

# 中间退火工艺对6111铝合金板材 微观组织的影响研究

田 燕<sup>1</sup>, 赵岭玉<sup>1\*</sup>, 朱士泽<sup>2</sup>

<sup>1</sup>沈阳理工大学材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳

<sup>2</sup>中国科学院金属研究所沈阳材料国家研究中心, 辽宁 沈阳

收稿日期: 2025年12月10日; 录用日期: 2026年1月6日; 发布日期: 2026年1月19日

## 摘 要

采用光学显微分析、扫描电子显微镜观察、电子背散射衍射分析、差示扫描量热分析、拉伸试验等方式对不同中间退火工艺的6111铝合金板材的显微组织、织构及力学性能进行了研究。结果表明, 退火后热轧板材的第二相有 $\alpha$ -AlFeMnSi、Mg<sub>2</sub>Si、Q及Si相; 随着退火温度的升高, 第二相的数量呈先增加后减少的趋势。中间退火温度对固溶后板材的织构体积分数影响较大, 而退火前轧制变形量对固溶后板材的织构密度影响较大。低温下退火时, 退火前轧制变形量的增加会显著增强固溶后的Cube和旋转立方织构; 提高中间退火温度使得固溶后的再结晶织构分布随机化。

## 关键词

6xxx系铝合金, 冷轧, 中间退火, 再结晶, 织构

# Effect of Intermediate Annealing Process on Microstructure of 6111 Aluminum Alloy Sheet

Yan Tian<sup>1</sup>, Lingyu Zhao<sup>1\*</sup>, Shize Zhu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Materials Science and Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang Liaoning

<sup>2</sup>Shenyang National Laboratory for Materials Science, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang Liaoning

Received: December 10, 2025; accepted: January 6, 2026; published: January 19, 2026

\*通讯作者。

文章引用: 田燕, 赵岭玉, 朱士泽. 中间退火工艺对 6111 铝合金板材微观组织的影响研究[J]. 材料科学, 2026, 16(1): 63-72. DOI: 10.12677/ms.2026.161007

## Abstract

The microstructure, texture and mechanical properties of 6111 aluminum alloy plates with different intermediate annealing processes were investigated by means of optical microscopy analysis, scanning electron microscopy observation, electron backscatter diffraction analysis, differential scanning calorimetry analysis and tensile test. The results show that the second phases of the hot-rolled sheet after annealing include  $\alpha$ -AlFeMnSi, Mg<sub>2</sub>Si, Q and Si phases. With the increase of annealing temperature, the quantity of the second phase shows a trend of first increasing and then decreasing. The intermediate annealing temperature has a significant impact on the texture volume fraction of the sheet after solution treatment, while the rolling deformation before annealing has a greater influence on the texture density of the sheet after solution treatment. When annealing at low temperatures, the increase in the rolling deformation before annealing will significantly enhance the Cube and rotational cube textures after solution treatment. Increasing the intermediate annealing temperature randomizes the recrystallized texture distribution after solution treatment.

## Keywords

6xxx Series Aluminum Alloy, Cold Rolling, Intermediate Annealing, Recrystallization, Texture

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

汽车板用 6xxx 系铝合金通常需要热轧和多道次冷轧成形。在不同冷轧道次间增设中间退火工艺,可有效改善板材性能。对于 6xxx 系铝合金来说,中间退火工艺主要对板材的表面质量、最终的成形性等产生影响[1]-[3]。其中,比较重要的工艺参数有中间退火时间、中间退火温度和退火前后的冷轧形变量等[4]。例如,提高中间退火温度会使成品板材中再结晶组织占比增加,同时使成品板材的平面各向异性值减小,有利于成品板材成形性能的提升[5];而成品板材中组织组分的占比与合金中第二相及弥散相的尺寸及分布有关[6]。Liu [7]等人发现低温退火后板材中会形成大量的细小沉淀析出相,而这些沉淀析出相会钉扎晶界使得板材中产生较强的 M 和 P 再结晶组织;随退火温度的升高,再结晶的速度加快,沉淀相的析出对再结晶的影响随之减弱,最终板材中 M 和 P 组织的强度较低。文章等人[8]研究了中间退火后的轧制下压量对 6000 系铝合金成形性的影响,发现轧制态板材中的轧制组织的体积分数随退火后冷轧压下量的增加而增加,轧制组织中 S 组织占比较大。在固溶预时效处理后,立方带处形核产生的 Cube 组织和颗粒诱导动态再结晶(PSN)效应产生的 Cube + ND20 组织的体积分数占比随退火后终轧压下量的增加而增加,而其他形核机制产生的 R 以及 Brass-R 组织的体积分数占比随退火后终轧压下量的增加而减少;同时退火后终轧压下量较大时,屈服强度较低,有利于成形。邓运来等人[9]研究指出,随着中间退火温度的上升,T4P 态下板材中促进再结晶形核的 AlFeSi 相以及抑制 PSN 效应的弥散相的尺寸逐渐减小,数量逐渐增多;同时板材中的旋转立方组织、高斯组织以及 P 组织的密度随之增加,板材的成形性能显著提升;其中,P 组织和旋转立方组织对成形性能的影响较大。

6111 铝合金是一种高合金含量的 6xxx 系列铝合金,多用于美式车型。目前,国内对 6111 铝合金中

间退火工艺的研究仍较少。本文对冷轧过程中间退火工艺进行设计,研究了退火温度及退火前轧制变形量对 6111 铝合金的微观组织、第二相及织构的影响,以期为该系合金轧制工艺的制定提供借鉴。

## 2. 实验材料与方法

试验材料选用南南铝加工有限公司生产的 9 mm 厚的 6111 铝合金热轧板材。首先通过差示扫描量热分析(DSC)探测板材中第二相的溶解温度。实验时的温度参数设置为室温至 600℃,加热速率为 10℃/min,保护气体为氩气。根据 DSC 结果,设置了不同的中间退火温度,同时设置了不同的退火前冷轧变形量,具体工艺方案见结果与分析章节表 1。在冷轧板材取样,进行 520℃/30 min 的固溶处理,水淬至室温,并进行一周的自然时效即 T4 处理。采用 Zeiss Gemini 型扫描电子显微镜(SEM)和 DMi8M 型光学显微镜(OM)表征材料的微观组织和第二相的演变;使用 Zeiss Sigma 500 扫描电子显微镜进行电子背散射衍射(EBSD)表征;用 X 射线微区衍射仪表征轧制面的织构。按照 GB/T228-2002《金属材料室温拉伸试样方法》标准使用 Instron 5982 电子万能试验机进行拉伸测试,每种板材的拉伸试验均沿轧制方向、与轧制方向成 45°、与轧制方向成 90°三个方向开展,获得强度、延伸率和塑性应变比  $r$ 。其中,塑性应变比  $r$  值按照 15%的拉伸应变来确定[10]。

## 3. 结果及分析

### 3.1. DSC 分析

对热轧板材取样进行 DSC 实验,根据曲线分析确定合适的退火温度,如图 1 所示。图 1 显示,305℃附近存在一个放热峰,且放热峰面积较小,说明该温度下会析出较少含量的弥散相,可能是  $\alpha$ -AlFeMnSi 或者  $Mg_2Si$  相[11]。在 539℃附近存在一个较大面积的吸热峰,说明热轧板材中有较多的第二相在该温度下溶解,溶解的相可能为  $Mg_2Si$  相和 Q 相。为进一步了解不同退火温度对应下的第二相的析出情况,选取 7 个温度参数(250℃、300℃、350℃、400℃、450℃、500℃及 550℃)对热轧板材进行中间退火处理,保温时间均为 30 min,冷却方式为空冷。

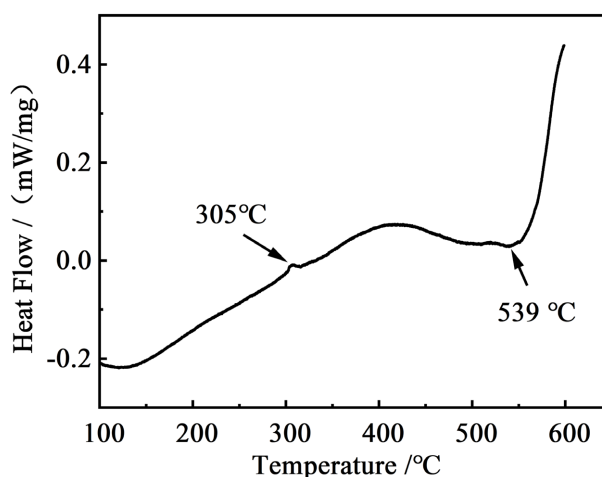


Figure 1. DSC curve of the hot-rolled sheet  
图 1. 热轧板材的 DSC 图

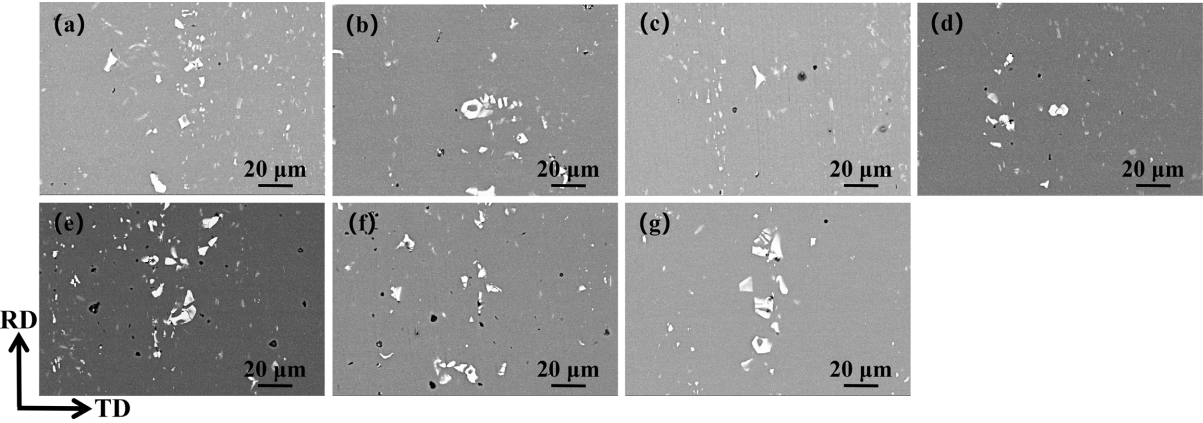
### 3.2. 不同温度下的第二相变化

图 2 是热轧板材经过不同温度退火后显微组织的 SEM 图。在进行不同温度的退火后,热轧板材中的

第二相类型以及数量均有所不同。由图 2 可知, 随着退火温度的升高, 热轧板材中的黑色第二相颗粒的数量变化趋势为先增加后减少; 其中, 500℃退火组织中的黑色第二相颗粒最多, 尺寸明显粗化; 而 550℃退火组织中黑色第二相颗粒明显减少, 块状和颗粒状的白色第二相占比较大; 另外以上退火组织中的第二相的分布方向均沿轧向分布。

为了更好地分析这些相的构成, 进一步对退火组织中的第二相进行 EDS 能谱分析, 结果表明, 亮白色相为  $\alpha$ -AlFeMnSi 相, 灰白色相为 Q 相(AlMgCuSi), 黑色相为  $Mg_2Si$  和 Si 相。显然, 退火温度的改变使得组织中第二相的种类和数量产生了明显变化。随着退火温度的升高, 第二相数量呈先增加后减少的趋势。

结合图 1 和图 2 结果, 选择 300℃和 550℃作为退火温度, 制定了轧制工艺, 如表 1 所示。



**Figure 2.** SEM observations of second-phase particles in hot-rolled sheets annealed at different temperatures: (a) 250℃, (b) 300℃, (c) 350℃, (d) 400℃, (e) 450℃, (f) 500℃, (g) 550℃

**图 2.** 热轧板材不同温度退火态第二相颗粒的 SEM 观察(a) 250℃, (b) 300℃, (c) 350℃, (d) 400℃, (e) 450℃, (f) 500℃, (g) 550℃

**Table 1.** Rolling process parameters  
**表 1.** 轧制工艺

	退火	一次冷轧压下量	退火	二次冷轧压下量	退火	三次冷轧压下量
1#	300℃/30 min	2 mm		2 mm		2 mm
2#		2 mm	300℃/30 min	2 mm		2 mm
3#		2 mm		2 mm	300℃/30 min	2 mm
4#	550℃/30 min	2 mm		2 mm		2 mm
5#		2 mm	550℃/30 min	2 mm		2 mm
6#		2 mm		2 mm	550℃/30 min	2 mm
7#		2 mm		2 mm		2 mm

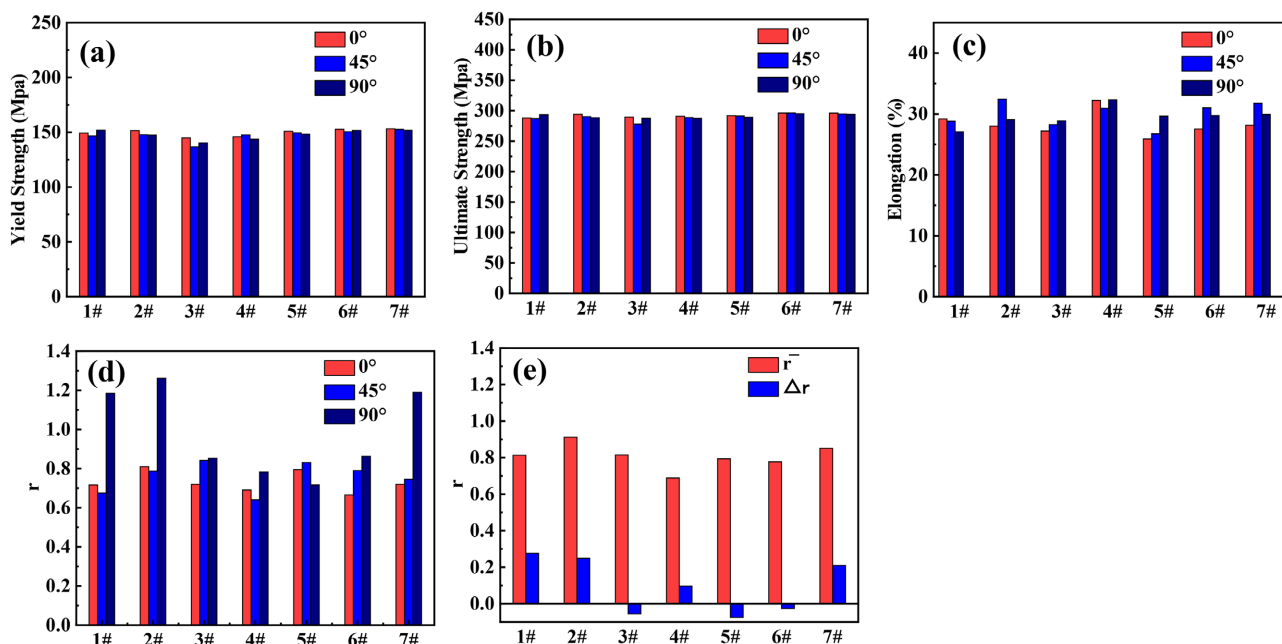
### 3.3. 拉伸性能分析

图 3 所示为 7 种轧制工艺板材经 T4 处理后的力学性能, 由图可知, 经 T4 处理后的各板材在与轧制方向呈 0°、45°、90°三个方向上的屈服强度、抗拉强度及延伸率均存在一定程度的差别, 而 4#、5#、6#、7#的强度差异较小; 4#的延伸率明显较高。薄板成型过程中在厚度方向上变形的难易程度可以通过  $\bar{r}$  值表征, 其可由公式  $\bar{r} = (r_{0^\circ} + 2 * r_{45^\circ} + r_{90^\circ}) / 4$  计算;  $\bar{r}$  值越大, 材料在厚度方向上的变形越困难, 即越不容易

变薄或变厚。除了  $\bar{r}$  值, 平面各向异性指数  $\Delta r$  也常用来评价板材成型性能, 其数值越大, 表明制耳率越高, 平面各向异性现象越显著; 其可由公式  $\Delta r = (r_{0^\circ} + r_{90^\circ} - 2 * r_{45^\circ}) / 2$  计算。2# 的  $\bar{r}$  值最大, 但  $\Delta r$  较高, 所以成形性能不是最优的; 3# 和 6# 的  $\Delta r$  值较低,  $\bar{r}$  值较高, 说明 3# 和 6# 的成形性能较好。

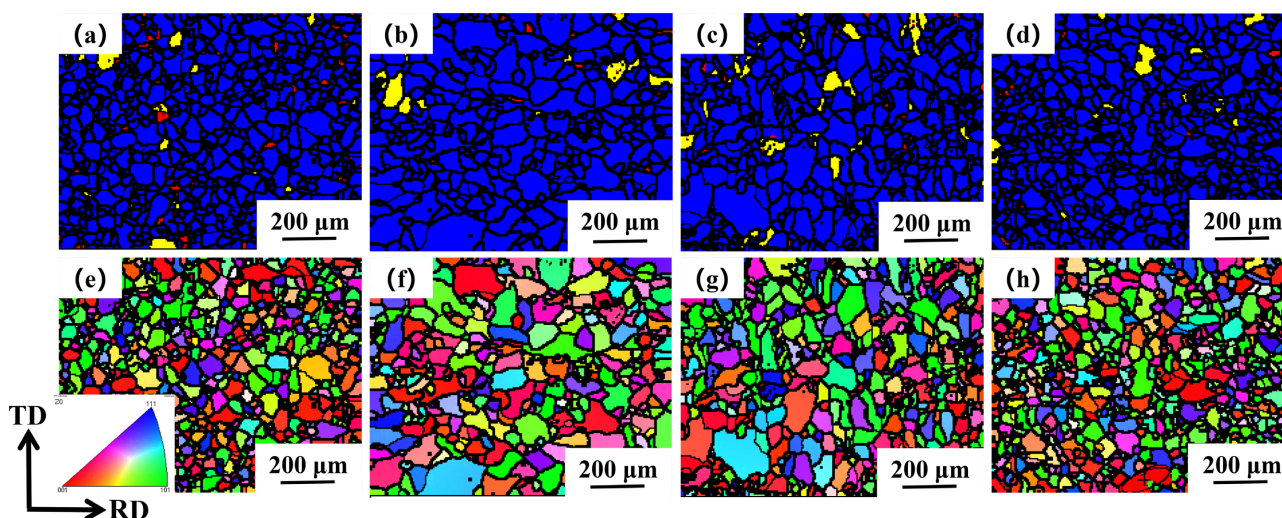
### 3.4. 微观组织分析

各板材的力学性能差异显然与其相应的显微组织及织构状态有关, 为了分析退火温度和退火后轧制变形量对晶粒形态和织构的影响, 这里选取 1#、3#、4#、7# 进行分析比较。从图 4 可以看到, 4 种板材中



**Figure 3.** Mechanical property of sheets with different rolling processes in T4 temper: (a) yield strength, (b) tensile strength, (c) elongation, (d)  $r$ -value, (e) average  $r$ -value and  $\Delta r$ -value

**图 3.** 不同轧制工艺板材 T4 态的力学性能(a) 屈服强度, (b) 抗拉强度, (c) 延伸率, (d)  $r$  值, (e)  $r$  均值及  $\Delta r$  值



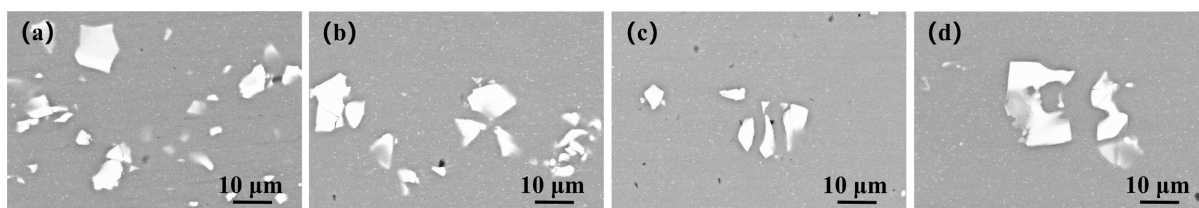
**Figure 4.** Recrystallization maps and IPF maps of sheets with different processes in T4 temper: (a), (e) 1#; (b), (f) 3#; (c), (g) 4#; (d), (h) 7#

**图 4.** 不同工艺板材 T4 态的再结晶图和 IPF 图(a), (e) 1#; (b), (f) 3#; (c), (g) 4#; (d), (h) 7#



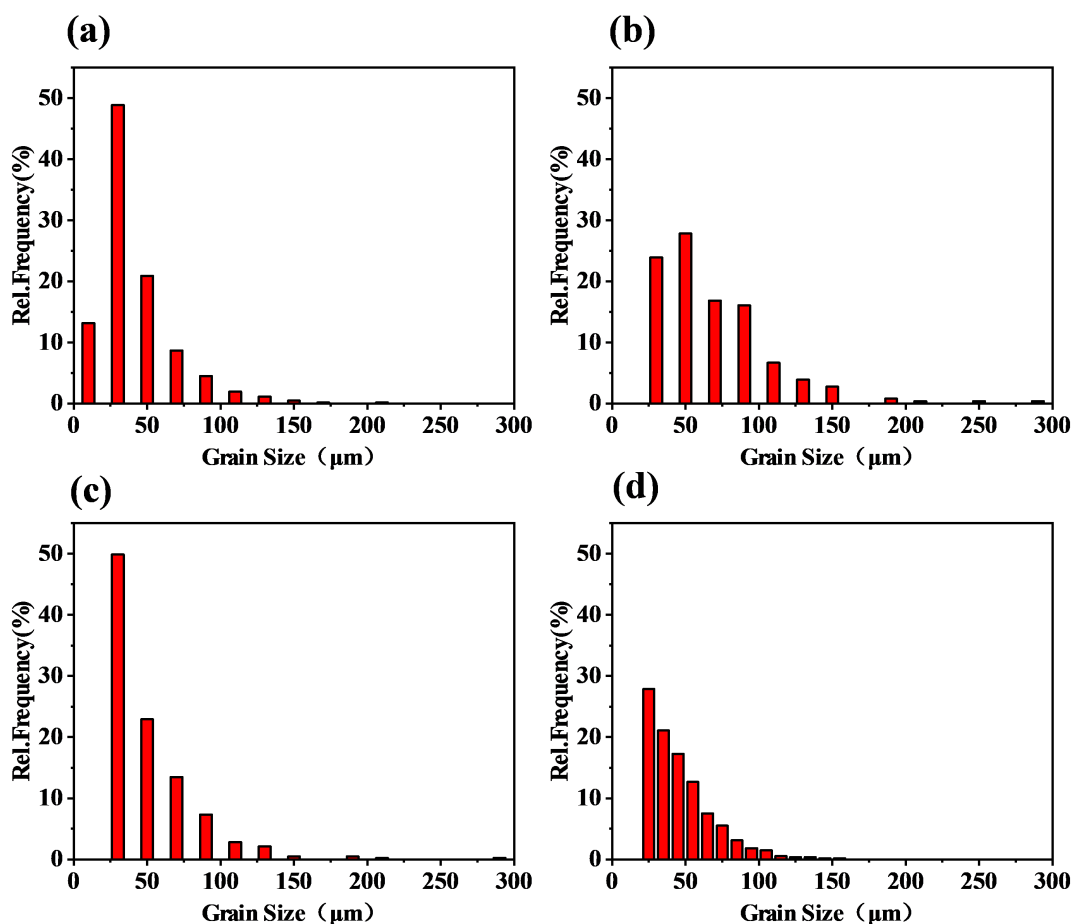
的晶粒均为典型的再结晶等轴晶,说明经过 T4 处理后,各板材均已完成再结晶。EBSD 图显示,同一微观组织中,晶粒尺寸差异明显,均存在明显的细晶区(晶粒尺寸较小的区域)和粗晶区(晶粒尺寸较大的区域),而且各板材的粗晶和细晶区对应的晶粒大小及所占的面积比例均不相同。研究表明[12],尺寸较小的晶粒所在区域一般与第二相颗粒的位置相对应;尺寸较大的第二相颗粒( $>1\text{ }\mu\text{m}$ )通过 PSN 效应促进再结晶形核;而细小的弥散相通过对位错的钉扎以及阻碍晶界的移动来细化再结晶晶粒,因此,晶粒内部的弥散相密度会影响再结晶晶粒的尺寸大小。由第二相 SEM 图(图 5)可知,T4 态板材中存在不同数量的第二相粒子,1#板材中第二相数量明显最多。

图 6 展示了再结晶晶粒尺寸的统计分析,由图可知,4 种合金的再结晶晶粒尺寸分布具有明显差异,



**Figure 5.** SEM observations of second-phase particles in sheets with different processes in T4 temper: (a) 1#, (b) 3#, (c) 4#, (d) 7#

图 5. 不同工艺板材 T4 态的第二相 SEM 观察(a) 1#, (b) 3#, (c) 4#, (d) 7#



**Figure 6.** Grain size maps of sheets with different processes after T4 treatment: (a) 1#, (b) 3#, (c) 4#, (d) 7#

图 6. 不同工艺板材经 T4 处理后的晶粒尺寸图(a) 1#, (b) 3#, (c) 4#, (d) 7#

1#板材 T4 态的晶粒尺寸主要分布在 30  $\mu\text{m}$  以下, 大尺寸晶粒较少; 而 3#板材 T4 态的晶粒尺寸主要分布在 30~100  $\mu\text{m}$  范围内, 50  $\mu\text{m}$  以下晶粒占比在 50%; 4#板材 T4 态的晶粒尺寸大多分布在 50  $\mu\text{m}$  以下; 7#板材 T4 态的再结晶晶粒尺寸分布与 1#板材相似, 最大晶粒尺寸为 158  $\mu\text{m}$ 。在 T4 态下, 1#、3#、4#、7#板材的晶粒尺寸平均值分别为 41.4  $\mu\text{m}$ 、68.5  $\mu\text{m}$ 、50  $\mu\text{m}$ 、45.9  $\mu\text{m}$ 。各板材固溶后的晶粒尺寸占比不同使得其平均尺寸产生了差异。通过图 3 的性能对比可知, 1#、3#、4#、7#板材 T4 态的性能差别主要在于延伸率和成形性能指标  $r$  均值; 因此, 这种由不同尺寸的晶粒搭配的组织对合金板材的最终性能产生了重要的影响。1#、3#、7#板材的退火温度分别为 300 $^{\circ}\text{C}$ 、300 $^{\circ}\text{C}$ 、550 $^{\circ}\text{C}$ , 对应的中间退火前冷轧变形量分别为 0%和 44.4%、0%; 结合晶粒尺寸的变化, 说明在低温下, 较低的退火前的冷轧变形量能够细化固溶后的晶粒。

对比各合金的晶粒尺寸可以看到, 1#板材 T4 态的粗晶区面积比 7#板材的粗晶区大, 且其细晶区占比较大, 这是由于中间退火降低了固溶处理前的变形储能, 使得再结晶的驱动力下降; 同时 1#板材中位错密度较大的变形区占比较 7#大, 这也验证了这一说法的正确性。对比 1#板材, 4#板材 T4 态的粗晶、细晶区的晶粒尺寸较大, 这是因为一方面, 中间退火温度的升高使得第二相的数量和种类减少, 而第二相在轧制过程中由于和铝基体变形不协同会使变形储能升高, 高含量第二相可增加再结晶驱动力; 另一方面, 中间退火温度的升高, 位错湮灭和重排的速度加快, 降低了热轧板材中的一部分变形能; 综合来看, 中间退火温度的升高降低了固溶时的再结晶驱动力, 同时第二相数量的变化引起再结晶形核位置的减少。

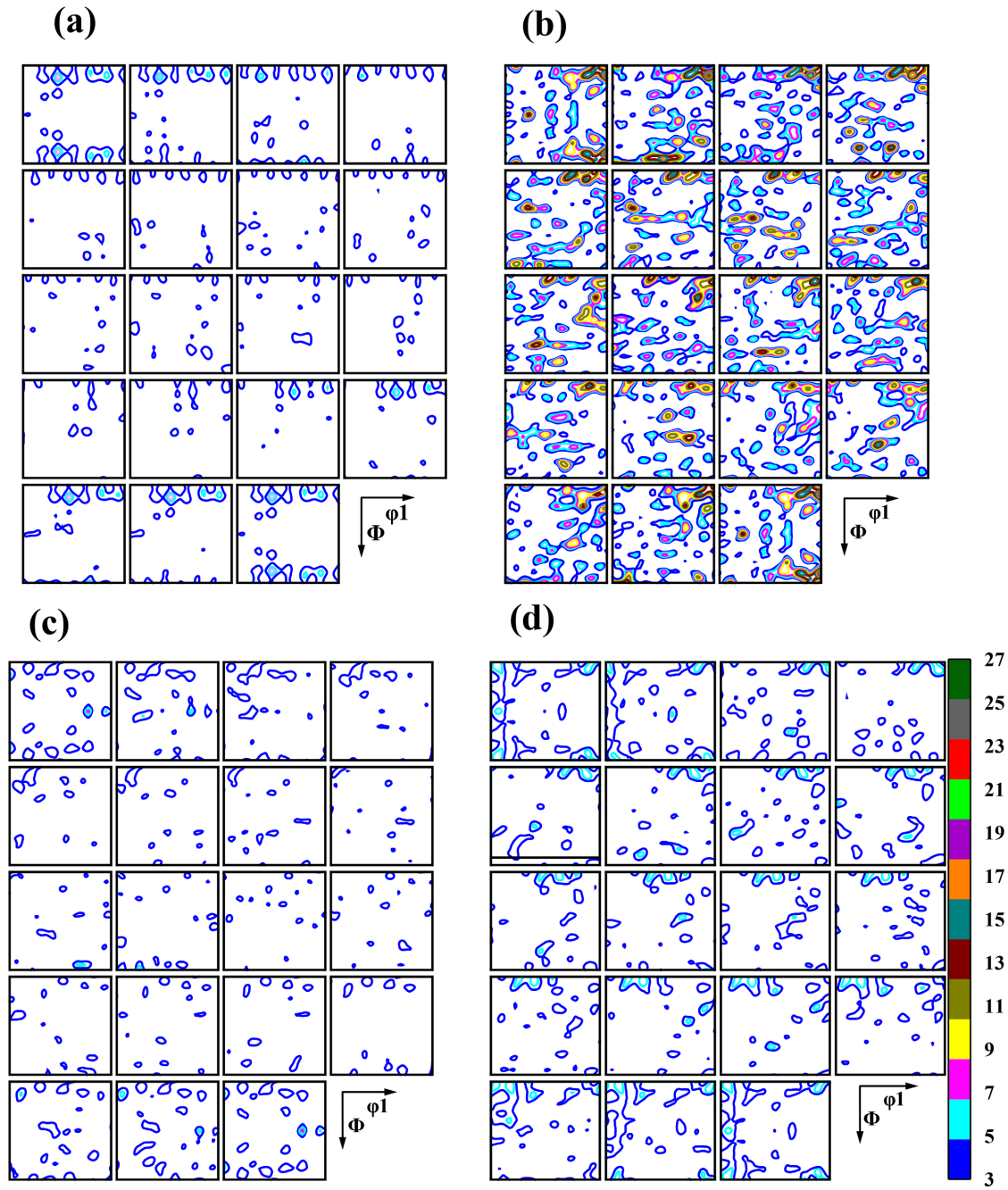
对比 3#板材, 1#板材的晶粒较小, 这是因为中间退火后较大的冷轧变形量使得板材整体应变储能较高; 同时较多的第二相在固溶处理过程中充当再结晶形核中心, 使得板材整体的再结晶形核率较大; 且第二相对再结晶晶粒长大还会起到一定的阻碍作用[13], 最终板材晶粒尺寸相对较为细小; 而 3#板材退火后的冷轧压下量较小, 板材的应变储能较低, 固溶过程中以晶界迁移和晶粒长大为主, 所以固溶后 3#板材中存在相对粗大的晶粒。

### 3.5. T4 态织构分析

图 7 示出了不同轧制工艺板材固溶处理后的再结晶织构。由图可知, 板材的织构组分和密度均有较大差异, 说明轧制工艺对最终的再结晶织构有比较大的影响。1#与 7#织构组分相似, 这与 EBSD 的微观组织结果相同。3#的织构组分密度明显最强。

表 2 列出了再结晶织构组分的密度和体积分数。在 T4 态下, 7#板材的再结晶织构组分主要包括 Cube{001}<100>、Goss{011}<100>和旋转立方{001}<110>为主。在轧制过程中加入退火工艺后, 板材 T4 态的织构组分均发生了变化。其中, 1#板材的再结晶织构组分以旋转立方{001}<110>和 Cube{001}<100>为主, 3#板材的再结晶织构组分较多, 以 Cube{001}<100>、Goss{011}<100>、F{111}<112>和旋转立方{001}<110>为主, 4#板材的再结晶织构组分以 Cube{001}<100>和旋转立方{001}<110>为主。3#板材 T4 态的旋转立方织构密度最大, 为 14.1; 说明晶粒取向集中; 4#板材 T4 态的旋转立方织构体积分数最大, 密度较小, 说明晶粒取向较为随机。对比 1#、7#板材可得, 在轧制过程中加入退火有益于减弱固溶后的再结晶织构; 对比 1#、3#板材可知, 退火前轧制变形量的增加会显著增强固溶后的 Cube 和旋转立方织构; 对比 1#、4#板材可得, 提高退火温度使得固溶后的再结晶织构分布随机化。同时由图 7 及表 2 可知, 低温下退火时, 退火前轧制变形量对固溶后板材的织构密度影响较大; 而退火温度对固溶后板材的织构体积分数影响较大; 这可能都与析出相有关[14] [15]。

冷轧变形量的增加使得位错密度增加, 进而增加了作为再结晶驱动力的形变储能, 有利于再结晶的进行; 冷轧这一塑性变形过程主要通过位错的滑移和孪生进行; 随着冷轧的进行, 会产生晶粒取向的



**Figure 7.** ODF maps of sheets with different rolling processes after T4 treatment: (a) 1#, (b) 3#, (c) 4#, (d) 7#  
**图 7.** 不同轧制工艺板材经 T4 处理后的 ODF 图(a) 1#, (b) 3#, (c) 4#, (d) 7#

**Table 2.** Recrystallization texture components  
**表 2.** 再结晶组织组分

	组织组分	密度	体积分数
1#	旋转立方{001}<110>	3.7	6.2
	Cube{001}<100>	3.3	11.6
	S{123}<634>	1.8	20



续表

3#	Cube{001}<100>	14	11.8
	Brass{011}<211>	8.1	9.1
	S{123}<634>	8.0	7.7
	Goss{011}<100>	3.4	7.3
	F{111}<112>	3.6	13.4
	旋转立方{001}<110>	14.1	10.8
4#	Cube{001}<100>	5.5	20.5
	S{123}<634>	2.62	10.7
	旋转立方{001}<110>	2.3	20.5
7#	Cube{001}<100>	6	17.6
	Goss{011}<100>	5.6	7.2
	S{123}<634>	3.9	20.2
	旋转立方{001}<110>	1.3	9.1

择优集中即织构。在冷轧后的退火过程中，温度的升高加快了位错的运动，位错攀移形成亚晶，亚晶通过合并和迁移两种方式长大形成再结晶晶粒；同时尺寸较大的第二相由于 PSN 效应也可作为再结晶形核中心，促进再结晶的形成，而尺寸较小且弥散分布的第二相会对位错产生钉扎作用，阻碍再结晶。此外，再结晶和回复的进行，均会引起局部取向差的增大。铝合金的再结晶织构是由 Cube 取向亚晶[16]及立方带形核的晶粒和由颗粒诱发形核(Particle Stimulated Nucleation, PSN)形核的晶粒之间的作用产生的[17]。结合 1#和 7#板材的固溶态组织及性能分析，可以得出，1#中变形组织较多，平面各向异性值较大，1#的再结晶织构占比较 7#低，说明再结晶的进行有利于成形性能的提高。铝合金板材在较低的中间退火温度下可能主要进行的是回复过程，形成了亚晶；同时回复过程消耗了一部分变形储能使得固溶过程中再结晶的驱动力下降，因此固溶后的板材中存在较多的 Cube 织构以及部分变形组织。在低温下退火时，退火前轧制变形量的增加可能对回复过程和 PSN 效应引起的再结晶过程均起到了促进的作用，退火后可能产生了一定比例的回复组织和再结晶组织；所以固溶后的板材中 Cube 织构与旋转立方织构占比基本相同。

#### 4. 结论

- (1) 对热轧板材进行不同温度的退火，随着退火温度的升高，第二相的数量呈先增加后减少的趋势。
- (2) 在轧制过程中加入中间退火步骤有益于减弱固溶后的再结晶织构；中间退火前轧制变形量的增加会显著增强固溶后的 Cube 和旋转立方织构；提高中间退火温度使得固溶后再结晶织构分布随机化。
- (3) 由 ODF 图及再结晶织构组分表可知，低温下退火时，中间退火前轧制变形量对固溶后板材的织构密度影响较大；而中间退火温度对固溶后板材的织构体积分数影响较大。

#### 参考文献

- [1] 丁轩, 甘玉荣, 张春菊, 等. 中间退火工艺对 6016 铝合金组织与性能的影响[J]. 金属热处理, 2021, 46(8): 174-179.
- [2] 李大林, 朱鹏程, 王萍, 等. 中间退火处理对 6016 冷轧铝合金板 Roping 纹和组织性能的影响[J]. 金属热处理, 2021, 46(11): 157-160.
- [3] 段晓鸽. 汽车用 6000 系铝合金的各向异性及烤漆硬化效应研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京科技大学, 2021.

- 
- [4] Wang, X., Guo, M., Chapuis, A., *et al.* (2015) The Dependence of Final Microstructure, Texture Evolution and Mechanical Properties of Al-Mg-Si-Cu Alloy Sheets on the Intermediate Annealing. *Materials Science & Engineering A*, **633**, 46-58. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.02.029>
- [5] 孙宁, 王经涛, 徐志远, 等. 中间退火工艺对 6016 铝合金板材组织及性能的影响[J]. 锻压技术, 2024, 49(12): 166-175.
- [6] 孟双, 徐志远, 杨立民, 等. 退火工艺对 6016 铝合金板材组织性能的影响[J]. 轻合金加工技术, 2025, 53(6): 40-48.
- [7] Liu, W.C. and Morris, J.G. (2007) Recrystallization Textures of the M{113} <110> and P{011} <455> Orientations in a Supersaturated Al-Mn Alloy. *Scripta Materialia*, **56**, 217-220. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2006.10.011>
- [8] 文章. 汽车用 6000 系铝合金板材成形性能研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2016.
- [9] 邓运来, 王冯权, 欧世声, 等. 不同温度中间退火对 6016 铝合金板材组织、组织和力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2019, 48(8): 168-172.
- [10] 冷启明. 薄板深冲性能  $r$  值和  $n$  值的测定[J]. 汽车科技, 1980(4): 24-31.
- [11] 王旭成. 基于 6016 铝合金铸轧板坯的汽车板制造工艺与组织调控研究[D]: [博士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2024.
- [12] 杜进清. 新型 Al-Mg-Si-Cu-Zn 系合金微区异构组织精准调控及其强塑性作用机理[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京科技大学, 2025.
- [13] Murayama, M., Hono, K., Miao, W.F., *et al.* (2001) The Effect of Cu Additions on the Precipitation Kinetics in an Al-Mg-Si Alloy with Excess Si. *Metallurgical and Materials Transactions A*, **32**, 239-246. <https://doi.org/10.1007/s11661-001-0254-z>
- [14] 宫浩, 孔德斌, 郭立娜, 等. 中间退火处理对 AlMgSiCu 铝合金冷轧板组织性能的影响[J]. 金属热处理, 2021, 46(9): 129-132.
- [15] 王启盼. 汽车车身用 6016 铝合金组织演变与性能研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 东北大学, 2020.
- [16] Chapelle, S.D.L. (2001) Cube Recrystallization Textures in a Hot Deformed Al-Mg-Si Alloy. *Scripta Materialia*, **45**, 1387-1391. [https://doi.org/10.1016/S1359-6462\(01\)01174-5](https://doi.org/10.1016/S1359-6462(01)01174-5)
- [17] 贾志宏, 丁立鹏, 吴赛楠, 等. 汽车车身用 6000 系铝合金板材微观组织与热处理工艺的研究进展[J]. 材料工程, 2014(12): 104-113.