

罗庆洪, 姜艳芝, 汤斌兵, 等. 7055 铝合金中纳米析出相数密度的测定与修正方法[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2025, 44(5): 621-626. DOI: 10.11956/j.issn.1008-0562.20250068

LUO Qinghong, LOU Yanzhi, TANG Binbing, et al. Determination and correction method for the number density of nano-precipitates in 7055 aluminum alloy[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2025, 44(5): 621-626. DOI: 10.11956/j.issn.1008-0562.20250068

7055 铝合金中纳米析出相数密度的测定与修正方法

罗庆洪¹, 姜艳芝¹, 汤斌兵², 贾荣光³, 李致良⁴

(1. 中国航发北京航空材料研究院, 北京 100095; 2. 南昌大学 物理与材料学院, 江西 南昌 330031;

3. 国标(北京)检验认证有限公司 电镜中心, 北京 110407; 4. 普锐斯(上海)贸易有限公司, 上海 201101)

摘 要: 为测定航空用高强度 7055 铝合金中纳米析出相的数密度, 采用透射电子显微镜中心暗场成像方法观察纳米析出相, 并进行统计分析, 通过双束会聚束电子衍射 (CBED) 花样分析获取试样局部厚度, 考虑到测试区边缘第二相颗粒被切割导致数密度测量值偏高的情况, 运用体视学方法, 对纳米颗粒数密度进行修正。研究结果表明: 7055 铝合金中测试区数密度修正系数为 0.928, 修正后 3 nm 以上析出相的数密度为 $8.9 \times 10^{11} \text{ mm}^{-3}$ 。研究结论为探讨 7055 铝合金中的析出强化效果、改进热处理工艺和优化材料性能提供数据支撑。

关键词: 铝合金; 析出相; 会聚束电子衍射; 薄晶体厚度; 数密度

中图分类号: TG157; TB31

文献标志码: A

文章编号: 1008-0562(2025)05-0621-06

Determination and correction method for the number density of nano-precipitates in 7055 aluminum alloy

LUO Qinghong¹, LOU Yanzhi¹, TANG Binbing², JIA Rongguang³, LI Zhiliang⁴

(1. AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China; 2. School of Physics and Materials Science, Nanchang University, Nanchang 330031, China; 3. Electron Microscope Center, Guobiao (Beijing) Testing and Certification Company Limited, Beijing 110407, China; 4. PRESI Trade Company Limited, Shanghai 201101, China)

Abstract: In order to test the number density of nano-precipitates in the high-strength 7055 aluminum alloy for aviation, the nano-precipitates were observed using the central dark field image method of transmission electron microscopy (TEM), and the statistical analysis was carried out. The local thickness of the sample was obtained through analysis of the two-beam convergent beam electron diffraction (CBED) pattern. Considering that measurement values for number density may be higher due to the cutting of second phase particles at the edge of the observation area, a stereological method was employed to correct the number density of nanoparticles. The research indicates that the correction coefficient for number density in the test area of 7055 aluminum alloy is 0.928, and after correction, the number density of precipitates larger than 3 nm is $8.9 \times 10^{11} \text{ mm}^{-3}$. The research conclusions provide data support for exploring precipitation strengthening effects, improving heat treatment processes, and optimizing material properties of 7055 aluminum alloy.

Keywords: aluminum alloy; precipitates; convergent beam electron diffraction; thin foil thickness; number density

0 引言

7055 铝合金具有良好的比强度、断裂韧性以及抗疲劳性能, 是制造飞机大梁、机翼等关键承力结构件的理想材料, 被广泛应用于航空航天等重要领域^[1-3]。7055 铝合金的性能与其微观组织结

构密切相关, 弥散分布的纳米析出相是超高强铝合金微观结构的重要组成部分^[4-5], 其尺寸、形貌以及数密度等特征, 对合金的强化效果起着决定性作用, 进而直接影响材料的综合性能^[6-8]。准确测定纳米析出相的数密度, 对于深入了解 7055 铝

收稿日期: 2025-02-26 修回日期: 2025-04-12 接受日期: 2025-04-22 责任编辑: 张雯

作者简介: 罗庆洪 (1974-), 男, 湖北 武汉人, 博士, 高级工程师, 主要从事金属材料及热处理方面的研究。E-mail: qhluo@sina.cn

合金的强化机制,建立科学合理的微观结构与宏观性能之间的关系,以及指导成分优化和工艺改进等方面具有一定的现实意义。

目前,透射电子显微镜(TEM)和扫描透射电子显微镜(STEM)等技术是观察和分析纳米析出相的常用方法^[9-11]。关于数密度的测定,纳米析出相尺寸细小,常规检测手段难以准确识别和统计,因此关于数密度测定的相关研究并不多。文献[12]采用了会聚束电子衍射测厚度方法,测定了镁合金中析出相的数密度,但并未获得参与统计的颗粒最小尺寸。文献[13]探讨了 50 nm 以上析出相的数密度。目前,纳米尺度颗粒数密度的测定存在诸多问题,同时,测量结果偏差较大,难以真实反映纳米析出相对合金性能的影响规律。

本文采用透射电镜会聚束电子衍射技术测定 7055 铝合金中纳米析出相的数密度,从体视学角度分析测试区边缘第二相颗粒被切割的情况,运用统计学原理对数密度进行修正,建立修正模型,给出修正公式,进而得到准确可靠的数密度定量分析结果,为开发航空航天领域高性能材料提供技术支持。

1 试验材料与样品制备

试验用材料为超高强铝合金 7055 板材,厚度为 50 mm,化学成分见表 1。最终热处理工艺如下:待炉温升至 477 ℃后放入试样,保温 2 h,随后进行水淬处理。透射电镜试样制备过程如下:①在大块样品上切割尺寸为 10 mm×10 mm×0.5 mm 的薄片;②在保持薄片表面平整的前提下,采用不同粒度的砂纸(从 P200 到 P1200 逐步细化)对薄片进行研磨,该步骤用以去除切割痕迹和表面氧化层,同时逐步减小样品厚度;③当样品厚度小于 50 μm 时,用 P2000 的细砂纸打磨 2 个表面,直至完全去除上一步研磨痕迹;④用直径 3 mm 的冲头和模具将薄片冲出直径为 3 mm 的圆片;⑤用电解抛光法将 3 mm 圆片样品减薄至穿孔。

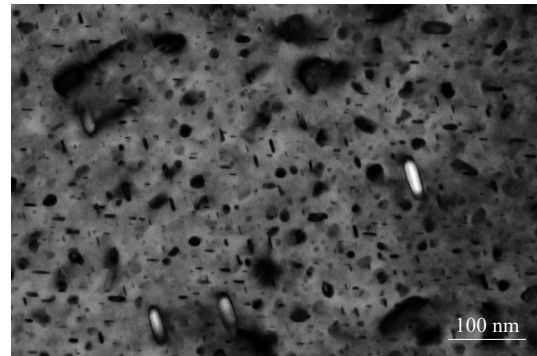
表 1 7055 铝合金的化学成分

Tab.1 chemical compositions of 7055 aluminum alloy			
成分	质量分数/%	成分	质量分数/%
Zn	7.60~8.40	Si	≤0.10
Mg	1.80~2.30	Ti	≤0.06
Cu	2.00~2.60	Cr	≤0.04
Zr	0.08~0.25	Mn	≤0.05
Fe	≤0.15	Al	余量

2 试验结果

2.1 析出相的透射电子显微镜观察

使用 FEI Tecnai G² F20 透射电子显微镜(TEM)观察 7055 铝合金的薄膜样品,加速电压 U 为 200 kV,电压波动范围为 ± 0.02 V/min,析出相见图 1(明暗场非同一视场)。可见多种纳米尺度析出相,其中包括简单立方结构析出相 Al_2ZnZr ,点阵参数 a 为 0.403 nm,呈球形或圆片状、相对均匀地分布在基体中。在选区电子衍射谱中可以看出析出相的衍射斑点与基体的衍射斑规则排列,部分斑点完全重合,表明析出相与铝基体(面心立方结构,点阵参数 a 为 0.409 nm)之间存在特定的取向关系,析出相 Al_2ZnZr 与基体之间的取向关系见文献[14]。



(a) 明场像



(b) 中心暗场像

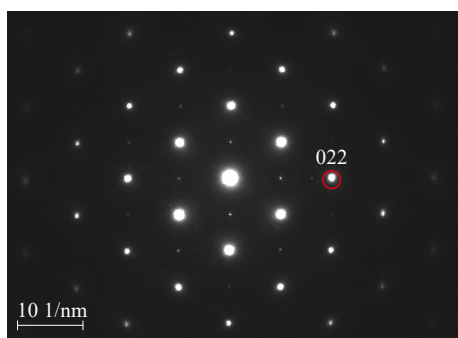
图 1 7055 铝合金中的析出相

Fig.1 precipitates in 7055 aluminum alloy

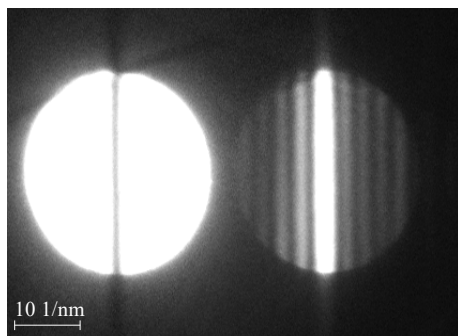
2.2 试样局部位置的 CBED 花样

铝基体的选区电子衍射(SAED)花样见图 2(a)。依据《微束分析 分析电子显微术 透射电镜选区电子衍射分析方法》(GB/T 18907—2013)^[15]进行衍射谱的测量与计算。结果表明,衍射谱中的一组强衍射斑中,距离透射斑最近的衍射斑对应的晶面间距 d_1 为 0.236 nm,此为铝基体 {111} 晶面

族的衍射;次近衍射斑晶面间距 d_2 为0.205 nm,此为铝基体{200}晶面族的衍射。两个衍射斑分别与透射斑连线,两条连线之间的夹角为 55° ,符合铝基体 $[01\bar{1}]$ 晶带轴衍射特征。图2(a)中红圈标记为(022)晶面产生的衍射斑。根据《微束分析 薄晶体厚度的会聚束电子衍射测定方法》(GB/T 20724—2021)^[6],倾转样品使仅(022)晶面的衍射处于强激发状态,得到图1(b)所示暗场像对应测试区在双束条件下的CBED花样,见图2(b)。



(a) $[01\bar{1}]$ 晶带轴的SAED花样



(b) (022)衍射束的CBED花样

图2 铝合金电子衍射花样

Fig.2 electron diffraction pattern of aluminum alloy

3 数据处理与分析

3.1 颗粒数密度的表征方法

材料中纳米尺度颗粒的数密度可以用单位体积内的颗粒数表示。7055铝合金析出相尺寸较小,低倍下很难观察,适宜采用透射电子显微术方法进行观察和统计。颗粒数密度的表征方法如下:将样品制备成透射电子束可以穿透的薄膜样品,在透射电镜下找到感兴趣区,拍摄感兴趣区第二相颗粒的中心暗场像,统计出暗场像所示测试区的颗粒总数 N ;采用会聚束电子衍射的方法,拍摄感兴趣区的双束会聚束电子衍射花样,分析得到感兴趣区的样品高度 t ;用测试区的颗粒总数 N 除以测试区的体积 V ,得到材料中纳米尺度析出相的

颗粒数密度。

上述方法中,存在一个问题,即在长、宽、高分别为 l_1 、 l_2 、 t 的长方体区域,边界切割作用产生的不完整颗粒会被统计为完整颗粒,统计颗粒总数偏大,数密度测试结果出现系统性高估的情况。为解决这一问题,引入体视学修正方法对误差进行修正,并通过多次重复试验验证数据的稳定性,最终获得准确可靠的第二相颗粒数密度测量结果。

3.2 第二相颗粒统计

颗粒总数的统计值直接影响数密度结果。采用Image J软件对图1(b)所示分析区域中的第二相颗粒进行自动统计,步骤如下。

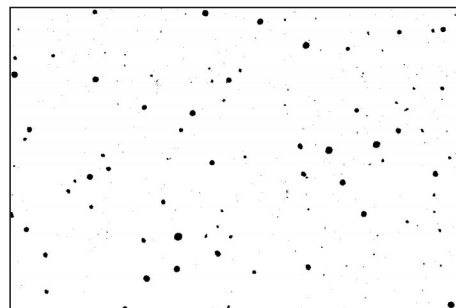
步骤1 设定图像的标尺,把图像转换为灰度图像,同步完成降噪和背底矫正。

步骤2 设置图像阈值的上下限,过滤图1(b)中亮度值位于阈值外的斑点。

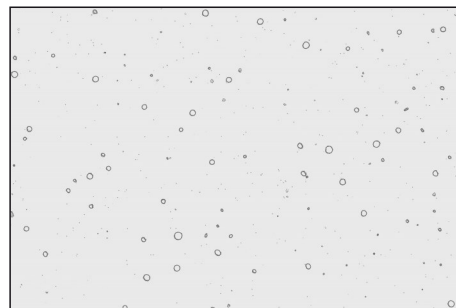
步骤3 对图像反相,突出显示第二相颗粒,结果见图3(a)。

步骤4 根据图像分辨率和颗粒尺寸分布情况,设置参与统计的颗粒尺寸 d 的最小值。统计时将互相重叠的颗粒或遗漏的情况逐一校正,输出统计结果。

测试区的析出相见图3。测试区中心暗场像分析结果见表2。测试区的颗粒总数 N 为108,参与统计的颗粒平均尺寸 $\bar{d}$ 为6 nm。



(a) 突出显示的析出相



(b) 参与统计的析出相($d > 3$ nm)

图3 测试区的析出相

Fig.3 precipitates in the test area

表2 测试区中心暗场像分析结果
Tab.2 analysis results of the central dark field image of the test area

l_1/nm	l_2/nm	N	$\bar{d}$
1 355	902	108	6

3.3 测试区试样厚度的测定

根据《微束分析 薄晶体厚度的会聚束电子衍射测定方法》(GB/T 20724—2021)^[16], 应用 CBED 方法分析图 1 (a) 对应位置铝合金薄试样的局域厚度。在图 2 (b) 所示 CBED 花样中, 测量透射盘与衍射盘之间的距离 R , 同时, 从衍射盘中心向外, 测量各个暗条纹到衍射盘中心的距离, 依次记为 $\Delta\theta_1, \Delta\theta_2, \dots$, 每个量测量 3 次, 计算平均值, 结果见表 3。

表3 CBED 花样测量结果
Tab.3 measurement data of CBED pattern

测量轮次	R/nm^{-1}	$\Delta\theta_1/\text{nm}^{-1}$	$\Delta\theta_2/\text{nm}^{-1}$	$\Delta\theta_3/\text{nm}^{-1}$	$\Delta\theta_4/\text{nm}^{-1}$
1	6.925	0.451	1.136	1.822	2.471
2	6.907	0.433	1.046	1.858	2.435
3	6.925	0.433	1.118	1.822	2.453
平均值	6.919	0.439	1.100	1.834	2.453

在双束近似条件下, (022)晶面衍射盘的强度分布^[17]为

$$I_{022} = \frac{\sin^2 \left[\pi t \sqrt{1 + (s\xi_{022})^2} / \xi_{022} \right]}{1 + (s\xi_{022})^2}, \quad (1)$$

式中: s 为偏离矢量, nm^{-1} ; ξ_{022} 为(022)晶面衍射束的消光距离, nm ; t 为薄晶体试样高度, nm 。

衍射盘内第 i 条暗条纹出现的条件为

$$\left(\frac{s_i}{n_i} \right)^2 + \left(\frac{1}{\xi_{022}} \right)^2 \left(\frac{1}{n_i} \right)^2 = \frac{1}{t^2}, \quad (2)$$

其中,

$$s_i = \frac{\lambda \Delta\theta_i}{d_{022}^2 R}, \quad (3)$$

式(2)和式(3)中: n_i 和 s_i 分别为衍射盘中心向外第 i 个强度极小值的序数和偏离矢量; λ 为入射电子的波长, nm 。

令 $y = (s_i/n_i)^2$, $k = -1/\xi_{022}^2$, $x = 1/n_i^2$, $b = 1/t^2$, 则式(2)可简化为 $y = kx + b$ 。

将表3中的数据代入式(1)~式(3), 得到衍射盘中第一条暗条纹^[16-17]的序数 $n_1=1$, 由此得到 $n_i=i$, 代入相关数据计算得到 x 、 y 的值, 见表4。利用 x 、 y 数据绘制散点图, 并用最小二乘法进行拟合, 结果见图4。拟合直线的截距 $b=11.85 \times 10^{-5} \text{ nm}^{-2}$, 由 $b=1/t^2$, 得到图1(b)中入射电子束方向试样厚

度 $t=91.9 \text{ nm}$ 。

表4 x 和 y 的值
Tab.4 values of x and y

i	$\Delta\theta/\text{nm}^{-1}$	s/nm^{-1}	x	$y/(10^{-5} \cdot \text{nm}^{-2})$
1	0.439	0.008	1.000 0	6.017
2	1.100	0.019	0.250 0	9.444
3	1.834	0.032	0.111 1	11.668
4	2.453	0.043	0.062 5	11.742

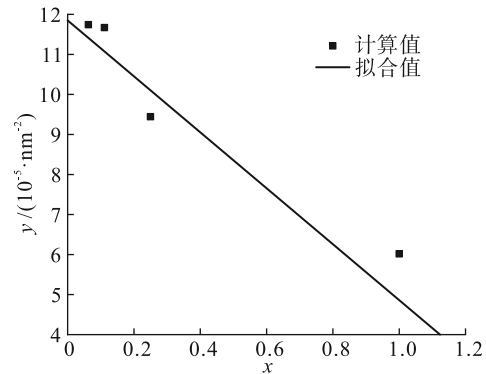


图4 x 、 y 拟合结果

Fig.4 fitting results of x and y

3.4 数密度及其修正

测试区试样的体积 $V=l_1 \times l_2 \times t=0.112 \mu\text{m}^3$, 测试区析出相的数密度 $\rho = N/V = 9.6 \times 10^{11} \text{ mm}^{-3}$ 。为保证统计结果的准确性, 试样厚度 t 应远大于试样中颗粒的平均尺寸 $\bar{d}$ 。测量结果表明, 薄膜厚度 $t=91.9 \text{ nm}$, 析出相平均尺寸为 6 nm , 满足要求。

铝合金中析出相的体积分数较低, 在投影方向上发生析出相重叠的概率很小, 可近似忽略不计。而测试区的6个表面边界附近存在被边界切割的颗粒, 为降低测量误差, 依据体视学原理对体积进行修正, 进而实现对数密度的修正。以下将根据测试区内颗粒的被切割情况, 将体积 V 分为4部分讨论。

第一部分是颗粒全部在测试区内的部分, 此部分是从体积为 V 的长方体的6个面, 各去掉厚度为 $\bar{d}/2$ 的表层后剩余的长方体, 其体积为

$$v_1 = (l_1 - \bar{d})(l_2 - \bar{d})(t - \bar{d})。$$

第二部分为体积为 V 的长方体中6个厚度为 $\bar{d}/2$ 的表面薄层, 分别扣除边缘厚度为 $\bar{d}/2$ 的棱边部分体积后, 剩余6部分体积之和。这6部分体积分别为

$$v_a = v_b = \bar{d}(l_1 - \bar{d})(l_2 - \bar{d})/2,$$

$$v_c = v_d = \bar{d}(l_1 - \bar{d})(t - \bar{d})/2,$$

$$v_e = v_f = \bar{d}(l_2 - \bar{d})(t - \bar{d})/2。$$

第二部分总体积为

$$v_2 = 2v_a + 2v_c + 2v_e。$$

第三部分是体积为 V 的长方体的12条棱边附近,厚度为 $\bar{d}/2$ 、横截面积为 $(\bar{d}/2) \times (\bar{d}/2)$ 的小长方体的体积,再去掉长方体8个顶角附近边长为 $\bar{d}/2$ 的8个小立方体的体积之后剩余部分的体积,表达式为

$$v_3 = \bar{d}^2(t - \bar{d}) + \bar{d}^2(l_1 - \bar{d}) + \bar{d}^2(l_2 - \bar{d})。$$

第四部分为长方体 V 的8个顶角附近边长为 $\bar{d}/2$ 的8个立方体的体积之和,表达式为

$$v_4 = \bar{d}^3。$$

以上4部分体积内参与统计的颗粒被切割的情况各不相同。引入系数 m_i ($i=1,2,3,4$),用于表征因颗粒切割差异对修正结果的影响。第一部分体积中参与统计的颗粒为完整颗粒,未发生被切割的情况。参与统计的颗粒与其所占体积一致,不需要修正,因此 $m_1=1$;第二部分、第三部分、第四部分体积内参与统计的颗粒,分别有 $1/2$ 、 $1/4$ 和 $1/8$ 落于体积为 V 的长方体内,因此 $m_2=2$, $m_3=4$, $m_4=8$ 。修正后的体积为

$$v' = v_1 + 2v_2 + 4v_3 + 8v_4 = (l_1 + \bar{d})(l_2 + \bar{d})(t + \bar{d})。$$

体积修正系数为

$$k_v = \frac{v'}{v} = \frac{(l_1 + \bar{d})(l_2 + \bar{d})(t + \bar{d})}{l_1 l_2 t}。 \quad (4)$$

数密度的修正系数 k_ρ 为

$$k_\rho = \frac{1}{k_v} = \frac{l_1 l_2 t}{(l_1 + \bar{d})(l_2 + \bar{d})(t + \bar{d})}。 \quad (5)$$

修正后的数密度为

$$\rho' = k_\rho \rho。 \quad (6)$$

将参数值代入式(5)和式(6),得到测试区数密度的修正系数 $k_\rho=0.928$,修正后的数密度 $\rho'=8.9 \times 10^{11} \text{ mm}^{-3}$ 。

3.5 纳米析出相对铝合金性能的影响

铝合金中大量的析出相均匀分布在基体中,对材料的性能产生较大影响^[18]。在物理性能方面,析出相会影响铝合金的热膨胀系数、电导率等物理性质。此外,析出相可以阻碍位错运动,减少电子散射过程中的位错散射机制,使铝合金在保持较高强度的同时,仍能维持相对稳定的电导率,从而满足航空航天领域对材料电性能与力学性能的要求。在热膨胀系数方面,析出相与基体之间存在的热错配应力会影响铝合金整体的热膨胀行为。当温度发生变化时,析出相和基体的热膨胀系数存在差异,在两者界面处会产生一定的应力,使铝合金在不同温度环境下的尺寸稳定性得到增

强,降低热胀冷缩导致的结构变形风险。

在力学性能方面,位错运动是材料发生塑性变形的的主要微观机制。位错运动时,析出相与基体之间存在的共格、半共格或非共格界面,对位错运动产生强烈的阻碍作用。这种阻碍作用可细分为Orowan绕过机制与切过机制。在Orowan绕过机制中,位错在遇到尺寸较大、难以直接切过的析出相时,会被迫环绕析出相发生弯曲与滑移,在析出相周围留下位错环,从而增加位错运动的阻力。

在疲劳性能方面,疲劳裂纹的萌生与扩展是导致金属材料失效的重要因素。析出相的存在能够有效抑制疲劳裂纹的萌生。一方面,析出相周围存在较高的应力集中区域,使得局部区域的位错运动更为活跃,在疲劳加载初期,这些区域优先发生塑性变形,从而消耗部分疲劳能量,降低裂纹在其他区域萌生的概率;另一方面,当疲劳裂纹萌生后,在扩展阶段,由于析出相与基体之间的界面能较高,裂纹穿越界面需要消耗更多的能量,析出相的存在改变了裂纹尖端的应力场分布,阻碍了裂纹的连续扩展,裂纹扩展路径会因析出相的存在而发生偏转、分叉甚至终止。大量疲劳试验数据显示^[19],含有适量且分布均匀析出相的铝合金,其疲劳寿命相较于未明显析出强化的铝合金延长2~3倍,高强度铝合金中的纳米尺度析出相极大地提高了材料在交变载荷工况下的可靠性。

4 结论

(1) 超高强度7055铝合金经477℃保温2h后水淬处理,产生大量弥散分布的纳米尺度析出相,析出相为球形或圆片状,尺寸多集中在30 nm以内。

(2) 采用会聚束电子衍射方法测定的试样局部厚度为91.9 nm。使用Image J软件实现了中心暗场像区域的析出相统计,进而通过计算得到测试区尺度在3 nm以上的析出相的数密度为 $9.6 \times 10^{11} \text{ mm}^{-3}$ 。

(3) 采用体视学方法,实现了对7055铝合金中纳米析出相数密度的修正,得到修正系数为0.928,修正后的数密度为 $8.9 \times 10^{11} \text{ mm}^{-3}$ 。

参考文献(References):

- [1] 冯迪,刘胜胆,韩念梅,等. 7A55铝合金-RRA态厚板组织和性能及其不均匀性的多因素影响[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(6): 1150-1160.
- FENG Di, LIU Shengdan, HAN Nianmei, et al. Multifactorial effects on microstructure, properties and through-thickness

- inhomogeneity of 7A55-RRA treated aluminum alloy thick plate[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(6): 1150-1160.
- [2] DURSUN T, SOUTIS C. Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys[J]. Materials & Design (1980-2015), 2014, 56: 862-871.
- [3] KHAN M A, WANG Y W, ANJUM M J, et al. Effect of heat treatment on the precipitate behaviour, corrosion resistance and high temperature tensile properties of 7055 aluminum alloy synthesis by novel spray deposited followed by hot extrusion[J]. Vacuum, 2020, 174: 109185.
- [4] 李茂华,孙佳林,陈志龙,等. 7055 铝合金中纳米析出相的演变行为[J]. 材料热处理学报, 2024,45(11):48-55.
LI Maohua, SUN Jialin, CHEN Zhilong, et al. Evolution behavior of nanoscale precipitates of 7055 aluminum alloy [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2024,45(11):48-55.
- [5] CHUNG T F, YANG Y L, SHIOJIRI M, et al. An atomic scale structural investigation of nanometre-sized η precipitates in the 7050 aluminium alloy[J]. Acta Materialia, 2019, 174: 351-368.
- [6] 祁清文,卜恒勇,黎琴. 7000 系铝合金固溶时效过程中微观组织变化的研究进展[J]. 金属热处理,2024,49(2):244-251.
QI Qingwen, BU Hengyong, LI Qin. Research progress on change of microstructure of 7000 series aluminum alloy during solution treatment and aging[J]. Heat Treatment of Metals, 2024, 49 (2): 244-251.
- [7] ZUO J R, HOU L G, SHI J T, et al. Effect of deformation induced precipitation on grain refinement and improvement of mechanical properties AA 7055 aluminum alloy[J]. Materials Characterization, 2017, 130: 123-134.
- [8] WANG Y Z, SHI L, SU R M, et al. Effect of intermittent non-isothermal aging on the microstructure and properties of Al-Zn-Mg-Cu alloy[J]. Materials Chemistry and Physics, 2024, 328: 129946.
- [9] 金传伟,吴园园,张继明. 纳米尺度析出相透射电镜的统计分析技术探讨[J]. 冶金分析, 2023, 43(1): 31-40.
JIN Chuanwei, WU Yuanyuan, ZHANG Jiming. Discussion on statistical analysis technique of nanoscale precipitated phase by transmission electron microscope[J]. Metallurgical Analysis, 2023, 43(1): 31-40.
- [10] ZANG J X, ZHANG K, DAI S L. Precipitation behavior and properties of a new high strength Al-Zn-Mg-Cu alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22 (11): 2638-2644.
- [11] LIU J Z, CHEN J H, LIU Z R, et al. Fine precipitation scenarios of AlZnMg(Cu) alloys revealed by advanced atomic-resolution electron microscopy study Part II: fine precipitation scenarios in AlZnMg(Cu) alloys[J]. Materials Characterization, 2015, 99: 142-149.
- [12] 刘玉,赵东山,聂鑫,等. Mg-Al-Zn-Sn 合金时效析出的 γ 相颗粒数密度的测定[J]. 电子显微学报, 2012, 31(2): 130-134.
LIU Yu, ZHAO Dongshan, NIE Xin, et al. The measurement of the density of the precipitated γ particles during the aging process of the Mg-Al-Zn-Sn alloy[J]. Journal of Chinese Electron Microscopy Society, 2012, 31(2): 130-134.
- [13] 崔桂彬,鞠新华,严春莲,等. 钢中析出相场发射扫描电镜的自动统计分析技术研究[J]. 冶金分析, 2019, 39(2): 17-22.
CUI Guibin, JU Xinhua, YAN Chunlian, et al. Study on automatic statistical analysis technology of precipitated phases in steel by field emission scanning electron microscope[J]. Metallurgical Analysis, 2019, 39(2): 17-22.
- [14] 娄艳芝,李春志. 7055 铝合金中纳米尺度 Al_2ZnZr 的结构和析出特征[J]. 中国有色金属学报,2022,32(5):1277-1288.
LOU Yanzhi, LI Chunzhi. Microstructure and precipitation characteristics of nano-scale Al_2ZnZr in 7055 aluminum alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals,2022,32(5):1277-1288.
- [15] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 微束分析 分析电子显微术 透射电镜选区电子衍射分析方法: GB/T 18907—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014: 1-24.
- [16] 国家市场监督管理总局,中国国家标准化管理委员会. 微束分析 薄晶体厚度的会聚束电子衍射测定方法: GB/T 20724—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021:1-16.
- [17] SPENCE J C H, ZUO J M. Electron Microdiffraction[M]. Cham: Springer US, 1992:21-25.
- [18] WANG F, QIU D, LIU Z L, et al. Crystallographic study of Al_3Zr and Al_3Nb as grain refiners for Al alloys[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(7): 2034-2040.
- [19] ZHAO H, YE L Y, CHENG Q S, et al. Enhanced mechanical properties and corrosion resistance of 7055 aluminum alloy through variable-rate non-isothermal aging[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023, 943: 169198.