

固溶时效对 Al6092/SiC_p/β-LiAlSiO₄ 复合材料力学性能和微观形貌的影响

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2022.05.004

张诗浩 蒋海云
符智翔 侯清麟

湖南工业大学
包装与材料工程学院
湖南 株洲 412007

摘 要: 以 6092 铝合金 (Al6092) 为金属基体, 碳化硅 (SiC_p) 和 β- 锂霞石 (β-LiAlSiO₄) 作为陶瓷颗粒增强相, 采用粉末锻造工艺制备 Al6092/SiC_p/β-LiAlSiO₄ 复合材料。探究固溶时效处理对 Al6092/SiC_p/β-LiAlSiO₄ 复合材料力学性能的影响, 揭示固溶时效处理对复合材料微观结构、析出相和位错的强化机制。结果表明, 固溶时效处理能提高 Al6092/SiC_p/β-LiAlSiO₄ 复合材料的刚度和强度, 还能促进试样中高位错密度区和 Mg₂Si 析出相的产生, 提高复合材料塑性变形所需的应力。此外, 微米级 SiC_p 的高模量特性可以自发地承载载荷, β-LiAlSiO₄ 的引入则促进了增强相的分散。总之, 固溶时效处理和二元陶瓷颗粒增强相可以共同提高 Al6092 的抗变形能力。

关键词: 固溶时效; 陶瓷颗粒; 铝基复合材料; 微观结构; 析出相

中图分类号: TG156.1

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2022)05-0022-06

引文格式: 张诗浩, 蒋海云, 符智翔, 等. 固溶时效对 Al6092/SiC_p/β-LiAlSiO₄ 复合材料力学性能和微观形貌的影响 [J]. 包装学报, 2022, 14(5): 22-27.

颗粒增强铝基复合材料具有质量轻、强度高、热膨胀系数低、制备工艺灵活等优势, 在航空航天、国防军事、电子封装等特种包装领域具有广泛的应用前景和市场潜力^[1-3]。尽管颗粒增强相可以明显改善金属基体的物理和机械性能, 但热处理仍是进一步提高合金材料机械强度的重要手段。对于 Al6092, 固溶处理可以最大限度地溶解强化组元 (Mg、Si), 形成过饱和溶液。同时, 在固溶强化的快速水淬过程中, 颗粒强化相与 Al 基体之间形成热错配应力, 可以增加复合材料内部的位错密度, 从而提高复合材料的强度。另外, 时效强化可以促进固溶处理后形成的过饱

和溶液的自发溶解和第二相析出, 也能提高复合材料的强度。但是, 过高的固溶温度会导致晶粒长大, 甚至过烧, 从而导致合金强度下降。目前, 关于固溶时效 (solution aging, SA) 对颗粒增强铝基复合材料的微观结构和力学性能影响的研究较少。因此, 本文拟研究单级和双级 SA 对 Al6092/SiC_p/β-LiAlSiO₄ 复合材料力学性能的影响^[4], 揭示复合材料的微观结构、析出相和位错对力学性能的强化机制, 分析 SiC_p 和 β-LiAlSiO₄ 作为颗粒增强相对复合材料力学性能的影响, 以为颗粒增强铝基复合材料的热处理工艺和应用提供理论参考。

收稿日期: 2022-06-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (21978076); 湖南省科技创新团队项目 (2021RC4065); 湖南省重点研发计划基金资助项目 (2022GK2037); 国家大学生创新创业培训计划项目 (202111535001S)

作者简介: 张诗浩 (1993-), 男, 山东菏泽人, 湖南工业大学博士生, 主要研究方向为金属基复合材料,

E-mail: beyooond@outlook.com

通信作者: 侯清麟 (1956-), 男, 湖南安仁人, 湖南工业大学教授, 博士, 主要从事化工产品加工过程与工艺研究,

E-mail: qinglinhou@aliyun.com

1 实验部分

1.1 材料与仪器

Al6092, 湖北金洋冶金股份有限公司; SiC_p, 颗粒尺寸为 5~10 μm, 唐山健诚冶金材料有限公司; β-LiAlSiO₄, 颗粒尺寸为 1~4 μm, 淄博辰东新材料有限公司。

3D 喷射沉积成型设备, SF380 型, 自主研发; 真空热压烧结炉, VHP-554 型, 湖南顶立科技有限公司; 高温箱式炉, KSL-1700X-A4 型, 合肥科晶材料技术有限公司; 立式行星式球磨机, XQM-4 型, 长沙天创粉末技术有限公司; 电子万能试验机, CMT 4104 型, 美特斯工业系统(中国)有限公司; 自动维氏硬度计, A-1170 wien 型, 徕卡显微系统(上海)有限公司; 扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)、能量色散 X 射线光谱仪(energy dispersive spectrometer, EDS), 英国牛津仪器公司; 透射电子显微镜(transmission electron microscope, TEM), JEM-2100 型, 日本电子株式会社。

1.2 试样制备

通过喷射沉积设备对 Al6092 铸锭进行粉末化, 得到粒径为 48~80 μm 的粉末材料。Al6092 的主要元素如表 1 所示。首先, 为了消除水分对复合材料性能的影响, 对 SiC_p、β-LiAlSiO₄ 颗粒进行预处理, 100 ℃ 下干燥 24 h。其次, 通过行星式球磨机将 Al6092 粉末和增强相在 250 r/min 下研磨 24 h, 以改善分散性和均匀性^[5-6]。

表 1 Al6092 铝合金的主要成分

Table 1 Main components of Al6092 aluminum alloy

元素	质量分数 /%
Al	95.35~98.05
Mg	0.80~1.20
Cu	0.70~1.00
Si	0.40~0.80
Fe	≤ 0.30
Zn	≤ 0.25
Ti	≤ 0.15
Cr	≤ 0.15
Mn	≤ 0.15
O	0.05~0.50
其他元素	≤ 0.15

注: 其他元素中每种元素的质量分数 ≤ 0.05%。

采用粉末锻造工艺制备 Al6092/40%SiC_p、Al6092/10%β-LiAlSiO₄ 以及 Al6092/30%SiC_p/10%β-LiAlSiO₄ 复合材料试样。锻造环境为真空。首先, 将

样品进行预热, 分别在 200, 400 ℃ 下保持 2 h; 然后, 将样品加热至 520 ℃ 并保持 1 h; 最后, 在 100 MPa 下锻造两次, 每次保持 1 min, 获得复合材料铸锭。

拉伸试样的形状和尺寸如图 1 所示。每个试样的标距长度为 32 mm, 标距宽度为 6 mm。

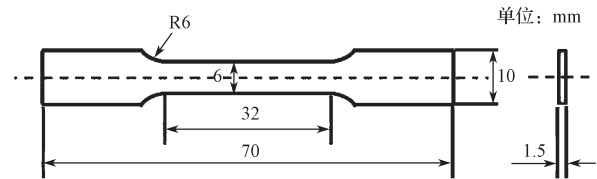


图 1 用于拉伸测试的复合材料试样

Fig. 1 Composite specimens for tensile testing

1.3 SA 处理

对试样进行 T6 热处理^[7]。SA 处理的工艺参数见表 2。1) 单级固溶温度包括 3 个水平(460, 490, 520 ℃), 保温时间为 2 h, 保温时间结束后立即进行水淬处理。时效温度为 160 ℃, 保温时间包括 3 个水平(12, 24, 36 h), 保温时间达到后进行室温冷却。2) 双级固溶温度由两个水平(460 ℃ + 520 ℃ 和 490 ℃ + 520 ℃)组成。当第一阶段的保温时间达到 2 h 后, 以 10 ℃/min 的速率将温度持续升高至第二阶段, 并继续保持 2 h, 第二阶段结束后立即进行水淬处理。时效温度为 160 ℃, 保温时间为 24 h, 保温时间达到后进行室温冷却。

表 2 固溶时效处理的工艺参数

Table 2 Process parameters of solution aging treatment

处理方法	固溶条件		时效条件	
	加热温度 /℃	保温时间 /h	加热温度 /℃	保温时间 /h
单级固溶	460	2		
	490	2	160	12, 24, 36
	520	2		
双级固溶	460, 520	2		
	490, 520	2	160	24

1.4 表征与测试

采用自动维氏硬度计测试试样的硬度。试样尺寸为 10 mm × 10 mm × 10 mm。用砂纸对试样进行打磨和表面抛光, 加载负荷为 2 N, 沿试样表面 2 mm 等距离部位测试, 自动保压 15 s。通过测量压痕对角线长度 d , 得到试样的硬度值。每个试样测量 10 次, 剔除最大值和最小值后计算平均值, 即为试样维氏硬度。

$$HV = 0.102 \times \frac{F}{S} = 0.102 \times \frac{2F \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2}, \quad (1)$$

式中: F 为试验载荷, N; S 为压痕表面积, mm²; α

为压头相对面夹角。

利用电子万能试验机对试样进行拉伸试验。其中,应变速率为 0.2 mm/min。拉伸测试标准采用 GB/T 32498—2016《金属基复合材料 拉伸试验 室温试验方法》。

使用扫描电子显微镜和能量色散 X 射线光谱仪分别对试样的微观结构和元素分布进行表征。

利用透射电子显微镜揭示试样的界面形态。透射试样的制作过程如下:先用砂磨机将试样减薄至 300 μm ,再用离子减薄方法继续减薄至 80 μm ,最后用冲孔机冲剪成 $\Phi 3\text{ mm}$ 的圆片。

2 结果与讨论

2.1 维氏硬度分析

图 2 为 3 种复合材料试样在自由加工状态 (F 态) 和 T6 态下的维氏硬度。从图可以看出,经 T6 热处理后,Al6092/40%SiC_p、Al6092/10% β -LiAlSiO₄ 以及 Al6092/30%SiC_p/10% β -LiAlSiO₄ 复合材料试样的维氏硬度均有所提升,分别为 314, 192, 288 HV。硬度的提升得益于 SiC_p 的高模量特性和 SA 强化机制。固溶强化阶段,Al6092 基体中溶质原子与位错的相互作用形成了柯氏气团,位错被溶质原子团钉扎,增加了位错滑移的阻力,从而使得复合材料的硬度提高。时效强化阶段,通过高温固溶、淬火形成的过饱和固溶体开始分解,溶质原子 Mg、Si 析出,弥散分布在基体中形成沉淀相 Mg₂Si。另外,根据 Kelly-Nicholson 机制,位错切过易变形的沉淀相粒子产生新的台阶表面,界面能升高,有效阻碍了位错滑移,从而提高了基体的硬度 [8]。

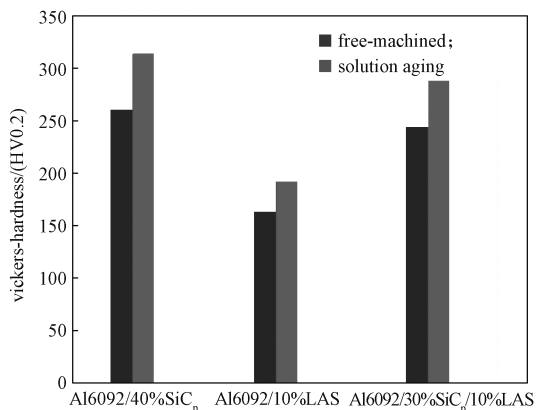
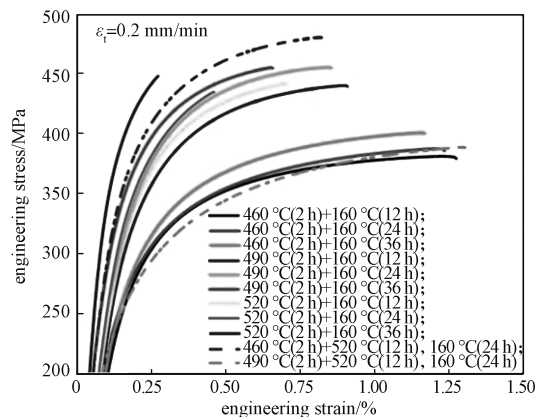


图 2 复合材料试样 F 态和 T6 态的维氏硬度

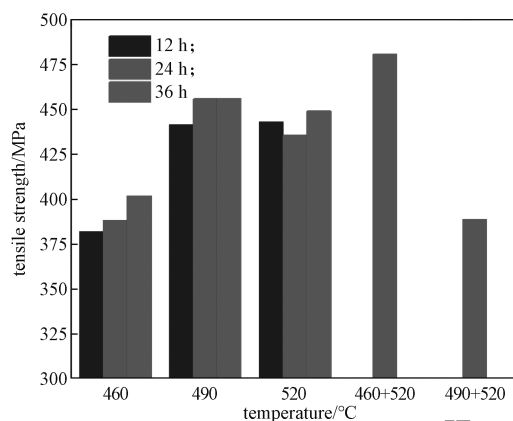
Fig. 2 Vickers hardness of samples in F state and T6 state

2.2 拉伸性能分析

不同 SA 条件下得到的 Al6092/30%SiC_p/10% β -LiAlSiO₄ 复合材料试样,其拉伸方向与锻造方向垂直,拉伸试验结果如图 3 和表 3 所示。表中, E 为弹性模量, A_t 为断裂总延伸率, R_m 为抗拉强度, R_{eL} 为下屈服强度, A_g 为最大力塑性延伸率。



a) 应力-应变曲线



b) 抗拉强度

图 3 SA 对复合材料力学性能的影响

Fig. 3 Effect of solution aging on mechanical properties of composites



彩图

从表 3 可以看出:

1) 单级固溶处理时,相比于 460 °C 和 520 °C,当固溶温度为 490 °C 时试样抗拉强度较高,特别是经过 36 h 的时效处理后,其抗拉强度可达 456 MPa,弹性模量可达 143 GPa。究其原因,一方面固溶温度能够有效提升合金强度;另一方面,固溶温度的持续升高会导致合金晶粒粗化、晶界变宽以及第二相非均匀分布等现象出现,进而影响合金的强度 [9]。因此,本复合材料的单级固溶温度适合选 490 °C。另外,同一个固溶温度下随着时效时间的增加,试样的抗拉强度呈增加趋势,但通过分析断裂总延伸率和最大力

表 3 不同 SA 条件下样品的拉伸测试结果

Table 3 Static tensile test results of samples under different solution aging conditions

SA 条件	E/GPa	A ₁ /%	R _m /MPa	R _{el} /MPa	A _g /%
460 ℃ (2 h) + 160 ℃ (12 h)	108	2.4509	382	381	2.0067
460 ℃ (2 h) + 160 ℃ (24 h)	143	2.3835	388	388	1.0046
460 ℃ (2 h) + 160 ℃ (36 h)	124	2.2554	402	401	1.9019
490 ℃ (2 h) + 160 ℃ (12 h)	140	1.7394	441	437	1.4052
490 ℃ (2 h) + 160 ℃ (24 h)	127	1.6366	456	455	1.2547
490 ℃ (2 h) + 160 ℃ (36 h)	143	1.2689	456	387	0.9355
520 ℃ (2 h) + 160 ℃ (12 h)	119	1.3547	443	371	0.9810
520 ℃ (2 h) + 160 ℃ (24 h)	119	0.8819	435	385	0.5141
520 ℃ (2 h) + 160 ℃ (36 h)	247	0.5251	449	416	0.3430
460 ℃ (2 h) + 520 ℃ (2 h) + 160 ℃ (24 h)	163	1.5801	481	395	1.2726
490 ℃ (2 h) + 520 ℃ (2 h) + 160 ℃ (24 h)	159	2.5080	389	372	2.2497

塑性延伸率不难发现,其所对应的塑性、韧性则有所下降。

2) 双级固溶处理时,经 460 ℃ (2 h) + 520 ℃ (2 h) + 160 ℃ (24 h) 热处理的试样的抗拉强度可达 481 MPa,比经 460 ℃ (2 h) + 160 ℃ (12 h) 单级固溶处理的提高了 25.9%。值得注意的是,当第一阶段的固溶温度升至 490 ℃ 时,试样的抗拉强度仅为 389 MPa。这一现象表明当第一阶段的固溶温度升至 490 ℃ 时,后续的热处理工艺产生了过烧现象,从而导致了复合材料的强度下降。具体来说,当合金进行双级固溶处理时,第一阶段低温固溶处理的主要目的是回复和再结晶^[10-11]。一方面,第一阶段的固溶温度低于非平衡低熔共晶点时,粗大化合物相将难以完全溶解^[12]。另一方面,固溶温度高于低熔点共晶的熔点时,又会使低熔点共晶和晶界出现复熔现象。因此,第一阶段的固溶处理对合金强度起关键作用。

2.3 SA 对力学性能的影响机制

从上述硬度和拉伸试验可知,SA 处理可以明显提高复合材料的力学性能。为了探究 SA 处理对复合材料力学性能的影响机制,对 Al6092/30%SiC_p/10%β-LiAlSiO₄ 复合材料的微观形貌特征进行分析。利用 EDS 对复合材料进行元素分布分析,结果如图 4 所示。

从图 4 可以看出,经 SA 处理的 Al6092/30%SiC_p/10%β-LiAlSiO₄ 复合材料试样出现了 Mg 元素析出现象,且 Mg 元素聚集在 β-LiAlSiO₄ 周围,作为 β-LiAlSiO₄ 和 Al 之间的界面层,从而形成了类似“壳-核”结构;而未经 SA 处理的试样则未见明显的析出行为。究其原因主要是,SA 处理促进了 Mg 元素从 Mg₂Si 相中的解析或从 Al 合金中的直接迁移。据报道,Mg 元素可以打破熔融 Al 基体的致密氧化层,减弱

表面张力^[13]。因此,Mg 元素聚集是 β-LiAlSiO₄ 和 Al 之间具有良好界面相容性的原因之一。简而言之,SiC_p、β-LiAlSiO₄ 与 Al 晶粒之间形成了紧密结合界面,从而提高机械强度和物理性能。特别是,β-LiAlSiO₄ 与 Al 基体之间粗糙、不规则的界面结构增加了结合时的接触面积,增强了机械锚定力。另外,这种良好的界面关系也可以在复合材料受热时,对 Al 基体的热膨胀行为起到抑制作用。

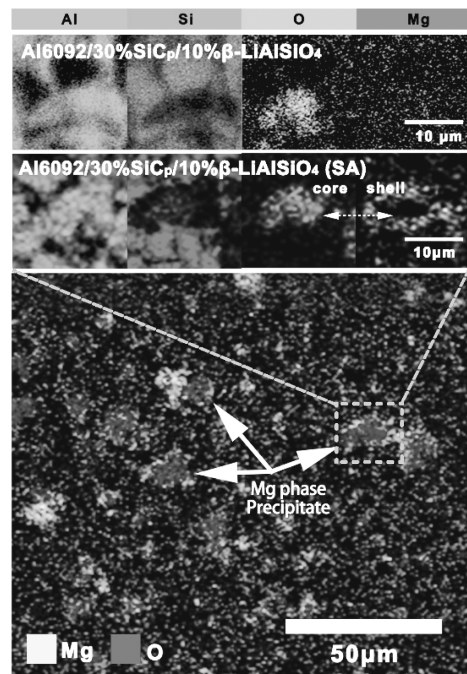


图 4 复合材料的微观形貌及元素分布图

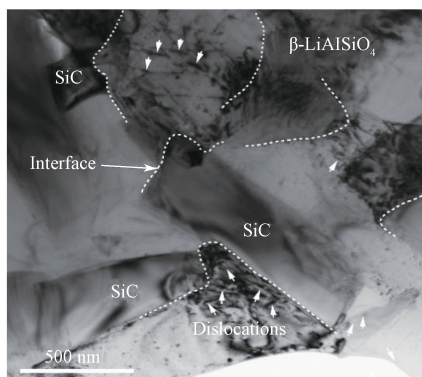
Fig. 4 Micromorphology and element distribution of composites



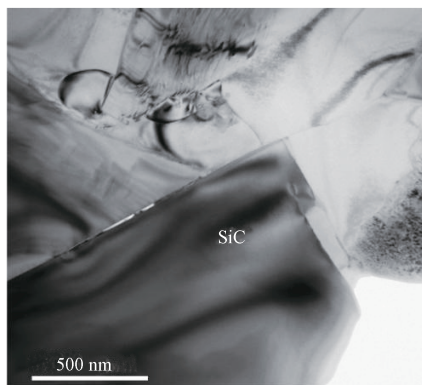
彩图

利用 TEM 测试经 SA 处理的复合材料界面区域的位错,检测结果如图 5 所示。与 Al6092/40%SiC_p

复合试样相比, Al6092/30%SiC_p/10%β-LiAlSiO₄ 复合试样显示出较高的位错密度区域, 主要集中在 SiC_p 与 Al 基体的界面区域。这些位错沿着延伸方向的尖角分布, 特别是在靠近 SiC_p 的界面位置。产生位错的主要原因是: 一方面, 试样因 SA 处理所引起的局部加热和冷却效应, 而产生热应力^[14], 使 SiC_p 和 Al 基体之间的界面区域产生大量位错。另一方面, Al 基体的塑性变形能力大于 SiC_p, 同时, SiC_p 为带有棱角的无定形块状, 因而在复合材料塑性变形过程中位错会在 SiC_p 局部团簇的区域塞积, 从而形成高密度位错区域。该区域增加了复合材料塑性变形所需的应力, 降低了塑性变形能力。此外, 作为一种微米级的颗粒增强相, SiC_p 可以自发地承载载荷并增加 Al 基体的位错密度, 以提高复合材料的强度^[15]。特别是引入 β-LiAlSiO₄ 后, Al6092/30%SiC_p/10%β-LiAlSiO₄ 复合材料的高位错密度区域增多并且分布更加均匀弥散。这表明 β-LiAlSiO₄ 的引入有效地促进了增强相的分散, 较好的界面相容性使其位错密度分布并未过度集中。综上所述, SiC_p 和 β-LiAlSiO₄ 颗粒增强相共同提高了复合材料的变形抗力。



a) Al6092/30%SiC_p/10%β-LiAlSiO₄



b) Al6092/40%SiC_p

图5 复合材料界面区域的位错

Fig. 5 Dislocations in the interface region of composites

3 结论

本文以 SiC_p 和 β-LiAlSiO₄ 为颗粒增强相, 采用粉末锻造工艺制备了 Al6092/SiC_p/β-LiAlSiO₄ 复合材料, 系统地分析了 SA 处理和颗粒增强相对复合材料力学性能的影响, 并揭示了 SA 处理对复合材料显微组织、析出相和位错的强化机制。结果表明, SA 处理能提高 Al6092/SiC_p/β-LiAlSiO₄ 复合材料的刚度和强度。其中, 复合材料试样在 460 °C (2 h) + 520 °C (2 h) + 160 °C (24 h) 的条件下应力达到 481 MPa, 与单级固溶处理相比, 可提高 25.9%。SA 处理后试样出现高位错密度区。其原因是: 试样在 SA 处理过程中会产生局部加热和冷却效应, 从而导致热应力的产生。在复合材料塑性变形过程中, 位错倾向于聚集在颗粒团簇区域, 这也促进了位错区域的形成。此外, SiC_p、β-LiAlSiO₄ 与 Al 晶粒之间具有紧密的界面连接, 提高了界面结合强度, 并有助于提高物理性能和机械强度。该复合材料有望在航空航天、国防军事和电子封装等特种包装领域推广应用。

参考文献:

- [1] BAINS P S, SIDHU S S, PAYAL H S. Fabrication and Machining of Metal Matrix Composites: A Review[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2015, 31(5): 553-573.
- [2] IBRAHIM I A, MOHAMED F A, LAVERNIA E J. Particulate Reinforced Metal Matrix Composites: A Review[J]. Journal of Materials Science, 1991, 26(5): 1137-1156.
- [3] KUMAR N, GAUTAM G, GAUTAM R, et al. A Study on Mechanical Properties and Strengthening Mechanisms of AA5052/ZrB₂ in Situ Composites[J]. Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME, 2016, 139(1): 011002.
- [4] ZHANG S H, HOU Q L, FU Z X, et al. Microstructure and Thermal Properties of Binary Ceramic Particle-Reinforced Aluminum Matrix Composites with SiC/LAS[J]. Journal of Materials Science, 2022, 57: 1796-1809.
- [5] LOTFI B, ROSTAMI M, SADEGHIAN Z. Effect of Silicon Content on Microstructure of Al-Si/SiC_p Composite Layer Cladded on A380 Al Alloy by TIG Welding Process[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(9): 2824-2830.
- [6] CARREÑO-GALLARDO C, ESTRADA-GUEL I, LÓPEZ-MELÉNDEZ C, et al. Dispersion of Silicon

- Carbide Nanoparticles in a AA2024 Aluminum Alloy by a High-Energy Ball Mill[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, 586: S68–S72.
- [7] LIU X D, ZHANG P C, XU Q D, et al. Aging Behavior of Be/6061Al Composite Fabricated by Hot Isostatic Pressing Technique[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 764: 460–466.
- [8] ALAM M A, YA H H, AZEEM M, et al. Modelling and Optimisation of Hardness Behaviour of Sintered Al/SiC Composites Using RSM and ANN: A Comparative Study[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, 9(6): 14036–14050.
- [9] 王 炳. 双级固溶与时效处理 ZL205A 合金的组织及性能研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2020.
- WANG Bing. Study on Microstructure and Properties of ZL205A Alloy Treated by Double-Stage Solid Solution and Aging[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2020.
- [10] 陈康华, 巢 宏, 方华婵, 等. 逐步固溶处理对 Al-Zn-Mg-Cu 系铝合金组织和局部腐蚀性能的影响 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2010, 41(5): 1730–1735.
- CHEN Kanghua, CHAO Hong, FANG Huachan, et al. Effect of Step-Solution on Microstructure and Local Corrosion Properties of Al-Zn-Mg-Cu Aluminum Alloy[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2010, 41(5): 1730–1735.
- [11] 阳建君, 旷 焕, 陈天鸥 等. 固溶温度对 2A96 铝锂合金电化学腐蚀性能的影响 [J]. 包装学报, 2020, 12(1): 56–62.
- YANG Jianjun, KUANG Huan, CHEN Tianou, et al. Effects of Solution Temperature on Electrochemical Corrosion Behavior of 2A96 Al-Li Alloy[J]. *Packaging Journal*, 2020, 12(1): 56–62.
- [12] 林高用, 彭大暑, 魏圣明, 等. 强化固溶处理对 7075 铝合金组织的影响 [J]. 金属热处理, 2002, 27(11): 30–33.
- LIN Gaoyong, PENG Dashu, WEI Shengming, et al. Influence of Strengthened Solution on Microstructures of 7075 Aluminum Alloy[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2002, 27(11): 30–33.
- [13] ZHANG Z J, YUAN Y, XIE W Q, et al. Tailoring the Thermophysical Properties of Porous SiC Framework Reinforced Al-Mg-Si Composites by Si Alloying Content for Thermal Energy Management[J]. *Materials Technology*, 2020, 35(11/12): 815–820.
- [14] OLEG M, OLGA D, TATIANA K, et al. Investigation of Stresses Induced Due to the Mismatch of the Coefficients of Thermal Expansion of the Matrix and the Strengthening Particle in Aluminum-Based Composites[J]. *Metals*, 2021, 11(2): 279.
- [15] KONG X J, WANG M H, WANG B, et al. Thermal Mismatch Stress Relaxation and Dislocation Transformation of 45%SiC_p/Al Composites by Continuous Diode Laser Heating[J]. *Applied Physics A*, 2019, 125(9): 596.
- (责任编辑: 邓 彬)

Effects of Solution Aging on Mechanical Properties and Microstructure of Al6092/SiC_p/β-LiAlSiO₄ Composites

ZHANG Shihao, JIANG Haiyun, FU Zhixiang, HOU Qinglin

(College of Packaging and Materials Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: Al6092/SiC_p/β-LiAlSiO₄ composites were prepared by a powder forging process using Al6092 as the metal matrix and SiC_p and β-LiAlSiO₄ as the ceramic particle reinforcement phases. The effects of solution aging on the mechanical properties, the microstructure, precipitation phases, and dislocations of the composites were revealed. The results showed that the solution aging treatment improved the stiffness and strength of Al6092/SiC_p/β-LiAlSiO₄ composites, and the solution aging promoted the generation of high dislocation density zones and Mg₂Si precipitation phases in the samples, which increased the stress required for plastic deformation of the composites. In addition, the high modulus property of micron-sized SiC_p could spontaneously carry loads, and the introduction of β-LiAlSiO₄ promoted the dispersion of the reinforcing phase. In conclusion, the solution aging treatment and the particle-reinforced phase can jointly improve the deformation resistance of Al6092.

Keywords: solution aging; ceramic particle; aluminum matrix composite; microstructure; precipitated phase