LA43M 镁锂合金过烧工艺

镁锂合金是迄今为止密度最小的金属结构材料，目前工业用镁锂合金密度为 1.41~1.65 g/cm^3，比铝合金轻50%左右，比一般镁合金轻 25%左右[1-2]。镁锂合金具有很高的比刚度、比强度和优良的抗震性能，其与铝合金比刚度分别为27~32 GPa/(g·cm^{-3})及28 GPa/(g·cm^{-3})，比强度分别为 150~200 MPa/(g·cm^{-3})及 100~150 MPa/(g·cm^{-3})。由于镁锂合金优良的综合力学性能，可部分替代铝合金，在航天、航空、3C 产业、汽车等领域具有较大的发展潜力[3-5]，目前国内镁锂合金在轨道卫星及航天探测器上已实现应用，效果较好。在实际生产过程中，为了提高合金组织成分均匀性，往往需要进行均匀化热处理，即把非平衡结晶的材料加热至一定温度保温，以消除化学成分与组织偏析现象。众所周知，提高均匀化温度，通过增加原子扩散能力使共晶析出相充分溶解，然而，温度若达到或高于共晶温度后，共晶相会产生复熔现象，即为过烧。因此，热处理工艺基于 DSC 差热法分析获得的相变温度制定，通常均匀化处理温度需略低于相变温度，使共晶相完全溶解，若高于相变温度则易出现过烧现象。对过烧微观组织的研究能够为实际生产中热处理工艺的调整与完善提供一定理论基础。张康等[6]研究了 AZ151 镁合金均匀化处理过程中的过烧现象，张洪梅等[7]研究了 MB15 镁合金铸锭热处理过程中的过烧现象。结果表明，过烧组织特征为复熔共晶球，晶界局部复熔加宽及复熔三角晶界。而镁锂合金由于熔点较低，对温度敏感性高，热处理过程中极易出现显微组织过烧，严重降低了产品安全性。目前国内将镁锂合金产品产业化生产的仅西安四方超轻材料有限公司，且没有国家标准借鉴，有关镁合金过烧现象的报道也极少，几乎无相关的资料可供生产指导。因此，本文通过设计不同热处理制度，研究镁锂合金热处理过程显微组织过烧的原因及典型状态，为镁锂合金生产应用提供指导和判定依据。

一、实验方案

镁锂合金显微组织结构分为 α 单相组织、α+β 双相及 β 单相组织[8-10]，实验主要研究镁锂合金组织过烧，因此选择单相材料更有利于观察其组织过烧缺陷。本实验选用西安四方超轻材料有限公司生产的单相组织合金 LA43M，其化学成分见表 1。

表1 LA43M镁锂合金的化学成分 *w*/%

Li	Al	Zn	Si	Fe	Cu	Mg
3.5~4.5	2.5~3.5	2.5~3.5	≤0.5	≤0.05	≤0.05	余量

镁锂合金燃点较低，热处理温度过高会导致材料燃烧，而较低温度下不会发生过烧现象，观察过烧组织需选择近燃点温度，且温度控制精度要求较高。由图 1 铸态 LA43M 合金的 DSC 差热分析曲线可知，该合金的相变起始点为 398 ℃，相变峰值为 430 ℃，结合杜冠军[11]对 LAZ 镁锂合金燃点的探究性试验结果，LAZ 系列合金在 400 ℃下仅约 1 h 就会发生燃烧。为研究 LA43M合金的临近过烧和过烧组织，实验设计方案如表 2 所示，温度区间为 390~420 ℃，升温速率 5 ℃/min，保温时间 0.5~1.0 h，冷却方式为氩气保护下随炉冷却，

[1] 冯凯，李丹明，何成旦，陈学康. 航天用超轻镁锂合金研究进展[J]. 特种铸造及有色合金，2017, 37(2): 140-144.

[2] 张开望，张强，石新泰，柴东朗，闫劲儒. 新型 Mg-4Li-xCa 合金显微组织及力学性能[J]. 铸造技术，2021, 42(4): 275-278.

[3] 徐春杰，王弋丹，华心雨，任国璐，李阳，刘君. 深冷及时效处理对 Mg-7.5Li-3.5Zn-2Y 合金组织及力学性能的影响[J]. 铸造技术，2019, 40(7): 633-638.

[4] ZHANG X S, CHEN Y J, HU J L. Recent advance in the development of aerospace materials[J]. Progress in Aerospace Science, 2018, 97: 22-34.

[5] CHEN X Y, ZHANG Y, CONG M Q, LU Y L, LI X P. Effect on Sn content on microstructure and tensile properties of as-cast and as-extruded Ma-8Li-3Al-(1,2,3) Sn alloys[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2020, 30(8): 2079-2089.

[6] 张康，鲍君峰，王梦雨. 均匀化过程中 AZ151 镁合金过烧组织的研究[J]. 热喷涂技术, 2016, 8(2): 65-68.

[7] 张洪梅，苏玉杰，李胜英，付忠国. MB15 合金的过烧[A]. 全国第十三届轻合金加工学术交流会论文集[C]. 杭州：中国有色金属加工工业协会，2005. 57-64.

[8] 张密林. 超轻镁锂合金设计、制备与表面技术[J]. 黑龙江冶金，2014, 34(1): 1-6, 9.

[9] 曾迎，蒋斌，李瑞红，刘玉虹. 合金元素对 Mg-Li 合金组织及性能的影响[J]. 铸造，2012, 61(3): 275-279.

[10] CUI C L, WU L B, WU R Z, ZHANG J H, ZHANG M L. Influence of yttrium on micro-structure and mechanical properties of as-cast Mg-5Li-3Al-2Zn alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2011, 509(37): 9045-9049.

[11] 杜冠军. 镁锂合金空气中的高温氧化行为及耐腐蚀性能的研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工程大学，2013.

中国知网 https://www.cnki.net

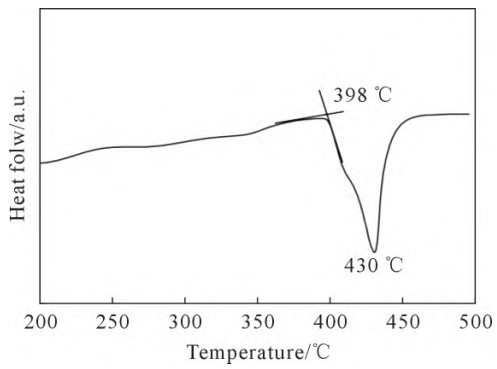

图 1 LA43M 合金的差热分析曲线

表2 LA43M合金热处理方案

编号	热处理温度/℃	保温时间/h
1#	390	1.0
2#	410	0.5
3#	410	1.0
4#	420	0.5

热处理设备选用高精度电阻炉，温度精度为±0.2 ℃，热处理过程采用 Ar 保护。

二、实验结果分析

(1)显微组织

图 2 为未热处理母材(图 2a)及 1#、2# 试样的金相组织照片，3# 及 4# 试样热处理过程发生燃烧。可以看出，母材组织为单一 α 相，晶界完整，无析出相；390 ℃保温 1 h 后，随冷却过程温度降低，过饱和相逐渐析出，1# 试样晶内出现少量析出相，且存在部分团聚现象，晶界处完整清晰，无熔断现象；随温度提高至 410 ℃保温 0.5 h，2# 试样析出相逐渐增多，且发生长大，部分晶界处观察到明显熔断现象，可作为过烧组织判定标准；410 ℃保温 1 h 及 420 ℃保温 0.5 h 条件下，因保温时间较长，温度较高，晶界熔化区扩展，液相含量增加，导致 3# 及 4# 试样发生燃烧。

(2)温度及保温时间对 LA43M 合金组织过烧的影响

表 3 为 LA43M 合金不同热处理条件下的组织过烧情况。可以看出，温度对 LA43M 合金热处理过程组织过烧的影响非常明显，温度低于 390 ℃时，合金没有发生明显过烧，当温度提高至 410 ℃短时间保温时，合金发生过烧，当温度再次提高至 420 ℃时，合金发生燃烧。由此可以确定 LA43M 合金合理热处理温度应控制在 390 ℃以内。另外，在温度 410 ℃条件下，保温时间延长至 1 h，LA43M 合金发生燃烧，说明近燃点温度条件下，组织发生过烧后，随保温时间延长，熔断区会逐渐扩展，最终导致合金发生燃烧。

表3 LA43M合金不同热处理条件下的组织过烧情况

编号	热处理温度/℃	保温时间/h	组织过烧情况
1#	390	1.0	无过烧
2#	410	0.5	过烧
3#	410	1.0	合金燃烧
4#	420	0.5	合金燃烧

三、结语

LA43M 合金在 390 ℃条件下没有发生组织过烧现象，因此推荐合理热处理温度应小于 390 ℃，避免组织过烧。LA43M 合金在 410 ℃条件下保温 0.5 h 后观察到典型过烧组织，可作为生产中过烧组织判定依据。LA43M 合金热处理过程对温度敏感性较高，应选用高精度温控设备，避免温度过高引起组织过烧甚至燃烧。

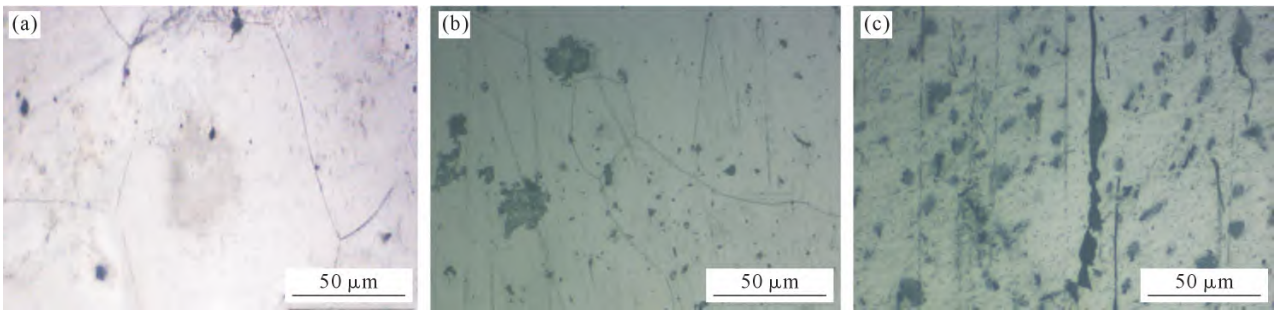

图 2 不同热处理条件下试样的金相组织：(a) 未热处理；(b) 390 ℃保温 1 h；(c) 410 ℃保温 0.5 h

王　瑞[1]，葛　骏[2]，樊晓泽[1]，马　骏[1]，齐二帅[1]
(1. 西安四方超轻材料有限公司，陕西 西安 710089；
2. 上海航天电子通讯设备研究所，上海 201108)

中国知网 https://www.cnki.net