

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2025.5102

添加 Ce 和 Y 稀土元素铸造 K465 合金 组织与性能

冯文静¹, 王立军², 崔利民¹, 申文飞², 李 丽², 王艳辉², 曾洪涛², 赵雷杰²

(1. 中航上大高温合金材料股份有限公司, 河北省高温合金再生利用河北省工程研究中心, 河北省高温合金再生技术重点实验室, 河北省航空航天高温合金产业技术研究院, 河北 邢台 054800; 2. 河北工程大学, 河北省智能工业装备技术重点实验室, 河北省冀南新区现代装备制造协同创新中心, 河北 邯郸 056038)

摘 要: 航空航天领域对高温合金性能要求不断提高, 而主元素成分调控法已经达到优化合金性能瓶颈, 难以继续通过调整主元素添加比来显著提升高温合金的性能。稀土是一种重要的微合金化元素, 微量的稀土元素添加就可对高温合金组织及性能产生显著影响。采用工业级 1 t 真空感应熔炼方法制备了 K465 母合金锭, 冶炼过程添加了 Ce 和 Y 稀土元素, 以提升该铸造高温合金性能。采用 OM 对添加 Ce 和 Y 稀土元素的母合金以及固溶处理后组织进行了观察, 利用 SEM、能谱仪(EDS)对母合金微观组织进行系统性表征, 利用电子高温持久试验机对固溶热处理合金进行室温拉伸与高温持久性能试验。研究结果表明, 添加稀土元素后的组织类型未发生转变, 主要由基体相 γ 相、强化相 γ' 相、 $(\gamma+\gamma')$ 共晶相以及碳化物构成, 析出 γ' 相具有较高的立方度。抗拉强度和伸长率分别可达到 887 MPa 和 4.0%, 975 °C /225 MPa 条件下持久寿命 88.5 h。

关键词: 高温合金; 稀土元素; 微观组织; 性能

中图分类号: TG132.3+2

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2025)06-0576-06

Microstructure and Properties of K465 Superalloys with Ce/Y Additions

FENG Wenjing¹, WANG Lijun², CUI Limin¹, SHEN Wenfei², LI Li², WANG Yanhui²,
ZENG Hongtao², ZHAO Leijie²

(1. Hebei Aerospace High Temperature Alloy Industry Technology Research Institute, Hebei Key Laboratory of High-Temperature Alloy Recycling Technology, Hebei Engineering Research Center for High Temperature Alloy Recycling, Zhonghangshangda Superalloys Co., Ltd., Xingtai 054800, China; 2. Collaborative Innovation Center for Modern Equipment Manufacturing of Jinan New Area (Hebei), Hebei Key Laboratory of Intelligent Industrial Equipment Technology, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

Abstract: With increasingly stringent demands for superalloys in the aerospace field, conventional composition optimization approaches have reached their performance ceiling. It has become increasingly difficult to significantly improve the performance of superalloys by adjusting the ratios of primary elements. Rare earth elements serve as important microalloying additives, and the addition of trace amounts can profoundly influence the microstructure and properties of superalloys. Industrial-scale 1 t vacuum induction melting was employed to prepare K465 master alloy ingots. The rare earth elements cerium (Ce) and yttrium (Y) were added during the smelting process to enhance the performance of this cast superalloy. Microstructural characterization was performed via optical microscopy (OM) on both the as-cast and solution-treated samples, whereas scanning electron microscopy (SEM) combined with energy-dispersive spectroscopy (EDS) was employed to analyse the microstructure systematically. The room-temperature tensile properties and

收稿日期: 2025-06-05

基金项目: 河北省军民融合科技创新项目(SJMYF202409); 河北省创新能力提升计划(235A1001D); 河北省高等学校科学技术研究产学研合作专项(CXY2024040)

作者简介: 冯文静, 1988 年生, 工程师, 学士。主要从事高温合金、特殊钢等关键金属材料制备技术研究方面的工作。

Email: 15100998936@126.com

通信作者: 赵雷杰, 1986 年生, 副教授, 博士。研究方向为金属件的组织及性能。Email: leijzhao@163.com

引用格式: 冯文静, 王立军, 崔利民, 申文飞, 李丽, 王艳辉, 曾洪涛, 赵雷杰. 添加 Ce 和 Y 稀土元素铸造 K465 合金组织与性能[J]. 铸造技术, 2025, 46(6): 576-581.

FENG W J, WANG L J, CUI L M, SHEN W F, LI L, WANG Y H, ZENG H T, ZHAO L J. Microstructure and properties of K465 superalloys with Ce/Y additions[J]. Foundry Technology, 2025, 46(6): 576-581.

high-temperature stress rupture performance after solution treatment were examined via a universal testing machine and a creep testing machine. These findings indicate that the addition of rare earth elements (Ce and Y) did not alter the phase constitution of the alloy, which is mainly composed of γ matrix phase, γ' phase, $(\gamma+\gamma')$ eutectic phase, and carbides. The master alloy exhibits a room-temperature tensile strength of 887 MPa with 4.0% elongation and demonstrates high-temperature stress rupture lifetimes of 88 h and 30 min at 975 °C/225 MPa.

Key words: superalloy; rare earth elements; microstructure; mechanical properties

高温合金因其优异的高温强度、抗氧化性和耐腐蚀性能,被广泛应用于航空发动机、燃气轮机等关键热端部件,其中镍基高温合金应用最为广泛^[1-3]。K465 合金作为一种典型的镍基铸造高温合金,因其良好的综合性能成为涡轮叶片等高温部件的重要材料之一^[4]。随着航空发动机推重比和涡轮前温度的不断提升,对 K465 合金的承温能力、组织稳定性及力学性能要求愈发苛刻。长久以来,通过合金化或工艺优化能有效提升 K465 合金的高温性能,但通过调整主要添加元素已难以显著改善高温合金的综合性能,针对主元素的成分优化面临瓶颈^[5]。

稀土元素在合金中常被用作微合金化添加剂,加入微量的稀土元素就会对高温合金组织及性能产生显著影响,如净化合金、改变析出相的种类及分布状态、提高热塑性、力学性能及抗氧化性能等^[6-8]。铈(Ce)和钇(Y)是两种典型的稀土元素,具有较高的化学活性,能与氧、硫等杂质形成高熔点化合物,从而减少有害相在晶界的偏聚。研究人员对添加 Ce 和 Y 对合金组织与性能的影响进行了持续的调查研究。谭晓等^[9]研究了 Ce 微合金化对免热处理 Al-Si 合金组织与力学性能的影响,研究发现添加 0.3%Ce (质量分数,下同)时,合金得到了最优强度,抗拉强度可达到 179 MPa,相比未添加稀土元素的提高了 17%,使力学性能得到了较好提高。Gao 等^[10]研究了 Ce 和 Y 稀土元素的添加对镁合金性能的影响,设计了不同含量的稀土元素,当 Ce 元素含量为 0.6% 时,合金综合性能最好,屈服强度、抗拉强度和伸长率可达到 281 MPa、295 MPa 和 27.9%。Zhu 等^[11]研究了稀土 Ce 元素对压铸铝合金的微观组织和力学性能的影响,发现 Ce 元素的添加对合金抗拉强度和伸长率有不同程度的增强,加入 0.4%Ce 合金的综合性能最优,与原试样相比抗拉强度和伸长率分别提高了 10.9%和 8.1%;添加 0.4%La 时,抗拉强度和伸长率分别为 305 MPa 和 2.66%。徐海峰等^[12]对添加 Sr 和 Ce 对镍基高温合金高温力学及疲劳性能进行了研究,研究发现合金元素 Sr 和 Ce 的复合添加,改善了材料的内部组织,提高铸态 K418 镍基高温合金的高温力学性能和热疲劳性能。王定刚等^[13]研究了不同 Ce+Y 元素添加量对 K465 合金微观组

织与力学性能的影响。结果表明,Ce+Y 含量为 0.03%的合金碳化物变质处理后形态良好,高温持久性能大幅提高;Ce+Y 含量提升到 0.06%时,枝晶间区大块 γ' 相的边缘析出富 Ce+Y 相,合金持久性能明显上升。综上所述,添加稀土元素对改善高温合金性能潜力巨大,稀土元素种类以及添加量至关重要。铸造镍基高温合金 K465 作为典型的高 γ' 相强化合金,其高温性能与凝固组织及晶界特征密切相关,预期可通过添加微量稀土元素改善 K465 合金的凝固行为、净化晶界并预期提升高温性能。

前期针对 K465 合金添加稀土元素相关研究主要以实验室状态,小批量验证性研究为主。本研究从实际生产角度出发,以添加 Ce 和 Y 稀土元素的 K465 合金为研究对象,利用工业级熔炼设备进行母合金制备。结合光学显微镜(OM)、扫描电镜(SEM)等手段,分析稀土元素对合金枝晶间距、 γ' 相分布,并研究固溶处理后的常规拉伸与持久性能,为稀土改性 K465 高温合金的设计与实际工程应用提供理论依据。

1 实验材料与方法

为保证合金母材及实验结果更贴近工业生产,采用企业级真空熔炼炉进行合金熔炼。使用中航上大高温合金材料股份有限公司 1 t 真空熔炼炉,将满足配分比并添加稀土元素的合金粉末放入真空熔炼炉进行熔炼。鉴于稀土元素添加过量会对合金产生不良影响,将 Ce、Y 两种合金元素添加总量控制在 0.03%以下。熔炼好的合金溶液一次性浇注成 $\phi 85 \text{ mm} \times 1100 \text{ mm}$ 母合金锭 25 支,浇注温度被精确控制在 1450~1480 °C,铸锭冷却后用车床对母合金锭表面进行车光处理,车光至直径为 $\phi 80 \text{ mm}$ 作为实验材料,如图 1 所示。

使用热电 ICP 电感耦合等离子光谱发生仪对母合金锭的化学成分进行检测,成分检测结果如统计于表 1,随后,对合金进行了固溶处理:将合金置于科晶 GSL-1700X 管式炉中加热至 1210 °C,并在此温度下保温 4 h,以促进合金内部结构均匀化,随后空冷至室温,固溶处理工艺如图 2 所示。固溶处理后合金分别进行室温拉伸与持久实验。持久实验温度



图1 K465 铸造合金母合金
Fig.1 Master alloy of the K465 cast alloy

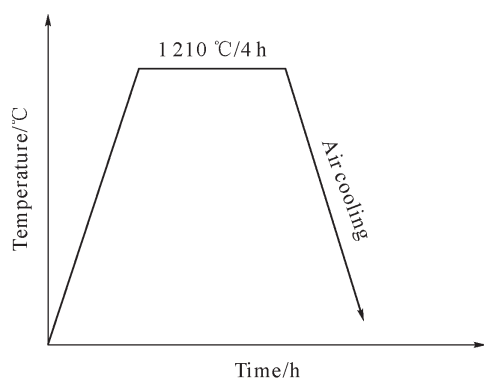
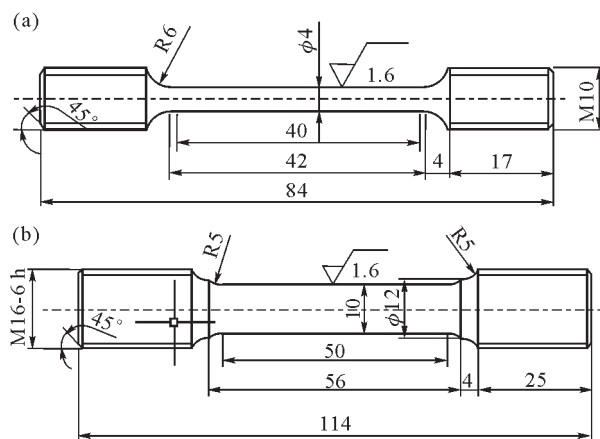


图2 固溶处理工艺
Fig.2 Solution treatment process diagram

为 975 °C, 试验力为 225 MPa, 以评估其在高温和高压环境下的性能表现。

金相试样制备时首先用线切割机在母合金锭上切取 5 mm×5 mm×5 mm 小方块试样, 然后依次采用 180~2000 目砂纸依次打磨, 并在抛光机上采用 2.5 mm 金刚石抛光膏进行抛光至表面无划痕。用于组织观察的试样采用王水(盐酸与硝酸按照 3:1 比例配制)进行腐蚀, 腐蚀时间为 10~12 s, 然后用酒精冲洗并迅速吹风机吹干。用未腐蚀状态金相试样进行金相观察, 对比固溶处理前后碳化物状态。采用金相显微镜观察微观组织和碳化物状态。采用 SU-5000 型扫描电子显微镜对腐蚀后的 K465 合金试样进行更高倍数下组织观察, 并配合能谱仪(EDS)分析元素分布特征, SEM 拍摄过程加速电压设置为 15.00 kV。将固溶处理后的合金高温持久试样, 高温持久试样严格按照 GB/T 228.1-2010 标准进行, 试样尺寸(图 3)所示。高温持久性能测试采用长春科新 RD-50 型电子式高温持久试验机。为保证实验数据的准确性与重复性, 每种测试条件下均进行 3 次重复实验, 最终取其平均值作为测试结果。



Unit: mm

图3 固溶处理 K465 合金性能试样示意图:(a) 室温拉伸试样;(b) 持久性能试样

Fig.3 Schematic diagram of a solution-treated K465 alloy test sample: (a) room-temperature tensile sample; (b) rupture sample

2 实验结果及讨论

2.1 金相组织表征

图 4a 和 b 分别展示了 K465 合金在铸态下的宏观金相组织照片。从图 4a 的低倍拍摄中可以观察到组织分布较为均匀, 其中分布有灰白色块状和长条状碳化物, 以及类似共晶体的组织。在图 4b 的较高倍数下, 可以更清晰地观察到碳化物呈链状分布于晶界和枝晶间, 而($\gamma+\gamma'$)共晶体主要呈花瓣状和平板状分布, 基体通道为 γ 相和被分割的 γ' 相。图 5a 和 b 分别展示了 K465 合金在固溶处理后的宏观金相组织照片。从图中可观察到添加稀土元素后 K465 母合金锭中碳化物呈近似球形, 而常见的未添加稀土元素 K465 合金中碳化物呈汉字型^[13-14], 二者有明显差异。而固溶处理前后, 碳化物的形貌和尺寸差别不明显。

2.2 SEM 微观组织表征

K465 合金中的析出相 γ' 相对其力学性能起着至关重要的作用^[15], 因此对析出相的控制和立方度的完整性有严格的要求, 观察和表征合金的组织尤为重要。本研究采用 SEM 扫描电镜技术对 K465 铸造高温合金的微观组织特征进行了表征, 如图 6 所示。图 6a 揭示了铸态合金的微观结构, 其包含 γ 相基体、冷却过程中析出的 γ' 相、($\gamma+\gamma'$)共晶相, 以及呈暗灰色方块状和长条状分布的碳化物, 大部分碳化物与析出相尺寸较小, 分散均匀。根据文献[13]报

表1 K465母合金化学成分
Tab.1 Chemical composition of the K465 master alloy

(mass fraction/%)												
C	Cr	Co	W	Mo	Nb	Al	Ti	B	Zr	Ce	Y	Ni
0.147	9.08	10.00	9.90	1.70	1.13	5.42	2.31	0.017	0.030	0.02	0.005	Bal.

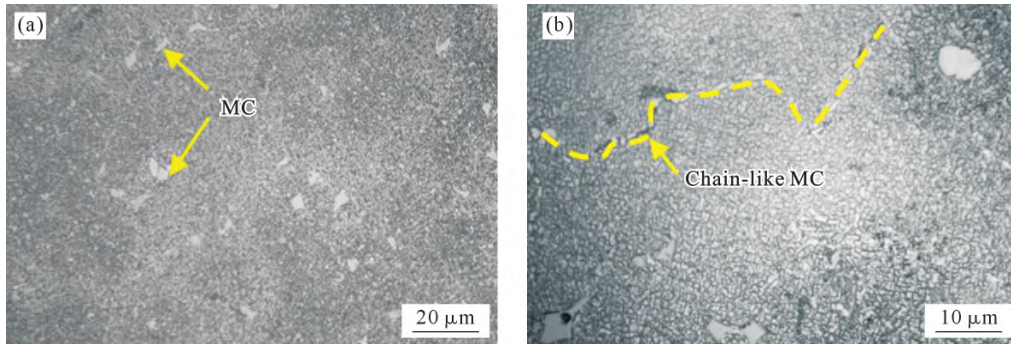


图 4 K465 合金铸态金相组织:(a) 低倍;(b) 高倍

Fig.4 OM images of the as-cast structure of the K465 alloy: (a) low magnification; (b) high magnification

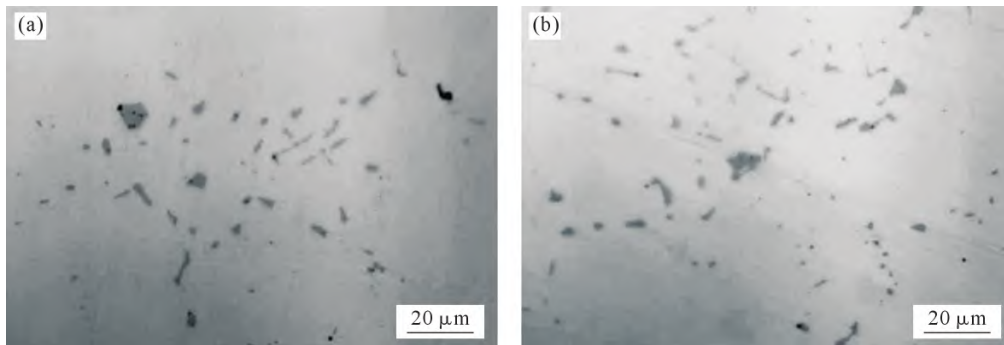
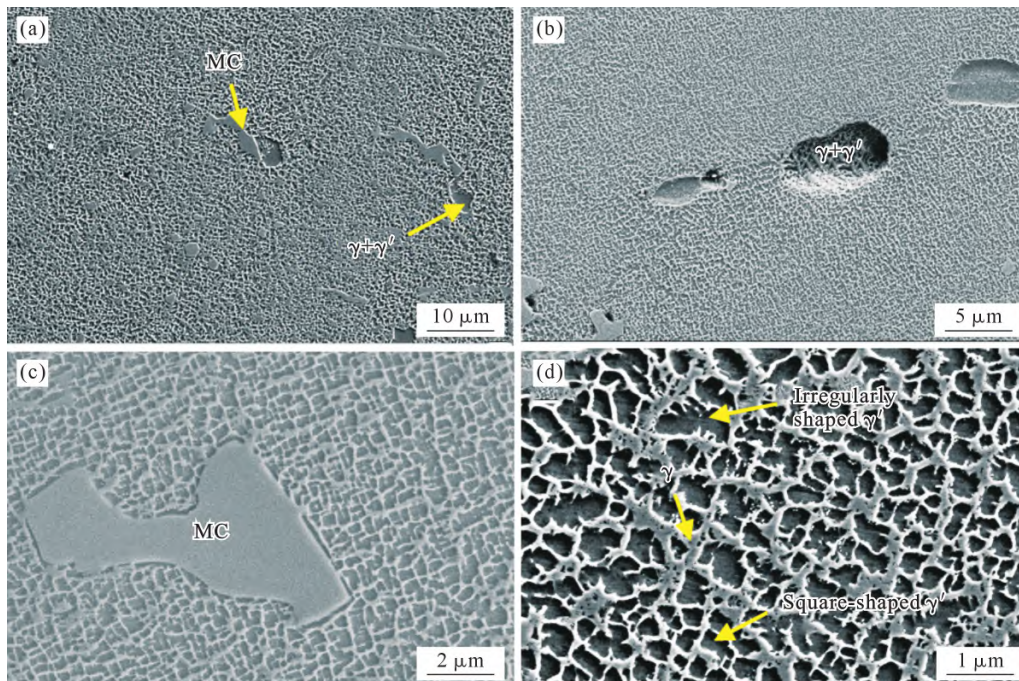


图 5 K465 合金固溶处理前后未腐蚀态试样金相:(a) 固溶处理前;(b) 固溶处理后

Fig.5 OM images of unetched state samples of the K465 alloy before and after solution treatment: (a) before; (b) after

道,对于析出相和碳化物,以细小且均匀状态分布于基体组织中,对改善合金的力学性能具有积极意义。不同位置 γ' 相的形貌有明显区别,在枝晶干区域,其形貌更为规则,呈方形;而在枝晶间区域,则表现为尺寸较大且形貌不规则形貌。图 6b 与 c 分别呈现了 $(\gamma+\gamma')$ 共晶相及 MC 型碳化物的高倍放大形

貌。研究表明,碳化物对合金具有强化效应,会对合金的力学性能产生相应影响^[16]。通过对暗灰色碳化物的元素分析(图 7),确认其主要元素为 C、Ti、Nb、W,从而鉴定其为 MC 型碳化物,此结果与 Yang 等^[17]和 Zhang 等^[18]的研究一致。然而,与郭小童等^[19]研究的未添加稀土的样品相比,本研究中添加稀土元素后

图 6 K465 合金铸态组织 SEM 像:(a) 铸态组织;(b) $(\gamma+\gamma')$ 共晶相;(c) MC 型碳化物;(d) γ 相和 γ' 相Fig.6 SEM images of the as-cast structure of the K465 alloy: (a) as-cast structure; (b) $(\gamma+\gamma')$ eutectic phase; (c) MC-type carbide; (d) γ phase and γ' phase

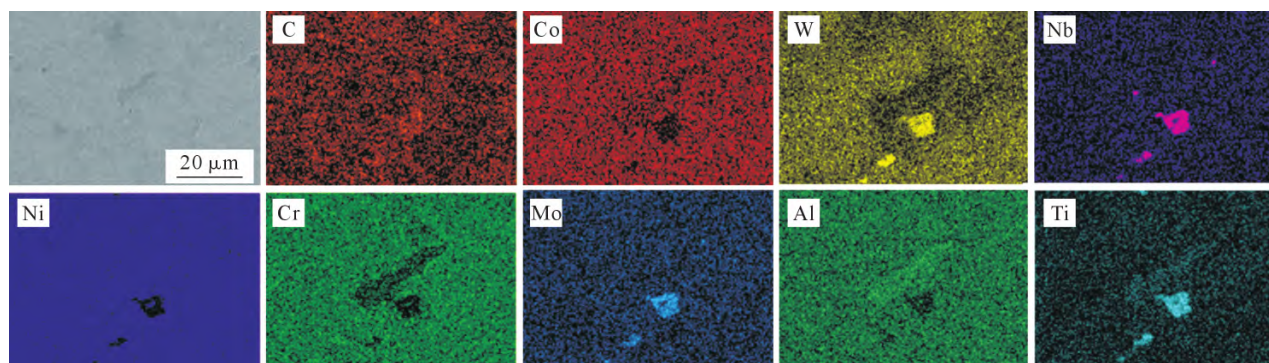


图7 铸态 K465 合金中碳化物 EDS 分析

Fig.7 EDS analysis of carbides in the as-cast K465 alloy

析出相的立方度更高。

2.3 高温持久和室温拉伸性能测试

针对经过固溶处理的铸造等轴晶镍基 K465 高温合金,测试了其室温拉伸性能以及 975 °C/225 MPa 下的高温持久性能,性能统计结果见表 2。数据表明,室温下的抗拉强度和伸长率分别为 887 MPa 和 4.0%,明显优于技术条件要求^[13]。在 975 °C 的持久寿命 88.5 h,远超技术标准规定的 40 h^[13],并且与前期研究未加稀土元素的母合金相比提升 40%以上。稀土元素的添加使得析出相细小均匀,并且具有完整的方形结构,有助于提高合金的持久性能^[20]。根据文献^[21],添加稀土元素会促使碳化物轮廓趋向于圆滑,能有效减少应力集中,进而降低微裂纹萌生的风险。这些微观组织的优化共同作用,可有效提升合金的持久寿命。余乾等^[22]未添加稀土元素的 K465 合金,相同测试条件下持久寿命低于 65 h;与之相比,本研究中添加稀土元素 K465 合金持久寿命有明显提升,表明了稀土元素的添加对于提升 K465 合金高温持久性能具有明显作用。

表2 K465合金固溶处理后室温拉伸性能

Table 2 Room-temperature tensile properties of the K465 alloy after solution treatment

Propertie	R_m /MPa	A /%
Measurement	873	3.8
	891	4.2
Average	887	4.0
Specification	≥ 830	3.0

表3 K465合金固溶处理后高温持久寿命

Tab.3 High-temperature endurance life of the K465 alloy after solution treatment

Test condition	Time/h	
	Measurement	Average
975 °C/225 MPa	85	87.5
	92	
	Specification	≥ 40

3 结论

(1)添加 Ce 和 Y 稀土元素 K465 母合金组织主要由 γ 相、 γ' 相、 $(\gamma+\gamma')$ 共晶相以及 MC 碳化物构成,晶粒组织细小, γ' 析出相具有较高的立方度。

(2)添加 Ce 和 Y 稀土元素 K465 母合金固溶处理后室温抗拉强度达到 887 MPa,明显高于标准值(830 MPa),伸长率为 4.0%,可满足实际应用需求。

(3)稀土元素的添加使 K465 高温合金的具备良好的高温持久性能,再 975 °C/225 MPa 条件下持久寿命达 88.5 h。

参考文献:

- [1] 邱华. M91 高温合金的研制及工艺优化[D]. 重庆: 重庆大学, 2004.
QIU H. Development and process optimization of M91 superalloy [D]. Chongqing: Chongqing University, 2004.
- [2] ZHAO Z N, SUN S Y, ZENG Y, WEI J J, FAN Z M, LU Y J, YANG W Z, LI L. Study on the anisotropic high cycle fatigue performance of L-DEDED Ni-based superalloy: Microstructure, failure mechanism and fatigue limit evaluation[J]. International Journal of Fatigue, 2024, 182: 108202.
- [3] ZHANG X, MU Y H, LU N N, LI Q, CHEN S F, ZHOU Y Z, SUN X F, LING J J, LI J G. Effect of solid solution elements on cracking susceptibility of Ni-based superalloys during additive manufacturing [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2024, 190: 218-228.
- [4] YANG B H, LIU Q, WANG J S, MA Q J, QING Y Q, ZHAN Y, SHANG S, LIU C S. Influence of GH4169 addition on cracking control, microstructure and mechanical properties of GH4169/K465 composite material manufactured by selective laser melting [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2024, 1001: 175206.
- [5] 王中琳, 谢兴飞, 曲敬龙, 杜金辉, 于月光. 稀土在高温合金中的研究进展[J/OL]. 中国稀土学报, 2025. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2365.tg.20250221.1641.008.html>.
WANG Z L, XIE X F, QU J L, DU J H, YU Y G. Research progress of rare earths in superalloys [J/OL]. Chinese Journal of Rare Earths, 2025. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2365.tg>.

- 20250221.1641.008.html.
- [6] CUEFF R, BUSCAIL H, CAUDRON E, ISSARTEL C, RIFFARD F. Oxidation of alumina formers at 1 173 K: Effect of yttrium ion implantation and yttrium alloying addition[J]. Corrosion Science, 2003, 45(8): 15-18.
- [7] 徐志超,马培立. 高温合金中微量元素的作用和控制[M]. 北京:冶金工业出版社, 1987.
- [8] 郭建亨. 几种微量元素在高温合金中的作用与机理 [J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(3): 465-475.
- GUO J T. Effects of several minor elements on superalloys and their mechanism [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(3): 465-475.
- [9] 谭晓, 翟文鑫, 于巍, 姜凯曦, 白玉, 郝海. Ce 微合金化对免热处理 Al-Si 合金组织与性能的影响[J/OL]. 铸造技术, 2025. <https://doi.org/10.16410/j.issn1000-8365.2025.5043>.
- TAN X, ZHAI W X, YU W, JIANG K X, BAI Y, HAO H. Effect of Ce on the microstructure and mechanical properties of Al-Si non-heat treatment alloy[J/OL]. Foundry Technology, 2025. <https://doi.org/10.16410/j.issn1000-8365.2025.5043>.
- [10] GAO S T, WEI X F, LE Q C, REN L, HU J L, WANG T C, LIAO Q Y, BAO L. Magnesium alloys strengthened with a combination of light rare earth element Ce and heavy rare earth element Y[J]. Materials Today Communications, 2025, 43: 111682.
- [11] ZHU R X, SU Y, QIN X Y, HU N, LU L Y. Effect of rare earth elements on the microstructure and properties of a die-cast aluminum alloy[J]. Materials Testing, 2019, 61(2): 159-163.
- [12] 徐海峰,孔建. Sr 和 Ce 对镍基高温合金高温力学及热疲劳性能的影响[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2020, 51(2): 320-322.
- XU H F, KONG J. Effect of Sr and Ce on high temperature mechanical property and thermal fatigue property of nickel-based superalloy [J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2020, 51(2): 320-322.
- [13] 王定刚,肖程波,宋尽霞,李青,余乾. 不同稀土元素添加量对 K465 合金微观组织与力学性能的影响[J]. 材料工程, 2014 (8):46-50.
- WANG D G, XIAO C B, SONG J X, LI Q, YU Q. Effects of rare-earth elements content on microstructure and mechanical properties of K465 superalloy [J]. Journal of Materials Engineering, 2014(8): 46-50.
- [14] 李思思, 静永娟, 程耀永, 裴冲, 毛唯. K465 镍基铸造高温合金钎焊及其在修复中的应用[J]. 电焊机, 2020, 50(11): 37-42, 49.
- LI S S, JING Y J, CHENG Y Y, PEI C, MAO W. Brazing of K465 nickel-based cast superalloy and its application in repair [J]. Electric Welding Machine, 2020, 50(11): 37-42, 49.
- [15] 赵鑫磊, 袁晓飞, 乔珺威. 固溶温度对 K424 合金显微组织与力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2024, 49(3): 15-21.
- ZHAO X L, YUAN X F, QIAO J W. Effect of solution temperature on microstructure and mechanical properties of K424 alloy [J]. Heat Treatment of Metals, 2024, 49(3): 15-21.
- [16] GAO N, LU D H, ZHAO Y Y, LIU X W, LIU G H, WU Y, LIU G, FAN Z T, LU Z P, GEORGE E P. Strengthening of a CrMnFe-CoNi high-entropy alloy by carbide precipitation [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 792: 1028-1035.
- [17] YANG J X, ZHENG Q, SUN X F, GUAN H R, HU Z Q. Morphological evolution of MC carbide in K465 superalloy [J]. Journal of Materials Science, 2006, 41: 6476-6478.
- [18] ZHANG L F, LIU K, ZHU Q, FAN G H, ZHANG P. Effect of Co content on the as-cast microstructure and homogenization of Ni-Co-based superalloys [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2025, 1010: 177393.
- [19] 郭小童, 郑为为, 李龙飞, 冯强. 冷却速率导致的薄壁效应对 K465 合金显微组织和持久性能的影响[J]. 金属学报, 2020, 56 (12): 1654-1666.
- GUO X T, ZHENG W W, LI L F, FENG Q. Cooling rate driven thin-wall effects on the microstructures and stress rupture properties of K465 superalloy [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2020, 56 (12): 1654-1666.
- [20] 王树森, 桑志茹, 程陆凡, 曹夕, 柴宏宇, 高明远. C 含量对 K465 镍基高温合金组织及高温持久性能的影响[J]. 热加工工艺, 2022, 51(24): 14-19.
- WANG S S, SANG Z R, CHENG L F, CAO X, CHAI H Y, GAO M Y. Influence of C contents on microstructure and high temperature stress rupture properties of polycrystalline nickel-based superalloy [J]. Hot Working Technology, 2022, 51(24): 14-19.
- [21] 张松. 双金属耐磨锤头的研制[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2023.
- ZHANG S. Development of the bimetallic wear-resisting hammer-head [D]. Hohhot: Inner Mongolia University of Technology, 2023.
- [22] 余乾, 宋尽霞, 王定刚, 曲士昱, 李青. 返回料比例对镍基高温合金 K465 组织和性能的影响[J]. 材料工程, 2006(6): 9-12, 39.
- YU G, SONG J X, WANG D G, QU S Y, LI Q. Effect of recycled alloy proportion on microstructure and mechanical properties of Ni-based superalloy K465 [J]. Journal of Materials Engineering, 2006(6): 9-12, 39.

(责任编辑:杨浩雪)