

含钪微合金化铝合金研究现状及发展趋势

周 民¹, 甘培原¹, 邓鸿华¹, 詹海鸿¹, 刘 晨¹, 曾建民²

(1. 广西冶金研究院有限公司, 广西 南宁 530023)

(2. 广西大学材料科学与工程学院, 广西 南宁 530004)



刘 晨

摘 要: 含钪微合金化铝合金是一类新型铝合金材料。钪被认为是目前铝合金最好的合金强化元素, 钪加入铝合金中, 形成 Al_3Sc 颗粒, 产生强烈的微合金化作用, 可全面提高铝合金的性能, 含钪铝合金被认为是新一代航空航天、舰船、兵器等用高性能合金材料。对钪在铝合金中所表现出来的物理冶金行为及作用做了综述与分析, 如明显地细化晶粒、强烈地沉淀强化及抑制再结晶等。介绍了钪元素全面提升铝合金综合力学性能, 如耐腐蚀性能、焊接性能等方面的效果。结合国内外含钪微合金化铝合金的研究进展与成果, 探讨了国内该领域的研究方向与发展趋势。

关键词: 钪; 微合金化; 铝合金; Al_3Sc ; 性能提升

中图分类号: TG146.2, TG146.4⁺5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2018)02-0154-07

Research Status and Prospect of Sc Microalloying Aluminum Alloys

ZHOU Min¹, GAN Peiyuan¹, DENG Honghua¹, ZHAN Haihong¹, LIU Chen¹, ZENG Jianmin²

(1. Guangxi Research Institute of Metallurgy Corporation Limited, Nanning 530023, China)

(2. College of Materials Science and Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: Scandium microalloying aluminum alloy is a kind of new material. Scandium is considered to be the best alloy strengthening element for aluminum alloys at present. The addition of scandium to aluminum alloy forms Al_3Sc particles and produces a strong microalloying effect, which can improve the properties of aluminum alloy in an all-round way. Scandium microalloying aluminum alloy is considered to be a high performance alloy material for the new generation of aerospace, ship, weapons and so on. The physical metallurgical behaviors and performances were summarized in this paper, such as obviously grain refining, intensively precipitation strengthening, recrystallization inhibiting and so forth. The improvements of Sc on the properties of Al alloys, such as comprehensive mechanical properties, corrosion resistance, weldability and so on, were introduced. Based on the international and domestic researches, the paper discussed the development trends in this field.

Key words: Sc; microalloying; aluminum alloy; Al_3Sc ; properties improvement

1 前 言

钪(Sc)是元素周期表中第21号元素, 稀土金属之一, 亦属稀散金属^[1]。金属钪的熔点为1541℃, 密度2.989 g/cm³, 化学性质非常活泼^[2]。钪以合金元素的形式加入铝合金中, 可表现出诸多优异性能, 如类似于稀

土金属的熔体净化和改善铸态组织的作用^[3], 亦如类似于过渡金属Mn、Cr等元素的抑制再结晶作用^[4]。微量的钪元素加入到铝合金中便能表现出强烈的性能强化作用, 全面提高铝合金强度、韧性、塑性、高温性能、耐腐蚀及焊接性能^[5,6]。

2 Sc在铝合金中的物理冶金作用

钪对铝合金各方面性能的提升本质上源于其在铝合金中与铝元素形成一种金属间化合物 Al_3Sc , 具有 Li_2 结构, 与 $\alpha\text{-Al}$ 同为FCC结构, 点阵常数亦较接近, 错配度

收稿日期: 2016-09-04

基金项目: 广西壮族自治区八桂学者建设工程专项(桂办发[2010]51号)

第一作者: 周 民, 男, 1990年生, 助理工程师

通讯作者: 刘 晨, 男, 1969年生, 教授级高级工程师, Email: Liuchen6212@126.com

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2018.02.11

较低^[7]。钪在 α -Al中的最大固溶度较小, 约为0.2% (原子数百分比)^[8], 且扩散系数较低^[9], Al_3Sc 颗粒能够在较高温度下保持稳定。

2.1 晶粒细化

钪元素对铝合金有着强烈的晶粒细化效果。钪的细化晶粒效果源于金属间化合物 Al_3Sc 与 α -Al 同为 FCC 结构, 在 659 °C 下点阵常数约为 0.414 nm, α -Al 的为 0.412 nm^[10], 此时错配度仅为 0.5% 左右, 铝原子在 Al_3Sc 界面上形核所需要克服的界面能与畸变能均较小, 起到非常有效的形核核心作用^[11]。汤振齐^[12] 等人使用 Sc 对 6066 铝合金进行改性, 研究发现随着 Sc 含量由 0% 提高至 0.2% (质量分数), 合金铸锭平均晶粒尺寸由 45 μm 降低至 20 μm , 组织均匀性也随之提高。若 Sc 与 Ti 共同添加入铝合金中, 两者所共同起到的晶粒细化效果要强于两者分别单独添加。Sc 与 Ti 复合添加, 能够在凝固过程中率先形成具有“核/壳”结构的 $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Ti})$ 金属间化合物, 该化合物以 Al_3Sc 为核心, 外层主要为 Al_3Ti 。在 Al_3Sc 核心上外延生长的 Al_3Ti 不再是非 FCC 的 DO_{22} 结构, 而是保持其亚稳的 Li_2 结构, 且外层 Al_3Ti 与 α -Al 的错配度更低, 能够为铝液的凝固提供更加便利的界面条件^[13]。

Sc 对铝合金强烈的晶粒细化作用, 还可改善铝合金铸态组织。Li^[14] 等人研究发现, 随着 Sc 含量的增加, 某 Al-Zn-Mg-Mn 合金不仅铸态晶粒随之细化, 而且组织也由枝晶逐渐转变为等轴晶组织。Zhemchuzhnikova^[15] 等人研究发现含 Sc 某 Al-Mg-Mn-Zr 铝合金半连续铸锭为均匀的等轴晶组织, 平均晶粒尺寸为 22 μm 左右。

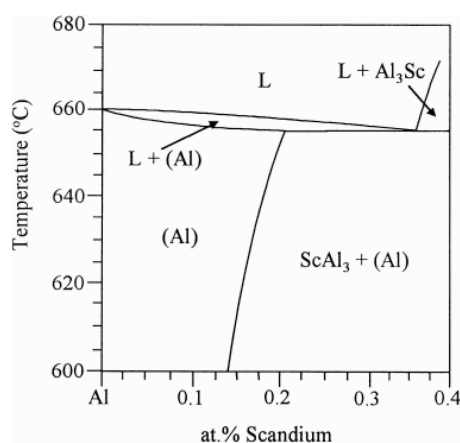


图1 Al-Sc 二元富铝端相图^[11]

Fig. 1 Sketch of Al-rich side of Al-Sc phase diagram^[11]

2.2 沉淀强化

图1为 Al-Sc 二元富铝端相图, Sc 在 α -Al 中的最大固溶度约为 0.2% (原子数百分比)/0.38% (质量分

数)^[11], 在较快速的冷却过程中易获得较高过饱和度。由于 Al_3Sc 颗粒与 α -Al 之间具有相同空间结构及较小错配度, 故其从过饱和 α -Al 固溶体中的沉淀析出不必依赖于高能量的缺陷位置 (如空位、位错、晶界、沉淀物等), 可同时在晶粒内部与晶界上均匀沉淀析出^[16], 图2为 Sc 含量为 0.2% (质量分数) 的 Al-Sc 二元合金 350 °C 时效不同时间的 TEM 图像。此外, Al_3Sc 析出颗粒可在较大尺寸范围内与 α -Al 基体保持共格关系^[17], 加之均匀弥散的分布, 含 Sc 铝合金可表现出强烈的沉淀强化效果^[18]。

Sc 在 α -Al 中的扩散系数相对较低^[9], 析出的纳米级 Al_3Sc 颗粒在高温下稳定性较高。Watanabe^[19] 等人研究发现 Sc 含量 0.28% (质量分数) 的 Al-Sc 二元合金在 450 °C 下时效 50 h, Al_3Sc 析出物平均尺寸约为 100 nm, 与基体保持半共格关系。

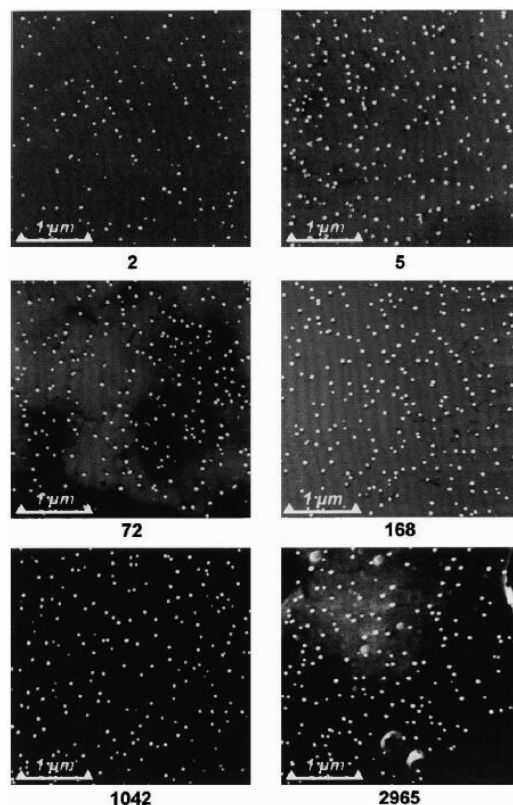


图2 Sc 含量为 0.2% (质量分数) 的 Al-Sc 二元合金 350 °C 时效不同时间的 TEM 照片^[16]

Fig. 2 TEM dark field images of Al-0.2% (mass fraction) Sc alloys aged for 2 to 2965 hours at 350 °C^[16]

Seidman^[20] 等人研究发现 Sc 含量为 0.1 ~ 0.3% (质量分数) 的 Al-Sc 二元合金在 275 ~ 350 °C 时效可析出大量与基体共格的球形 Al_3Sc 颗粒, 尺度为 1.4 ~ 9.6 nm, 在基体上均匀弥散分布, 导致铝合金强度由纯铝的 20 MPa

提升至 140 ~ 200 MPa。Marquis^[21] 等人研究发现 Sc 含量 0.1% ~ 0.3% (质量分数) 的 Al-Sc 二元合金直到 400 °C 左右温度 Al_3Sc 析出颗粒才发生长大, 与基体失去完全的共格关系。

2.3 抑制再结晶

Sc 元素具有抑制铝合金再结晶及提高再结晶温度作用。一方面, 在热处理过程中析出大量弥散分布的纳米级球形 Al_3Sc 沉淀物, 对位错与晶界具有强烈的“钉扎”作用^[22], 使得位错与晶界在常规再结晶温度下难以迁移, 再结晶被抑制。另一方面, Sc 元素在 $\alpha\text{-Al}$ 基体中的扩散系数相对 Cu, Zn, Mg 等主要合金元素较低, 与 Mn 相当^[9], 不易回溶, 即便沉淀物长大, 其对位错与晶界仍具有钉扎作用, 阻碍再结晶晶粒的形核与长大。

Jones^[23] 等人研究发现含 0.25% (质量分数) Sc 的 Al-Sc 二元合金经塑性变形后在热处理过程中沉淀析出先于再结晶进行, 析出的 Al_3Sc 颗粒对再结晶起到强烈的抑制作用, 使得温度高于 500 °C 合金再结晶过程方能进行。Li^[24] 等人研究某含 Sc 的 Al-Zn-Mg-Mn-Zr 合金, 发现其在

470 °C 固溶处理温度下仍未发生完全再结晶, 且随 Sc 含量由 0.12% 增加至 0.24% (质量分数), 合金从局部再结晶转变为完全抑制再结晶, 保持完全的冷轧加工态组织。肖代红^[25] 等人研究发现含 0.3% (质量分数) Sc 的 AA7085 合金经锻造、固溶处理与时效后仍然保持锻造纤维组织, 断裂强度、屈服强度及断裂韧性等性能均有提高。

3 Sc 对铝合金性能的影响

3.1 Sc 对力学性能的影响

如前文所述, Sc 元素能够细化铝合金晶粒, 有强烈的沉淀强化以及抑制再结晶效果, 这些方面均能提高铝合金的力学性能。

俄罗斯牌号为 01570 的 Al-Mg-Sc 系合金^[26], 其屈服强度由未添加 Sc 之前的 180 MPa 提升至 300 MPa, 塑性未降低, 耐腐蚀性提高; 俄罗斯牌号为 01970 的 Al-Zn-Mg-Sc 系合金^[26], 强度超过 500 MPa, 具有天然的超塑性, 耐应力腐蚀开裂及焊接性能均有较大提升。表 1 为 Al-Mg 合金与 Al-Mg-Sc 合金力学性能的对比。

表 1 Al-Mg 合金与 Al-Mg-Sc 合金力学性能的对比^[26]

Table 1 Mechanical properties of deformed semiproducts of new Al-Mg-Sc alloys and traditional Al-Mg alloys^[26]

System	Alloy	Mean content of base alloying components, wt. %	σ_r , MPa	$\sigma_{0.2}$, MPa	δ_4 %
Al-Mg	AMg1	Al-1.5Mg	120	50	28
Al-Mg-Sc	1515	Al-0.15Mg-0.3Sc-0.1Zr	250	160	16
Al-Mg	AMg2	Al-2.2Mg-0.4Mn	190	90	23
Al-Mg-Sc	1523	Al-2.1Mg-0.3Sc-0.15Zr	270	200	16
Al-Mg	AMg4	Al-4.2Mg-0.65Mn-0.06Ti	270	140	23
Al-Mg-Sc	1535	Al-4.2Mg-0.3Sc-0.1Zr	360	280	20
Al-Mg	AMg5	Al-5.3Mg-0.55Mn-0.06Ti	300	170	20
Al-Mg-Sc	1545	Al-5.2Mg-0.3Sc-0.1Zr	380	290	16
Al-Mg	AMg6	Al-6.3Mg-0.65Mn-0.06Ti	340	180	20
Al-Mg-Sc	1570	Al-5.8Mg-0.4Mn-0.25Sc-0.1Zr	400	300	15

Jia^[27] 等人研究 Al-Zr-Sc 三元合金的再结晶行为, 合金经塑性变形及时效处理后 Zr 元素掺杂进入 Al_3Sc 中, 形成大量细小的 $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ 具有“核/壳”结构的沉淀析出物。通过选区电子衍射确定该化合物为 L_{12} 结构, 并非 Al_3Zr 的 D_{023} 结构, 这种化合物既保留了 Al_3Sc 的有益性质, 也具备了一些新特点。Zr 元素在 $\alpha\text{-Al}$ 中的扩散系数极低, 外层为 Al_3Zr 的 $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ 颗粒热稳定性更高, 进一步提高铝合金的再结晶温度。在 Zr 含量一定的条件下, 随着 Sc 含量的提高, Al-Zr-Sc 三元合金的再结晶温度能提高至 550 °C, 甚至超过 600 °C。

V, Cr, Zr, Ti 及其它稀土元素等^[28] 在铝合金中拥

有更低扩散系数, 它们可对 Al_3Sc 颗粒进行掺杂^[29,30], 形成具有“核/壳”结构的 $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{X})$ 颗粒, 这些颗粒具有更高的热稳定性, 能够提高含 Sc 铝合金的高温力学性能, 特别是高温抗蠕变性能, 有望进一步扩大含 Sc 铝合金的应用范围^[31]。

Zhang^[32] 等人研究添加 Sc 与 Zr 改性的某超高强度 Al-Zn-Mg-Cu 合金, 在依次经历均匀化处理、热挤压、固溶处理及时效处理后, Sc 含量 0.05% (质量分数) 与 Zr 含量 0.16% (质量分数) 的合金在 T6 状态下屈服强度与断裂强度分别为 719 MPa 与 790 MPa。含 Sc 与 Zr 的合金具有更细小的晶粒组织, 且在均匀化处理过程中析出大

量细小的 $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ 颗粒, 起到“钉扎”位错与亚晶界的效果, 在后续热处理过程中能有效地抑制再结晶。该合金强化效果来源于沉淀强化、亚结构强化及晶粒细化。

Zhemchuzhnikova^[15]等人研究含 Sc 与 Zr 的某 Al-Mg-Mn 合金的低温力学性能, Sc 含量为 0.2% (质量分数) 与 Zr 含量为 0.08% (质量分数) 的合金在依次经历半连续铸造、均匀化处理及热轧后, 热轧板材的韧脆转变温度 (ductile to brittle transition, DBT) 降低至 77 K, 且该温度下屈服强度与断裂强度分别为 335 MPa 与 555 MPa, 延伸率为 34%, 低温下仍能保持较高的塑性。该合金有着优异的综合低温力学性能, 被认为非常适合应用于液化天然气 (LNG) 领域。该合金优异的低温力学性能来源于 Sc 与 Zr 形成的 $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$, 能够在热轧及后续的冷却过程中抑制再结晶, 使热轧板材保持加工态组织, 其强化机制为固溶强化、细晶强化、亚结构强化及沉淀强化。

Kumar^[33]等人研究某 Al-4Mg-0.08Sc-0.008Zr 合金在超细晶粒 (UFG) 状态下的性能, 该合金经双辊铸造 (twin-roll cast, TRC), 搅拌摩擦处理与 290 °C 退火 22 h 处理后, 晶粒尺寸低于 1 μm 。因 TRC 可提供较大的冷却速度, 故合金铸锭过饱和度大, 即大部分 Sc 仍固溶在基体中。在随后的退火过程中, Sc 与 Zr 以 $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ 的形式沉淀析出, 在基体上均匀弥散地分布, 强烈地抑制再结晶, 合金保持超细晶粒状态, 屈服强度达 405 MPa。该合金的强化机制为固溶强化、细晶强化、沉淀强化及位错强化。

3.2 提高耐腐蚀性

添加 Sc 元素能提高铝合金的耐剥落腐蚀、耐晶间腐蚀性能, 以及降低应力腐蚀开裂倾向^[34]。Sc 元素对铝合金耐腐蚀性能的提升作用, 有几个方面原因。第一, Al_3Sc 电极电位与 $\alpha\text{-Al}$ 基体相近, 两者之间电位差较小, 提高铝合金的电化学稳定性^[35]。第二, Sc 元素能强烈地细化铝合金晶粒, 提高晶界体积分数, 将晶界上某些脆性沉淀物由连续分布转变为间断分布^[36], 抑制裂纹沿晶界发展, 降低合金应力腐蚀开裂及环境断裂倾向。第三, Al_3Sc 可改变晶界析出物的化学成分, 提高某些沉淀物的化学惰性^[37]。第四, 铝合金的应力腐蚀开裂及环境断裂往往沿再结晶晶粒发展, 抑制再结晶亦可降低应力腐蚀开裂及环境断裂倾向^[38]。由前文可知, Sc 元素可有效抑制铝合金的再结晶过程, 从而可有效降低应力腐蚀开裂及环境断裂倾向。第五, Sc 元素能够降低铝合金时效处理后出现的“晶间无沉淀析出带” (PFZ) 宽度^[39], 甚至将其消除。PFZ 的电位较负, 在介质中率先受到腐蚀, PFZ 越宽, 合金耐晶间腐蚀性能越差。Sc 元素有稳定空位^[40], 降低溶质原子扩散的能力, 故能够缩小甚至消除

PFZ, 提高铝合金的耐晶间腐蚀性能。

Li^[41]等人研究某含 Sc 与 Zr 的 Al-Zn-Mg 合金的耐剥落腐蚀与耐应力腐蚀开裂性能。通过浸泡腐蚀试验、交流阻抗测试及透射电镜观察等手段研究发现, 含 Sc 与 Zr 的合金耐剥落腐蚀性能提高, 应力腐蚀开裂倾向降低。7000 系合金的耐腐蚀性能较低, 尤其是应力腐蚀开裂倾向较大。由前文可知, 这是由于该系合金在时效处理过程中容易在晶界上形成连续的沉淀析出物, 也容易在晶界两侧形成晶间无沉淀析出带 (PFZ), 这两方面原因造成该系合金具有较大的应力腐蚀开裂倾向。而 Sc 与 Zr 元素的加入, 一方面细化晶粒, 提高晶界体积分数, 可打破晶界上沉淀析出物的连续分布状态; 另一方面, 则是消除 PFZ, 故含 Sc 与 Zr 的 7000 系合金从两方面提高了耐腐蚀性能。

Peng^[42]等人研究某含 Sc 与 Zr 的 Al-Mg-Mn 合金的耐腐蚀性能。通过与原合金进行对比, 发现添加 Sc 与 Zr 元素以及施以适当的热处理后不仅合金的力学性能有较大提高, 其耐腐蚀性能也得到提升, 表现为腐蚀电流降低, 耐剥落腐蚀性能提高。

Argade^[43]等人研究某 Al-4Mg-0.08Sc-0.008Zr 合金在超细晶粒状态下的耐腐蚀性能。该合金经 TRC、搅拌摩擦及退火处理后获得了低于 1 μm 的晶粒尺寸, 将该合金在 3.5% NaCl 溶液中浸泡及进行电化学测试, 发现该合金不仅拥有较高的极化电阻, 而且随着浸泡时间延长, 极化电阻也随之提高; 此外, 时效峰值的合金具有最正的钝化膜击穿电位。Al-Mg 合金本身耐腐蚀性能优异, 主要原因是该合金组织结构均匀, 故耐腐蚀性能较好。该类合金添加 Sc 与 Zr 后, 因基体上析出了 Al_3Sc 或 $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ 颗粒而具有了沉淀强化机制, 力学性能也随之提高, Al_3Sc 及 $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ 颗粒与 $\alpha\text{-Al}$ 基体的电极电位较为接近, 且在整个基体上均匀弥散分布, 这些化合物颗粒与基体形成微腐蚀电偶对的倾向不大, 故这类合金能兼具优秀力学性能及耐腐蚀性能。

3.3 提高焊接性

铝合金整体的焊接性能均较差, 尤以 7000 系合金为甚。铝合金焊缝多为粗大柱状晶或枝晶组织, 晶间往往存在连续的脆性低熔点共晶物, 导致焊缝强度较低, 甚至不足母材 50%, 裂纹倾向较大, 耐腐蚀性能低等后果^[44]。此外, 由于熔化焊接过程伴随巨大热量输入, 可使焊缝两侧母材中的沉淀析出颗粒长大, 甚至发生再结晶, 失去强化效果, 导致母材软化^[45]。

通常的焊接过程近似一个熔池熔炼过程^[46], 母材与焊接材料在高压电弧作用下, 在焊缝区域内依次经历重熔、熔合与凝固, 整个过程持续时间短, 输入热量大,

对焊缝及周边母材均有较大热影响,是一个复杂的冶金过程。不论是在铝合金母材或是焊接材料中添加 Sc 元素,均能提高其焊接性能^[47,48]。Sc 元素对铝合金焊接性能的改善有多方面原因。第一,细化焊缝区晶粒可提高其强度^[49]。Sc 元素可强烈地细化铝合金焊缝区晶粒,甚至将枝晶转变为等轴晶组织,消除晶间低熔点共晶物连续分布形式,提高焊缝区强度及降低其发生沿晶断裂倾向^[50]。第二,Sc 元素具有强烈地沉淀强化作用,可在焊后冷却以及热处理过程中析出,进一步提高焊缝的强度^[51]。第三,对于含 Sc 铝合金来说,母材中存在大量较稳定的 Al_3Sc 、 $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ 等颗粒,一定程度上抑制热影响区的再结晶,减弱热影响区的软化^[52]。第四,Sc 元素细化焊缝区晶粒,改善焊缝区组织,从而提高焊缝区耐腐蚀性能^[53]。

Babu^[54]等人研究 Sc 对 AA2319 焊丝焊接 AA2219 铝合金性能的改善作用,发现添加 Sc 后焊缝由粗大柱状晶转变为细小等轴晶组织,且晶间连续分布的共晶组织亦得到改善,焊缝强度、韧性及延伸率均得到提升,且经焊后热处理力学性能可进一步提高。

虽然 Sc 对铝合金焊接性能有显著地提升作用,但是作为焊接填充材料来说,存在一个 Sc 含量阈值。Norman^[55]等人研究发现,若母材不含 Sc,考虑焊缝金属的稀释作用,填充材料中的 Sc 含量应不低于 0.8% 方能产生细化焊缝晶粒的效果。由于 Sc 价格较高,过高的 Sc 含量不利于含 Sc 焊接材料的发展与应用,故诸多研究者将研究聚焦于在保持焊接性能前提下,尽量降低焊接填充材料的 Sc 含量。 Al-Ti 与 Al-Zr 二元体系的富铝端均存在一个包晶反应^[56,57],即 $\text{L} + \text{Al}_3\text{Ti}(\text{Al}_3\text{Zr}) \rightarrow \alpha\text{-Al}$,包晶反应能在低溶质原子浓度下率先形核生成金属间化合物作为铝液的形核核心,促进 $\alpha\text{-Al}$ 非均匀形核,达到细化晶粒效果,Ti 与 Zr 也均是铝合金常用的晶粒细化剂。Ti 与 Zr 对含 Sc 焊接材料有几方面有益的作用,其一,由于包晶反应率先形成的 Al_3Ti 与 Al_3Zr 在合金熔点处均具有亚稳态 Li_2 结构,利于 Al_3Sc 在其界面上形核及长大;其二,一旦 Al_3Sc 在其上形核生长,两者均被 Al_3Sc 稳定,保持 Li_2 结构,这种具有“核/壳”结构的颗粒在合金凝固过程中可起到强烈地细化晶粒效果。由于 Ti 与 Zr 对 Al_3Sc 产生了掺杂,降低了细化晶粒所需要的 Sc 含量阈值^[58]。

Seshagiri^[59]等人采用添加 Sc 与 Zr 改性的 AA2239 焊丝对 AA2219 合金进行焊接,发现焊缝区晶粒得到细化,组织更均匀,屈服强度、断裂强度、断裂韧性及延伸率均得到提高。

Huang^[60]等人采用含 Sc, Ti 与 Zr 的 Al-Mg 合金填充

焊丝对某 Al-Zn-Mg-Sc-Zr 合金进行焊接,焊缝区晶粒细化效果明显,为细小等轴晶组织,热处理前焊缝断裂强度可达 460 MPa,焊接接头系数为 83.3%。此外,由于焊缝区晶粒的细化,晶间低熔点共晶物的连续分布状态也被破坏,焊缝热裂纹倾向得到降低。添加 Sc, Ti, Zr 的 Al-Mg 合金填充焊丝能够提高铝合金的焊接性能。

4 结 语

综上所述,Sc 是铝合金优秀的微合金化元素,对铝合金各方面性能均有显著提升,是发展新一代高性能铝合金最有前景的合金元素。我国钪资源丰富,原料来源多样,可以从含钪矿石、氯化烟尘、赤泥、钛白废酸及锆母液等途径提取钪^[61~63]。随着技术的进步与产业的发展,钪产品的成本与价格逐步降低,这也将刺激钪的应用,含钪铝合金因其出色的性能也必将有广阔的发展前景。国外对含钪铝合金的研究与应用均较为深入,如俄罗斯业已开发出诸多牌号的含 Sc 铝合金结构材料,并已经在航空航天及军工领域得到应用。目前国内在含 Sc 铝合金,特别是在含 Sc 超高强度铝合金领域有一定的研究基础。在此基础上,关于今后含钪微合金化铝合金材料的发展主要有以下几个方面:①Sc 在铝合金中与其它合金元素的交互作用及物理冶金行为。只有深刻理解 Sc 在铝合金中的冶金行为与所产生的性能强化机制,才能更精确更高效地利用 Sc 的优异性能。②添加量优化及复合添加改性。Sc 价格较昂贵,若能够在保持性能水平基础上降低合金的 Sc 含量,对含 Sc 铝合金的推广应用有积极意义。研究 Zr, Ti 及其它稀土元素等与 Sc 的复合添加作用,不仅能够降低 Sc 的使用量,而且也能够弥补 Sc 元素的某些不足,扩大含 Sc 铝合金的应用和服役范围。③含 Sc 铝合金兼具优异的力学性能与物理化学性能,应扩大其应用研究范围,特别是功能材料方向应用研究。

参考文献 References

- [1] Yin Zhimin(尹志民), Pan Qinglin(潘清林), Jiang Feng(姜峰), et al. *Scandium and Its Alloys* (钪和含钪合金) [M]. Changsha: Central South University Press, 2007.
- [2] Zhang Kangning(张康宁). *Rare Metals Letters* (稀有金属) [J], 1982, 6: 20-25.
- [3] Xing Qingyuan(邢清源), Meng Linggang(孟令刚), Deng Liang(邓亮), et al. *Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程) [J], 2016, 45(2): 487-492.
- [4] Jindal V, De P K, Venkateswarlu K. *Materials Letters* [J], 2006, 60: 3373-3375.
- [5] Du Gang(杜刚), Yang Wen(杨文), Yan Desheng(闫德胜), et al. *Acta Metallurgica Sinica* (金属学报) [J], 2011, 47(3): 311-316.

- [6] Chen Qin(陈 琴), Pan Qinglin(潘清林), Wang Ying(王 迎), *et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals* (中国有色金属学报) [J], 2012, 22(6): 1555–1563.
- [7] Royset J. *Metallurgical Science and Technology* [J], 2007, 25(2): 11–21.
- [8] Kang Y B, Pelton A D, Chartrand P, *et al. Computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry* [J], 2008, 32(2): 413–422.
- [9] Kerkov M A, Wood T D, Sanders P G, *et al. Metallurgical & Materials Transaction A* [J], 2014, 45: 3800–3805.
- [10] Harada Y, Dunand D C. *Scripta Materialia* [J], 2003, 48: 219–222.
- [11] Norman A F, Prangnell P B, McEwen R S. *Acta Mater* [J], 1998, 46(16): 5715–5732.
- [12] Tang Zhenqi(汤振齐), Liu Ning(刘 宁), Su Yu(苏 宇), *et al. Heat Treatment* (热处理) [J], 2016, 31(1): 7–10.
- [13] Hyde K B, Norman A F, Prangnell P B. *Materials Science Forum* [J], 2002, 396–402: 39–44.
- [14] Li Bo, Pan Qinglin, Shi Yunjia, *et al. Transactions of Nonferrous Metals Society of China* [J], 2013, 23: 3568–3574.
- [15] Zhemchuzhnikova D, Mogucheva A, Kaibyshev R. *Materials Science and Engineering A* [J], 2013, 565: 132–141.
- [16] Novotny G M, Ardell A J. *Materials Science and Engineering A* [J], 2001, 318: 144–154.
- [17] Sun Yingying, Song Min, He Yuehui. *Rare Metals* [J], 2010, 29(5): 451–455.
- [18] Knippling K E, Karnesky R A, Lee C P, *et al. Acta Materialia* [J], 2010, 58: 5184–5195.
- [19] Watanabe C, Kondo T, Monzen R. *Metallurgical and Materials Transactions A* [J], 2004, 35(9): 3003–3008.
- [20] Seidman D N, Marquis E A, Dunand D C. *Acta Materialia* [J], 2002, 50: 4021–4035.
- [21] Marquis E A, Seidman D N. *Acta Materialia* [J], 2001, 49: 1909–1919.
- [22] Adachi H, Nakanishi Y H, *et al. Transactions of the Indian Institute of Metals* [J], 2009, 62(2): 159–162.
- [23] Jones M J, Humphreys F J. *Acta Materialia* [J], 2003, 51: 2149–2159.
- [24] Li Bo, Pan Qinglin, Huang Xing, *et al. Materials Science and Engineering A* [J], 2014, 616: 219–228.
- [25] Xiao Daihong(肖代红), Chao Hong(巢 宏), Chen Kanghua(陈康华), *et al. Chinese Journal of Nonferrous Metals* (中国有色金属学报) [J], 2008, 18(12): 2145–2150.
- [26] Zakharov V V. *Metal Science and Heat Treatment* [J], 2003, 45(7–8): 246–253.
- [27] Jia Zhihong, Røyset J, Jan, Ketil Solberg, *et al. Transactions of Nonferrous Metals Society of China* [J], 2012, 22: 1866–1871.
- [28] Suamitra S, Todorora T Z, Zwanaiger J W. *Acta Materialia* [J], 2015, 9: 109–115.
- [29] Harada Y, Dunand D C. *Materials Science and Engineering A* [J], 2002, 329–331: 686–695.
- [30] Harada Y, Dunand D C. *Intermetallics* [J], 2009, 17: 17–24.
- [31] Booth–Morrison C, Dunand D C, Seidman D N. *Acta Materialia* [J], 2011, 59: 7029–7042.
- [32] Zhang Wei, Xing Yuan, Jia Zhihong, *et al. Transactions of Nonferrous Metals Society of China* [J], 2014, 24: 3866–3871.
- [33] Kumar N, Mishra R S. *Materials Science and Engineering A* [J], 2013, 580: 175–183.
- [34] Cavanaugh M K, Birbilis N, Buchheit R G, *et al. Scripta Materialia* [J], 2007, 56(11): 995–998.
- [35] Royset J, Ryum N. *International Materials Reviews* [J], 2005, 50(1): 19–44.
- [36] Bobby Kannan M, Raja V S, Mukhopadhyay A K, *et al. Metallurgical and Materials Transactions A* [J], 2005, 36: 3257–3262.
- [37] Shi Yunjia, Pan Qinglin, Li Mengjia, *et al. Journal of Alloys and Compounds* [J], 2014, 612: 42–50.
- [38] Umamaheshwer Rao A C, Vasu V, Govindaraju M, *et al. Transactions of Nonferrous Metals Society of China* [J], 2016, 26: 1447–1471.
- [39] Huang Xing, Pan Qinglin, Li Bo, *et al. Journal of Alloys and Compounds* [J], 2015, 650: 805–820.
- [40] Liu Yanyan, Li Mengjie, Gao Fei, *et al. Journal of Alloys and Compounds* [J], 2015, 639: 263–267.
- [41] Li B, Pan Q L, Zhang Z Y, *et al. Materials & Corrosion* [J], 2013, 64(64): 592–598.
- [42] Peng Y, Li S, Deng Y, *et al. Materials Science and Engineering A* [J], 2016, 666: 61–71.
- [43] Argade G R, Kumar N, Mishra R S. *Materials Science and Engineering A* [J], 2013, 565: 80–89.
- [44] Olabode M, Kah P, Martikainen J. Aluminium Alloys Welding Processes: Challenges, Joint Types and Process Selection[C]// *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2013, 227(8): 1129–1137.
- [45] Borchers T E, Mcallister D P, Zhang Wei. *Metallurgical & Materials Transaction A* [J], 2015, 46: 1827–1833.
- [46] Kah P, Suoranta R, Martikainen J. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [J], 2013, 67: 655–674.
- [47] Norman A F, Hyde K, Costello F, *et al. Materials Science and Engineering A* [J], 2003, 354: 188–198.
- [48] Lei Xuefeng, Deng Ying, Peng Yongyi, *et al. Journal of Materials Engineering and Performance* [J], 2013, 22(9): 2723–2729.
- [49] Schemp P, Cross C E, Hacker R, *et al. Weld World* [J], 2013, 57: 293–304.
- [50] He Zhenbo, Peng Yongyi, Yin Zhimin, *et al. Transactions of Nonferrous Metals Society of China* [J], 2011, 21: 1685–1691.
- [51] Kishore B N, Mahesh K T, Pan D, *et al. Materials Chemistry and Physics* [J], 2012, 137: 543–551.
- [52] Deng Ying, Peng Bing, Xu Guofu, *et al. Materials Science and Engineering A* [J], 2015, 639: 500–513.
- [53] Ramanaiah N, Prasad Rao K. *International Journal of Advanced Man-*

- ufacturing Technology [J], 2013, 64: 1545–1554.
- [54] Kishore B N, Mahesh K T, Pan D, et al. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [J], 2013, 65: 1757–1767.
- [55] Norman A F, Birley S S, Prangnell P B. *Science and Technology of Welding and Joining*[J], 2003, 8(4): 235–245.
- [56] Witusiewicz V T, Bondar A A, Hecht U, et al. *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2008, 465: 64–77.
- [57] Wang Tao, Jin Zhanpeng, Zhao Jicheng. *Journal of Phase & Equilibria* [J], 2001, 22(5): 544–551.
- [58] Fu Le, Peng Yongyi, Huang Jiwu, et al. *Materials Science and Engineering A* [J], 2015, 620: 149–154.
- [59] Seshagiri P C, Nair B S, Reddy G M, et al. *Science and Technology of Welding and Joining*[J], 2008, 13(2): 146–158.
- [60] Huang Xing, Pan Qinglin, Li Bo, et al. *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2015, 629: 197–207.
- [61] Yang Haiqiong(杨海琼), Dong Haigang(董海刚), Zhao Jiachun(赵家春), et al. *Nonferrous Metal*[J], 2014, 3: 29–33.
- [62] Zan Haihong(詹海鸿), Liang Huanlong(梁焕龙), Fan Yanjin(樊艳金), et al. *Nonferrous Metal*(有色金属)[J], 2014, 8: 45–47.
- [63] Fan Yanjin(樊艳金), He Hangjun(何航军), Zhang Jianfei(张 Jian 飞), et al. *Nonferrous Metal*(有色金属)[J], 2015, 5: 55–57.

(编辑 惠 琼)