Cr 含量对低 Cu/Mg 比 Al-Cu-Mg-Ag 合金微观组织和力学性能的影响①

杨国强, 刘志义, 柏松, 李苏望, 曹靖
（中南大学 材料科学与工程学院, 湖南 长沙 410083）

摘　要：研究了 Cr 含量(质量分数)对低 Cu/Mg 比 Al-Cu-Mg-Ag 合金微观组织和力学性能的影响。结果表明：在低 Cu/Mg 比 Al-Cu-Mg-Ag 合金中添加 Cr，合金中形成了 Al-Cr 相和 $Al_{1.6}TiCr_{0.4}$ 相；Cr 含量由 0.17%提高到 0.22%，合金的抗拉强度由 463 MPa 提高到 484 MPa，提升了 4.5%；屈服强度由 288 MPa 提高到 319 MPa，提升了 10.8%。合金力学性能的提升主要来源于 Cr 的固溶强化和 S′相的析出强化。

关键词：微合金化；Cu/Mg 比；固溶强化；析出强化；Cr；Al-Cu-Mg-Ag 合金；析出相；欠时效；力学性能
中图分类号：TB302；TG115　　**文献标志码**：A　　doi：10.3969/j.issn.0253-6099.2025.02.034
文章编号：0253-6099(2025)02-0193-04

Effect of Cr Content on Microstructure and Mechanical Properties of Al-Cu-Mg-Ag Alloy with a Low Cu/Mg Ratio

YANG Guoqiang, LIU Zhiyi, BAI Song, LI Suwang, CAO Jing
(*School of Materials Science and Engineering*, *Central South University*, *Changsha* 410083, *Hunan*, *China*)

Abstract: The effect of Cr content in mass fraction on the microstructure and mechanical properties of Al-Cu-Mg-Ag alloy with a low Cu/Mg ratio was investigated. Results indicate that after an addition of Cr to the Al-Cu-Mg-Ag alloy with low Cu/Mg ratio, phases of Al-Cr and $Al_{1.6}TiCr_{0.4}$ are generated in the alloy; with Cr content from 0.17% up to 0.22%, the alloy has its tensile strength improved from 463 MPa to 484 MPa (a 4.5% increase), and its yield strength enhanced from 288 MPa to 319 MPa (a 10.8% increase). The enhancement in mechanical properties is attributed to solid solution strengthening by Cr and precipitation strengthening by S′ phases.

Key words: microalloying; Cu/Mg ratio; solid solution strengthening; precipitation strengthening; Cr; Al-Cu-Mg-Ag alloy; precipitate; under-aging; mechanical property

Al-Cu-Mg-Ag 合金因其优良的耐热性能和抗蠕变性能，广泛应用于航空航天领域和石油工业，但该合金存在热稳定性和耐腐蚀性较差的缺点[1-2]。学者们利用微合金化和优化热处理工艺等改善其性能。目前对 Al-Cu-Mg-Ag 合金力学性能的研究主要集中在高 Cu/Mg 比 Al-Cu-Mg-Ag 合金的主要析出相 θ′相和 Ω 相[3-7]，而对低 Cu/Mg 比 Al-Cu-Mg-Ag 合金的主要析出相 S(Al_2CuMg)相的研究很少。Cr 作为铝合金常用的微合金化元素，广泛添加在 Al-Zn-Mg-Cu 合金中[8-10]。郭帅[11]研究了 Cr 的微合金化对低 Cu/Mg 比 Al-Cu-Mg 合金的性能影响，但由于其 Cr 添加量较少，合金中未发现含 Cr 相。本文在此基础上，继续增加 Cr 添加量，研究 Cr 在低 Cu/Mg 比 Al-Cu-Mg-Ag 合金中的存在形式，并研究增加 Cr 添加量对低 Cu/Mg 比 Al-Cu-Mg-Ag 合金微观组织和力学性能的影响，以期促进含 Cr 的 Al-Cu-Mg-Ag 合金在石油和航天工业方面的应用。

1　实验方法

实验原料主要为工业高纯铝、纯镁、纯银和 Al-50Cu(元素前数据表示该元素的质量分数，下同)、Al-10Mn、Al-4Cr、Al-6Ti、Al-4Zr 中间合金，通过熔炼、铸造，制备

① 收稿日期：2024-09-28
作者简介：杨国强(1999—)，男，四川眉山人，硕士，主要从事铝合金微合金化研究。E-mail：213112092@csu.edu.cn
通信作者：刘志义(1962—)，男，湖南邵阳人，教授，博士研究生导师，主要从事铝合金的基础研究及应用技术开发。E-mail：liuzhiyi@csu.edu.cn

了 Cr 添加量分别为 0.17%和 0.22%的 2 种合金,分别命名为 A 合金和 B 合金,其化学成分见表 1。

表 1　Al-Cu-Mg-Ag 合金化学成分(质量分数)

Table 1　Chemical composition of Al-Cu-Mg-Ag alloy　%

合金	Cu	Mg	Ag	Mn	Ti	Zr	Cr	Fe	Si	Al
A	3.08	1.81	0.51	0.60	0.15	0.13	0.17	0.04	0.03	余量
B	3.13	1.84	0.53	0.61	0.14	0.13	0.22	0.04	0.03	余量

对 A、B 合金铸锭进行双级均匀化处理:420 ℃/24 h+480 ℃/48 h,空冷至室温;然后在空气炉内将铸锭加热至 410 ℃并保温 2 h,立即轧制成厚约 2.5 mm 的薄板;对 A、B 合金薄板样品进行 500 ℃/1 h 固溶处理和 170 ℃/3 h 欠时效处理,所得样品分别命名为 UA、UB。

分别采用扫描电镜、透射电镜观察合金的微观组织和沉淀颗粒;在 HV-10B 型仪器上测试合金显微硬度,载荷 5 kg,加载时间 10 s;在 WOW-50E 型试验机上进行室温拉伸试验,拉伸速率 2 mm/min。

2　实验结果与讨论

2.1　合金时效硬化行为

经 500 ℃/1 h 固溶处理后,170 ℃下不同 Cr 含量(质量分数,下同)Al-Cu-Mg-Ag 合金时效硬化曲线如图 1 所示。随着时效时间增加,A、B 合金硬度都呈现先增加后降低的趋势,并且各时效时间下 B 合金的硬度均高于 A 合金的硬度。固溶处理后 A 合金的硬度值为 84.2HV,B 合金的硬度值为 97HV,B 合金表现出更强的固溶强化效应。时效 8 h,A、B 合金的硬度均到达时效峰值硬度,分别为 140HV、150HV。继续延长时效时间,2 种合金的硬度总体呈下降趋势。可以看出,增加 Cr 添加量可以使合金时效硬度提高,这归因于 Cr 的固溶强化效应。

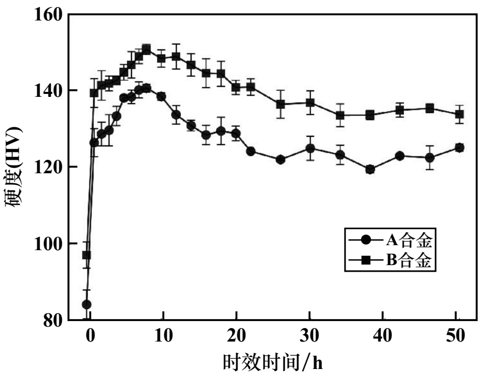


图 1　170 ℃ 下不同 Cr 含量 Al-Cu-Mg-Ag 合金的时效硬化曲线

Fig.1　Age-hardening curves of Al-Cu-Mg-Ag alloys with different Cr contents at 170 ℃

2.2　合金拉伸性能

欠时效态下不同 Cr 含量 Al-Cu-Mg-Ag 合金室温拉伸性能如图 2 所示。随着 Cr 含量从 0.17%增加到 0.22%,合金抗拉强度从 463 MPa 提高到 484 MPa,提高了 4.5%;屈服强度从 288 MPa 提高到 319 MPa,提高了 10.8%;延伸率也有所提升。由此可见,随着微合金化程度提高,合金拉伸性能提高。

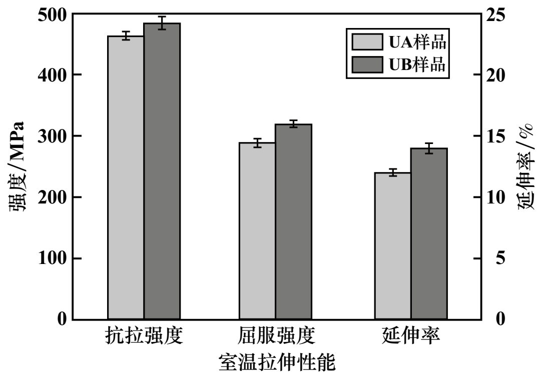


图 2　欠时效态下不同 Cr 含量 Al-Cu-Mg-Ag 合金的室温拉伸性能

Fig.2　Tensile properties of under-aged Al-Cu-Mg-Ag alloys with different Cr contents at room temperature

2.3　合金物相分析

欠时效态下不同 Cr 含量 Al-Cu-Mg-Ag 合金的 XRD 图谱如图 3 所示。从图 3 可知,UA、UB 样品相组成几乎没有区别,都由于 Cr 的加入而形成了 $Al_{1.6}TiCr_{0.4}$ 相和 Al-Cr 相。另外,合金中还有 Al_2CuMg、Al_3Ti 存在。

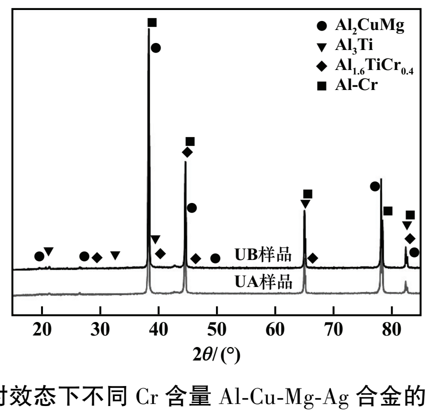


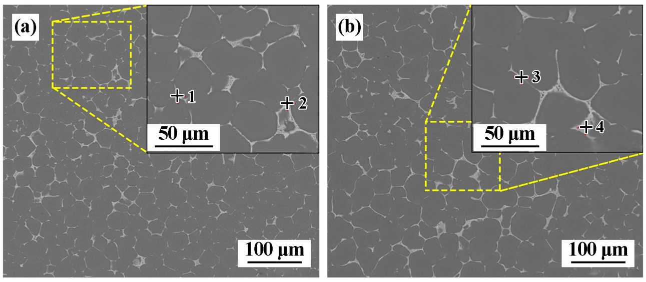
图 3　欠时效态下不同 Cr 含量 Al-Cu-Mg-Ag 合金的 XRD 图谱

Fig.3　XRD patterns of under-aged Al-Cu-Mg-Ag alloys with different Cr contents

2.4　合金显微组织分析

不同 Cr 含量 Al-Cu-Mg-Ag 铸态合金的显微组织见图 4。由图 4 可见,A、B 铸态合金的晶粒尺寸并无明显差异,SEM 形貌表现为典型的枝晶偏析特征,晶粒呈现等轴状。对图 4 中合金的第二相粒子进行了

EDS 分析,结果如表 2 所示。由表 2 可知,第二相粒子主要为 Al_x(Cu,Mn,Fe,Cr)和 Al_2CuMg 相。Fe、Cr、Mn 元素表现为互相聚集的状态,即 Mn 含量高的第二相其中 Fe 和 Cr 含量也相对较高。由于 Cr 的添加,A、B 铸态合金中均形成了 Al_x(Cu,Mn,Fe,Cr)粒子,但晶粒大小并没有明显差异。



(a) A 合金; (b) B 合金

图 4　不同 Cr 含量 Al-Cu-Mg-Ag 铸态合金的显微组织

Fig. 4　Microstructure of as-cast Al-Cu-Mg-Ag alloys with different Cr contents

表 2　图 4 中各点的 EDS 分析结果(质量分数)

Table 2　EDS analysis results of each point in Figure 4　　%

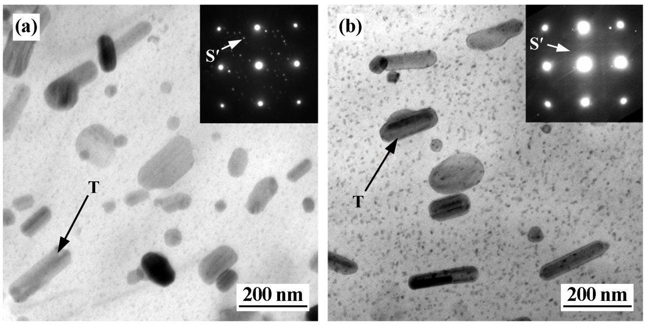
点号	Cu	Mg	Mn	Cr	Fe	Al
1	22.10	22.95	0.31	0.15	0.28	余量
2	5.50	3.64	3.41	0.68	2.27	余量
3	19.42	20.50	0.47	0.25	0.31	余量
4	6.77	1.23	7.40	1.33	3.11	余量

2.5　合金 TEM 分析

图 5 为 UA、UB 样品沿 $<100>_\alpha$ 轴的明场图像和相应的选区电子衍射(SAED)图。可以看出,晶粒内部存在一些粗大的棒状 T 相($Al_{20}Cu_2Mn_3$)。在相应的 SAED 图中可以看见变体的 S 相(Al_2CuMg)衍射斑点,由于样品为欠时效状态,为了了解 Cr 的添加对低 Cu/Mg 比Al-Cu-Mg-Ag 合金相关析出相的大小和分布的影响,对 UA、UB 试样进行了 TEM 分析,结果见图 5。合金中可能有 S″和 S′同时存在,本文暂不做区分,统一认为是 S′相。未长大的短针状 S′相大多为弥散分布,还有一些 S′相在 T 相与 Al 基体的界面周围析出。对 UA、UB 样品沿 $<100>_\alpha$ 轴的亮场图像中的短针状 S′相(尺寸太小近乎看作球状)进行了面积分数和尺寸统计,结果如表 3 所示。UB 样品中析出的 S′相较 UA 样品析出的 S′相的数量更多,尺寸更大。由此可以看出,提高 Cr 含量,可以使合金中 S′析出相数量增加,从而提高合金性能。

2.6　讨论与分析

微合金化主要通过细化晶粒、影响强化相析出或



(a) UA 样品; (b) UB 样品

图 5　UA、UB 样品沿 $<100>_\alpha$ 轴的明场图像和相应的选区电子衍射(SAED)图

Fig. 5　Bright field images of UA and UB samples along $<100>_\alpha$ axis and corresponding SAED pattern

表 3　UA、UB 样品 S′相的面积分数和尺寸统计

Table 3　Area fraction and size of S′ phase in UA and UB samples

样品名称	面积分数/%	直径/nm
UA	11.8	8.8
UB	13.2	12.7

形成相关金属间化合物影响合金的力学性能[12-17]。在微观组织结构上, Al 合金中添加 Cr 元素会形成 Al-Cr 相(如 Al_7Cr、$Al_{11}Cr_2$、$Al_{45}Cr_7$ 等)和富含 Cr、Fe、Mn、Cu 的粒子[13-18]。文献[19]在 Al-Mg-Si 合金中添加 0.07% Cr,诱导形成了 $Al_{45}Cr_7$ 相,其作为 α-Al 的异质形核点,细化了晶粒。文献[11]在低 Cu/Mg 比 Al-Cu-Mg 合金中进行 Cr 的微合金化,却未发现明显的晶粒细化现象。在低 Cu/Mg 比的 Al-Cu-Mg-Ag 合金中,本文将 Cr 添加量从 0.17%提高到 0.22%,Cr 添加量的增加并未导致明显的晶粒细化(图 4)。提高 Cr 含量可以使 S′相含量增加、尺寸增大(图 5 和表 3),这是由于 Cr 以弥散粒子的形式作为异质形核点,促进了 S′相的形核析出,在相同时间的欠时效状态下,UB 样品的 S′相的含量更多、尺寸更大,进而使 UB 样品室温下的拉伸强度和屈服强度更优。

在力学性能上,UB 样品的硬度、拉伸强度、屈服强度均优于 UA 样品。考虑 Cr 元素添加影响欠时效 Al-Cu-Mg-Ag 合金力学性能的强化机制,其理论屈服强度($\sigma_{0.2}^{cal}$)[20-21]可估计为:

$$\sigma_{0.2}^{cal} = \sigma_0 + \Delta\sigma_{HP} + \Delta\sigma_{SS} + \Delta\sigma_P \qquad (1)$$

式中:σ_0 为纯铝的晶格摩擦应力; $\Delta\sigma_{HP}$、$\Delta\sigma_{SS}$、$\Delta\sigma_P$ 分别为由晶界、固溶体原子和沉淀物引起的屈服强度增量。

细晶强化主要是晶粒尺寸差异引起的强度变化,由于两合金的晶粒大小基本没有差异,细晶强化对两

合金所做出的贡献并无差距，可视为 $\Delta\sigma_{HP(UA)} \approx \Delta\sigma_{HP(UB)}$。

固溶强化增量可由固溶强化屈服强度增量的方程[21-22]来分析：

$$\Delta\sigma_{SS} = \sum k_i c_i^m \quad (2)$$

式中：c_i 为固溶体中溶质元素 i 的浓度，%；k_i 为相应的固溶体强化效率；m 为与合金相关的常数，对于 Al-Cu-Mg-Ag 合金，$m=1$。在本实验中两合金的固溶强化增量的差异主要由 Cr 含量决定。$c_{Cr(UA)} < c_{Cr(UB)}$，相对应的固溶体强化效率不变，则有 $\Delta\sigma_{SS(UA)} < \Delta\sigma_{SS(UB)}$。

合金中的 S′相尺寸太小，近似看作很小的圆形，忽略尺寸因素的影响，沉淀强化增量的分析方程[20]可表示为：

$$\Delta\sigma_P = M \frac{\Delta\mu}{4\pi\sqrt{2}} \sqrt{f_V} \quad (3)$$

式中 M、$\Delta\mu$ 和 f_V 分别为 Al 的泰勒因子、相与基体之间的剪切模量、颗粒的体积分数。本文以 S′相的面积分数近似替代其体积分数，则有 $f_{V(UA)} < f_{V(UB)}$，沉淀强化增量 $\Delta\sigma_{P(UA)} < \Delta\sigma_{P(UB)}$。

再将公式(2)、(3)所得结论代入公式(1)中，即可得：$\sigma_{0.2(UA)}^{cal} < \sigma_{0.2(UB)}^{cal}$，这与实验结果吻合。

3 结论

1）在低 Cu/Mg 比 Al-Cu-Mg-Ag 合金中添加 0.17%Cr 和 0.22%Cr，都会形成 $Al_{1.6}TiCr_{0.4}$ 相和 Al-Cr 相，且两者晶粒尺寸相差不大；相对于含 0.17%Cr 的合金，相同欠时效状态下，含 0.22%Cr 的合金中析出数量更多、粒径更大的 S′ 相，表现出更优的力学性能。

2）Cr 含量由 0.17%提高到 0.22%，合金抗拉强度由 463 MPa 提高到 484 MPa，提升了 4.5%；屈服强度由 288 MPa 提高到 319 MPa，提升了 10.8%。合金强化机制是 Cr 元素的固溶强化效应和 S′(Al_2CuMg)相的析出强化效应。

参考文献(References)：

[1] TOLGA D, COSTAS S. Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys[J]. Materials and Design, 2013,56:862-871.

[2] SUN Z G, MA Y L, MA S M, et al. Mechanical properties and corrosion resistance enhancement of 2024 aluminum alloy for drill pipe after heat treatment and Sr modification[J]. Materials Today Communications, 2023,36:16805.

[3] LIN Y, XIA Y, JIANG Y, et al. Precipitation hardening of 2024-T3 aluminum alloy during creep aging[J]. Materials Science Engineering: A, 2013,565:420-429.

[4] 徐浩楠，杜翥，何雨，等. Al-Cu-Mg-Ag 耐热铝合金研究进展[J]. 信息记录材料, 2022,23(10):8-10.
XU Haonan, DU Zhu, HE Yu, et al. Research progress on Al-Cu-Mg-Ag heat-resistant aluminum alloys[J]. Information Recording Materials, 2022,23(10):8-10.

[5] 胡奇，郭一鸣，章立钢，等. Mg、Si 含量对 Al-Cu-Mg-Ag-Si 合金析出相的影响[J]. 矿冶工程, 2024,44(1):143-146.
HU Qi, GUO Yiming, ZHANG Ligang, et al. Effects of Mg and Si contents on precipitates in Al-Cu-Mg-Ag-Si alloys[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(1):143-146.

[6] 谢浩宇，刘志义，赵娟刚，等. 稀土 Er 对 Al-Cu-Mg-Ag 合金微观组织和力学性能的影响[J]. 矿冶工程, 2022,42(1):140-143.
XIE Haoyu, LIU Zhiyi, ZHAO Juangang, et al. Effect of rare earth Er on microstructure and mechanical properties of Al-Cu-Mg-Ag alloys[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2022,42(1):140-143.

[7] 王鹏，刘冠华，刘志义. 固溶温度对 Al-Cu-Mg-Ag 合金显微组织与力学性能的影响[J]. 矿冶工程, 2019,39(6):115-119.
WANG Peng, LIU Guanhua, LIU Zhiyi. Effect of solution treatment temperature on microstructure and mechanical properties of Al-Cu-Mg-Ag alloys[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2019,39(6):115-119.

[8] WANG M, HUANG L P, CHEN K H, et al. Influence of minor combined addition of Cr and Pr on microstructure, mechanical properties and corrosion behaviors of an ultrahigh strength Al-Zn-Mg-Cu-Zr alloy[J]. Micron, 2017,104:80-88.

[9] KENNETH C A, ROBBY F G, PIYADA S, et al. Microstructure evolution and localized corrosion susceptibility of an Al-Zn-Mg-Cu-Zr 7xxx alloy with minor Cr addition[J]. Materials, 2023,16(3):946.

[10] FANG H, CHAO H, CHEN K. Effect of Zr, Er and Cr additions on microstructures and properties of Al-Zn-Mg-Cu alloys[J]. Materials Science Engineering: A, 2014,610:10-16.

[11] 郭帅. 油井管用 Al-Cu-Mg-(Ag)合金耐热、耐腐蚀机理研究[D]. 长沙：中南大学, 2022.
GUO Shuai. Research on mechanisms of heat and corrosion resistance of Al-Cu-Mg-(Ag) alloys for oil well pipe[D]. Changsha: Central South University, 2022.

[12] BAI S, YI X, LIU G, et al. Effect of Sc addition on the microstructures and age-hardening behavior of an Al-Cu-Mg-Ag alloy[J]. Materials Science Engineering: A, 2019,756:258-267.

[13] MALEKAN M, EMAMY M, MOSSAYEBI N, et al. Effects of Al_3Ni and Al_7Cr intermetallics and T6 heat treatment on the microstructure and tensile properties of Al-Zn-Mg-Cu alloy[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2020,29(5):3432-3442.

[14] 王建. Cr、Sc 对 Al-Cu-Mg-Ag 合金的组织与性能的影响[D]. 郑州：郑州大学, 2015.
WANG Jian. The influence of Cr and Sc on the microstructure and the mechanical properties of Al-Cu-Mg-Ag alloys[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2015.

[15] LING K, CHEN J W, RAN H W, et al. Effect of V additions on the microstructure and mechanical properties of Al-Cu-Mg-Ag alloy[J]. Materials Today Communications, 2022,33:10497.

[16] FERRAGUT R, DUPASQUIER A, MACCHI C E, et al. Vacancy-solute interactions during multiple-step ageing of an Al-Cu-Mg-Ag alloy[J]. Scripta Materialia, 2008,60 (3):137-140.

(下转第 204 页)

the fabrication of ceramic three-dimensional parts[J]. Rapid Prototype Journal, 1998,4(3):1355-2546.

[45] HE L, SONG X. Supportability of a high-yield-stress slurry in a new stereolithography-based ceramic fabrication process[J]. JOM, 2018, 70:407-412.

[46] XU X Y, ROBLES-MARTINEZ P, MADLA C M, et al. Stereolithography (SLA) 3D printing of an antihypertensive polyprintlet: Case study of an unexpected photopolymer-drug reaction[J]. Additive Manufacturing, 2020,33:101071.

[47] DONG D, SU H J, LI X, et al. Microstructures and mechanical properties of biphasic calcium phosphate bioceramics fabricated by SLA 3D printing[J]. Manufacturing Processes, 2022,81(10):433-443.

[48] LI X, YUAN Y, LIU L, et al. 3D printing of hydroxyapatite/tricalcium phosphate scaffold with hierarchical porous structure for bone regeneration[J]. Bio-Design and Manufacturing, 2020,3:15-29.

[49] KAI C C. Three-dimensional rapid prototyping technologies and key development areas[J]. Control Engineering Journal, 1994,5(4):200-206.

[50] GONG P, YAN X K, XIONG W, et al. Design of a debinding process for polymetallic material green parts fabricated via metal paste injection 3D printing with dual nozzles[J]. RSC Advances, 2020,10:18000-18007.

[51] 何轶伦,周伍喜,李松林,等. Sc_2O_3-Y_2O_3-ZrO_2 纳米复合陶瓷粉末的制备[J]. 矿冶工程, 2014,34(1):100-102.
HE Yilun, ZHOU Wuxi, LI Songlin, et al. Preparation of Sc_2O_3-Y_2O_3-ZrO_2 nano-composite ceramic powder[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2014,34(1):100-102.

[52] 刘明信,乔聪卓. 单体种类对光固化增材制造 5052 铝合金的影响[J]. 矿冶工程, 2024,44(2):145-152.
LIU Mingxin, QIAO Congzhuo. Effect of monomer types on photocuring additive manufacturing of 5052 aluminum alloy[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(2):145-152.

[53] SANTOLIQUIDO O, CAMEROTA F, ORTONA A. The influence of topology on DLP 3D printing, debinding and sintering of ceramic periodic architectures designed to replace bulky components[J]. Open Ceramics, 2021,5:100059.

[54] MASTROIANNI L, RUSSO V, ERÄNEN K. Towards unconstrained catalyst shaping: High accuracy DLP printing of porous γ-Al_2O_3-based catalysts[J]. Catalysis Science & Technology, 2024(5):1336-1348.

[55] CARBAJO J, NAM S H, FANG N X. Fabrication of micro-perforated panel (mpp) sound absorbers using digital light processing (DLP) 3D printing technology[J]. Applied Acoustics, 2023,216(15):109788.

[56] HAN Z Q, LIU S H, QIU K, et al. The enhanced ZrO_2 produced by DLP via a reliable plasticizer and its dental application[J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2023,141:105751.

[57] HU S, TANG Y X, ZHOU G H, et al. Photocured 3D printed yttrium aluminum garnet transparent ceramics and their microstructure regulation[J]. Journal of Silicate, 2024,52(3):882-889.

引用本文:胡子健,俞风英,钟佳妮,等. 陶瓷增材制造技术的研究现状与展望[J]. 矿冶工程, 2025,45(2):197-204.
HU Zijian, YU Fengying, ZHONG Jiani, et al. Research status and prospects of ceramic additive manufacturing[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(2):197-204.

(上接第 196 页)

[17] XU H, DONG Y, BAI S, et al. Effect of small Sn addition on the initial strengthening and microstructural evolution of an Al-Cu-Mg-Ag alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023,943:169167.

[18] TRUDONOSHYN O, PRACH O, RANDELZHOFER P, et al. Heat treatment of the new high-strength high-ductility Al-Mg-Si-Mn alloys with Sc, Zr and Cr additions[J]. Materialia, 2021,15:100981.

[19] WANG X, MA P K, MENG Z Y, et al. Effect of trace Cr alloying on centerline segregations in sub-rapid solidified Al-Mg-Si (AA6061) alloys fabricated by twin-roll casting[J]. Materials Science Engineering: A, 2021,825:141896.

[20] WANG J, LIU Z Y, BAI S, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of the electron-beam welded joints of cast Al-Cu-Mg-Ag alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2020,801:140363.

[21] KURMANAEVA L, TOPPING D T, WEN H, et al. Strengthening mechanisms and deformation behavior of cryomilled Al-Cu-Mg-Ag alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015,632:591-603.

[22] GAZIZOV M, KAIBYSHEV R. Precipitation structure and strengthening mechanisms in an Al-Cu-Mg-Ag alloy[J]. Materials Science Engineering: A, 2017,702:29-40.

引用本文:杨国强,刘志义,柏松,等. Cr 含量对低 Cu/Mg 比 Al-Cu-Mg-Ag 合金微观组织和力学性能的影响[J]. 矿冶工程, 2025,45(2):193-196.
YANG Guoqiang, LIU Zhiyi, BAI Song, et al. Effect of Cr content on microstructure and mechanical properties of Al-Cu-Mg-Ag alloy with a low Cu/Mg ratio[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(2):193-196.