

文章编号:1673-9981(2020)04-0330-06

$\text{Al}_3\text{Sc}/\text{Al}_3(\text{Sc}_x, \text{M}_{1-x})$ 相对裂纹萌生与扩展作用研究进展*

陈显明, 范莹莹

肇庆学院电子与电气工程学院, 广东 肇庆 526061



摘要:介绍了含钪铝合金中 $\text{Al}_3\text{Sc}/\text{Al}_3(\text{Sc}_x, \text{M}_{1-x})$ 第二相粒子对裂纹萌生与扩展作用研究进展。 $\text{Al}_3\text{Sc}/\text{Al}_3(\text{Sc}_x, \text{M}_{1-x})$ 第二相粒子具有三种尺度, 微米级、纳米级和亚微米级, 粗大的 $\text{Al}_3\text{Sc}/\text{Al}_3(\text{Sc}_x, \text{M}_{1-x})$ 粒子可以成为裂纹源, 降低疲劳性能; 纳米级的 $\text{Al}_3\text{Sc}/\text{Al}_3(\text{Sc}_x, \text{M}_{1-x})$ 粒子通过提升合金强度, 钉扎位错和亚晶界, 从本质上降低裂纹萌生的几率, 还可以通过改善其它粗大粒子的析出和分布来改善疲劳性能。在对疲劳裂纹扩展的作用上, $\text{Al}_3\text{Sc}/\text{Al}_3(\text{Sc}_x, \text{M}_{1-x})$ 第二相粒子总体上对疲劳性能的提升是有利的, 可以降低裂纹扩展速率。同时还对裂纹扩展的计算方法进行了综述, 认为计算方法是研究 $\text{Al}_3\text{Sc}/\text{Al}_3(\text{Sc}_x, \text{M}_{1-x})$ 第二相粒子在裂纹萌生与扩展作用方面的一种行之有效的方法。

关键词: $\text{Al}_3\text{Sc}/\text{Al}_3(\text{Sc}_x, \text{M}_{1-x})$ 粒子; 含钪铝合金; 裂纹萌生; 裂纹扩展; 研究进展

中图分类号: TG146

文献标识码: A

裂纹萌生与扩展是材料制备与使用过程中必须面对的基本问题, 与材料的本质与其它各种性能密切相关。铝合金是除钢铁之外用量最为广泛的合金材料, 是国民经济的支柱材料之一, 应用于各行各业。面对航天、航空、舰船、兵器等领域对新型铝合金提出的更高性能要求, 研究和开发各种新型和高性能铝合金成为共识。基于 Sc 元素添加形成了含钪铝合金系列, 是目前国内正在研制和发展的高性能铝合金之一。大量的研究表明^[1-5], 添加 Sc 元素后形成的 $\text{Al}_3\text{Sc}/\text{Al}_3(\text{Sc}_x, \text{M}_{1-x})$ (M 代表 Zr, Ti 和 Hf 等元素) 第二相粒子对合金性能的提升效果显著。目前, 对于 $\text{Al}_3\text{Sc}/\text{Al}_3(\text{Sc}_x, \text{M}_{1-x})$ 粒子的研究更多的是集中于析出过程、结构、分布、形貌和对各种性能的影响和作用上^[6-12], 而对于其在裂纹萌生与扩展中的作用研究较少。

研究表明, 铸态条件下 $\text{Al}_3\text{Sc}/\text{Al}_3(\text{Sc}_x, \text{M}_{1-x})$ 的初生粒子形态都是“团簇体”, 这些“团簇体”由 2~20 个面心立方的小粒子组成^[13-15]。目前对于这些“团簇体”在裂纹萌生与扩展过程中起什么样的作用及如何影响裂纹萌生与扩展并不明晰。热处理过程和形变加工过程中析出的次生 $\text{Al}_3\text{Sc}/\text{Al}_3(\text{Sc}_x, \text{M}_{1-x})$ 粒子更加细小弥散, 属于纳米层次, 因此直接实验观测其在裂纹萌生与扩展中的作用更加困难, 目前关于其在裂纹萌生与扩展中的作用机制基本都是定性和推测性质的。而且 $\text{Al}_3(\text{Sc}_x, \text{Zr}_{1-x})/\text{Al}_3(\text{Sc}_x, \text{Ti}_{1-x})$ 被发现是一种核壳结构^[16-20], 这种粒子对合金拉伸等力学性能的提升幅度比单纯的 Al_3Sc 粒子更大, 这种粒子在裂纹萌生与扩展过程中的作用机制与 Al_3Sc 粒子是否相同还是另有作用模型, 目前也没统一说法和更加有力的证据。

收稿日期: 2020-03-30

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51402258)

作者简介: 陈显明(1975-), 男, 副教授, 博士, 研究方向: 金属材料制备成型与组织性能研究。

1 $\text{Al}_3\text{Sc}/\text{Al}_3(\text{Sc}_x, \text{M}_{1-x})$ 粒子对裂纹萌生影响研究

$\text{Al}_3\text{Sc}/\text{Al}_3(\text{Sc}_x, \text{M}_{1-x})$ 第二相粒子包含三种不同粒径量级的颗粒:凝固过程中析出的初生 $\text{Al}_3\text{Sc}/\text{Al}_3(\text{Sc}_x, \text{M}_{1-x})$ 粒子,这些粒子比较粗大,属于微米量级;固溶时效过程中析出的细小弥散强化相粒子,属于纳米量级;热处理温度较高时,粗化后尺寸介于以上两相之间的粒子属于亚微米量级.这些不同的第二相粒子对裂纹的萌生和扩展具有重要的影响.

裂纹的萌生是在交变应力作用下的局部应变、局部损伤和最终局部开裂的过程.车欣等人^[21]研究了 Sc 对 T6 态铸造 Al-9.0%Si-4.0%Cu-0.4%Mg 合金的低周疲劳行为的影响规律,认为:Sc 的加入减小合金中共晶 Si 相的尺寸,而在 Al-Si 合金中共晶 Si 相往往被认为是裂纹萌生的发生地,而通过降低共晶 Si 相的尺寸可降低其在相界处产生的应力集中,减少裂纹萌生的可能,提高合金的低周疲劳寿命;并且细化后的共晶 Si 颗粒,也会对疲劳裂纹的扩展速率与行为产生影响.黄宏锋等人^[22]研究了 $\text{Al}(\text{Sc}, \text{Zr})$ 粒子对 Al-Mg-Sc-Zr 合金断裂行为的影响后发现,经过高温稳定化退火处理后,发现在断裂韧窝中出现了部分粗大的 $\text{Al}(\text{Sc}, \text{Zr})$ 粒子,这些粗大的 $\text{Al}(\text{Sc}, \text{Zr})$ 粒子在拉伸过程中不但没有起到强化作用,反而成为裂纹源,加快了裂纹扩展的速率,使合金性能显著降低.张飞鹏等人^[23]研究了 Al-4.9Mg-0.6Mn-0.2Sc-0.1Zr 合金在平面应变下的断裂行为,结果表明:裂纹主要萌生于粗大的 Al6Mn 相,微米量级的 Al6Mn 相粒子也可以形成微裂纹,而纳米级 Al_3Sc 相粒子通过钉扎位错和晶界可以稳定材料微观结构,减小亚晶界前沿位错堆积密度,故可以改善试验合金热轧板的断裂韧性;裂纹沿着第二相粒子形成的断裂通道扩展.岳嵩和 JiayiZhang 等人^[24-25]研究了 Sc 微合金化对 Al-Fe 系铝合金导线的蠕变性能及其组织形貌的影响后发现,Sc 的添加对蠕变性能有较大的提升,这主要是由于 Sc 的添加能抑制 Al_3Fe 相的形核及析出,而 Al_3Fe 属于粗大析出相(微米量级),往往是裂纹萌生的位置源,并且 Al_3Sc 对位错和亚晶界具有钉扎效应,阻碍裂纹扩展.

$\text{Al}_3\text{Sc}/\text{Al}_3(\text{Sc}_x, \text{M}_{1-x})$ 第二相粒子对于裂纹萌生的影响主要从几个方面进行:一方面,在铝合金基

体中添加 Sc 后形成的 $\text{Al}_3\text{Sc}/\text{Al}_3(\text{Sc}_x, \text{M}_{1-x})$ 粒子可以细化晶粒,提高合金强度,这从本质上降低了裂纹萌生的可能;第二个方面, $\text{Al}_3\text{Sc}/\text{Al}_3(\text{Sc}_x, \text{M}_{1-x})$ 粒子会影响其它粗大第二相粒子的析出,降低粗大第二相粒子尺寸,改善其分布,进而减少裂纹萌生的可能;再一个方面, $\text{Al}_3\text{Sc}/\text{Al}_3(\text{Sc}_x, \text{M}_{1-x})$ 粒子钉扎位错和亚晶界,阻碍新的裂纹源的发生. $\text{Al}_3\text{Sc}/\text{Al}_3(\text{Sc}_x, \text{M}_{1-x})$ 粒子对裂纹萌生的影响很复杂,因此未来的工作需要进一步原位观察裂纹萌生的演化过程,建立合理的模型以阐明 $\text{Al}_3\text{Sc}/\text{Al}_3(\text{Sc}_x, \text{M}_{1-x})$ 粒子与裂纹萌生行为的关系.

2 $\text{Al}_3\text{Sc}/\text{Al}_3(\text{Sc}_x, \text{M}_{1-x})$ 粒子对裂纹扩展影响研究

车欣等人^[21]的研究还认为,对于 Al-Si 系铸造铝合金,Sc 的加入细化了 $\alpha\text{-Al}$ 基体相尺寸,导致晶界数量增多,提高了疲劳裂纹在扩展过程中遇到晶界的频率,其对裂纹扩展的阻碍作用亦会随之增大,导致裂纹扩展速率降低并最终提高合金的疲劳寿命.李向新等人^[26]通过向 7075 合金中添加 Sc 来研究疲劳裂纹萌生及扩展行为后发现:在合金中加入 Sc 元素后,合金的裂纹扩展区相对较宽,失效断面较窄,发生断裂所需要的加载次数就更大,因此裂纹萌生的时间就相对较长且随着 Sc 含量的增加,7075 合金的疲劳萌生寿命呈先增加而后降低的趋势,在 Sc 含量为 0.24% 时取得疲劳萌生寿命的最大值;当应力比为 0.1 时,四种不同 Sc 含量 7075 合金的疲劳裂纹长度都随着循环次数的增加而增大,但是相对而言,添加 0.24% 的 Sc 元素的 7075 合金的疲劳裂纹长度的增加是最慢的;当应力比为 0.5 时,Sc 含量为 0.24% 时 7075 合金的裂纹生长速度最慢,在 Sc 含量为 0.12% 和 0.48% 的 Sc 元素时合金的疲劳裂纹生长速度相当,且都低于不含 Sc 的 7075 合金.张笑宇等人^[27]研究了含 Zr 和 Sc 元素的 Al-Zn-Mg-Cu 合金的微观组织和低周疲劳性能发现:裂纹在扩展中遇到晶界或第二相时,裂纹尖端主应力的作用面将会稍微改变方向,逐渐过渡到沿着与最大正应力垂直的方向扩展;在 0.4%~0.7% 的外加总应变幅下均表现出稳定的循环应力响应行为,可以看作是位错切过细小的 GP 区和 η' 相继续运动以及 $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ 相对位错的钉扎产生的有效应力与位错缠结、位错堆积等形成的内应力之间达

到平衡所表现出的稳定的循环应力响应行为. Jing Chen 等人^[28]研究了 Al-Zn-Mg-Sc-Zr 合金的显微组织和疲劳裂纹扩展行为, 结果表明: 合金中的 $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ 粒子能显著地细化合金晶粒、提升拉伸性能和抗疲劳裂纹扩展性能; 疲劳裂纹在扩展过程中会切割一些粗大的杂质粒子并扩展进合金基体中, 但却无法切割 $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ 粒子, 因为应力不足以打破粒子并在上面传播, 当裂纹尖端遇到这些粒子会停滞瞬间, 然后绕过了这些粒子, 因此 $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ 粒子对裂纹扩展起到偏转和阻滞作用, 令裂纹产生分叉. 郭加林等人^[29]研究了用微量 Sc 和 Zr 元素合金化的 2524SZ 合金裂纹扩展情况, 在 2524SZ 合金中, 当疲劳裂纹扩展遇到与基体共格的 $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ 粒子时, 在裂纹尖端的屈服变形过程中, 位错必须切割 $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ 粒子, 屈服变形的阻力大, 疲劳裂纹向前扩展的速率会降低. Mengjia Li 等人^[30]研究了 Al-Mg-Sc 合金微观结构和力学性能, 拉伸和疲劳裂纹扩展, Al-Mg-Sc 合金具有较高的抗疲劳裂纹扩展能力, 而第二相 $\text{Al}_3(\text{Sc}_{1-x}\text{Zr}_x)$ 是影响抗疲劳裂纹扩展能力的主要因素. Avtokratova Elena 等人^[31]对超细晶 (UFG) Al-6% Mg-0.3% Sc 合金的疲劳裂纹扩展进行了研究, 结果表明: 在近阈值区超细晶裂纹扩展速率比普通多晶材料要高, 在中间疲劳阶段 UFG 结构中疲劳裂纹的扩展对晶粒尺寸变得不敏感; 表面特征分析表明, 随着 K 的增加, UFG 结构中裂纹扩展的抑制可能与疲劳断裂模式由晶间向穿晶的逐渐转变有关. R. Sen 等人^[32]研究了显微组织参数对钎掺杂 Al-6Mg 合金平面应变断裂韧性的影响及测定了不同热处理条件下合金的平面应变断裂韧性, 发现粗大的不溶碎片对二元 Al-6Mg 合金的断裂韧性有较大影响, 钎处理后的合金由于第二相颗粒的尺寸和数量的减少, 使断裂韧性有所改善. Michael Besel 等人^[33]研究了摩擦搅拌焊接对 Al-Mg-Sc 合金疲劳行为的影响, 发现焊缝局部组织的变化和复杂基本上影响了裂纹起始位置和裂纹扩展路径. C. Watanabe 等人^[34]以 Al-Mg-Sc 合金为研究目标, 研究了 Al_3Sc 粒子对其疲劳行为的影响, 发现当 Al_3Sc 粒子小于 4 nm 时试样中发现初始硬化后的循环软化, 而当 Al_3Sc 粒子大于 11 nm 时试样中未发生循环软化. Y. Y. PENG^[35]研究了 Al-6.2Mg-0.4Mn-Sc-Zr 合金中 $\text{Al}_3\text{Sc}/\text{Al}_3(\text{Sc}_x, \text{M}_{1-x})$ 第二相粒子对疲劳性能的影响, 发现 $\text{Al}_3\text{Sc}/$

$\text{Al}_3(\text{Sc}_x, \text{M}_{1-x})$ 第二相粒子导致疲劳寿命和疲劳强度的增加, 使得裂纹难以萌生和扩展.

$\text{Al}_3\text{Sc}/\text{Al}_3(\text{Sc}_x, \text{M}_{1-x})$ 第二相粒子对疲劳裂纹扩展行为的影响和作用机制是非常复杂的, 并与诸多影响裂纹萌生与扩展因素 (如晶粒、晶界、晶向、晶系等) 交织在一起, 给研究带来了很大的困难. $\text{Al}_3\text{Sc}/\text{Al}_3(\text{Sc}_x, \text{M}_{1-x})$ 粒子与铝合金基体间存在共格、半共格或者非共格三种关系, 同时它们在尺寸、分布、形貌及晶体学特征 (晶体结构和惯析面) 等方面存在差异, 这些因素都对裂纹的扩展性能有重要影响. 根据 N. Kamp^[36] 的结论可认为: 当第二相粒子的直径 d 小于其临界直径 d_c 时, 可以降低裂纹扩展的驱动力, 从而提高耐疲劳损伤性能; 当 $d > d_c$ 时, 位错的滑移运动不可逆, 这种不可逆的滑移可以使裂纹持续地扩展; 临界直径 d_c 由塞积的位错数量确定. 析出相对于裂纹扩展行为的作用机制还没有阐述清楚, 也可以通过设计实验和建立合理的模型来理解析出相形貌 (片状、棒状和球状) 和尺寸对裂纹扩展行为的影响和作用.

3 裂纹扩展行为计算仿真研究

在计算模拟不仅能还原实验模拟现象, 还便于观察实际试验中难以捕捉到的瞬时实验现象, 且还能对实验结果进行预测演化模拟, 因此计算机模拟是实验研究的指引与保障. 作为计算模拟方法, 在微裂纹研究中, 晶体相场方法在扩散时间尺度和空间密度尺度上比传统相场 (PFM) 法和分子动力学 (MD) 法更具有优势^[37-41]. 在近几年研究中, 高英俊等人^[42-43]和 Elder 等人^[44-45]提出的晶体相场方法模型基础上研究韧性材料的微裂纹扩展、连通与分叉, Shi 等人^[46]用晶体相场法研究了晶界耦合运动和微裂纹的影响等. 吴志学^[47-48]以三维有限单元技术和 Paris 疲劳裂纹扩展规律为基础, 并在裂纹扩展增量计算中考虑了裂纹闭合的影响, 建立了一种无形状约束的模拟表面裂纹在线弹性断裂力学条件下疲劳扩展的数值方法, 利用该方法对拉伸和纯弯曲疲劳载荷下表面裂纹扩展进行了数值模拟, 将模拟结果和 Newman 及 Raju 经验公式预测结果进行了比较, 表明所采用方法的实用性, 并发现裂纹闭合对疲劳裂纹扩展过程中的裂纹形状演化以及裂纹尖端的应力强度因子 (SIF) 分布有明显影响. 庄力健等人^[49]建立了一种基于疲劳损伤理论估算疲劳裂纹

扩展速率的模拟方法,开发了相应的疲劳裂纹扩展模拟软件,根据 16MnR 钢循环塑性模型,模拟的 16MnR 钢疲劳裂纹扩展速率与疲劳裂纹扩展试验结果相比较,两者非常吻合.金志江等人^[50]通过数值模拟法对共面裂纹疲劳扩展的干涉进行了研究,发现在共面裂纹扩展的早期,3 个裂纹的扩展几乎是独立的,但到它们之间的裂纹前缘接近到一定距离后,开始产生相互作用,使 2 条共面裂纹逐渐合并成一条长裂纹,然后以一条长裂纹的规律向前扩展.姜风华等人^[51]采用 Prandtl-Ruess 本构方程建立数学模型,考虑材料硬化和裂纹开闭现象,用累积等效塑性应变控制裂纹扩展参数的方法成功模拟了疲劳裂纹扩展的几个经典现象.

总之,计算方法是研究 $\text{Al}_3\text{Sc}/\text{Al}_3(\text{Sc}_x, \text{M}_{1-x})$ 第二相粒子对裂纹萌生与扩展作用机制的一种行之有效的,但目前以 $\text{Al}_3\text{Sc}/\text{Al}_3(\text{Sc}_x, \text{M}_{1-x})$ 粒子为仿真模型进行裂纹扩展仿真研究的还比较少见,未来可以多开展这方面的研究.

4 结 语

含钪铝合金是我国正在发展的高性能铝合金之一,而疲劳使用寿命是其获得大规模应用的关键性能,对其开展各方面的研究非常必要,在含钪铝合金中 $\text{Al}_3\text{Sc}/\text{Al}_3(\text{Sc}_x, \text{M}_{1-x})$ 粒子是各种性能提升的关键,因此以其为目标进行裂纹萌生与扩展的研究是至为重要的.

参考文献:

- [1] 周民,甘培原,邓鸿华,等. 含钪微合金化铝合金研究现状及发展趋势[J]. 中国材料进展, 2018, 37(2): 154-160.
- [2] 王祝堂. 航空航天铝-钪合金新进展[J]. 中国有色金属报, 2017(8):1-3.
- [3] WANG Yu, XIONG Baiqing, LI Zhihui, et al. As-cast microstructure of Al-Zn-Mg-Cu-Zr alloy containing trace amount of Sc[J]. Rare Metals, 2019, 38(4): 343-349.
- [4] JIANG Shengyu, WANG Ruihong. Grain size-dependent Mg/Si ratio effect on the microstructure and mechanical/electrical properties of Al-Mg-Si-Sc alloys[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2019, 35(7): 1354-1363.
- [5] LIU Li, JIANG Jiantang, ZHANG Bo, et al. Enhancement of strength and electrical conductivity for a dilute Al-Sc-Zr alloy via heat treatments and cold drawing[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2019, 35(6): 962-971.
- [6] 郭琦,徐国富,黄继武,等. 新型 Al-Mg-Sc-Zr 合金显微组织和性能研究[J]. 稀有金属, 2019, 43(3): 255-264.
- [7] 王振,李亨,唐锴,等. 控温变形对 Al-Mg-Si-Sc-Zr 合金时效及微观组织的影响[J]. 材料热处理学报, 2019, 40(12): 47-53.
- [8] 管仁国,金红梅, JIANG Wensen, 等. 固溶原子、析出相和变形对 Al-Sc-Zr 合金组织和性能的定量影响 [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2019, 29(5): 907-918.
- [9] MONDOL S, ALAM T, BANERJEE R, et al. Development of a high temperature high strength Al alloy by addition of small amounts of Sc and Mg to 2219 alloy[J]. Materials Science & Engineering A, 2017, 687(27): 221-231.
- [10] TAENDL J, ORTHACKER A, AMENITSCH H, et al. Influence of the degree of scandium supersaturation on the precipitation kinetics of rapidly solidified Al-Mg-Sc-Zr alloys[J]. Acta Materialia, 2016, 117(15): 43-50.
- [11] BURANOVA Y, KULITSKIY V, PETERLECHNER M, et al. $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ -based precipitates in Al-Mg alloy: Effect of severe deformation[J]. Acta Materialia, 2017, 124(1): 210-224.
- [12] 周昌兵, 薛娜, 王晓姣, 等. Al-Sc 及 Al-Sc-Zr 合金的析出强化行为[J]. 材料热处理学报, 2014, 35(5): 60-63.
- [13] LIU Xuan, XUE Jilai, GUO Zhichao, et al. Segregation behaviors of Sc and unique primary Al_3Sc in Al-Sc alloys prepared by molten salt electrolysis[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2019, 35(7): 1422-1431.
- [14] LIU Xuan, GUO Zhichao, XUE Jilai, et al. Effects of synergetic ultrasound on the Sc yield and primary Al_3Sc in the Al-Sc alloy prepared by the molten salts electrolysis[J]. Ultrasonics sonochemistry, 2018(9): 1-8.
- [15] 杜元元, 苏学宽, 邹景霞, 等. Al-Sc 合金中 Al_3Sc 析出相的研究进展[J]. 金属热处理, 2007, 32(2): 12-15.
- [16] 文胜平, 林双平, 官博, 等. 含钪 Al-4.5Mg-0.7Mn-0.1Zr 合金中 Al_3E 相的形成及微观结构[J]. 稀有金属, 2010, 34(6): 802-806.
- [17] TOLLEY A, RADMILOVIC V, DAHMEN U. Segregation in $\text{Al}_3(\text{ScZr})$ precipitates in Al-Sc-Zr alloys [J]. Scripta Materialia, 2005, 52: 621.
- [18] RADMILOVIC V, TOLLEY A, MARQUIS E A,

- et al. Monodisperse $\text{Al}_3(\text{LiScZr})$ core/shell precipitates in Al alloys[J]. *Scripta Materialia*, 2008, 58(7): 529-532.
- [19] ZHANG Chaomin, JIANG Yong, CAO Fuhua, et al. Formation of coherent, core-shelled nano-particles in dilute Al-Sc-Zr alloys from the first-principles [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2019, 35(5): 930-938.
- [20] ZHANG Jiayi, HU Tao, YI Danqing, et al. Double-shell structure of $\text{Al}_3(\text{Zr, Sc})$ precipitate induced by thermomechanical treatment of Al-Zr-Sc alloy cable[J]. *Journal of Rare Earths*, 2019, 37(6): 668-672.
- [21] 车欣, 梁兴奎, 陈丽丽, 等. Al-9.0%Si-4.0%Cu-0.4%Mg(-0.3%Sc)合金的显微组织及其低周疲劳行为[J]. *金属学报*, 2014, 50(9): 1046-1054.
- [22] 黄宏锋, 姜锋, 刘兴涛, 等. $\text{Al}_3(\text{Sc, Zr})$ 粒子与剪切带对 Al-Mg-Sc-Zr 合金再结晶及断裂行为的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2015, 25(5): 1117-1127.
- [23] 张飞鹏, 黄晓亚, 徐开东, 等. Al-Mg-Mn-Sc-Zr 合金的断裂韧性[J]. *金属学报*, 2013, 38(12): 14-18.
- [24] 岳嵩, 邓显波, 张嘉艺, 等. 低温下 Sc 微合金化对 8xxx 系铝合金导线蠕变性能的影响[J]. *材料热处理学报*, 2017, 38(9): 36-42.
- [25] ZHANG Jiayi, JIANG Xinyang, MA Mingyang, et al. Effect of scandium micro-alloying on the creep resistance properties of Al-0.7Fe alloy cables [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2017, 699: 194-200.
- [26] 李向新, 陈律, 邓岚, 等. 含 Sc 航空 7075 合金的疲劳裂纹萌生及扩展行为[J]. *金属热处理*, 2015, 40(12): 44-48.
- [27] 张笑宇, 冷利, 王占军. 含 Zr, Sc 的 Al-Zn-Mg-Cu 合金的低周疲劳行为[J]. *材料导报*, 2017, 31(20): 63-67.
- [28] CHEN Jing, PAN Qinglin, YU Xuehong, et al. Effect of annealing treatment on microstructure and fatigue crack growth behavior of Al-Zn-Mg-Sc-Zr alloy [J]. *Journal of Central South University*, 2018, 25(5): 961-975.
- [29] 郭加林, 尹志民, 王华, 等. 微量 Sc 和 Zr 对 2524SZ 合金薄板疲劳裂纹扩展特性的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2010(5): 827-832.
- [30] LI Mengjia, PAN Qinglin, WANG Ying, et al. Fatigue crack growth behavior of Al-Mg-Sc alloy[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2014, 598(3): 350-354.
- [31] ELENA A, OLEG S, RUSTAM K, et al. Fatigue-crack-growth behavior of ultrafine-grained Al-Mg-Sc Alloy produced by ECAP [J]. *Materials Science Forum*, 2008, 584-586: 821-826.
- [32] SEN R, KAISER S, MITRA M K, et al. Plane strain fracture toughness of scandium doped Al-6Mg alloy [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2007, 457(1-2): 135-143.
- [33] MICHAEL B, YASUKO B, ULISES ALFARO M, et al. Fatigue behavior of friction stir welded Al-Mg-Sc alloy [J]. *International Journal of Fatigue*, 2015(2): 1-11.
- [34] WATANABE C, MONZEN R, TAZAKI K. Effects of Al_3Sc Particle size and precipitate-free zones on fatigue behavior and dislocation structure of an aged Al-Mg-Sc alloy [J]. *International Journal of Fatigue*, 2008, 30(4): 635-641.
- [35] PENG Y Y, YIN Z M, NIE B, et al. Effect of minor Sc and Zr on the fatigue properties of Al-Mg-Mn alloys. *materials science forum*, 2007, 546-549(2): 863-866.
- [36] KAMP N, GAO N, SARINK M J, et al. Influence of grain structure and slip planarity on fatigue crack growth in low alloying artificially aged 2xxx aluminium alloys [J]. *International Journal of Fatigue*, 2007, 29(5): 869-878.
- [37] ADELZADEH M, SHODJA H M, RAFII-TABARDE H. Computational modeling of the interaction of two edge cracks, and two edge cracks interacting with a nanovoid, via an atomistic finite element method [J]. *Computational Materials Science*, 2008, 42(2): 186-193.
- [38] RAPAPORT D C. The art of molecular dynamics simulation [M]. New York: Cambridge University Press, 1995.
- [39] STEINBACH I. Phase-field model for microstructure evolution at the mesoscopic scale [J]. *Annual Review of Materials Research*, 2013, 43(1): 89-107.
- [40] CHEN L Q. Phase-field model for microstructure evolution [J]. *Annual Review of Materials Research*, 2002, 16(32): 113-140.
- [41] 高英俊, 卢昱江, 孔令一, 等. 晶体相场模型及其在材料微结构演化的应用 [J]. *金属学报*, 2018, 54(2): 278-292.
- [42] 高英俊, 罗志荣, 邓芊芊, 等. 韧性材料的微裂纹扩展与分叉的晶体相场模拟 [J]. *计算物理*, 2014, 31(4): 471-478.
- [43] 高英俊, 罗志荣, 黄世叶, 等. 韧性材料的微裂纹扩展和连通的晶体相场模拟 [J]. *中国有色金属学报*, 2013, 23(7): 1892-1899.
- [44] ELDER K R, KATAKOWSKI M, HAATAJA M, et al. Modeling elasticity in crystal growth [J]. *Physical*

Review Letters, 2002, 88(24): 1-4.

[45] ELDERK R, GRANT M. Modeling elastic and plastic deformations in nonequilibrium processing using phase field crystals[J]. Physical Review E, 2004, 70 (5): 1-18.

[46] SHI H, WEN X,ZHENG C Z, et al. coupled motion of grain boundaries and the influence of microcracks; a phase-field-crystal study[J]. Computational Materials Science, 2017, 132;125-131.

[47] 吴志学. 表面裂纹疲劳扩展的数值模拟[J]. 应用力学学报, 2006, 23(4): 563-567.

[48] 吴志学. 表面裂纹疲劳扩展的数值模拟 II [J]. 应用力学学报, 2007, 24(1);42-46.

[49] 庄力健, 高增梁,王效贵,等. 16MnR 钢在不同应力比下的疲劳裂纹扩展的试验研究及模拟[J]. 压力容器, 2007, 24(3): 1-7.

[50] 金志江,马歆. 共面裂纹疲劳扩展干涉的数值模拟[J]. 浙江大学学报:工学版,2003, 37(2): 211-214.

[51] 姜风华, 田常录. 疲劳裂纹扩展的数值模拟[J]. 内蒙古工业大学学报, 2004, 23(3): 161-166.

Research progress of Al₃Sc/Al₃(Sc_x, M_{1-x}) particles on crack initiation and propagation

CHEN Xianming,FAN Yingying

School of Electronic and Electrical Engineering, Zhaoqing University, Zhaoqing 526061, China

Abstract: The research progress of Al₃Sc/Al₃(Sc_x, M_{1-x}) in scandium—containing aluminum alloy on crack initiation and propagation is presented. Al₃Sc/Al₃(Sc_x, M_{1-x}) particles have three scales, micron, nanoscale, and submicron levels. Coarse Al₃Sc/Al₃(Sc_x, M_{1-x}) particles can become crack sources and reduce fatigue properties; nano—sized Al₃Sc/Al₃(Sc_x, M_{1-x}) particles can essentially reduce the crack initiation probability by lifting the alloy strength, pinning dislocations and sub—crystal boundaries, and also improve fatigue performance by improving precipitation and distribution of other coarse particles . In the action of fatigue crack growth, Al₃Sc/Al₃(Sc_x, M_{1-x}) are generally beneficial to the improvement of fatigue performance, which can reduce the crack growth rate. The calculation method of crack propagation is also reviewed, and it is considered that the calculation method is an effective method to study the effect of Al₃Sc/Al₃(Sc_x, M_{1-x}) on crack initiation and propagation.

Key words: Al₃Sc/Al₃(Sc_x, M_{1-x}) particles; scandium—containing aluminum alloy; crack initiation; crack propagation; research progress