

Ti、Sc、Zr 联合添加对 7005 铝合金组织和性能的影响

倪培相¹ 邢 毅² 孙 军¹ 王 磊¹ 左秀荣³

(1.天润工业技术股份有限公司技术中心; 2.山东省威海市住房公积金管理中心;
3.郑州大学材料物理教育部重点实验室)

摘 要 利用光学显微镜、扫描电镜、硬度计、MTS810 液压伺服试验机、EDS 能谱仪等手段研究了 Ti、Sc、Zr 联合细化的 7005 铝合金变形前后的显微组织和性能。结果表明,Ti、Sc、Zr 联合细化的 7005 铝合金具有最小的晶粒度,最优的力学性能,比细晶铝锭(GRAI)单独细化或者 Sc、Zr 联合细化的效果好,抗拉强度比国家标准提高了约 24%,伸长率提高了 55%。这是因为 Ti、Sc、Zr 联合细化的合金在凝固过程中形成了与基体共格的一次 $Al_3(Sc_xZr_{1-x})$ 和 $Al_3(Sc_xTi_{1-x})$ 粒子,起到了异质形核的作用,细化了合金晶粒尺寸。合金在均匀化和固溶时效处理后析出了大量弥散分布、热稳定性高并与基体共格的 $Al_3(Sc_xZr_{1-x})$ 粒子,提高了合金的硬度和强度。

关键词 7005 铝合金;显微组织;性能;异质形核

中图分类号 TG146.21;TG113.25⁺1

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.04.023

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Ti, Sc, Zr Joint Addition on Microstructure and Properties of 7005 Aluminum Alloy

Ni Peixiang¹, Xing Yi², Sun Jun¹, Wang Lei¹, Zuo Xiurong³

(1.Institute of Tianrun Crankshaft Co.,Ltd.; 2.Shandong Weihai Housing Provident Fund Management Center;
3.Key Laboratory of Material Physics Ministry of Education, Zhengzhou University)

Abstract: Microstructure and properties of 7005 aluminum alloy with Ti, Sc and Zr compound modification before and after deformation were investigated by optical microscope, scanning electron microscope, hardness tester, MTS810 servo hydraulic testing machine and EDS energy spectrometer. The results indicate that 7005 alloy modified by joint addition of Ti, Sc and Zr possesses the finest grain size as well as optimal strength, elongation, and electrical conductivity, which has better effects than those by single refine or Sc and Zr joint addition. The tensile strength and elongation of the alloy are increased by 24% and 55% than the national standards, respectively, which is mainly attributed to the formed primary $Al_3(Sc_xZr_{1-x})$ and $Al_3(Sc_xTi_{1-x})$ particles coherent with the matrix during solidification, playing a role of heterogeneous nucleation, thus refining the grain. Large amounts of dispersed $Al_3(Sc_xZr_{1-x})$ particles with high thermal stability are precipitated in alloy after homogenization and solution treatment, which is coherent with matrix, enhancing the hardness and strength.

Key Words: 7005 Aluminum Alloy, Microstructure, Mechanical Properties, Heterogeneous Nucleation

7005 铝合金是 Al-Zn-Mg 系中强可焊的变形铝合金,具有相当高的强度、断裂韧度、抗腐蚀性能和良好的可焊性,常用作运输工具的框架、横杆和桥梁等结构件材料,而随着现代航空航天、交通运输事业的发展,该合金的性能有待进一步提高^[1-2]。晶粒细化和组织强化是提高合金性能的重要方法。Ti 能细化合金在铸态时的晶粒,是非常有效的晶粒细化剂。当铝合金中加入少量的 Ti 时,合金的强度、韧性、耐磨性、抗疲劳性能及热稳定性等均有所提高。含 Sc 铝合金具有很高的强度、韧

性和良好的耐蚀性,但 Sc 作为铝合金良好的晶粒细化剂,必须保证达到一定的临界浓度(0.55%),才能获得理想的细化效果^[3],但这增加了合金的成本,而复合添加 Sc 和 Zr 在降低 Sc 有效含量的情况下能达到只含 Sc 时的效果^[4-5],是降低含 Sc 铝合金制造成本的有效途径。目前,该合金主要是通过常规 Al-Ti 中间合金和少量 Zr 或者 Sc 来细化组织并提高性能,关于用含 Ti 细晶铝锭和 Sc、Zr 联合强化来改善该合金组织和性能的研究鲜有报道。因此,本研究在原 7005 合金标准成分

收稿日期:2022-08-17;修改稿收到日期:2022-10-02

第一作者简介:倪培相,男,1982 年出生,高级工程师,山东威海(264400),E-mail:pxni@tianrun.com

引用格式:倪培相,邢毅,孙军,等. Ti、Sc、Zr 联合添加对 7005 铝合金组织和性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(4):554-559.

NI P X, XING Y, SUN J, et al. Effects of Ti, Sc, Zr joint addition on microstructure and properties of 7005 aluminum alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(4):554-559.

基础上,添加适量的 Sc、Zr,并用细晶铝锭(Ti 含量为 0.112%)代替常规的 Al-10Ti 中间合金,进行了含 Ti 细晶铝锭、Sc、Zr 的联合添加对 7005 铝合金组织的研究,旨在进一步探索 Ti、Sc、Zr 联合微合金化对 7005 铝合金组织和性能的影响,旨在为其应用提供参考。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

采用质量分数为 99.7% 的纯铝、纯锌、纯镁以及 Al-10Mn、Al-2Cr、Al-4. 4Zr、Al-2. 18Sc、细晶铝锭 (GRAI)、Al-10Ti 等中间合金分别配制成 4 种铝合金,见表 1。用 5 kW 的电阻炉熔炼,熔炼温度控制在 750 ℃ 以内,在 740 ℃ 用氩气除气精炼,精炼后在 720 ℃ 下浇注到金属型中,凝固冷却后取出试样,并对其进行 470 ℃×24 h 均匀化处理。

表 1 不同合金成分
Tab.1 Compositions of alloys %

编号	细化剂	w _B							
		Zn	Mg	Mn	Cr	Zr	Sc	Ti	Al
1	Al-Ti	4.6	1.3	0.5	0.12	0.1	—	0.03	余量
2	GRAI	4.6	1.3	0.5	0.12	0.1	—	0.03	余量
3	Ti(GRAI)、Sc、Zr	4.6	1.3	0.5	0.12	0.20	0.25	0.03	余量
4	Sc、Zr	4.6	1.3	0.5	0.12	0.20	0.25	—	余量

1.2 试验方案

首先对熔铸好的 4 种合金进行铸态组织观察。金相试样均取自距试样底部 2 cm 处。金相试样经过粗

磨、细磨、抛光后,用 5 mL HF+25 mL HO₃+75 mL H₂O 的混合酸腐蚀,用配备 VideoTest 处理系统的 OLYMPUS 金相显微镜进行微观组织定性定量分析。

4 种合金经 470 ℃×24 h 均匀化处理后,再进行热挤压成形,挤压温度为 450 ℃,挤压速度为 4 m/min。利用 GX-71 型金相显微镜和 JSM-6700F 扫描电镜观察并分析合金的微观组织。

在常温下采用 MH-50 型数显维氏硬度计分别测量 4 种合金的硬度,比较细化方式对合金硬度的影响。采用 MTS810 液压伺服材料试验机测试合金的常温力学性能,分析合金化对合金力学性能的影响。

2 试验结果分析

2.1 合金组织

2.1.1 铸态组织

图 1 为 4 种不同细化方式处理后合金的宏观组织。可以看出,铸态下的 Al-Ti 细化的合金为较大的等轴晶粒,GRAI 细化的合金晶粒比 Al-Ti 细化的合金晶粒明显变小;Ti、Sc、Zr 和 Sc、Zr 分别细化的合金为更细小的等轴晶粒,且 Ti-Sc-Zr 细化的合金的晶粒最细小。表明细晶铝锭的 Ti 细化晶粒的效果比常规 Al-Ti 合金细化效果明显,Sc、Zr 联合细化比单纯加 Ti 的细化作用要好,Ti(GRAI)、Sc、Zr 联合添加对晶粒的细化作用最好。

图2为混合酸腐蚀后合金的显微组织。可见Al-Ti

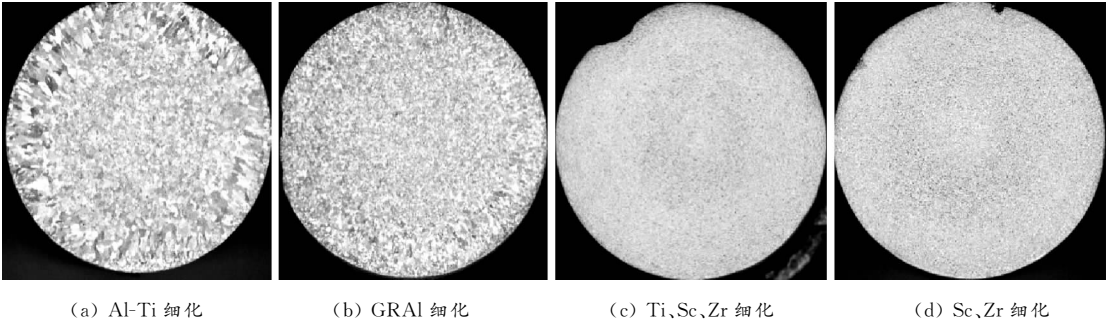


图 1 不同细化剂细化的 4 种合金铸态宏观组织

Fig.1 Microstructures of as-cast alloys with different refiner treatment

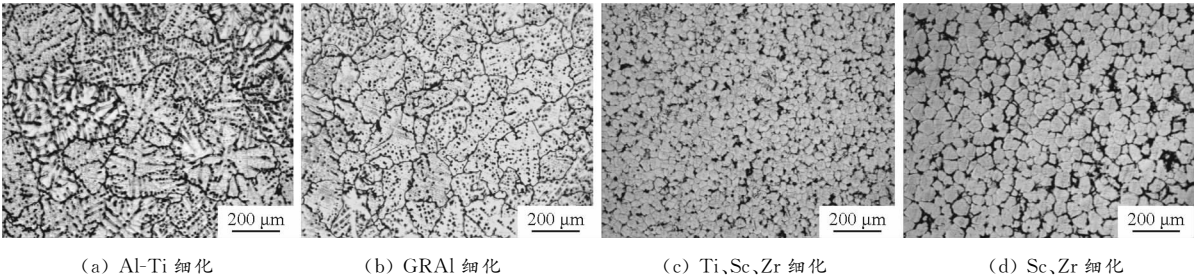


图 2 不同细化剂细化的 4 种合金铸态显微组织(已酸蚀)

Fig.2 Microstructures of as-cast alloys with different refiner treatment

中间合金细化后合金的晶粒比较大,约为 330 μm ,而且有较多粗大的枝晶,枝晶间距约为 23 μm ;GRAI 细化后合金的晶粒相对较小,约为 170 μm ,且枝晶变少变细,枝晶间距约为 19 μm ;Sc、Zr 和 Ti、Sc、Zr 细化的合金晶粒更小,直径分别约为 50 μm 和 35 μm ,并且无枝晶。表明细晶铝锭的 Ti 细化晶粒的效果比常规 Al-Ti 合金细化效果明显,Sc、Zr 联合细化比单纯加 Ti 的细化作用要好,Ti、Sc、Zr 联合添加对晶粒的细化效果最好。

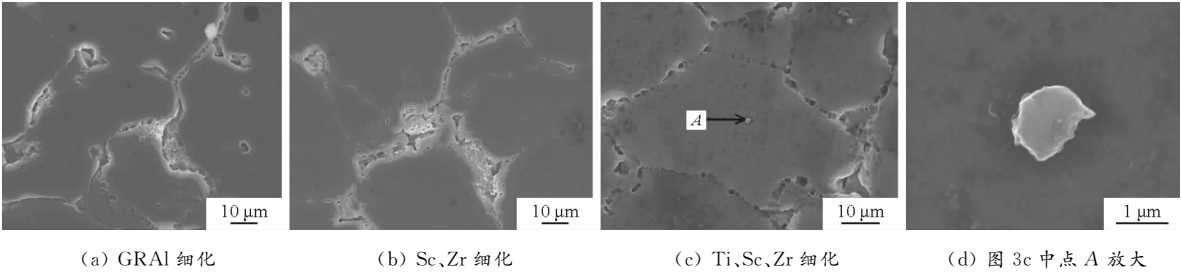


图 3 不同细化方式下 7005 合金 SEM 形貌
Fig.3 SEM morphologies of as-cast alloys by different refining methods

表 2 图 3c 中点 A 能谱分析

Tab.2 Energy spectrum analysis of point A in Fig.3c %							
w_B							
Mg	Sc	Ti	Cr	Mn	Zn	Zr	Al
0.16	3.77	0.85	—	—	2.37	14.77	78.07

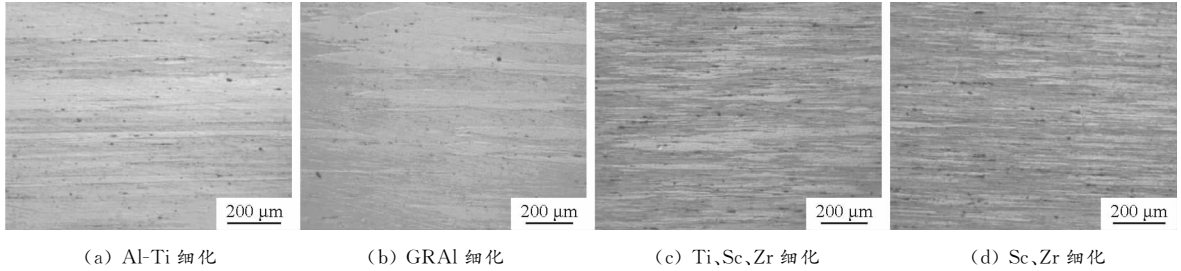


图 4 不同细化方式下 7005 合金挤压变形并热处理后的金相组织

Fig.4 Microstructures of 7005 alloys after deformation and heat treatment by different refining methods

压态组织都变成纤维状,合金中的黑色粗大相明显减少,4 种合金均发生了部分再结晶,并且用 Al、Ti 和 GRAI 细化的合金再结晶程度更强且更明显。

2.2 力学性能

2.2.1 硬度

图 5 为不同细化剂细化的 4 种合金挤压变形后的

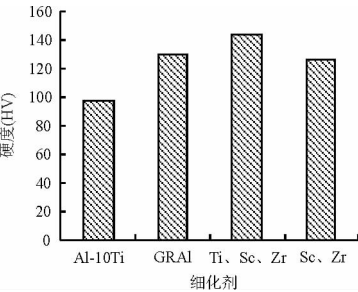


图 5 4 种不同细化方式下合金挤压态的硬度
Fig.5 Hardness of as-extruded alloys by different refining methods

图 3 为经混合酸腐蚀后试样的 SEM 组织。可以看出,经 Ti、Sc、Zr 细化的合金晶内出现了很小的粒子,见图 3c。经能谱分析知,该粒子含有大量的 Ti、Sc、Zr,见表 2。研究表明,此粒子可能是合金凝固过程中形成的一次 $\text{Al}_3(\text{Sc}_x\text{Zr}_{1-x})$ 和 $\text{Al}_3(\text{Sc}_x\text{Ti}_{1-x})$ 粒子^[6-8]。 $\text{Al}_3(\text{Sc}_x\text{Zr}_{1-x})$ 和 $\text{Al}_3(\text{Sc}_x\text{Ti}_{1-x})$ 粒子与 Al 基体共格,在合金凝固过程中优先形成,分布均匀细小弥散,起到了非均质形核的作用,细化了合金晶粒尺寸。

2.1.2 变形组织

图 4 为 4 种合金挤压变形并经 440 $^{\circ}\text{C} \times 150 \text{ min}$ 固溶,室温水淬,120 $^{\circ}\text{C} \times 24 \text{ h}$ 时效处理后的金相组织。可以看出,合金在经过挤压变形和固溶时效处理后,挤

硬度。可以看出,Al-10Ti 细化的合金硬度(HV)最小,为 97.2;Ti、Sc、Zr 联合细化的合金硬度最大,为 143.7。其他两种合金的硬度相差不大,都在 130 左右。可见,Ti-Sc-Zr 细化合金硬度提高最显著,比 Al-10Ti 细化的合金提高了约 50%。

2.2.2 力学性能对比

图 6 为合金挤压变形后经 440 $^{\circ}\text{C} \times 150 \text{ min}$ 固溶和 120 $^{\circ}\text{C} \times 24 \text{ h}$ 时效处理后的力学性能对比图。可以看出,4 种合金的强度和伸长率均超过了国标(372 MPa、317 MPa 和 12%)。Al、Ti 细化的合金的强度最低;Sc、Zr 和 GRAI 细化的合金强度大体相当;Ti、Sc、Zr 联合细化的合金抗拉强度和屈服强度分别为 485 MPa 和 436 MPa,伸长率达到了 16.1%。综合来看,Ti、Sc、Zr 细化的合金强度和伸长率最高,比国标试样的抗拉强度高约 30%,伸长率提高了约 55%。

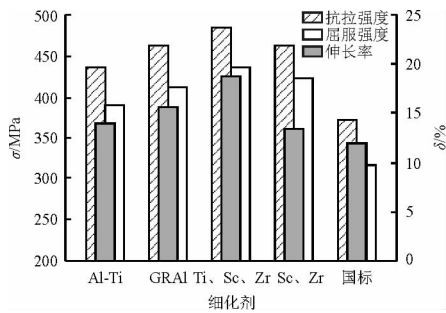


图 6 4 种合金挤压变形并热处理后常温力学性能
Fig.6 Mechanical properties of alloys after deformation and heat treatment

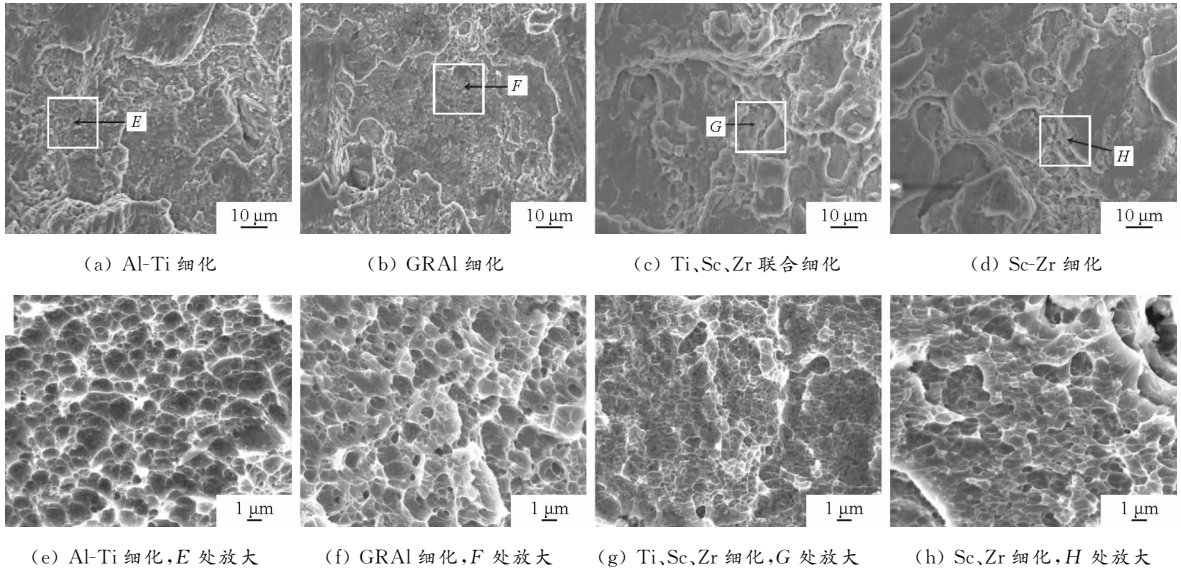


图 7 挤压态热处理后 4 种合金拉伸试样断口形貌
Fig.7 Tensile fracture morphologies of as-extruded alloys after heat treatment

图 8 为不同细化方式处理的 7005 铝合金的拉伸断口形貌及能谱分析。经能谱分析发现，Al-Ti 和 Sc、Zr 联合细化的合金断口韧窝底部的粗大粒子多为含 Zn、Mg、Fe、Si 的粒子，说明 Al-Ti 和 Sc、Zr 细化后合金断口的粗大韧窝是由合金中粗大的第二相引起的，基体中

的 Fe、Si 形成的粗大第二相以及较大的含 Zn、Mg 相会影响合金的韧性。GRAI 或 Ti、Sc、Zr 联合细化的合金中细化了含 Zn、Mg 相和含 Fe、Si 的第二相，可以避免粗大第二相引起晶粒的过早断裂，从而提高了合金的塑性。

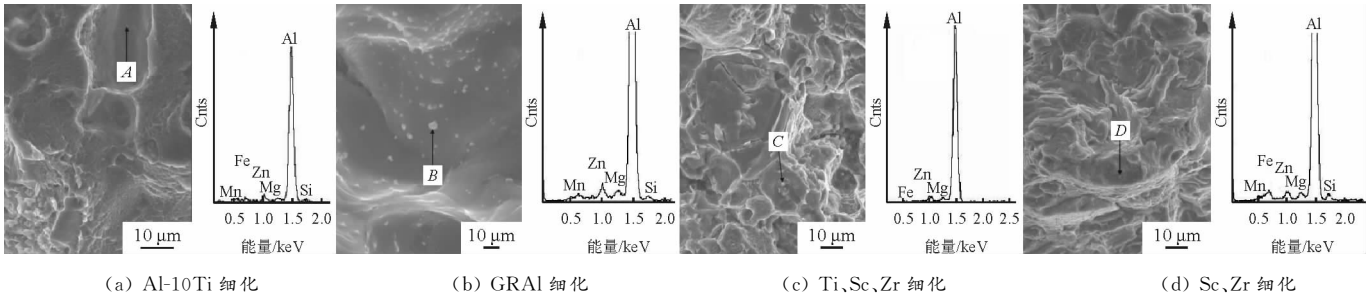


图 8 4 种合金拉伸断口 SEM 形貌及 EDS 分析结果
Fig.8 SEM images and EDS results of tensile fracture of alloys

3 分析与讨论

3.1 合金化对晶粒细化的影响

经不同细化方式细化的 7005 铝合金，晶粒大小有

明显差别，Ti、Sc、Zr 联合细化的合金晶粒细小，细化效果最好。原因是 Al-Ti 中间合金中存在很多含 Ti 的粗大相，由于组织的遗传性，用 GRAI 细化的合金比常规 Al-Ti 中间合金细化的合金中 Ti 的分布更均匀，提高了合金的成分过冷，并抑制了晶粒的长大，细化了合金

晶粒。Sc、Zr 细化的合金,由于生成了大量可作为异质形核核心的 Al_3Sc 、 Al_3Zr 和 $\text{Al}_3(\text{Sc}_x\text{Zr}_{1-x})$ 粒子^[8],并且分布非常均匀弥散,因此合金晶粒比 GRAI 细化的合金晶粒小。Ti、Sc、Zr 联合细化的合金中,由于 Ti 的添加,Ti 同 Zr 一样也能置换 Al_3Sc 中的 Sc 从而降低有效 Sc 含量,使得 Al_3Sc 粒子增多^[9]。另外,不仅生成 $\text{Al}_3(\text{Sc}_x\text{Zr}_{1-x})$ 粒子,还形成了与基体错配度更小的 $\text{Al}_3(\text{Sc}_x\text{Ti}_{1-x})$ 粒子(与基体错配度约为 0.34%)^[10],在合金中 Sc 含量不变的情况下增加了异质形核粒子的数量,所以晶粒更加细小。

3.2 合金化对再结晶的影响

7005 铝合金经过挤压变形和固溶时效处理后,组织都变成纤维状,4 种合金均发生了部分再结晶,并且 Al-Ti 和 GRAI 细化的合金再结晶程度更强更明显。这是因为含 Sc 的合金在均匀化退火并固溶时效热处理之后析出了大量弥散分布、热稳定性高并与基体共格的 $\text{Al}_3(\text{Sc}_x\text{Zr}_{1-x})$ 粒子^[11],共格粒子的存在会明显阻碍再结晶的进行,由于变形时共格粒子附近不会产生高位错密度和取向梯度,因而不能显著促进非自发形核,并且 $\text{Al}_3(\text{Sc}_x\text{Zr}_{1-x})$ 粒子尺寸很小(5~7 nm)^[12],对晶界迁移阻力很大。另外, $\text{Al}_3(\text{Sc}_x\text{Zr}_{1-x})$ 粒子的存在会使变形组织中胞状结构模糊、位错缠结严重,阻碍了多边化和亚晶生长等形核方式的进行,使合金的再结晶温度明显升高,抑制了合金的再结晶。

3.3 合金化对合金力学性能的影响

Sc、Zr 联合细化的 7005 铝合金在凝固过程中析出的具有 $L1_2$ 型结构的一次 $\text{Al}_3(\text{Sc}_x\text{Zr}_{1-x})$ 粒子与基体共格,熔点高、稳定性好,在熔体中分布均匀^[13],大大细化了铸态晶粒组织,造成细晶强化、共格强化和亚结构强化^[11],提高了合金的硬度。在 Ti-Sc-Zr 细化的合金中,不但形成 $\text{Al}_3(\text{Sc}_x\text{Zr}_{1-x})$ 粒子造成共格强化和亚结构强化,而且还有大量弥散分布的析出点存在,且其细晶强化作用更强,硬度较大,使得 Ti-Sc-Zr 细化的合金硬度最高。

7005 铝合金在热挤压变形后,组织中的晶界不平衡析出相被挤压破碎,降低了应力集中,提高了合金的强度。此外,在挤压变形过程中,纤维组织和变形亚结构边界的位错不断增加,位错在运动时的相互交割加剧,产生位错缠结等障碍,位错运动阻力增大,引起变形抗力的增加,从而提高了合金的硬度^[14]。

Ti 对 7005 铝合金的塑性有很大的影响,可以大幅提高其伸长率。Ti 加入铝合金中,能够细化合金晶粒,从而提高合金塑性。添加 Sc、Zr 后,在凝固过程中形成了 Al_3Sc 、 Al_3Zr 和 $\text{Al}_3(\text{Sc}_x\text{Zr}_{1-x})$ 粒子,可作为异质形

核核心,细化合金晶粒,起到细晶强化的作用。在均匀化过程中析出细小的二次 $\text{Al}_3(\text{Sc}_x\text{Zr}_{1-x})$ 粒子,分布均匀、弥散,可以强烈钉扎晶界和位错,阻止晶界的迁移,起到了弥散强化的作用^[15]。由于合金强度提高,合金的塑性大大降低,这与 Sc-Zr 细化合金的强度和塑性结果相符。而 Ti-Sc-Zr 细化的合金,由于 Ti 的添加,晶粒比 Sc-Zr 细化的合金晶粒更加细小,因应力集中引起合金开裂的机会也较少,从而提高了合金的塑性。因此 Ti、Sc、Zr 联合细化的合金具有理想的强度和伸长率。

4 结 论

(1)4 种细化方式细化的 7005 合金中,Ti、Sc、Zr 联合细化的合金晶粒最小,Sc、Zr 细化的合金晶粒次之,GRAI 细化的合金晶粒稍大,Al-Ti 中间合金细化的合金晶粒最大。可见,Ti-Sc-Zr 联合细化作用最好,Sc、Zr 细化作用次之,GRAI 细化较差,Al-Ti 合金细化作用最差。

(2)7005 铝合金经挤压变形和固溶时效处理后,组织形貌都变成纤维状结构,合金中的粗大沉淀相固溶或球化,残留相减少,枝晶消失,析出物更加均匀弥散。含 Sc 的合金在均匀化和固溶时效处理后析出了大量弥散分布、热稳定性高并与基体共格的 $\text{Al}_3(\text{Sc}_x\text{Zr}_{1-x})$ 粒子,提高了合金的硬度和强度。

(3)Ti、Sc、Zr 联合细化的 7005 铝合金的强度、伸长率最好,抗拉强度和伸长率分别比国标提高了 30% 和 55%。

参 考 文 献

- [1] 刘敬福,周祥春,曲迎东. Al-Zn-Mg 合金应力腐蚀断裂的研究进展[J]. 金属热处理, 2020, 45(9): 21-28.
- [2] PRASANTA K R, GHOSH M M, GHOSH K S. Microstructural, mechanical and electrochemical behaviour of a 7017 Al-Zn-Mg alloy of different tempers[J]. Materials Characterization, 2015, 104(6): 49-60.
- [3] 李召明,姜海昌,闫德胜,等. 微量 Sc 对 Al-Zn-Mg 合金焊接接头组织和性能的影响[J]. 材料研究学报, 2019, 33(9): 673-682.
- [4] JIN T N, NIE Z R, XU G F, et al. Effects of cooling rate on solidification behavior of dilute Al-Sc and Al-Sc-Zr solid solution[J]. Trans. Nonferrous Met.Soc., 2004, 14(1): 58-62.
- [5] 王凯先,尹登峰,胡婷,等. 微量钪、锆对 Al-Zn-Mg 合金铸态组织演变的影响[J]. 金属热处理, 2019, 44(3): 50-57.
- [6] WANG Y L, JIANG H C, LI Z M, et al. Two-stage double peaks ageing and its effect on stress corrosion cracking susceptibility of Al-Zn-Mg alloy[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2018, 34(7): 1 250-1 257.
- [7] ROKHLIN L L, DOBATEKINA T V, BOCHVAR N R, et al. Investigation of phase equilibria in alloys of the Al-Zn-Mg-Cu-Zr-Sc system[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2004, 376: 10-16.

Ti 含量对压铸 A380 合金缸壳体力学性能的影响

赵郁臻¹ 徐义武² 詹凤伟² 周海军¹ 薛小江¹ 钱志安¹ 王培建¹ 张 森¹ 康阳洋¹ 程汉明³
(1.广东鸿图南通压铸有限公司;2.通用汽车中国;3.南通鸿劲金属铝业有限公司)

摘 要 针对新一代发动机所用的 A380 合金下缸壳体,在性能上对材料的抗拉强度及屈服强度要求更高,提出了满足 -3σ 的全新目标。为此,通过不断调整铝液的化学成分及压铸工艺参数,确保最终目标指标得到实现。
关键词 化学成分;力学性能;工艺参数
中图分类号 TG146.21;TG249.2 **文献标志码** A
DOI:10.15980/j.tzzz.2023.04.024 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



Ti Content on Improvement of Mechanical Properties of Lower Crankcase

Zhao Yuliu¹, Xu Yiwu², Zhan Fengwei², Zhou Haijun¹, Xue Xiaojiang¹, Qian Zhian¹,
Wang Peijian¹, Zhang Sen¹, Kang Yangyang¹, Chen Hanming³

[1.Guangdong Hongtu(Nantong) Die-casting Co., Ltd.; 2.GM China; 3.Nantong Hongjin Metal Aluminum Co., Ltd.]
Abstract: In view of the lower cylinder housing for the new generation engine, the tensile strength and yield strength of the alloy are the higher than other products in performance. Therefore, the final target can be achieved by constantly adjusting the chemical composition of liquid aluminum and the process parameters of die casting.
Key Words: Chemical Composition, Mechanical Properties, Processing Parameter

伴随着汽车排放国标 VI 要求,汽车行业相继开发出与之要求相匹配的发动机。基于此,通用汽车开发了 CSS 发动机。其中,CSS 675T(下缸体延伸配套体)直接应用于通用汽车(General Motor)2.7T 四缸发动机,以及全铝缸盖、缸体和塑料油底壳等材料^[1-3]。因此,本研究对如何提高材料力学性能进行了分析,旨在为类似项目的应用提供参考。

1 下缸壳体力学性能要求

CSS675T 由 3 个子零件共同构成。采用自主开发的 A380 耐磨铝合金,其在性能上需要满足 -3σ 的特殊要求。通过 MagMa 模流分析软件对铝液的充型过程进行模拟,对温度场的分布进行分析,优化模具方案,最终设计出合理的浇注方案和冷却系统。压铸过程中,使

收稿日期:2022-05-24;**修改稿收到日期:**2022-06-27
第一作者简介:赵郁臻,男,工程师,1990 年出生,江苏南通(226300),E-mail:zero-zhao@ght-china.com
引用格式:赵郁臻,徐义武,詹凤伟,等. Ti 含量对压铸 A380 合金缸壳体力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(4):559-561.
ZHAO Y L, XU Y W, ZHAN F W, et al. Ti content on improvement of mechanical properties of lower crankcase[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(4):559-561.

[8] MARSHA E D, DAVID C D, DAVID N S. Effects of Ti additions on the nanostructure and creep properties of precipitation-strengthened Al-Sc alloys[J]. Acta Materialia, 2005, 53: 4 225-4 235.

[9] LI Z M, JIANG H C, WANG Y L, et al. Effect of minor Sc addition on microstructure and stress corrosion cracking behavior of medium strength Al-Zn-Mg alloy[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2018, 34(7): 1 172-1 179.

[10] DUAN J Q, YIN Z M, ZHAO K, et al. Microstructure evolution and Al₃(Sc_{1-x}Zr_x) precipitates' kinetics in Al-Zn-Mg alloy during homogenization[J]. Journal of Central South University, 2013, 20(3): 579-586.

[11] 商宝川,尹志民,周向,等. 固溶-时效对 Al-Zn-Mg-Sc-Zr 合金板材组织与性能的影响[J].中国有色金属学报,2010,20(11): 2 063-2 069.

[12] LI B, PAN Q L, HUANG X, et al. Microstructures and properties of Al-Zn-Mg-Mn alloy with trace amounts of Sc and Zr[J]. Materials Science and Engineering, 2014, 616: 219-228.

[13] LIU T, HE C N, LI G, et al. Microstructural evolution in Al-Zn-Mg-Cu-Sc-Zr alloys during short-time homogenization[J]. International Journal of Minerals Metallurgy and Materials, 2015(5): 516-523.

[14] 崔忠圻. 金属学与热处理[M]. 北京:机械工业出版社,2000.

[15] WANG S H, MENG L G, YANG S J, et al. Microstructure of Al-Zn-Mg-Cu-Zr-0.5Er alloy under as-cast and homogenization conditions[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011(21): 1 949-1 954.

(编辑:栗万仲)