recycled 6061 aluminum alloy, improves the nucleation temperature and content of the Fe-rich phase of $Al_{13}Fe_4$, promotes the completion of dendrite lap during solidification, and hinders the liquid phase flow feeding. Cu mainly affects the final solidification behavior of the recycled 6061 aluminum alloy. The low melting point $Al_5Cu_2Mg_8Si_6$ phase significantly reduces the lower limit of the brittle temperature range and the strength of the paste zone near the solid phase line, leading to the deterioration of the thermal cracking performance.

Key words: recycled 6061 aluminum alloy; hot tearing; thermal analysis; alloying; solidification process

6061铝合金具有较高的比强度、极佳的加工性能、优良的焊接性能等优点,被广泛用于包装、交通运输、电子家电和建筑装饰等应用领域[1]。一方面随着经济发展对铝产品的需求的不断增加,另一方面废旧铝的大量富集,铝合金的回收与高品质化再利用显现出较高的经济价值和重要的社会价值。然而6061再生铝合金重熔后成分复杂,尤其是Fe和Cu含量高,导致铸造性能差,易产生热裂缺陷,严重降低成品率。

热裂是铸造生产中的常见的铸造缺陷,一般发生在固相线附近的最后凝固阶段[2,3]。已有大量研究针对铸造热裂的形成机理进行了探讨,提出的主要观点和理论包括强度理论、液膜理论、晶间搭桥理论和凝固收缩补偿理论等。合金的化学组成密切影响着合金的结晶温度区间、共晶组织分数及凝固行为等,是引起热裂的关键因素之一。合金凝固过程中,结晶温度区间决定了合金的凝固特性,合金结晶区间宽,引起线收缩和应力越大,热裂倾向性也越大,反之,结晶区间越窄,热裂倾向性越小。因此针对Fe和Cu对6061再生铝合金的凝固行为和热裂性能开展实验研究和分析工作,对于控制合金中杂质的含

收稿日期:2020-10-08
基金项目:企业委托项目(20172583)——基于 6061 再生铝制备高品质耐磨铝合金的关键技术开发.
作者简介:何建松(1969-),广东佛山人,工程师.主要从事再生铝合金产品开发与利用方面的工作.
电话:0763-3608606,E-mail:ZT13926671787@126.com
通讯作者:杜 军(1975-),贵州遵义人,教授,博士.研究方向:轻合金组织控制.电话:020-87113597,
E-mail:jundu@scut.edu.cn

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

量，从而降低其热裂倾向性具有积极意义。

本文通过调整6061再生合金中Fe和Cu元素的含量，研究杂质元素对6061再生铝合金凝固行为和热裂倾向的影响趋势，为铝合金再生制造的成品率和性能提升提供一定的理论和实验依据，为再生铝利用的附加值品质提升提供参考。

1 实验方法

1.1 材料制备

实验原材料6061再生铝合金成分w(%)为：0.90 Mg、0.69 Si、0.92 Fe、0.11 Mn、0.50 Cu、0.16 Zn、0.10 Cr、0.02 Ti。利用Al-50Cu中间合金和Al-20Fe中间合金调整Cu和Fe含量。基于对该公司长期生产的再生铝成分进行统计分析，实验中分别单一调节再生合金中的Fe和Cu元素含量，Fe含量依次设计为0.90%、1.0%、1.2%、1.4%和1.7%；Cu含量依次设计为0.5%、1.0%、1.5%、2.0%和2.5%。将6061再生铝合金在坩埚电阻炉熔化，当合金完全熔化后，压入相应的中间合金，搅拌均匀，精炼除气保温至720 ℃，并静置30 min。随后进行冷却热分析和热裂倾向测试。

1.2 约束杆热裂测试

用约束杆法评价6061再生铝合金的热裂倾向。约束杆测试系统由两片45号钢模具合并而成，如图1，具体包括一根的ϕ20 mm的竖直浇道和4根不同长度(51、89、127、165 mm)的ϕ10 mm的水平圆柱。每次实验约束杆模具需预热至300 ℃，然后进行再生铝合金熔液浇铸。热裂敏倾向系数HTS=$\Sigma(f_{length}\times f_{location}\times w_{crack})$，其中$f_{length}$为棒长影响因子，$f_{location}$为裂纹位置影响因子，$w_{crack}$为裂纹大小因子[9,10]。

1.3 凝固热分析测试

采用双热电偶法(图2a所示)采集并获得合金的凝固冷却曲线，其中图2(b)为原6061再生铝合金的凝固热分析曲线，具体为：两个K型热电偶分别位于石墨坩埚中心和边缘的位置，利用与热电偶相连的NI 9212温度采集系统收集温度数据，使用Origin软件处理得到再生铝合金的凝固冷却曲线，并可以计算温度对凝固时间的一阶导数(如图2b)，分析确定合金凝固特征参数，如合金液相线温度、固相线温度/枝晶搭接点温度、第二相的生成温度等[11,12]。

2 实验结果

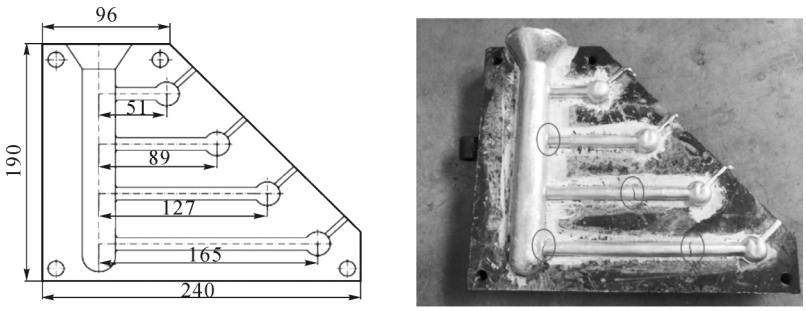
2.1 热裂敏感性

图3所示分别a为不同Fe和Cu含量对6061再生变形铝合金热裂倾向性的影响。结果表明：随着Fe含量的增加，合金热裂倾向(HTS)不断增大。对于Fe含量为0.9%时的初始再生铝合金，其HTS为172；当Fe含量增加到1.2%时，HTS为183，随后HTS增长平缓，当Fe含量增加到1.7%时，HTS为190。图3(b)为不同Cu含量对6061再生变形铝合金热裂倾向性的影响。结果表明：随着Cu含量的增加，合金热裂倾向性(HTS)不断增大。对于Cu含量为0.5%时，原6061再生铝合金HTS为172；当Cu含量增加到1.5%时，HTS为194；当Cu含量增加到2.5%时，HTS为209。

2.2 凝固热分析

从6061再生铝合金凝固热分析曲线（图2b)可知。对于该再生铝合金，在凝固区间内，一阶导数曲线存在4个明显的峰，峰值是相变释放潜热的体现，依次对应为初生α-Al、$Al_{13}Fe_4$、α-AlFeSi、Mg_2Si 4种析出相[13]。在非平衡凝固条件下，熔体温度冷却到650 ℃附近时发生α-Al的析出转变，潜热释放量大并出现冷却平台，随后初生α-Al枝晶长大搭接并开始形成骨架结构，液相自由流动受到抑制；熔体在640 ℃和610 ℃附近时分别析出$Al_{13}Fe_4$相和α-AlFeSi相，针状富铁Fe相会影响液体的流动补缩并割裂基体，导致再生铝合金的性能恶化；凝固末期晶间残余液相发生非平衡共晶反应L→α+Mg_2Si，合金凝固结束。

图4所示分别为不同Fe和Cu含量的6061再生铝

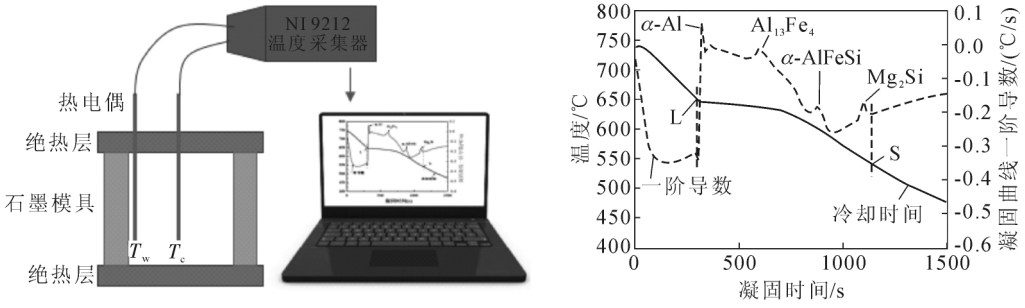


(a)设计图　　(b)约束杆铸件

图 1 约束杆钢制模具及试样铸件

Fig.1 Steel mold and sample castings of constrained rod

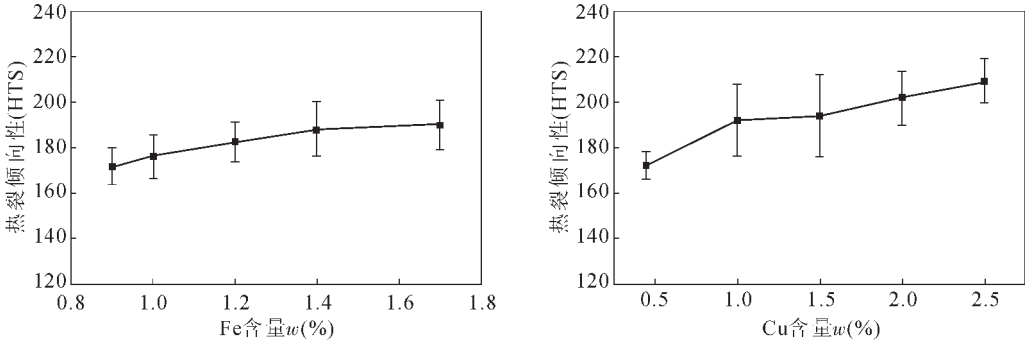
(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



(a)测温　　(b)凝固曲线

图2 热分析装置系统

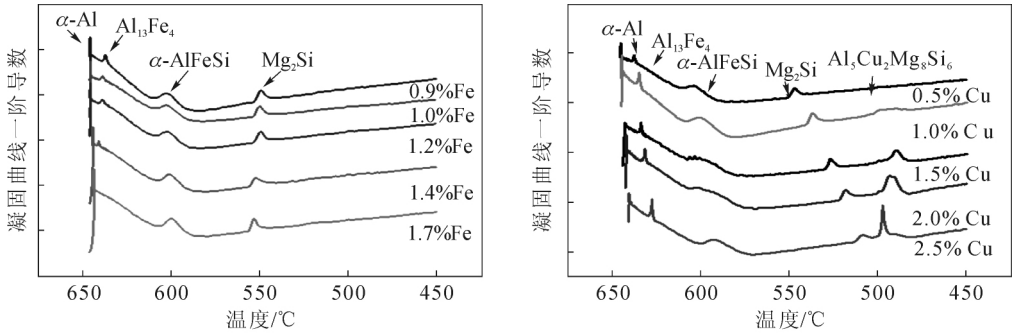
Fig.2 Thermal analysis system



(a)Fe含量影响　　(b)Cu含量影响

图3 杂质元素对6061再生铝合金热裂倾向性(HTS)的影响

Fig.3 Effect of the impurity elements on hot tearing sensitivity of recycled 6061 aluminum alloy



(a)Fe含量的影响　　(b)Cu含量的影响

图4 不同杂质元素的6061再生铝合金凝固曲线一阶导数

Fig.4 First derivative of solidification curve of recycled 6061 aluminum alloy with different impurity elements

合金凝固曲线一阶导数。进一步地获得其凝固特征参数。表1为不同Fe含量的6061再生铝合金热分析凝固参数。随着合金Fe含量由0.9%增加到1.7%，初生α-Al相形核温度降低3.1 ℃，一阶导数的第一个峰向低温偏移；$Al_{13}Fe_4$相的形核温度提升4.3 ℃，第二个峰向高温偏移，并于第一个峰重合；α-AlFeSi相的形核温度降低4.7 ℃，而Mg_2Si相形核温度3.2 ℃。合金中Fe的增加，导致液相线温度下降和固相线温度的提升，最终合金的凝固区间ΔT减小4.3 ℃。表2为将不同Cu含量的6061再生铝合金热分析凝固参数。当再生铝合金中Cu含量增加到1.5%时，在凝固末期阶段一阶导数开始有新峰出现，结合相图分析和ProCAST铸造数值模拟软件模拟可知[14-16]，该峰对应为以$Al_5Cu_2Mg_8Si_6$为代表的新富铜杂质相的析出，随着Cu的进一步添加，新峰峰值增高，杂质相析出增多。随着合金Cu含量由0.5%增加到2.5%，初生α-Al相和$Al_{13}Fe_4$相形核温度分别降低3.8 ℃和8.2 ℃，而α-AlFeSi相和Mg_2Si相形核温度分别大幅降低11.6 ℃和39.1 ℃。由于凝固末期$Al_5Cu_2Mg_8Si_6$新富铜相析出，合金的凝固区间ΔT增大了48.1 ℃。

3 分析与讨论

由以上实验结果表明，6061再生铝合金中Fe含量的增加，热裂倾向系数HTS由172增至190，且影响合金的凝固过程，虽然没有改变析出相的种类，但改变析出相的形核温度与含量。由凝固热分析结果可得，合金中Fe的含量增加，对合金初期凝固行为影响较为明显，导致初生α-Al相形核温度降低3.1 ℃和

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 1 不同 Fe 含量的 6061 再生铝合金凝固特征参数
Tab.1 Solidification parameters of recycled 6061 aluminum alloy with different Fe content

Fe(%)	第二相析出温度 /℃				固相线温度	凝固区间
	α-Al	$Al_{13}Fe_4$	α-AlFeSi	Mg_2Si	/℃	/℃
0.9	649.7	637.9	610.6	553.8	544.5	105.2
1.0	648.6	638.7	609.3	554.1	544.3	104.3
1.2	649.7	640.1	607.8	555.4	544.5	105.2
1.4	647.8	642.2	607.5	556.7	545.2	102.6
1.7	646.6	--	605.9	557.0	545.7	100.9

表 2 不同 Cu 含量的 6061 再生铝合金凝固参数
Tab.2 Solidification parameters of recycled 6061 aluminum alloy with different Cu content

Cu(%)	第二相析出温度 /℃					固相线温度	凝固区间
	α-Al	$Al_{13}Fe_4$	α-AlFeSi	Mg_2Si	$Al_5Cu_2Mg_8Si_6$	/℃	/℃
0.5	649.7	637.9	610.6	553.8	-	544.5	105.2
1.0	649	636.5	608.4	542.3	495.3	482.7	166.3
1.5	648.8	634.8	607.8	532.9	496.9	482.6	166.2
2.0	645.4	633.2	605.5	523.3	498.4	483.2	162.2
2.5	645.6	629.7	599.0	514.7	503.7	492.3	153.3

$Al_{13}Fe_4$相形核温度提升了4.3 ℃，富铁相提前形核并析出，阻碍液相自由流动，增大合金热裂倾向；但Fe的添加对合金凝固末期的凝固行为影响幅度小，包括α-AlFeSi相和Mg_2Si相的含量及形核温度等，且合金凝固区间变化较小，未显著恶化合金的热裂性能。但合金中引入Fe会导致富铁相的总含量增加，脆性的枝状或针状的富铁相在凝固过程中阻碍液相补缩，降低合金半固态的塑性，并容易割裂基体形成裂纹源，导致合金热裂倾向增大和性能恶化[17]。因此，虽然6061再生铝合金中Fe含量增加，热裂倾向性增加幅度较小，但为了提升再生铝合金的生产质量，应严格控制合金的Fe含量，做好生产前的除铁除锈工作。

而由实验结果表明，合金中Cu的添加对合金初期凝固行为较小，而对末期凝固行为影响较大，合金热裂倾向性HTS也增大至209。当合金中Cu含量为2.5%时，Mg_2Si相析出温度下降39.1 ℃，合金的凝固区间ΔT增大了48.1 ℃。在凝固末期析出低熔点$Al_5Cu_2Mg_8Si_6$等富铜杂质相，降低脆性温度区间的下限，扩大合金脆性区间，延长合金处于易脆区间时间，还会导致固相线附近糊状区强度降低，在应力作用下容易被拉裂，成为新的裂纹源，这些都会增大合金热裂倾向性。因此，对于6061再生铝合金应严格控制Cu的含量来降低合金的热裂倾向性，保证再生铝合金生产质量。

4 结论

（1）Fe和Cu含量的添加会增大6061再生铝合金的热裂倾向。当Fe含量由0.9%增加到1.7%时，HTS由172增至190；当合金中Fe含量由0.5%增加到2.5%时，HTS由172增至209。

（2）再生铝合金中Fe元素的添加，主要影响合金初期凝固行为，提高Al13Fe4富铁相的形核温度和含量，促使凝固过程中枝晶搭接完成，阻碍液相流动补缩，降低合金半固态塑形，降低合金铸态性能。

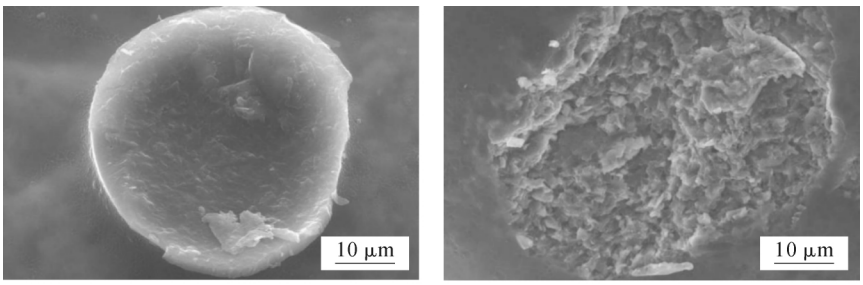
（3）再生铝合金中Cu元素的添加，主要影响合金末期凝固行为，凝固末期析出的低熔点Al5Cu2Mg8Si6等富铜杂质相，显著降低脆性温度区间的下限，且导致固相线附近糊状区强度降低，容易在应力作用下成为新的裂纹源，热裂性能恶化。

参考文献：

[1] 白嘉远. 铝合金材料的应用及其加工成形技术 [J]. 世界有色金属, 2017(14):272-273.
[2] Li Y, Li H X, Katgerman L, et al. Recent advances in hot tearing during casting of aluminium alloys. Progress in Materials Science, https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100741
[3] Eskin D G, Suyitno, Katgerman L. Mechanical properties in the semi-solid state and hot tearing of aluminium alloys [J]. Progress in Materials Science, 2004, 49(5): 629-711.
[4] Delia F, Ravindran C, Sediako D, et al. Hot tearing mechanisms of B206 aluminum-copper alloy [J]. Materials & Design, 2014, 64: 44-55.
[5] 王业双，王渠东，丁文江，等. 合金的热裂机理及其研究进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2000(2): 48-50.
[6] 丁浩，傅恒志，刘忠元，等. 凝固收缩补偿与合金的热裂倾向[J]. 金属学报, 1997, 33(9): 921-926.
[7] Warrington D, McCartney D. Development of a New Hot-cracking Test for Aluminum Alloys[J]. Cast Metals, 1989, 2(3): 134-143.
[8] Birru A K, Karunakar D B. Effects of grain refinement and residual

（下转第 7 页）

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



(a)第4组试块　　(b)第1组试块

图 2 树脂砂断口形貌

Fig.2 Morphology of resin sand fracture

中含有较多的环氧基团，碳原子之间的结合力小，同时由于其脂肪族直链结构，降低了树脂的热稳定性[5]，改变了树脂碳化后的构型。能使混合树脂的分解温度降低。改善型砂的溃散性。

3 结论

采用聚酚氧树脂共混改性后的酚醛树脂，用于制备覆膜砂，能提高覆膜砂热强度和常温强度，改善覆膜砂的溃性能。在有色合金用覆膜砂中有广阔的前景。

参考文献：

[1] 冀运东. 轻合金铸造用 EPA 改性酚醛树脂及应用的研究[D]. 武汉：华中科技大学，2005.

[2] 刘琦. 易溃散覆膜砂在铝合金铸造中的应用[C]// 第二届有色金属铸造及国际会议论文集，2001.

[3] 林卓然，罗国钦，谈信. 聚酚氧树脂的性质及其应用[J]. 广州化工，1992，20(4)：26-28.

[4] 冀运东，郑凯东. 基于内聚力失效微细观单胞模型的树脂砂拉伸性能的数值研究[J]. 机械工程学报，2019(4)：364-370.

[5] 冀运东，李末银，孙伟民，等. 高溃散高强度覆膜砂的开发和应用[C]// 中国机械工程学会造型制芯新技术研讨会. 中国机械工程学会, 2004.

（上接第 4 页）

elements on hot tearing of A713 aluminium cast alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016, 26 (7): 1783-1790.

[9] 石磊. Al-10Si-2Cu合金共晶团的细化及其对热裂敏感性的影响[D]. 济南: 山东大学, 2015.

[10] 张兴孟，毛卫民，朱文志. Zn、Mg、Cu对7075铝合金热裂性能和组织的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2014, 34(12): 1336-1339.

[11] Yang Lu, Li Wen-fang, Du Jun, et al. Effect of Si and Ni contents on the fluidity of Al-Ni-Si alloys evaluated by using thermal analysis[J]. Thermochimica Acta, 2016: 645: 7-15.

[12] Stefanescu D M. Thermal Analysis-Theory and Applications in Metalcasting [J]. International journal of metalcasting, 2015, 9(1): 7-22.

[13] 史明波，李乘波，杜军，等. Mg对6061再生铝合金凝固特性和热裂行为的影响[J]. 铸造, 2020, 69(4): 361-366.

[14] Raghavan V. Al-Cu-Mg-Si (Aluminum-Copper-Magnesium-Silicon) [J]. Journal of Phase Equilibria & Diffusion, 2007，28 (2): 198-200.

[15] Verma A, Kumar S, Grant P S, et al. Influence of cooling rate on the Fe intermetallic formation in an AA6063 Al alloy[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2013, 555(13):274-282.

[16] 王志，李一洲，王峰，等. Mg-xZn-2Y 合金的热裂敏感倾向性[J]. 中国有色金属学报(英文版), 2016, 26(12):3115-3122.

[17] 黄正阳. 6061再生铝合金的组织控制与性能研究[D]. 广州：华南理工大学, 2019.

技术资料邮购

《铸造实用生产技术集锦》

《铸造实用生产技术集锦》本书由李德臣教授级高工编著。共七章：1 重大铸件生产技术；2 耐热耐磨产品生产技术；3 耐蚀耐磨产品生产技术；4 耐磨产品生产技术；5 铸造工艺设计；6 铸造用辅助产品生产技术；7 铸造与哲学。特快专递邮购价：97元。

邮购咨询：李巧凤　　电话/传真：029-83222071

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net