冷却速度对耐热铸造铝合金的组织和性能影响

刘传宝，张　永，夏　峰，赵　伟，郑海鹏，于忠军
（中国航发哈尔滨东安发动机有限公司，黑龙江哈尔滨 150069）

摘要：本研究旨在阐明冷却速度对耐热铸造铝合金组织与高温力学性能的调控机理，从而为工艺优化提供依据。以Al-Cu-Ce-Mn-Sc-Zr合金为对象，采用砂型（冷却速度50 ℃/min）和熔模壳型水冷（150 ℃/min）制备单铸拉伸试样，经固溶＋双级时效处理后，进行300 ℃和350 ℃高温拉伸及300 ℃、310 ℃高温持久试验，并观察显微组织。结果表明：快冷试样晶粒尺寸约90 μm，慢冷约150 μm。快冷使高温抗拉强度提升约9%~10%（300 ℃和350 ℃下分别提高约16 MPa和14 MPa），屈服强度也有相应提高；但高温持久寿命显著降低，以300 ℃/100 MPa为例，慢冷试样的持久时间（>250 h）约为快冷（>150 h）的1.7倍，且载荷或温度升高时差异更明显。增大冷却速度细化晶粒可提升高温拉伸强度，但晶界增多加速扩散与滑移，降低抗蠕变持久性能；需根据铸件不同区域对强度或持久的要求匹配冷却速度。

关键词：冷却速度；晶界；位错；高温强度；高温持久
中图分类号：TG146.21；TG113　**文献标识码：**A　**文章编号：**1001-4977（2026）09-1028-05
DOI：10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0130

Effect of Cooling Rate on Microstructure and Properties of Heat-Resistant Cast Aluminum Alloy

LIU Chuan-bao, ZHANG Yong, XIA Feng, ZHAO Wei, ZHENG Hai-peng, YU Zhong-jun
(AECC Harbin DongAn Engine Co., Ltd., Harbin 150069, Heilongjiang, China)

Abstract: This study aims to elucidate the regulation mechanism of cooling rate on the microstructure and high-temperature mechanical properties of heat-resistant cast aluminum alloys, thereby providing a basis for process optimization. Taking an Al-Cu-Ce-Mn-Sc-Zr alloy as object, the sand mold (50 ℃/min) and investment shell mold with water cooling (150 ℃/min) were used to prepare the separately cast tensile specimens. After solution treatment and two-stage aging, high-temperature tensile tests at 300 ℃ and 350 ℃, and high-temperature stress rupture tests at 300 ℃ and 310 ℃ were performed, following the microstructure observation. Results show that the average grain size is about 90 μm for the rapid cooling specimens and about 150μm for the slow cooling ones. Rapid cooling increased high-temperature tensile strength by about 9%-10% (increased 16 MPa and 14 MPa at 300 ℃ and 350 ℃, respectively), the yield strength was also increased accordingly, however, the elevated-temperature stress rupture life was markedly reduced. Taking 300 ℃/100 MPa as an example, the rupture life of the slowly cooled specimens (>250 h) was about 1.7 times of that of the rapidly cooled ones (>150 h), and the gaps were widened with higher load or temperature. Increasing cooling rate can refine grains and enhance elevated-temperature tensile strength, but the increased grain boundaries accelerate diffusion and sliding, impairing creep resistance. The cooling rate should be tailored according to the strength or creep resistance requirements of different casting regions.

Key words: cooling rate; grain boundary; dislocation; high-temperature strength; high-temperature creep resistance

铝合金因低密度、高比强度、良好的加工性与成本优势，是航空航天领域轻量化结构的核心材料[1-5]。随着飞行器向高推重比、高服役温度发展，对耐热铝合金的高温瞬时/持久强度提出双重严苛要求，而铝合金凝固过程的组织构建是决定其力学性能上限的关键环节[6-11]。

冷却速度作为铸造工艺中最核心的热参数，直接调控耐热铸造铝合金的晶粒尺度、晶界形貌、耐热金

基金项目：国家重点研发计划（2024YFB3714000）；国家自然科学基金（92360301）；黑龙江省自然科学基金（JQ2023E003）。
收稿日期：2026–03–10 收到初稿，2026–04–28 收到修订稿。
作者简介：刘传宝（1983–），男，硕士，主要研究方向为镁、铝合金铸造技术。E-mail：529976570@qq.com
通信作者：张永，男，研究员级高工，工学博士。电话：0451-86574401，E-mail：hitzhangyong@163.com
引用格式：刘传宝，张永，夏峰，等 . 冷却速度对耐热铸造铝合金的组织和性能影响 [J]. 铸造，2026，75（9）：1028–1032.
Liu Chuanbao，Zhang Yong，Xia Feng，et al. Effect of cooling rate on microstructure and properties of heat-resistant cast aluminum alloy [J]. Foundry，2026，75（9）：1028–1032.

属间化合物析出尺寸/分布状态及基体固溶度，进而对合金室温拉伸性能与高温服役行为产生决定性作用[12-16]。针对Al-Cu、Al-Fe和Al-Ce系典型耐热铝合金，不同的冷却速率下，强化相的非平衡析出特征、晶粒细化效应存在明显差异，室温伸长率与高温强度的变化规律呈现显著的工艺相关性[17-18]。本课题研究冷却速度对耐热铸造铝合金组织性能的影响，为该合金铸造工艺优化、性能调控提供试验依据和参考。

1 试验方法

采用AlCu50、CeAl-20、AlMn10、ScAl-2A和AlZr4铝基中间合金和精铝锭配制，原材料总质量180 kg。采用电阻炉熔化，先将精铝锭、AlCu50和AlMn10中间合金放入坩埚，完全熔化后，将坩埚内的熔体升温至740 ℃；加入CeAl-20、ScAl-2A和AlZr4中间合金，完全熔化后，进行旋转喷吹除气精炼，氩气流量20 L/min，转速400 r/min，精炼20 min。采用电感耦合等离子体原子发射光谱法（ICP-AES）测试化学成分，结果如表1所示。

采用减压凝固法测量熔体含氢量。铝合金熔体主要溶解氢，遵循：$C=k\cdot\sqrt{P_{\mathrm{H}}}$，$C$为氢溶解度，$k$为温度常数，$P_{\mathrm{H}}$为氢分压，压力越低，氢溶解度越小；常压至真空，溶解度可骤降1~2个数量级[19-21]。该方法原理是使试样在低压条件下凝固，促进试样内氢析出，通过测量试样密度来间接判断熔体内的含氢量是否达标。该方法无需复杂设备，工艺操作简便，可在生产现场快速检测，适合炉前快速判断铝熔体除气效果。

表1 合金化学成分

Tab. 1 Chemical compositions of the alloy w_B/%

项目	Cu	Ce	Mn	Sc	Zr	Al
设计成分	4.50~5.50	1.50~2.50	1.00~1.50	0.20~0.50	0.10~0.20	余量
实测成分	4.90	2.00	1.30	0.40	0.20	余量

本试验采用法国马蒂尼铝公司的HYDRALVAC 6000铝合金减压凝固试样制备仪器，如图1所示。设置真空度为40 mbar，工作时间为10 min。取少量精炼后的铝熔体倒入该仪器的坩埚内，盖上钟罩，启动按钮，坩埚内的熔体在40 mbar的气压下完全凝固，采用METTLER TOLEDO精密天平测量试样密度，见图2，该天平测量精度为 ± 0.001 g/cm^3。试样密度不低于2.80 g/cm^3，熔体内含氢合格。



图1 HYDRALVAC 6000铝合金减压凝固试样制备仪器

Fig. 1 HYDRALVAC 6000 preparation equipment for aluminum alloy decompression solidification specimen

砂型单铸拉伸试样尺寸按HB963要求设计，采用冷芯盒射芯机制备砂型，粘结剂为环氧树脂，固化剂为三乙胺气体。在砂型上放入铠装热电偶，用于测量冷却速度，如图3所示。砂型温度为室温（15 ℃），浇注温度715 ℃，在540~715 ℃温度区间内的冷却速度为50 ℃/min。浇注的砂型单铸拉伸试样如图4所示。



图2 METTLER TOLEDO精密天平

Fig. 2 METTLER TOLEDO precision balance

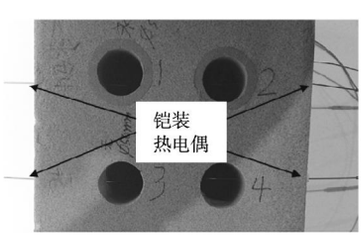


图3 在砂型上放置热电偶

Fig. 3 Install thermocouples in the sand mold

熔模单铸拉伸试样制备时，尺寸参照砂型单铸拉伸试样，粘结剂采用硅溶胶，面层粉料为刚玉粉，加固层粉料为煤矸石粉，制备7层型壳，型壳厚度6~8 mm。型壳焙烧后，在型壳上钻孔，放入铠装热电偶用于测

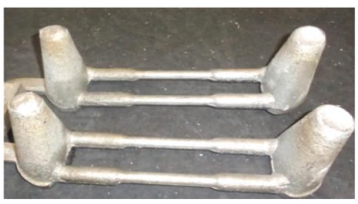


图4　砂型单铸拉伸试样
Fig. 4 The separately cast tensile specimens using sand mold

量冷却速度。采用耐高温无机胶（DB5012型，耐热温度可达1 700 ℃）涂覆在热电偶探测端，由于该耐高温无机胶不导电，可避免合金液浸入偶丝间缝隙造成测量结果不准确的问题。

型壳预热670 ℃，保温时间20 min，裸壳浇注（保证浇注结束后型壳内的铝熔体未开始凝固），浇注温度715 ℃。浇注结束后将型壳立即放入盛有室温水（15 ℃）的容器中，加快凝固，在540~715 ℃温度区间内的冷却速度为150 ℃/min。浇注过程如图5所示，浇注的熔模单铸拉伸试样如图6所示。

将熔模拉伸单铸拉伸试样和砂型单铸拉伸试样一起进行热处理。固溶处理：535 ℃，保温10 h，淬火转移时间低于10 s，淬火介质为水。时效处理：170 ℃，保温时间5 h，升温至230 ℃，保温时间10 h。



图5　浇注熔模单铸拉伸试样
Fig. 5 The separately cast tensile specimen pouring by investment casting



图6　熔模单铸拉伸试样
Fig.6 The separately cast tensile specimens prepared by investment casting

2　试验结果与讨论

2.1　冷却速度对耐热铸造铝合金性能的影响

高温拉伸测试执行GB/T 228.2—2015，测试结果汇总如表2所示。

300 ℃下熔模单铸拉伸试样的平均抗拉强度值为189 MPa，砂型单铸拉伸试样的平均抗拉强度值为173 MPa，前者比后者高出16 MPa，提高9%。前者的屈服强度平均值为141 MPa，后者的屈服强度平均值为127 MPa，前者比后者高出14 MPa，提高11%。伸长率提升不明显。

350 ℃下熔模单铸拉伸试样的平均抗拉强度值为150 MPa，砂型单铸拉伸试样的平均抗拉强度值为

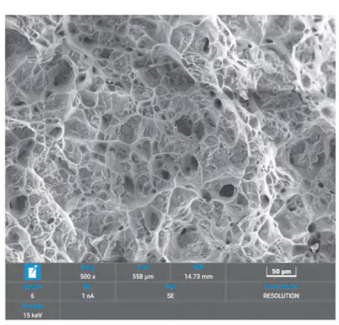


图7　350 ℃下熔模单铸拉伸试样拉伸断口形貌图片
Fig. 7 SEM image of 350 ℃ tensile fracture surface of the separately cast specimen prepared by investment casting

表2　高温拉伸结果
Tab. 2 High-temperature tensile results

温度/℃	熔模铸造/水冷			砂型铸造		
	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%
300	192	136	6.9	176	131	7.2
	186	152	7.3	173	127	4.6
	189	136	5.7	171	125	6.9
350	150	112	6.9	139	108	13.0
	151	115	6.5	134	106	5.0
	151	114	6.5	136	106	9.0

136 MPa，前者比后者高出14 MPa，提高10%，前者的屈服强度平均值为113 MPa，后者的屈服强度平均值为106 MPa，前者比后者高出7 MPa，提高6%。伸长率提升不明显。

图7是350 ℃下熔模单铸拉伸试样拉伸断口形貌，肉眼可见大量韧窝，属于典型的韧性穿晶断裂。

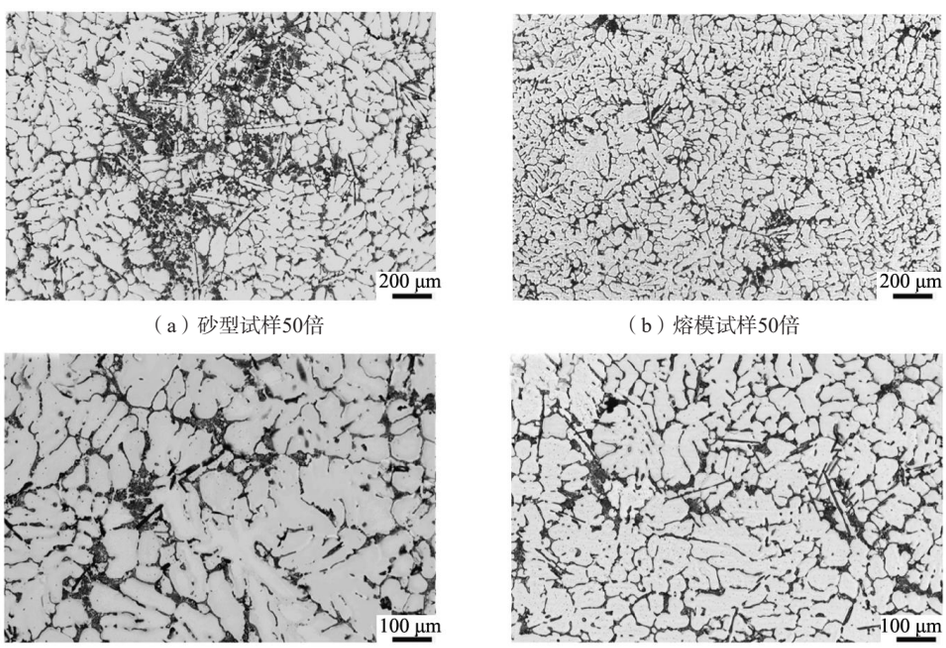
高温持久测试执行GB/T 2039—2024，测试结果汇总如表3所示。

在300 ℃，载荷为100 MPa，熔模铸造单铸拉伸试样持久寿命可达150 h以上，砂型单铸拉伸试样持久寿命可达250 h以上。载荷为110 MPa，熔模单铸拉伸试样持久寿命可达120 h以上，砂型单铸拉伸试样持久寿命可达140 h以上。

在310 ℃，载荷为100 MPa，熔模单铸拉伸试样持久寿命可达70 h以上，砂型单铸拉伸试样持久寿命可达100 h以上。

2.2 冷却速度对耐热铸造铝合金组织的影响

由于熔模单铸拉伸试样的冷却速度（150 ℃/min）是砂型单铸拉伸试样冷却速度（50 ℃/min）的3倍，因此其晶粒尺寸相对砂型更加细小，图8为砂型和熔模单铸拉伸试样的金相图片。砂型单铸拉伸试样平均晶粒尺寸约为150 μm，精铸单铸试样平均晶粒尺寸约为90 μm。



（a）砂型试样50倍　（b）熔模试样50倍

（c）砂型试样100倍　（d）熔模试样100倍

图8 单铸拉伸试样金相图片

Fig. 8 Metallographic images of the separately cast tensile specimens

表3 高温持久结果

Tab. 3 High-temperature creep resistance results

温度/℃	载荷/MPa	熔模铸造/水冷 持久寿命/h	砂型铸造 持久寿命/h
300	100	150	259
		154	281
	110	175	276
		120	142
		130	149
		135	188
310	100	78	124
		82	114
		87	128
		85	175

晶粒越细高温强度越高即砂型低于熔模单铸拉伸试样的强度。高温拉伸属于短时高速加载，变形依旧以滑移为主。位错在晶粒内部，遇到晶界就被挡住、塞积，晶粒越细小，晶界就越多，位错滑移一小段就碰会到晶界，难以形成大范围的滑移带，故抵抗位错运动的抗力越高即强度越高。

晶粒越细高温持久时间反而越低即砂型低于熔模单铸拉伸试样的持久时间。高温持久属于长时间、低应力载荷，材料变形由晶界滑移原子扩散共同主导。晶粒越细小晶界就越多，不仅增加了晶界滑移界面，加快蠕变变形，同时晶界作为原子快速扩散通道，更容易诱发蠕变微孔萌生与扩展。最终造成细晶试样高温强度更优，但持久寿命略低于粗晶粒试样。

3 结论

（1）本试验熔模单铸拉伸试样的冷却速度是砂型单铸试样的3倍，起到了显著的晶粒细化作用，能够有效提升高温拉伸强度。

（2）砂型铸造的单铸试样虽然高温强度低于熔模单铸试样，但拥有更好的高温持久能力。因此需要根据铸件不同区域对于高温强度和高温持久的具体要求制定相匹配的冷却速度。

参考文献：

[1] 毕江，刘雷，张东生，等. 铸造、快凝及增材耐热铝合金的研究进展 [J]. 中国金属有色学报，2023，33（4）：970–996.

[2] 付俊伟，崔凯，王江春. Al-Cu系耐热铝合金的研究进展 [J]. 中国金属有色学报，2021，31（7）：1827–1836.

[3] 李虎田，宋炜，钟鼓，等. 铸造耐热铝合金研究及应用现状与展望 [J]. 铸造，2024，73（7）：891–896.

[4] 陈汉，伍鹏程，张涛，等. 耐热铝合金在航空领域的研究进展与发展趋势 [J]. 航空材料学报，2024，44（6）：1–15.

[5] 茄菊红，谢峰，冯超，等. 高强耐热铸造铝合金及其航空发动机复杂壳体铸件的性能研究 [J]. 材料工程，2025，53（1）：186–194.

[6] 高一涵，刘刚，孙军. 耐热铸铝基合金研究进展：微观组织设计与析出策略 [J]. 金属学报，2021，57（2）：129–143.

[7] Sun Tengteng，Geng Jiwei，Bian Zeyu，et al. Enhanced thermal stability and mechanical properties of high-temperature resistant Al-Cu alloy with Zr and Mn micro-alloying [J]. Transaction of Nonferrous Metals Society of China.2022，32（3）：64–78.

[8] 张淇. 耐热铝合金的研究及应用现状与展望 [J]. 有色金属加工，2021，50（1）：1–4.

[9] 王郁，王俊升，薛程鹏，等. 微合金化对铝合金高温析出相影响的研究进展 [J]. 航空制造技术，2021，64（15）：68–77.

[10] Alexandre f.ferreira，Ivaldo l. ferreira，Rangel P. almeida，et al. Microstructural evolution and microsegregation in directional solidification of hypoeutectic Al-Cu alloy：a comparison between experimental data and numerical results obtained via phase-field model [J]. Transaction of nonferrous Metals Society of China.2021，31（2）：1853–1867.

[11] 李龙飞. 铸造铝合金凝固糊状区力学特性及热裂缺陷预测研究 [D]. 北京：北京科技大学，2022.

[12] 陈祥楷. 基于第一性原理的溶质及团簇对Al-Cu合金的强度与塑性影响的研究 [D]. 北京：北京科技大学，2023.

[13] 钱晓明，章羽，王昭东，等. 铸造冷却速率对Al-Mg-Si-Mn耐热铝合金组织及加工性能影响 [J]. 中国金属有色学报，2022，32（2）：344–352.

[14] 李道秀. 基于TCB演变效应的Al-Si-Mg合金形核机理与组织性能调控的研究 [D]. 济南：山东大学，2023.

[15] 林超，张鸿，毕亮，等. 铸造Al-Cu合金凝固缺陷研究现状 [J]. 材料导报，2016，30（11）：143–147.

[16] 何卫，马恒，石泽灏，等. 铝铜合金的晶界偏析行为及析出相的理论研究 [J]. 材料科学与工艺，2022，30（2）：68–72.

[17] 叶洁云. 基于合金成分与凝固控制的Al-Ce合金组织与性能调控 [D]. 赣州：江西理工大学，2023.

[18] 侯富敏. Al-Ce合金的成分设计及快速冷却条件对其组织性能影响研究 [D]. 太原：中北大学，2021.

[19] 谢传成. 凝固条件和热处理工艺对低压铸造耐热铝铜合金的影响 [D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2017.

[20] 张华伟. Al-Cu-Ni 铸造耐热铝合金设计、制备及性能研究 [D]. 上海：上海交通大学，2021.

[21] 张鸿，李言祥，刘源. 真空下铝液中氢溶解度行为及减压凝固试样法 [J]. 金属学报，2006，42（10）：1171–1176.

（编辑：刘东辉，ldh@foundryworld.com）