

# 电磁振荡铸轧AA6022 铝合金薄板热处理工艺研究

贺晨<sup>1,2</sup>, 赵宇辉<sup>1,2</sup>, 赵吉宾<sup>1,2</sup>, 王志国<sup>1,2</sup>, 何振丰<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016)

(2. 中国科学院 机器人与智能制造创新研究院, 辽宁 沈阳 110169)

**摘要:** 基于亚快速凝固原理的电磁振荡铸轧技术成功制备出汽车用AA6022 铝合金薄板, 为了提高终端产品的综合力学性能, 对冷轧后的薄板进行了热处理工艺研究。采用金相显微镜(OM)、扫描电子显微镜(SEM、EBSD)、宏观硬度以及拉伸实验等检测方法, 研究了不同热处理工艺对亚快速凝固板材微观组织和力学性能的影响规律。结果表明: Al-Ti-B晶粒细化剂与电磁场的复合应用可以显著提高细小等轴状晶粒比例; 固溶+预时效处理可以显著抑制自然时效硬化效应、增强合金板材的抗自然时效稳定性、提高合金板材的冲压成形性能和烤漆硬化增量; 在优化的热处理工艺条件下(560 °C×5 min+150 °C×5 min+室温停放 30 d+175 °C×30 min), 板材的屈服强度、抗拉强度、延伸率、宏观硬度以及塑性应变比, 分别由1#试样的 259 MPa、296 MPa、10.7%、466.5 MPa、0.66 提高至 4#试样的 296 MPa、322 MPa、16.1%、599.8 MPa、0.75。

**关键词:** AA6022 铝合金; 电磁铸轧; 热处理工艺; 微观组织; 力学性能

中图分类号: TG146.21

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2022)11-4187-10

能源与环境是当今世界面临的两大难题, 都与汽车产业的发展息息相关。因此“轻量化、节能减排、安全智能”成为汽车行业健康发展的必然趋势。若车身质量降低 100 kg, 每行驶 100 km, 平均油耗可降低 0.3~0.6 L, 尾气及温室气体排放量可减少约 5 g/km<sup>[1-5]</sup>。传统 6000 系铝合金汽车板生产工艺包括: 铸造-均匀化-热轧-中间退火-冷轧-热处理, 其周期长、能耗高、成本高等特点限制了高品质铝合金板材在交通运输工业中的广泛应用<sup>[6,7]</sup>。而电磁振荡铸轧工艺凭借其短流程、低成本、高成材率的技术优势, 得到国内外科研工作者的广泛关注。

20 世纪 80 年代中期, 印度学者 Misra<sup>[8]</sup> 在 Pb-Sb-Sn 合金凝固过程中, 施加了不同类型的电流场, 发现电场作用下, 合金中第二相变得细小且分布均匀性显著提高、共晶片层间距减小。Zhai 等<sup>[9]</sup> 研究发现, 凝固过程中电场作用下形核速率大幅度增加, 因而晶粒变得细小, 使涂层底部组织结构发生明显变化, 转变为等轴晶。与传统方法相比涂层中的裂纹数量减少了 60%, 涂层的平均显微硬度提高, 耐蚀性提高。

磁场可以通过洛伦兹力来控制金属熔体的流动、传热、传质以及凝固过程。因此, 磁场作用下的金属凝固, 液-固界面失稳主要与热电磁力存在一定相关性<sup>[10,11]</sup>。Li

等<sup>[12,13]</sup> 研究了不同磁场对 CMSX-4 合金凝固组织的影响规律。结果表明: 洛伦兹力不仅改变了熔体的对流行为, 也可以直接作用于枝晶臂, 从而影响枝晶碎片的形成。Shen 等<sup>[14]</sup> 研究了定向凝固过程中横向静磁场对初生枝晶间距的细化机理, 并进行了实验验证。根据 Kurz-Fisher 模型, 这种磁场诱导的细化与定向凝固过程中糊状区的温度梯度和溶质元素再分配有关。

Hu 等<sup>[15]</sup> 在激光熔覆过程中施加电/磁复合场, 提高了熔池中气孔的逃逸能力, 降低了孔隙率。国内东北大学研究团队通过不同外场的施加、升温速率的探索以及热处理工艺的优化, 减轻了薄带铸轧 AA2099<sup>[16-18]</sup>、AA6181<sup>[19]</sup> 以及 AA7075 铝合金<sup>[20-22]</sup> 板坯的宏/微观偏析缺陷、最终提高了铸轧板坯的综合力学性能。Gao 等<sup>[23,24]</sup> 对比分析了凝固条件、升温速率、热处理工艺参数对 AA6016 铝合金薄板微观组织和成形性能的影响规律。结果表明: 快速加热+短时保温的热处理策略可以避免粗大晶粒形成、同时热处理工艺的优化可以显著提高合金板材的冲压成形性能与烤漆硬化响应速率。

综上所述, 为了促进低成本、高性能汽车用铝合金板材在汽车覆盖件上的广泛应用, 本实验提出了“电磁铸轧→直接冷轧→热处理”的 AA6022 铝合金汽车板短

收稿日期: 2022-03-22

基金项目: 中央引导地方科技发展专项资金(2021JH6/10500119); 国家自然科学基金(51805526); 广东省基础与应用基础研究基金(2020B1515120027)

作者简介: 贺晨, 男, 1988 年生, 博士, 中国科学院沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016, 电话: 024-83601252, E-mail: hechen@sia.cn

流程一体化制备及组织性能控制新思路。研究固溶和时效处理工艺对合金板材成形性、烘烤硬化性以及抗自然时效稳定性的影响规律。确定最佳的热处理工艺制度。旨在为采用短流程、高性能电磁铸轧法生产兼具优异成形性能与后处理烘烤硬化性能的汽车用铝合金板材，提供一定的数据参考与理论支撑。

## 1 实验

在水平式双辊薄带铸轧试验机上制备AA6022 铝合金铸轧板坯，其化学成分如表 1 所示。铸轧工艺参数为：浇注温度 690 °C、铸轧速度 1.0 m/min、冷却水压 0.4 MPa、板坯厚度 5 mm、板坯宽度 200 mm、静磁场强度 45 mT、脉冲频率 20 Hz、峰值电流 400 A、占空比 15%。在不同工艺条件制备的铸轧板坯上分别截取尺寸为 200 mm×200 mm×5 mm 的板坯进行直接冷轧实验，冷轧后板材厚度约为 1 mm，总压下率达到 80%。固溶处理温度为 560 °C，预时效处理温度为 150 °C，改变保温时间。其中 1#试样为对比板坯，2#试样添加Al-Ti-B细化剂，3#试样施加电磁复合场，4#试样为Al-Ti-B+电磁场。

固溶时效处理后的板材试样依据国标 GB/T 228-2010 进行加工，拉伸试样的尺寸如图 1b所示。试样力学性能检测实验在INSTRON 4206 型号的 100 kN拉伸

表 1 AA6022 铝合金化学成分

Table 1 Chemical composition of AA6022 aluminum alloy (wt%)

Mg	Si	Cu	Mn	Fe	Al
0.8	1.0	0.1	0.1	0.1	Bal.

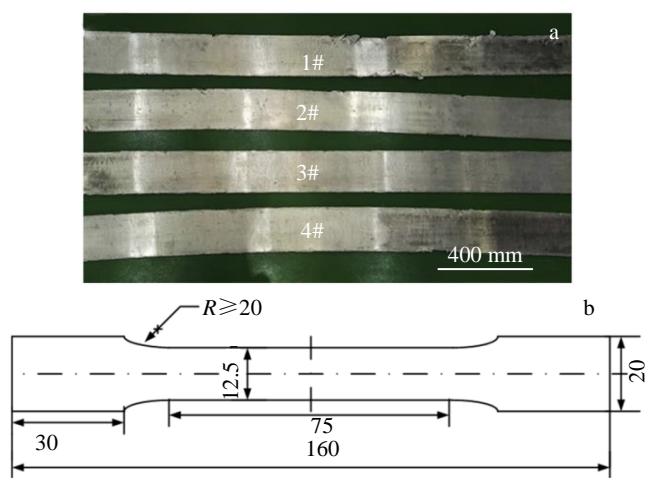


图 1 不同工艺制备的铝合金铸轧板坯及拉伸试样尺寸

Fig.1 Twin-roll cast sheet prepared under different processing conditions (a) and tensile specimen size (b)

试验机上进行，拉伸速率为 1 mm/min。宏观维氏硬度实验在KB3000BVRZ-SA型万能硬度计上进行。采用ZEISS Imager M2m型光学显微镜 (OM) 对铸轧态试样的宏观组织进行分析，并通过Image pro 6.0 软件对所得的金相图片进行晶粒度与非平衡共晶相面积分数的统计。在 ZEISS ULTRA 55 型场发射扫描电子显微镜 (SEM) 上对试样的微观组织、第二相化学成分、再结晶后晶粒尺寸以及断口形貌进行表征和分析。

## 2 结果分析

### 2.1 工艺条件对铸轧板坯组织性能的影响

不同工艺条件制备铸轧板坯的微观组织如图 2 所示。微观组织呈明显的树枝晶组织，且枝晶的生长具有一定的方向性，总体上是垂直于铸轧辊面，从板坯边部指向板坯中心方向，板坯边部存在明显的枝晶间偏析缺陷如图 2a所示。随着Al-Ti-B细化剂和电磁场的施加，形核率显著提高，结合洛伦兹力对熔体的振荡作用，熔体的温度场和溶质场变得均匀，弱化了枝晶的生长条件，因此粗大树枝晶的数量明显减少了，定向生长的树枝晶转变成了近球形的等轴状晶粒，如图 2d所示。

添加Al-Ti-B合金在凝固过程中极容易发生下沉与聚集，显著降低其利用率，电磁场的施加，增强了细化剂在熔体中的分布均匀性，提高了基体中合金元素的过饱和固溶程度，晶界处非平衡共晶相的数量减少，平均晶粒尺寸显著减小 (如图 3 所示)，平均晶粒尺寸由 1#试样的 179 μm，逐渐减小至 2#和 3#的 107 和 112 μm，4#试样最小为 76 μm。同时，晶界处共晶相面积分数，由 1#试样的 7.75%降低到 4#试样的 4.13%，偏析缺陷也由原来的大面积中心偏析缺陷转变成点状、分散型偏析缺陷。

1#试样由于其微观组织呈明显的粗大树枝晶形貌，且具有较严重的枝晶间偏析缺陷，拉伸过程中容易在偏析处发生开裂，导致其强度和延伸率都较低，其力学性能分别为 259 MPa、296 MPa、10.7%。随着Al-Ti-B细化剂和电磁场的复合应用，板坯强度和延伸率同时提高，分别为 296 MPa、322 MPa、16.1%，如图 4 所示。

### 2.2 铸轧-直接冷轧薄板热处理工艺

#### 2.2.1 固溶处理工艺研究

图 5 和图 6 分别为冷轧板材不同固溶处理时间后的硬度及SEM照片。如图 5d所示，当固溶处理保温时间 1 min时，冷轧过程产生的加工硬化以及内应力逐渐消失并发生再结晶软化，合金发生回复与静态再结晶，硬度值由 804.6 MPa迅速降低至 466.5 MPa，随着保温时间的延长，可溶相分解后产生的Mg、Si、Cu、Mn等组元回溶入基体中产生晶格畸变，增大了位错运动的阻力，使

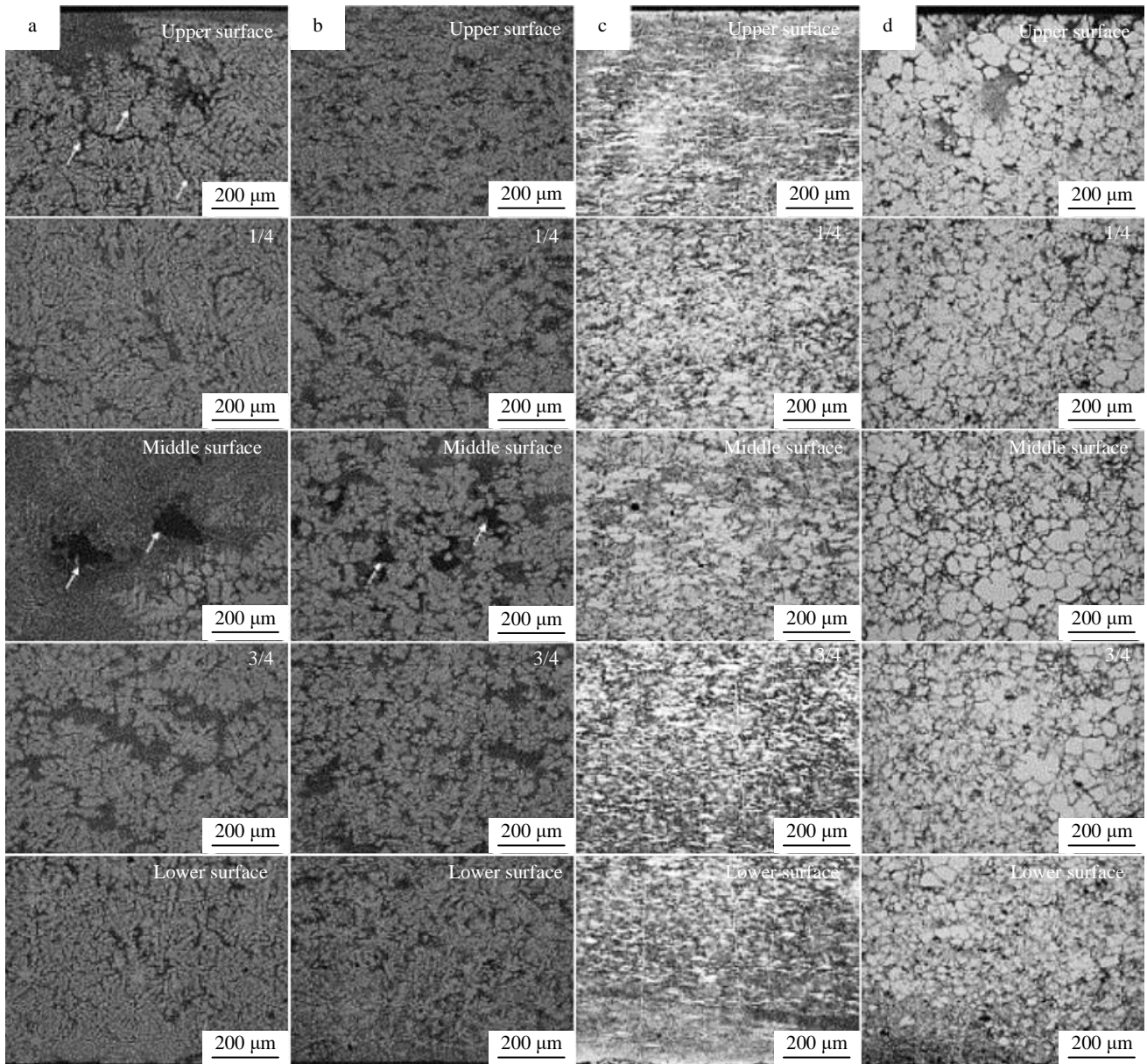


图 2 不同工艺条件制备铸轧板坯的微观组织

Fig.2 Microstructures of twin-roll cast sheet prepared under different processing conditions: (a) 1#, (b) 2#, (c) 3#, and (d) 4#

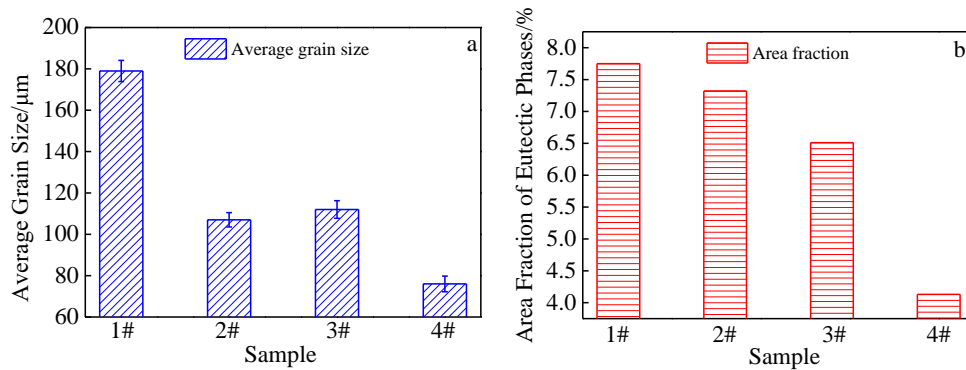


图 3 铸轧板坯平均晶粒度与共晶相面积分数

Fig.3 Average grain size (a) and area fraction of eutectic phases (b) of twin-roll cast sheet

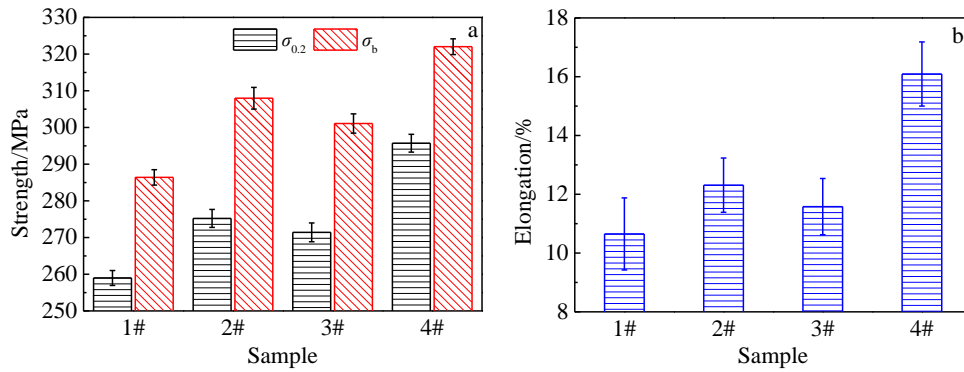


图 4 不同工艺条件制备铸轧板坯的力学性能

Fig.4 Mechanical properties of twin-roll cast sheet prepared under different conditions: (a) strength and (b) elongation

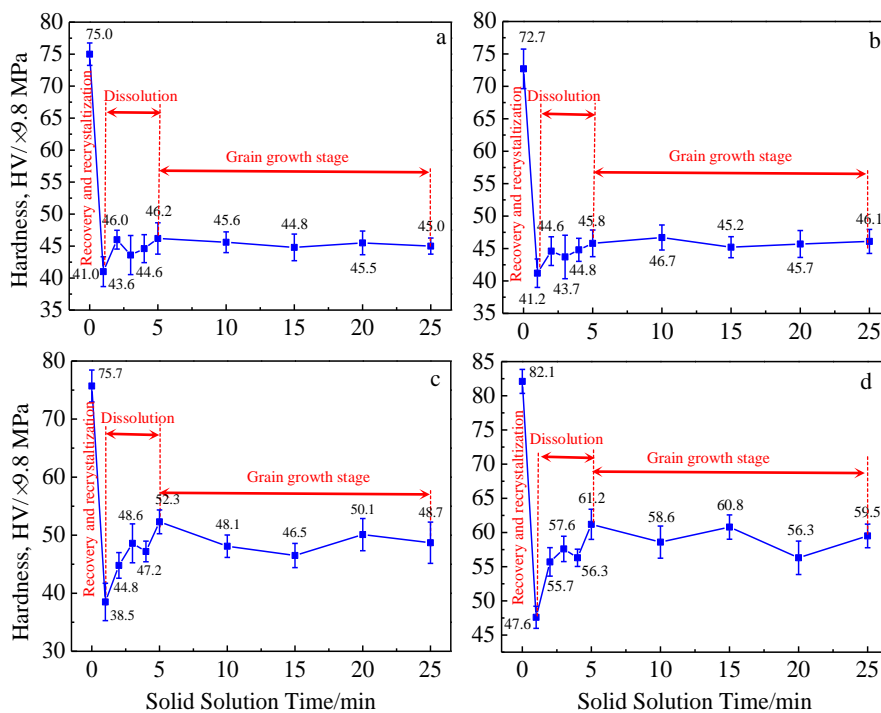


图 5 冷轧板材不同固溶处理时间后的硬度

Fig.5 Hardness of cold rolled sheets after solid solution treatment for different time: (a) 1#, (b) 2#, (c) 3#, and (d) 4#

滑移难以进行，从而使固溶体合金的强度与硬度升高。当保温时间延长至 5 min 的时候，硬度值升至最高约为 599.8 MPa，结合图 6d，说明此时的固溶强化效果最显著，可溶的中间金属相已全部分解并固溶入基体。随着保温时间继续延长而硬度值有所降低，说明此时的再结晶晶粒发生了明显的粗化现象，导致硬度值有所降低。因此，确定了最佳的固溶处理保温时间为 5 min。

固溶处理后不同工艺条件下板坯的再结晶晶粒组织如图 7 所示。由图可见，不同工艺制备的铝合金板材其再结晶后晶粒尺寸差别较大，1#试样的再结晶晶粒组织较为粗大，而且试样中存在个别异常长大的晶粒。当合

金凝固过程中添加 Al-Ti-B 晶粒细化剂或电磁场时，细化了晶粒，且凝固组织中晶界数量明显增多。因此，如图 7d 所示，微观组织中有较多细小的再结晶晶粒。

如图 8 所示，对再结晶后晶粒尺寸的分布情况进行了统计，1#试样再结晶晶粒尺寸为 19.83  $\mu\text{m}$ ，随着细化剂和电磁场的施加，再结晶晶粒尺寸分别减小至 18.89 和 18.91  $\mu\text{m}$ ，同时合金板材厚度方向晶粒大小变得均匀，4#试样的晶粒大小最为均匀，平均晶粒尺寸最小为 18.65  $\mu\text{m}$ ，这与合金的铸态组织有很大的关系，凝固组织越细小，晶界的数量越多，再结晶晶核数量越多，发生再结晶后晶粒尺寸越均匀且细小。

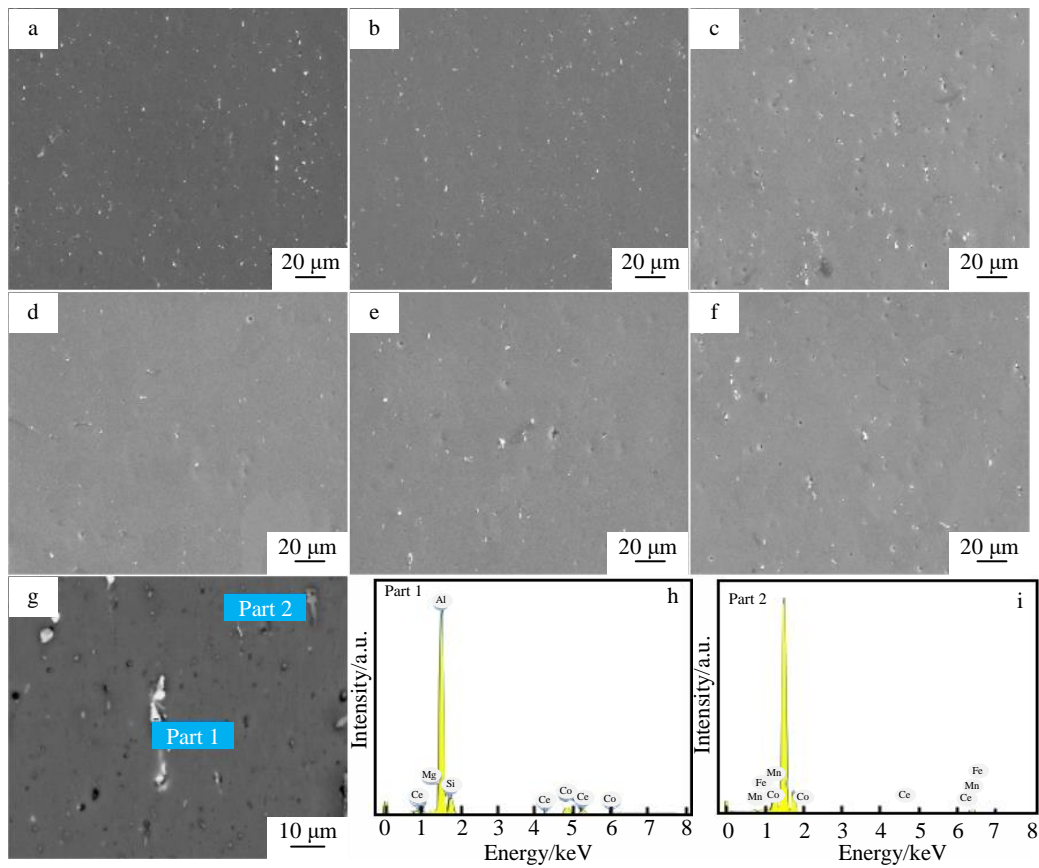


图 6 冷轧板材不同固溶处理时间淬火后SEM照片及能谱分析

Fig.6 SEM images of cold rolled sheets after solid solution treatment for different times: (a) 0 min, (b) 1 min, (c) 2 min, (d) 5 min, (e) 10 min, (f) 20 min; (g) crystal phase, EDS spectra of part 1 (h) and part 2 (i)

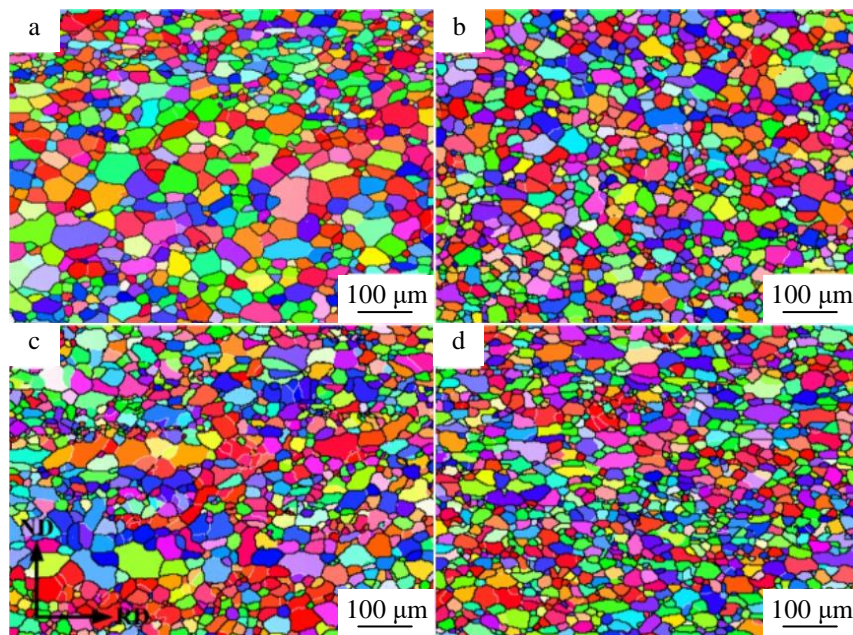


图 7 不同工艺制备合金板材固溶处理后再结晶晶粒组织

Fig.7 Recrystallization grain size of aluminum alloy sheets prepared under different processing conditions after solid solution treatment: (a) 1#, (b) 2#, (c) 3#, and (d) 4#

### 2.2.2 预时效处理工艺

如图 9 所示，固溶处理后立即进行预时效处理，预时效温度 150 °C，保温时间分别为 0、2、5、10、15、20 min。为了表征预时效处理后过饱和和溶质原子的稳定情况，对预时效后板材室温停放不同时间，即自然时效后的硬度进行了检测。铝合金汽车板在热处理后并不会

马上使用，汽车厂在冲压成形之前还需要经过运输、仓储等阶段。因此，为了模拟铝合金汽车板的实际生产工艺流程，本工作在预时效处理后室温停放 30 d后再对不同状态的板材进行烤漆硬化处理，以考察不同预时效工艺对抗自然时效稳定性和烤漆硬化响应速率的影响。

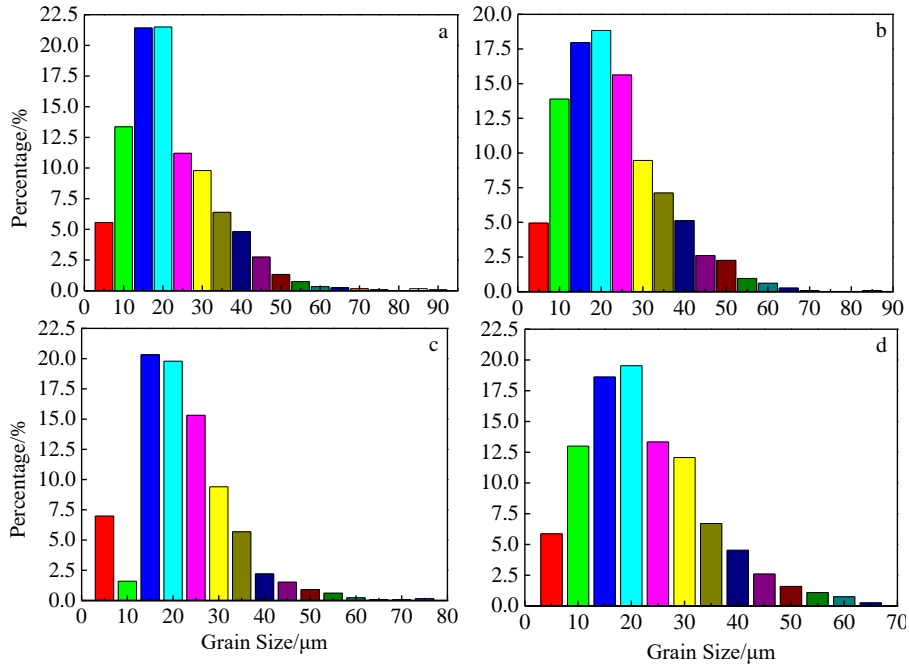


图 8 不同工艺制备铝合金板材固溶处理后再结晶晶粒尺寸分布

Fig.8 Recrystallization grain size distribution of aluminum alloy sheets prepared under different processing conditions after solid solution treatment: (a) 1#, (b) 2#, (c) 3#, and (d) 4#

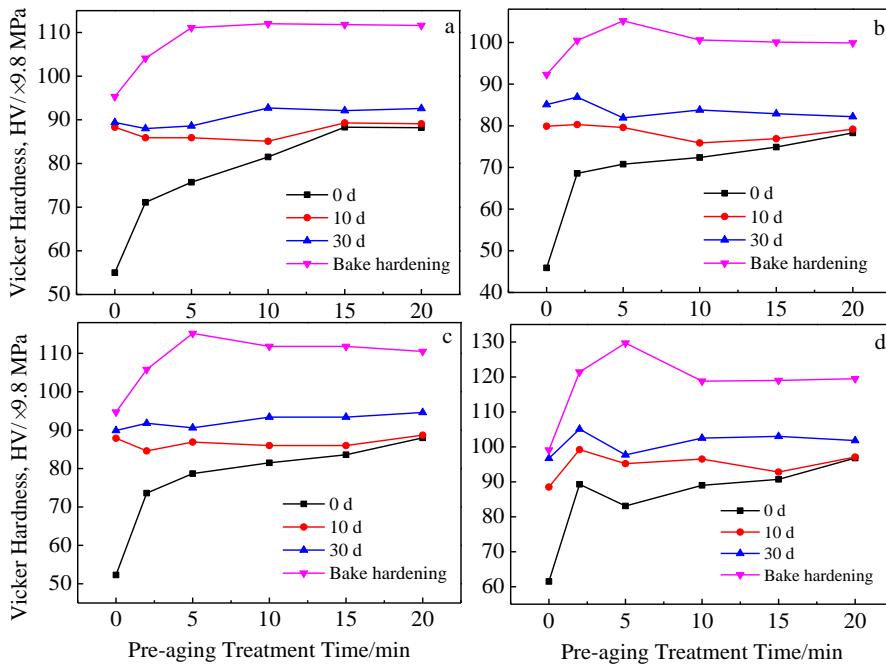


图 9 预时效工艺对不同室温停放时间板材硬度的影响

Fig.9 Effect of pre-aging treatment on the hardness of aluminum sheet with different holding time at room temperature: (a) 1#, (b) 2#, (c) 3#, and (d) 4#

当固溶处理后未进行预时效的合金板材，室温停放 10 d 的时候，硬度值升高较多，继续延长停放时间硬度值基本不变，但是烤漆处理后硬度值的增量非常小，时效硬化效果较差，无法满足汽车用铝合金板材抗凹陷性能的使用要求。此外，当预时效保温时间继续延长，预时效处理 10 和 30 d 后的硬度继续上升，这是因为随着预时效时间的延长，合金中析出的原子团簇逐渐增多，第二相的析出强化作用明显，硬度值逐渐升高。烤漆硬化处理后的硬度 (HV) 最高为 1271.1 MPa。

2.3 铸轧-直接冷轧薄板热处理态力学性能

2.3.1 成形性能

根据上面确定的最佳的固溶处理和预时效处理工艺，对铝合金板材试样固溶和时效处理后不同方向进行拉伸实验。如式 (1) 所示，计算出不同工艺条件合金板材的加工硬化指数  $n$  值与塑性应变比  $r$  值，结果如表 2 所示。

$$\bar{r} = \frac{(r_0 + 2r_{45} + r_{90})}{4} \quad (1)$$

式 (1) 与表 2 中， $n_0$ 、 $n_{45}$ 、 $n_{90}$  和  $r_0$ 、 $r_{45}$ 、 $r_{90}$  分别表示与轧制方向成 0°、45°、90° 3 个方向的  $n$  值与  $r$  值。

如图 10 所示，沿着不同方向  $n$ 、 $r$  值均存在明显差异，整体规律为沿着轧制方向最高，而沿着 45° 方向最低。且 2#、3# 和 4# 试样的平均  $r$  值分别为 0.71、0.69、0.75，明显优于 1# 试样的 0.66。

这是因为随着晶粒细化剂和电磁场的施加，电磁振荡效应均匀了凝固过程中的溶质场与温度场，消除了晶核择优生长的条件，使得合金中形成了更多的等轴晶或者蔷薇状晶，提高了合金微观组织的均匀性。4# 试样的平均  $r$  值最大为 0.75，说明其抵抗厚度方向变薄的能力优于其他试样，提高了合金板材的冲压成形性能。综上所述，可以发现实验合金板材存在一定的各向异性，这也必然会对合金板材在后续的深冲成形过程产生一定的影响。因此，如何通过微观组织调控来控制  $r$  值的大小，最终提高合金板材的冲压成形性能就显得至关重要。

2.3.2 力学性能

合金板材在 560 °C 下保温 5 min，水淬后立即在 150 °C 下保温 5 min，室温停放 30 d 后在 175 °C 下保温 30 min 烤漆处理后的力学性能数据如表 3 所示。无论是预时效态还是烤漆硬化处理状态，晶粒细化剂和电磁场的应用均会提高合金板材的强度和延伸率，这是因为组织中等轴晶的比例显著增加且再结晶晶粒变得细小均匀，提高了对变形过程裂纹扩展的阻碍能力。

通过对比屈服强度发现，1# 试样的烤漆硬化增量为 118 MPa，随着晶粒细化剂的添加和电磁场的应用，烤漆硬化增量均有所提高，在 4# 工艺条件下提高至最大为 141 MPa，满足了汽车用铝合金板材烤漆硬化处理后对抗凹陷性能的要求。

表 2 不同工艺条件下铝合金板材硬化指数  $n$  值和塑性应变比  $r$  值

Table 2 Strain hardening exponent  $n$  and plastic strain ratio  $r$  of aluminum alloy sheet prepared under different processing conditions

Sample	$r_0$	$r_{45}$	$r_{90}$	$\bar{r}$	$n_0$	$n_{45}$	$n_{90}$	$\bar{n}$
1#	0.75	0.53	0.71	0.66	0.27	0.25	0.26	0.26
2#	0.76	0.64	0.73	0.71	0.27	0.26	0.27	0.26
3#	0.74	0.62	0.72	0.69	0.28	0.25	0.27	0.27
4#	0.82	0.67	0.77	0.75	0.28	0.27	0.28	0.28

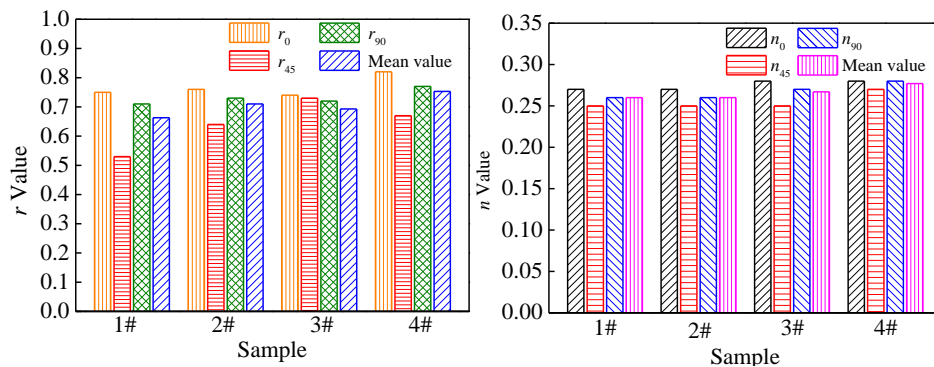


图 10 不同工艺制备铝合金板材预时效后的  $r$  值和  $n$  值

Fig.10  $r$  and  $n$  values of pre-aging aluminum alloy sheets prepared under different processing conditions after pre-aging treatment

表 3 板材预时效与烤漆硬化处理后力学性能

Table 3 Mechanical property of sheets prepared under different processing conditions after pre-aging and bake hardening treatment

Sample	Pre-aging treatment			Bake hardening treatment		
	$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	$\sigma_b/\text{MPa}$	$\delta/\%$	$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	$\sigma_b/\text{MPa}$	$\delta/\%$
1#	133	259	21.7	251	332	18.6
2#	139	267	24.3	266	353	18.9
3#	137	262	25.2	264	346	20.0
4#	141	274	26.3	282	366	19.3

### 2.3.3 断口分析

板材T4P态拉伸试样的断口形貌如图 11 所示。试样的断裂表面由一些细小的韧窝组成，属于典型的韧性断裂。1#试样板坯产生了严重的偏析缺陷，树枝晶组织较为粗大，这种凝固组织特征在预时效处理后仍然存在，其断口由明显的撕裂边缘和较少的韧窝组成。然而，随着细化剂和电磁场复合应用，断口中韧窝数量增加，而且韧窝的数量和深度均有所增加，且韧窝分布更加均匀。

## 3 讨论

铝合金板材从铝加工厂发货到汽车厂冲压成形期间，不可避免地要经历仓储、转运、停放等过程。如图 12 所示，若对淬火后的板材直接长时间室温停留，不稳定的过饱和固溶体将会发生自然时效，基体中过饱和的 Mg 和 Si 等溶质原子就会通过扩散聚集到一起，形成一定

尺寸的团簇（1），团簇（1）的形成消耗了一定数量的过饱和空位和溶质原子，且随着停放时间的延长，合金的屈服强度不断上升，不利于后续的冲压成形，而此时预时效处理的作用就显得尤为重要<sup>[24]</sup>。

文献[23]和[25]指出，Al-Mg-Si系铝合金在 100 °C 以上温度进行预时效处理时，基体中的 Mg、Si 溶质原子会聚集形成另一种原子聚集区，称之为团簇（2）。团簇（2）与团簇（1）的主要区别就是，这种团簇的 Mg/Si 比更接近于 1 且成分波动范围较窄、但强化效果弱于团簇（1），在烤漆硬化处理过程中更容易发生相的转变，基体中会直接形成数量、形貌、尺寸适当的强化相，实现快速时效响应。正是由于团簇（2）的形成，降低了基体的过饱和固溶度，抑制了室温停放时自然时效过程团簇（1）的形成，从而减缓了室温停放导致的屈服强度不断升高，使合金获得较低的屈服强度和较高的抗自然时效稳定性。

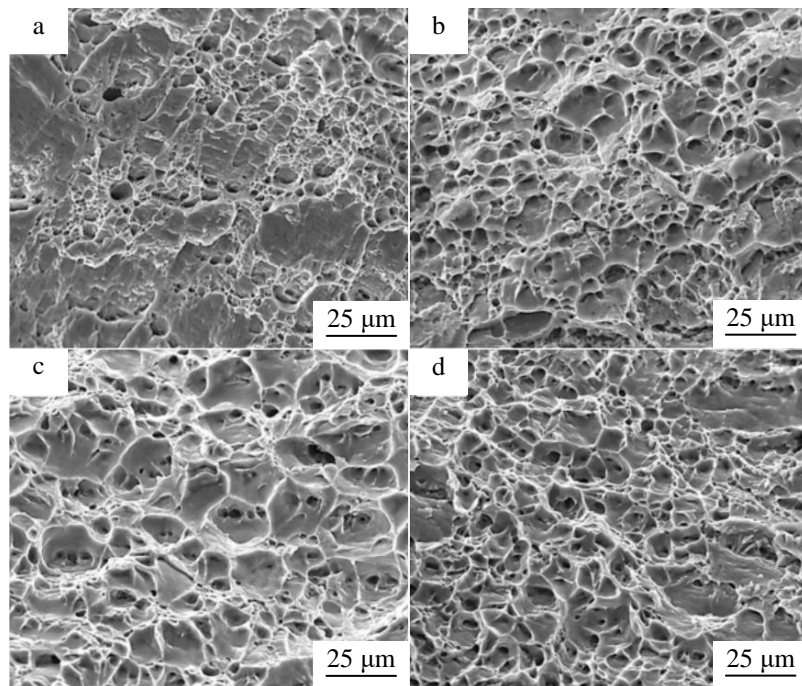


图 11 不同工艺制备铝合金板材预时效处理后拉伸断口形貌

Fig.11 Tensile fracture morphologies of alloy sheet prepared under different processing conditions after pre-aging treatment: (a) 1#, (b) 2#, (c) 3#, and (d) 4#



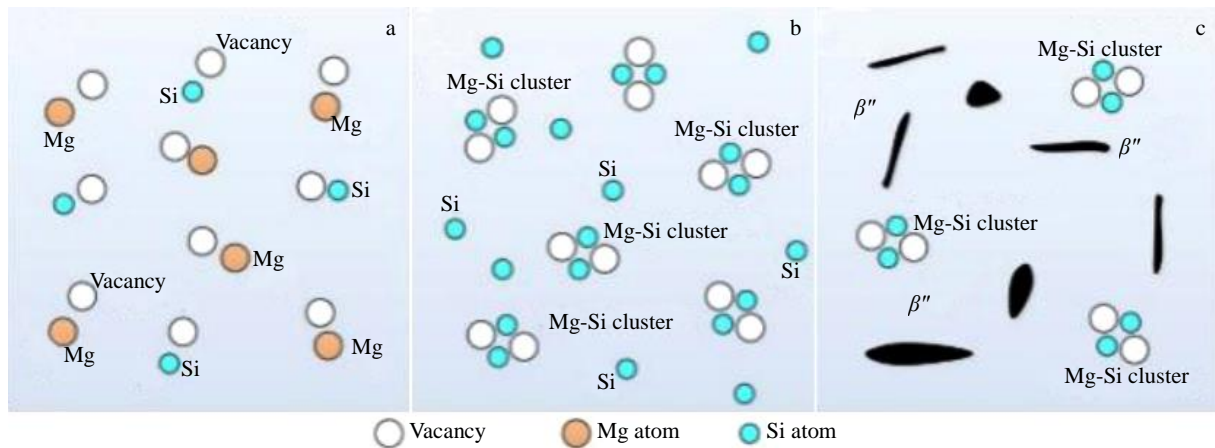


图 12 Al-Mg-Si系铝合金时效相析出示意图

Fig.12 Schematic of aging phase formation of Al-Mg-Si alloy: (a) solution treatment, (b) aging treatment, (c) bake hardening treatment

由于团簇(2)的化学成分与主要强化相 $\beta''$ 相的化学成分非常接近,在烤漆硬化处理过程会迅速向 $\beta''$ 强化相发生转变,增加 $\beta''$ 强化相的析出数量,提高合金板材的烤漆硬化增量。因此,团簇(2)也可以成为 $\beta''$ 强化相的预析出形核质点,预时效后这种预析出形核质点数量越多,烤漆硬化处理后形成的析出相数量也会越多,分布就会越密集,合金的强度与硬度越高,抗凹陷性能就会越好。前期的研究结果表明<sup>[25]</sup>:当固溶淬火后在140~180℃进行预时效处理时,保温时间小于10 min对Al-Mg-Si系铝合金汽车板的烤漆硬化效果最为显著。在预时效温度一定的前提下,预析出相的数量与保温时间息息相关,保温时间为2 min时预析出相较少,其 $r$ 值和烤漆硬化增量较低;保温时间为15~20 min时,预析出相形核质点已充分长大,导致预时效后屈服强度较高,不利于冲压成形。

## 4 结 论

1) 细化剂与电磁场的应用,平均晶粒尺寸由1#试样的179  $\mu\text{m}$ ,逐渐减小至2#和3#的107和112  $\mu\text{m}$ ,4#试样最小为76  $\mu\text{m}$ 。同时,晶界处共晶相面积分数,由1#试样的7.75%降低到4#试样的4.13%,力学性能有所提高,由1#试样的259 MPa、296 MPa、10.7%提高到4#试样的296 MPa、322 MPa、16.1%。

2) 当固溶处理保温时间小于5 min时,随着保温时间的延长,硬度(HV)逐渐升高,由4#试样保温时间1 min时466.5 MPa升高至保温5 min时的599.8 MPa,此时,固溶强化效应占据主导作用。继续延长保温时间,硬度值趋于稳定。因此,为了避免再结晶晶粒粗化,确定了最佳固溶处理保温时间为5 min。

3) 预时效处理可以显著增强合金板材的抗自然时

效稳定性,提高合金板材的冲压成形性能。当保温时间为5 min时,室温停留10 d后硬度值已趋于稳定,延长室温停留时间至30 d,硬度值也没有明显的升高,而此时烤漆硬化处理后的硬度最高为1271.1 MPa。预时效对 $r$ 值影响较大,由1#试样的平均 $r$ 值0.66提高到4#试样的平均 $r$ 值0.75。

## 参考文献 References

- [1] Li H H, Hu Z L, Hua L *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2019, 48(1): 1029
- [2] Ding Qingwei(丁清伟), Zhang Di(张迪), Hou Shengli(侯胜利). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2019, 48(8): 2661
- [3] Wang Zhutang(王祝堂). *Light Alloy Fabrication Technology*(轻合金加工技术)[J], 2019, 47(12): 32
- [4] Wang Zhutang(王祝堂). *Light Alloy Fabrication Technology*(轻合金加工技术)[J], 2020, 48(2): 36
- [5] Wang Zhutang(王祝堂). *Light Alloy Fabrication Technology*(轻合金加工技术)[J], 2020, 48(2): 66
- [6] Wang Zhutang(王祝堂). *Light Alloy Fabrication Technology*(轻合金加工技术)[J], 2019, 47(10): 27
- [7] Tisza M, Czinege I. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*[J], 2018, 1(4): 229
- [8] Misra A K. *Metallurgical Transactions A*[J], 1985, 16(7): 1354
- [9] Zhai L L, Wang Q, Zhang J W *et al.* *Ceramics International*[J], 2019, 45(14): 16873
- [10] Wu Y F, Zhang X L, Xu X F *et al.* *Journal of Energy Storage*[J], 2020, 31: 101567
- [11] Xuan W D, Ren Z M, Li C J. *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2015, 620: 10

- [12] Li Q D, Shen J, Qin L *et al.* *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2019, 274: 116 308
- [13] Li P, Ren S, Jiang D *et al.* *Journal of Crystal Growth*[J], 2016, 437: 14
- [14] Shen Z, Zhou B F, Zhong Y B *et al.* *Journal of Crystal Growth*[J], 2019, 517: 54
- [15] Hu Y, Wang L, Yao J H *et al.* *Surface and Coatings Technology*[J], 2020, 383: 125 198
- [16] Li S J, Jiang T, Wang J Y *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 2019, 757: 14
- [17] Li S J, Wei B W, Yu C *et al.* *Journal of Materials Research and Technology*[J], 2020, 9(3): 3304
- [18] Li S J, He C, Fu J Y *et al.* *Materials Characterization*[J], 2020, 161: 110 145
- [19] Sun K M, Li L, Chen S D *et al.* *Materials Letters*[J], 2017, 190: 205
- [20] Su X, Xu G M, Jiang D H. *Materials Science and Engineering A*[J], 2014, 599: 279
- [21] Su X, Wang S J, Ouyang X *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 2014, 607: 10
- [22] Chen G, Li J T, Yin Z K *et al.* *Materials Characterization*[J], 2017, 127: 325
- [23] Gao G J, Li Y, Wang Z D *et al.* *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2018, 753: 457
- [24] Gao G J, He C, Li Y *et al.* *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2018, 28: 1
- [25] Birol Y. *Materials Science and Engineering A*[J], 2005, 391: 175

## Research of Heat Treatment Process of AA6022 Aluminum Alloy Sheet Prepared by Electromagnetic Oscillation Twin Roll Casting

He Chen<sup>1,2</sup>, Zhao Yuhui<sup>1,2</sup>, Zhao Jibin<sup>1,2</sup>, Wang Zhiguo<sup>1,2</sup>, He Zhenfeng<sup>1,2</sup>

(1. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

(2. Institutes for Robotics and Intelligent Manufacturing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110169, China)

**Abstract:** Based on the principle of sub-rapid solidification, AA6022 aluminum alloy sheets for automotive were successfully prepared by electromagnetic oscillation twin roll casting technology. In order to improve the comprehensive mechanical properties of the end products, the heat treatment process of the sheet was studied. Combined with OM, SEM, EBSD, macro hardness and tensile test, the effects of different heat treatment parameters on the microstructure and mechanical properties of sub-rapid solidification sheet were studied. The results show that the composite application of Al-Ti-B grain refiner and electromagnetic field can significantly improve the proportion of fine equiaxed grains. Solution + pre-aging treatment can significantly inhibit the natural aging hardening effect, enhance the natural aging stability of alloy sheet, and improve the stamping formability and paint hardening increment of alloy sheet. Under the optimized conditions (560 °C×5 min+150 °C×5 min+30 d at room temperature+175 °C×30 min), the yield strength, tensile strength, elongation, macro hardness and plastic strain ratio of the sheet increase from 259 MPa, 296 MPa, 10.7%, 466.5 MPa and 0.66 of sample 1# to 296 MPa, 322 MPa, 16.1%, 599.8 MPa and 0.75 of sample 4#, respectively.

**Key words:** AA6022 aluminum alloy; electromagnetic twin roll casting; heat treatment process; microstructure; mechanical properties

---

Corresponding author: Zhao Jibin, Researcher, Ph. D., Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, P. R. China, Tel: 0086-24-83601252, E-mail: jbzhaos@sia.cn