DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2021.02.004

热处理工艺对增材制造 AlSi10Mg 合金组织与力学性能的影响

赵　娟,邢　蕊,李文瑛,李　辰,仲莹莹,朱　琳
(航天科工防御技术研究试验中心, 北京 100854)

摘　要:对比研究了增材制造 AlSi10Mg 合金与传统铸造 ZL104 合金的化学成分、组织与力学性能,研究了退火温度、退火时间对增材制造 AlSi10Mg 合金组织与力学性能的影响。结果表明,当对增材制造 AlSi10Mg 合金进行 T1(180 ℃×12 h,空冷)和 T2(230~250 ℃×2 h,空冷)处理时,力学性能满足 R_m≥380 MPa,A≥8%的要求。

关键词:增材制造; AlSi10Mg 合金; 热处理;组织与力学性能

中图分类号: TG156; TG113　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2021)02-0085-05

Effect of Heat Treatment Process on Microstructure and Mechanical Properties of Additive Manufacturing AlSi10Mg

ZHAO Juan, XING Rui, LI Wenying, LI Chen, ZHONG Yingying, ZHU Lin
(Aerospace Science and Industry Defense Technology Research Testing Center, Beijing 100854, China)

Abstract: The chemical composition, microstructure and mechanical properties of additive manufactured AlSi10Mg alloy and traditional casting ZL104 alloy were compared and studied. The effects of annealing temperature and annealing time on microstructure and mechanical properties of additive manufactured AlSi10Mg alloy were studied. The results show that the mechanical properties of additive manufacturing AlSi10Mg alloy can meet the requirements of R_m≥380 MPa and A≥8% at T1 (180 ℃×12 h, air cooling) and T2 (230~250 ℃×2 h, air cooling).

Key words: additive manufacturing; AlSi10Mg;heat treatment; microstructure; mechanical property

增材制造(又称“3D 打印”)技术是一种通过材料逐渐累加实现制造实体零件的技术。相对于传统材料的切削加工,是一种“自下而上”的制造方法。以粉末床为主要技术特征的激光选区熔化技术(Selective Laser Melting,SLM) 是目前应用最广泛的激光增材制造技术,具有尺寸精度高、表面质量好、成形件性能优异等特点,已被各国优先推广应用于航空航天领域[1-4]。

然而在激光增材制造加工过程中由于熔区的温度梯度大,已成形部分存在较大热应力,随时可能出现孔洞、缝隙和开裂的现象,此外因为重力场的存在, 一些形状复杂的成形件需要支撑结构,金属材料增材制造技术中,支撑部分会影响到整个部件的内应力分布,设计不当可能会发生成形件翘曲变形的现象[5-7]。

本研究以航空航天领域中应用最为广泛的 AlSi10Mg 为研究对象,从化学成分、力学性能及显微组织比对分析增材制造工艺与传统铸造工艺的不同。通过热处理工艺研究摸索 AlSi10Mg 热处理工艺与金相组织、力学性能的关系,找出其综合力学性能最优的热处理工艺,为铝合金复杂构件的高性能、高效率及高精度制造奠定科学与技术基础。

1　试验部分

1.1　AlSi10Mg 化学成分

ZL104、AlSi10Mg 的化学成分分别见表 1 和表2。

表1　ZL104的化学成分 w(%)
Tab.1 Chemical composition of ZL104

Si	Mg	Mn	Fe		Cu	Zn	Ti+Zr
			S	J			
8.0~10.5	0.17~0.35	0.20~0.50	0.60	0.90	0.10	0.25	0.15

表2 AlSi10Mg的化学成分 w(%)
Tab.2 Chemical composition of AlSi10Mg

Si	Mg	Mn	Fe	Cu	Zn	Ti	O
9.80	0.40	0.003 4	0.15	0.004 2	0.029	0.007 5	0.035

从表 1、表 2 对比可知 AlSi10Mg 化学成分与 ZL104 相近, 因此参考 GJB 1695-1993 选用 AlSi10Mg 常用的状态人工时效(T1)、退火(T2)、固溶

收稿日期:2020-12-10

作者简介:赵　娟(1989-),女,安徽阜阳人,博士,高级工程师.主要从事新材料与新工艺方面的工作.
电话:010-68195282,E-mail:juanzhao13@fudan.edu.cn

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

时效(T6)状态进行理化性能综合比较，摸索最佳使用状态。研究选用相同打印方向同炉同批 AlSi10Mg 试样 12 件，进行沉积态、T1、T2、T6 力学性能、金相组织、残余应力分析比较。

1.2 AlSi10Mg 常用状态力学性能

通过比较表 3 和表 4 的数据对比，增材制造 AlSi10Mg 试样力学性能远远优于 ZL104。通过不同状态力学性能数据对比，可知沉积态样件强度高塑性较低，导致样件易发生脆断；T1 时效处理后试样 $R_m \geqslant 380$ MPa，$A \geqslant 8\%$，适用于制造刚度要求较高变形小的零部件；退火处理后试样，强度大幅降低，伸长率及断面收缩率大幅提升，但力学综合性能未到达技术指标 $R_m \geqslant 380$ MPa，$A \geqslant 8\%$的要求，该退火热处理工艺未满足使用要求，需摸索退火热处理工艺；固溶时效后试样，强度大幅降低，伸长率与 T1 后试样相当，仍未到达技术指标 $R_m \geqslant 380$ MPa，$A \geqslant 8\%$的要求。

表 3 增材制造 AlSi10Mg 常用状态力学性能数据
Tab.3 Common mechanical properties data of additive manufacturing AlSi10Mg

试样编号	试样状态	*Rm* /MPa	*Rp*0.2 /MPa	*A*（%）	*Z*（%）
1#	沉积态	439	282	6.0	11.0
2#		446	282	6.0	8.5
3#		436	278	7.0	10.0
4#	T1 态（180 ℃×12 h 空冷）	439	293	8.5	11.0
5#		438	290	8.0	11.5
6#		438	292	8.5	11.5
7#	退火态（300 ℃×2 h 空冷）	289	186	25.0	41.5
8#		288	192	28.0	43.5
9#		288	186	27.0	43.5
10#	固溶时效态	291	245	10.0	25.0
11#	(530 ℃×1 h 水冷	292	247	9.5	27.0
12#	165 ℃×6 h 空冷)	292	248	10.0	26.0

1.3 AlSi10Mg 常用状态金相组织

图 1(a)为 ZL104 未变质金相组织图，图 1(b)为 ZL104 变质处理后金相组织图。砂型铸造变质处理后的 ZL104 显微组织 α 固溶分体呈树枝状分布，枝晶间隙有灰色颗粒 Si，Si 与 α 形成共晶体。同时存在浅灰色骨骼状 AlFeMnSi 相，AlFeMnSi 与 α 形成二元共晶体。

表 4 传统制造 ZL104 力学性能数据
Tab.4 Mechanical performance data of ZL104 alloy

合金代号	铸造方法	合金状态	力学性能 抗拉强度 σ_b / MPa	伸长率 δ_s（%）	布氏硬度 HBS(5/250/30)
ZL104	S、R、J、K	F	145	2	50
	J	T1	195	1.5	65
	SB、RB、KB	T6	225	2	70
	J、JB	T6	235	2	70

图 2 为不同状态下 AlSi10Mg 的金相组织图，与 ZL104 组织不同，AlSi10Mg 沉积态、T1 金相组织为诸多整齐排列的鱼鳞状的多层熔覆组织，组织可见打印方向和熔融区组织，熔融区内部组织细小；T1 态基本保留沉积态组织形貌，T2 态保留沉积态组织走向，T6 态未保留沉积态组织形貌。退火态组织仍保留沉积态组织走向，组织放大后熔区内部组织细小无明显界限；固溶时效态组织已无沉积态组织走向，组织是由弥散分布的圆形颗粒组成，因此固溶时效态试样不能保留增材制造工艺优势。

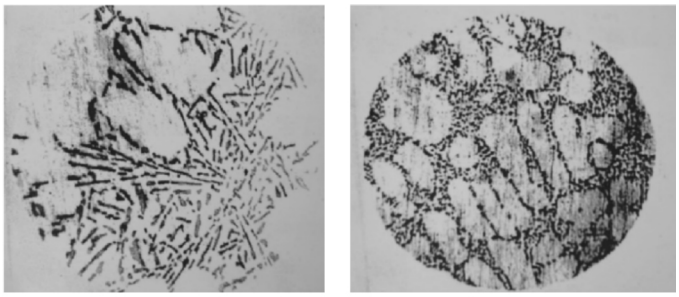
1.4 AlSi10Mg 退火工艺

1.4.1 退火温度摸索

选用同批同炉增材制造 AlSi10Mg 试样 30 件，每组 3 件共 10 组试样，进行退火工艺温度的摸索。采用 200~320 ℃温度区间进行热处理，保温时间均为 2 h，空冷，分析性能及金相结果，寻求合理的退火温度范围，具体实验参数如表 5。

1.4.2 退火时间摸索

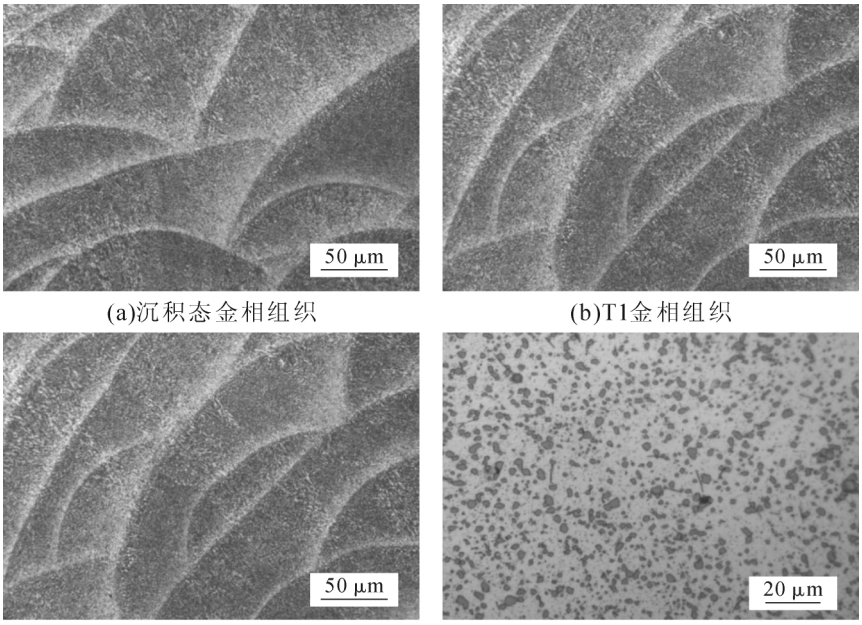
选用同批同炉增材制造 AlSi10Mg 试样 15件，每组 3 件共 5 组试样，进行退火工艺时间的摸索。采用 240 ℃进行热处理，保温时间选取 1~8 h，空冷，分



(a)未变质金相组织　(b)变质处理后金相组织

图 1 不同状态下 ZL104 的金相组织图
Fig.1 Microstructure of ZL104 alloy in different states

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



(a)沉积态金相组织　(b)T1金相组织

(c)T2金相组织　(d)T6金相组织

图 2 不同状态下 3D 打印 AlSi10Mg 的金相组织

Fig.2 Microstructure of 3D printing AlSi10Mg alloy in different states

表5 不同加热温度、相同保温时间退火工艺

Tab.5 Annealing process with different heating temperature and same holding time

热处理工艺	加热温度 /℃	保温时间 /h	冷却方式
T2	200	2	空冷
T2	230	2	空冷
T2	240	2	空冷
T2	250	2	空冷
T2	270	2	空冷
T2	280	2	空冷
T2	290	2	空冷
T2	300	2	空冷
T2	320	2	空冷

析性能及金相结果，寻求合理的退火保温时间,具体实验参数如表 6。

表6 不同保温时间、相同加热温度退火工艺

Tab.6 Annealing process with different holding time and same heating temperature

热处理工艺	加热温度 /℃	保温时间 /h	冷却方式
T2	240	1	空冷
T2	240	2	空冷
T2	240	4	空冷
T2	240	6	空冷
T2	240	8	空冷

2　试验结果及讨论

2.1　退火温度对增材制造 AlSi10Mg 合金组织及力学性能的影响

退火温度对增材制造 AlSi10Mg 合金力学性能的影响见图 3。

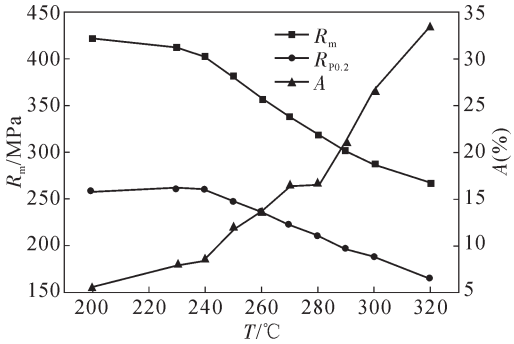


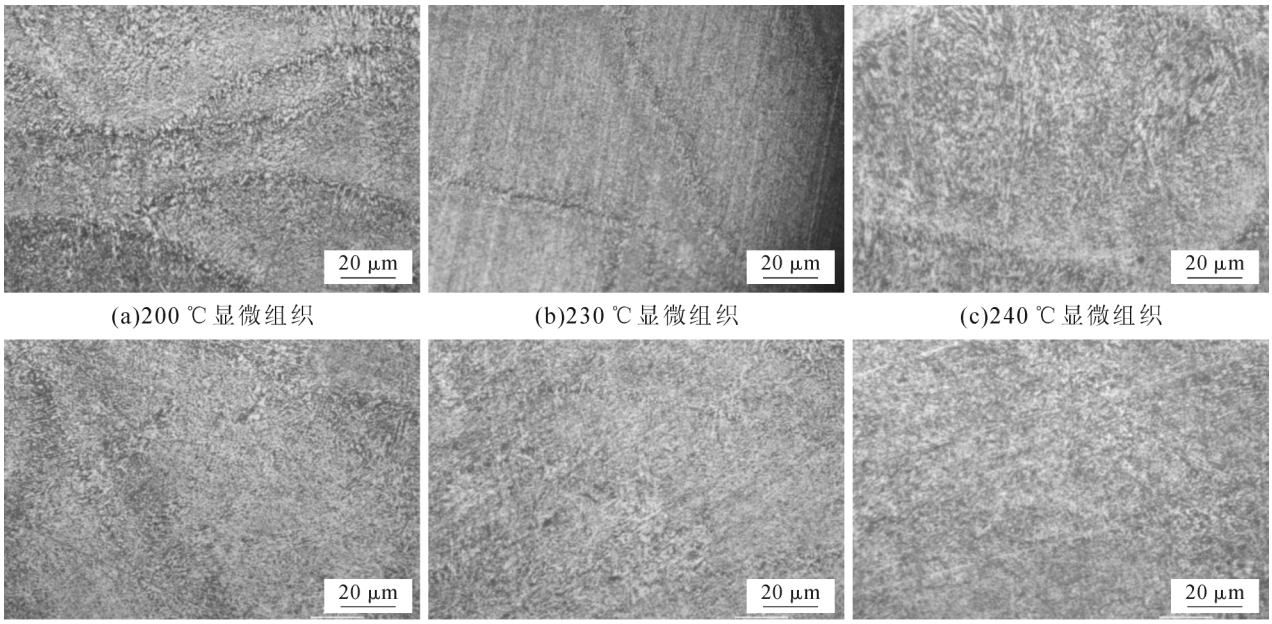
图 3 退火温度对增材制造 AlSi10Mg 合金力学性能的影响

Fig.3 Effect of annealing temperature on mechanical properties of additive manufacturing AlSi10Mg

图 3 为退火温度对增材制造 AlSi10Mg 合金力学性能的影响图,由图可知,增材制造 AlSi10Mg 试样随着退火温度升高,力学性能强度逐渐降低,伸长率逐渐升高,230~250 ℃退火处理后力学性能满足 $R_m \geqslant 380$ MPa、$A \geqslant 8\%$的要求,具体力学性能数据如表 7。

图 4 为不同退火温度处理后增材制造 AlSi10Mg 的显微组织图,由图可知,AlSi10Mg 金相组织随着退火温度升高沉积态组织走向减弱，鱼鳞状组织界限逐渐减弱,热影响区逐渐减小。AlSi10Mg 试样成形是激光束快速熔化铝粉末，而后快速固化的过程。因高能量密度的激光束在很短的时间内和很小的区域内与金属材料发生交互作用，材料表面局部区域的快速加热和熔池周围冷态基材的强换热作用，导致激光熔池及其热影响区通常具有高的冷却速率。在这种条件下,金属材料的凝固和固态相变将会较大地偏离平衡，使得材料的固溶极限显著扩

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



(a)200 ℃显微组织 (b)230 ℃显微组织 (c)240 ℃显微组织

(d)250 ℃显微组织 (e)260 ℃显微组织 (f)270℃显微组织

图 4 不同退火温度处理后增材制造 AlSi10Mg 的显微组织图

Fig.4 Microstructure of additive manufacturing AlSi10Mg after different annealing temperatures

表 7 230~250 ℃退火处理后增材制造 AlSi10Mg 力学性能数据

Tab.7 Mechanical property data of additive manufacturing AlSi10Mg after annealing at 230~250 ℃

试样状态	*Rm* /MPa	*Rp0.2* /MPa	*A* (%)	*Z*(%)
230 ℃×2 h AC	411	261	8.5	11
	412	262	8.0	10
	413	260	8.0	10
240 ℃×2 h AC	403	261	8.5	11
	402	261	8.5	10
	402	262	8.0	10
250 ℃×2 h AC	380	246	12.0	18
	381	245	12.0	17
	381	254	12.5	18

大、晶内微观亚结构显著细化，这种过高的冷却速率在粉末颗粒边缘更高，固溶度更大，从而改善成形金属构件的物理、化学和力学性能[8]。通过力学性能、金相组织综合比对，退火处理加热温度推荐230~250 ℃。

2.2 退火时间对增材制造 AlSi10Mg 合金组织及力学性能的影响

图 5 为退火时间对增材制造 AlSi10Mg 合金力学性能的影响图，由图可知，随着时效时间的延长，试样强度缓慢降低，伸长率几乎不变。图 6 为不同退火时间处理后 AlSi10Mg 显微组织图，通过力学性能、显微组织综合比对，240 ℃退火处理时退火时间推荐 2 h。

2.3 讨论

研究表明人工时效(T1)、退火(T2)态仍保留沉积

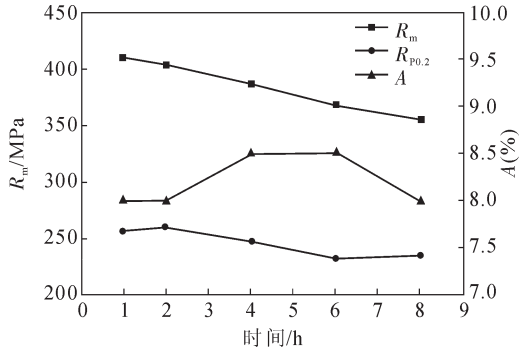


图 5 退火时间对增材制造 AlSi10Mg 合金力学性能的影响

Fig.5 Effect of annealing time on mechanical properties of additive manufacturing AlSi10Mg

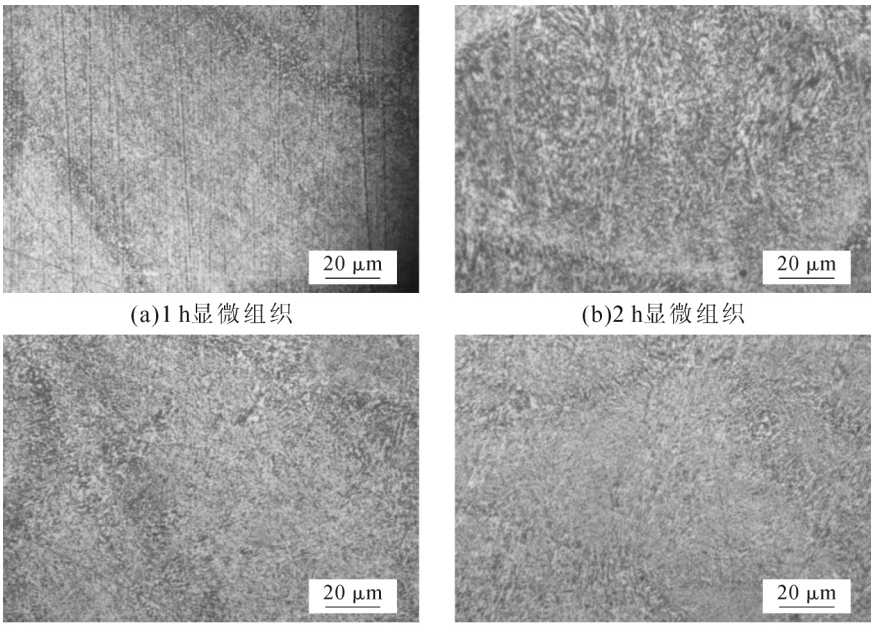
态组织走向及趋势，T1(180 ℃×12 h)、T2((230~250) ℃×2 h)达到 R_m≥380 MPa，A ≥8%的力学性能，且经热处理后其残余应力大幅降低，因试验用拉伸试棒为块状简单结构，非薄壁结构，应力集中较小，成型后不易变形，残余应力较低[9]，但在目前实际应用中形状复杂构件沉积态增材制造构件因残余应力过大，无法直接从基板切取试样，甚至有基板歪曲变形甚至尖角等应力集中部位开裂的现象，经 T1、T2 处理后构件无翘曲变形、开裂现象，可从基板线切割切取试样，说明残余应力大幅降低，因此推荐热处理工艺如表 8。

表8 增材制造AlSi10Mg样件推荐热处理工艺

Tab.8 Recommended heat treatment process for additive manufacturing AlSi10Mg

热处理状态	加热温度 /℃	保温时间 /min	冷却介质
T1	180	12～15	空气
T2	230～250	2	空气

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



(a)1 h显微组织　(b)2 h显微组织　(c)4 h显微组织　(d)6 h显微组织

图 6 不同退火时间处理后增材制造 AlSi10Mg 的显微组织

Fig.6 Microstructure of additive manufacturing AlSi10Mg after different annealing time treatments

3 结论

(1)增材制造 AlSi10Mg 构件组织致密,晶粒细小力学性能优异,远胜过传统铸造方法成形的零件;此外增材制造 AlSi10Mg 构件 T1 态、T2 态仍保留沉积态鱼鳞状组织走向及趋势。

(2)当增材制造 AlSi10Mg 构件 T1 态热处理工艺:180 ℃×12 h、空冷时,力学性能达到 $R_m \geqslant$ 380 MPa,$A \geqslant 8\%$;当增材制造 AlSi10Mg 构件 T2 态热处理工艺:(230~250) ℃×2 h、空冷时,力学性能达到 $R_m \geqslant 380$ MPa,$A \geqslant 8\%$。

参考文献:

[1] 黄卫东,李延民,冯莉萍,等. 金属材料激光立体成形技术[J]. 材料工程,2002 (3): 40-41.

[2] 黄卫东,林鑫. 激光立体成形高性能金属零件研究进展[J]. 中国材料进展,2010,29 (6): 12-13.

[3] 张东云. 采用区域选择激光熔化法制造铝合金模型 [J]. 中国激光,2007,34 (12): 1700-1704.

[4] 张骁丽,齐欢,魏青松. 铝合金粉末选择性激光熔化成形工艺优化试验研究[J]. 应用激光,2013,33 (4): 391-392.

[5] 魏青松. 金属粉床激光增材制造技术 [M]. 北京: 化学工业出版社,2019.

[6] 李俐群,王宪,曲劲宇,等. 激光熔化沉积 AlSi10Mg 及气孔对力学性能的影响[J]. 中国表面工程,2019,32 (3): 109-114.

[7] 巩维艳,沙治波,王震,等. 激光选区熔化成形 AlSi10Mg 铝合金粉末特性研究[J]. 新技术新工艺,2018 (12): 14-16.

[8] 俞斐腾. AlSi10Mg 合金激光熔化沉积工艺与组织性能的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019.

[9] 于宝义,何亮,郑黎,等. SLM 成形 AlSi10Mg 合金残余应力数值模拟及组织性能分析 [J]. 特种铸造及有色合金,2020,40 (4): 349-355.

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