DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.09.004

K424 高温合金显微组织和力学性能分析

逯红果[1,2],王光华[2],田立敏[2],赵国才[2],马中钢[2],殷凤仕[1],李道乾[2]

(1. 山东理工大学 机械工程学院,山东 淄博 255049; 2. 山东瑞泰新材料科技有限公司,山东 沂源 256100)

摘　要:通过金相显微镜、扫描电镜研究了 K424 合金显微组织。研究表明:K424 合金中主要为 MC 型碳化物和($\gamma+\gamma'$)共晶组织,MC 型碳化物分为汉字骨架状和颗粒、长条状;汉字骨架状的 MC 型碳化物不利于提高合金伸长率和断面收缩率。

关键词:K424 合金;熔体处理温度;力学性能

中图分类号: TG113; TG132　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2020)09-0820-04

Analysis of Microstructure and Mechanical Properties of K424 Superalloy

LU Hongguo[1,2], WANH Guanghua[2], TIAN Limin[2], ZHAO Guocai[2], MA Zhonggang[2], YIN Fengshi[1], LI Daoqian[2]

(1. School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China; 2. Shandong Ruitai New Material Technology Co Ltd, Yiyuan 256100, China)

Abstract: The microstructure of K424 alloy was studied by metallographic microscope and scanning electron microscope (SEM). The results show that the K424 alloy is mainly composed of MC-type carbides and ($\gamma+\gamma'$) eutectic structure. MC-type carbides are divided into Chinese-shaped skeletons, particles, and strips. Among them, the Chinese character skeleton of MC-type carbide is not conducive to improving the alloy elongation and cross-sectional shrinkage.

Key words: K424 superalloy; melt treatment temperature; mechanical properties

K424 合金是镍基沉淀硬化型等轴晶铸造高温合金,含有较高的 Ti 含量和 Ti/Al 比,具有较高的高温强度和良好的工艺性,使用温度可达 950 ℃ 以上,主要用于制作航空、航天发动机涡轮叶片、尾喷口调节片、整铸涡轮转子及导向器等高温结构部件[1-3]。镍基 K424 合金析出相主要为 γ' 相和 MC 型碳化物,凝固过程中发生非平衡共晶转变形成($\gamma+\gamma'$)共晶组织[1,3,4]。高温熔体处理技术[4]、浇注温度[5,6,10,12]、凝固冷却方式[1,3,9]、热处理方式[3]主要影响析出相分布、形态和大小,对析出相类型影响不大。杨敬明[4]研究表明:高温熔体处理技术能够细化 MC 型碳化物,减少晶粒尺寸和二次枝晶间距,改善组织偏析。赵展等[1,2,5]研究了冷却速度对 K424 高温合金凝固特征的影响规律,发现控制冷却速度能够改变 MC 型碳化物、共晶组织和缩松的大小。袁晓飞[3]研究表明:热处理温度影响 γ' 相大小和形状,对 MC 型碳化物及共晶组织影响不大。但是,日常浇注同一批 K424 合金拉伸试棒过程中,室温拉伸结果常会出现抗拉强度、屈服强度差别不大,但伸长率和断面收缩率差别较大的现象。为此,本文进一步探究该现象发生的原因,为以后的试验和生产提供经验。

1　试验方法

本试验采用型号为 ZGJL0.5-100-2.5 真空感应炉重熔 K424 母合金锭,采用相同重熔工艺浇注 2 批次的成型圆盘试棒,分别命名为 1# 合金和 2# 合金,化学成分见表 1。

采用 CMT-5105 型拉伸试验机进行室温拉伸性能测试。拉断的试样采用线切割沿试样轴线剖开获得纵剖面,经镶嵌、打磨、抛光及腐蚀后观察显微组织。金相试样的腐蚀剂为 1.5 g $CuSO_4$+40 mL HCl+20 mLC_2H_5OH。利用光学显微镜(OM)观察宏观晶粒形貌,采用型号为 FEI-Apreo-S 场发射高分辨扫描电镜观察显微组织及断口纵剖面形貌。

收稿日期:2020-05-11

基金项目:国家重点研发计划(2018YFB1106600);山东省重点研发计划(重大科技创新工程)(2019JZZY010332)

作者简介:逯红果(1988-),山东菏泽人,硕士,工程师.研究方向:金属材料的组织和性能研究.电话:17560312304,E-mail:luhongguo12345@163.com.

通讯作者:殷凤仕(1967-),山东莒县人,教授,博士生导师.研究方向:高性能高温金属材料的组织和性能研究.电话:13605331243,E-mail:fsyin@sdut.edu.cn

表 1 合金化学成分 w(%)
Tab.1 Chemical composition of the alloy

合金编号	C	Cr	Fe	Mo	V	W	Nb	Ti	Co	Al	B	Ni
1#	0.166	9.38	0.037	2.87	0.78	1.28	0.79	4.51	12.88	5.32	0.014	余量
2#	0.148	9.10	0.058	2.90	0.78	1.30	0.79	4.52	12.88	5.34	0.014	余量

2 试验结果

2.1 拉伸性能

表 2 为 K424 合金室温拉伸性能结果。从表 2 可知，1# 和 2# 合金的抗拉强度和屈服强度差别不大，但在伸长率和断面收缩率方面，2# 合金比 1# 提高 1 倍左右。

表2 K424合金室温拉伸试验结果
Tab.2 The tensile test results of K424 alloy at room temperature

合金编号	R_m/MPa	$R_{p0.2}$/MPa	A(%)	ψ(%)
1#	1 082	1 021	3.2	5.9
2#	1 142	1 036	6.8	11.2

2.2 显微组织

图 1 为 1# 和 2# 合金的金相照片。可以看出，析出相主要分布在枝晶间，且存在差异性。1# 合金析出相主要以汉字骨架状分布在枝晶间，而 2# 合金析出相主要以颗粒状分布在枝晶间。

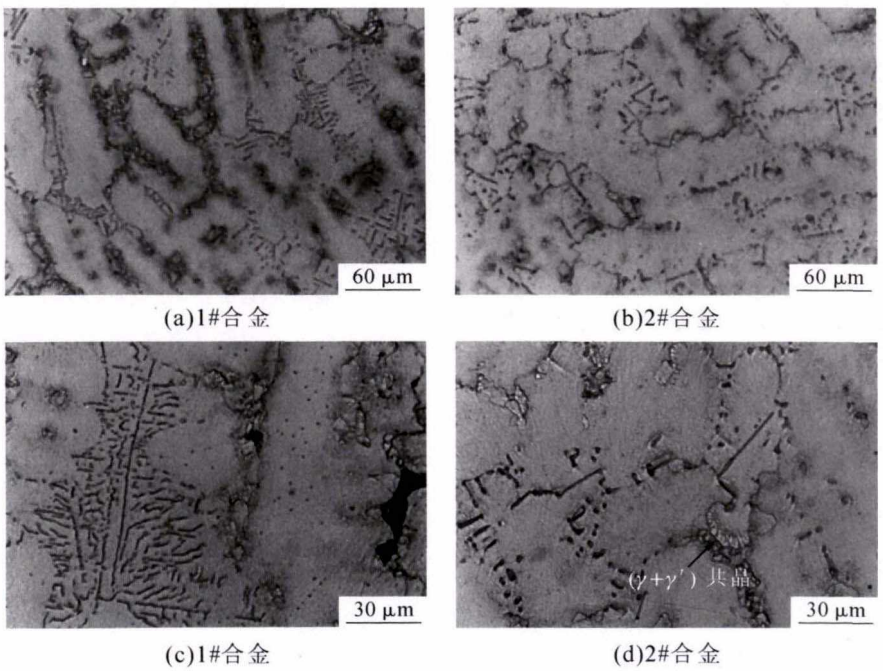
图 2 为 1# 和 2# 合金的扫描照片。可见，1# 和 2# 合金中均存在显微疏松（箭头标记处）；1# 合金析出相主要为汉字骨架状，而 2# 合金析出相主要为颗粒状，小部分为汉字状。

图 3 为 1# 合金和 2# 合金断口附近 BSE 照片。由图 3 可以看出，裂纹源优先在析出相附近形成，并易沿着垂直与拉伸力方向（双向箭头表示拉伸方向）进行扩展。

3 分析与讨论

镍基 K424 合金凝固过程为 L→γ 转变，随后发生 L→γ+MC 型转变，在非平衡凝固下形成(γ+γ')共晶组织，碳化物类型 MC 型(M 主要为 Ti、Nb 和 Mo 元素)[1-3]。根据文献[1,3,4]与图 3 断口 BSE 照片中析出相衬度一致可知，汉字骨架状、长棒状和颗粒状析出相主要为 MC 型碳化物。由表 2 可知，室温拉伸试验下，K424 合金抗拉强度与屈服强度差别不大，但是在伸长率和断面收缩率方面，2# 合金比 1# 提高约 1 倍。由图 1 和图 2 可知，1# 合金中 MC 型碳化物呈汉字骨架状分布，而 2# 合金中 MC 碳化物主要以颗粒状和长棒状分布，且枝晶间无明显的汉字状碳化物存在。

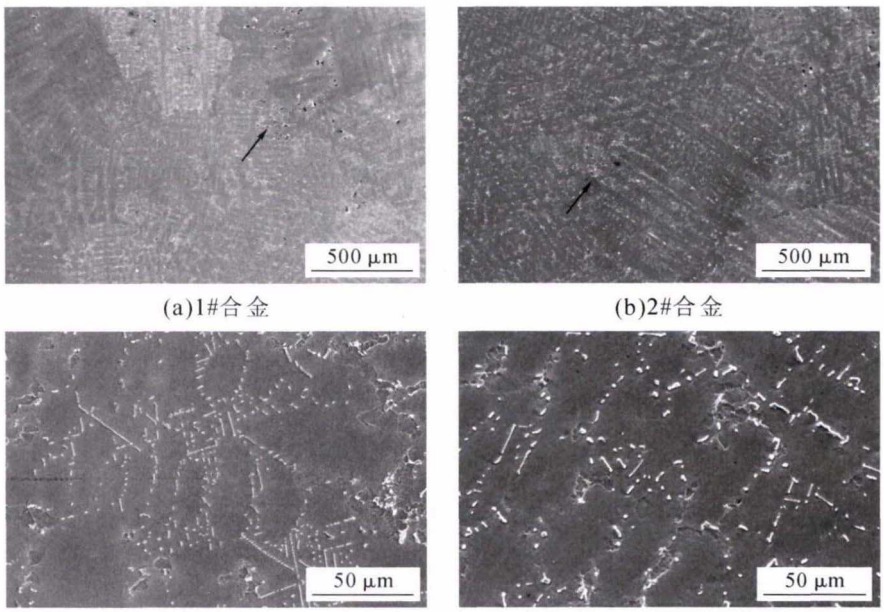
影响镍基铸造高温合金中碳化物形态的主要因素有熔体处理温度、浇注温度和碳含量等。相关研究表明：提高熔体处理温度能够细化 MC 型碳化物，使其弥散分布[4]；降低浇注温度和提高冷却速度，能够改变碳化物的析出形貌，由汉字状变成颗粒状[5,6]；增加碳含量，能够改变 MC 型碳化物的形貌，由“块状”向“汉字状”转变[7-9]。由表 1 看出，1# 合金和 2#



(a)1#合金　(b)2#合金

(c)1#合金　(d)2#合金

图 1 合金的金相照片
Fig.1 Microstructures of the alloy

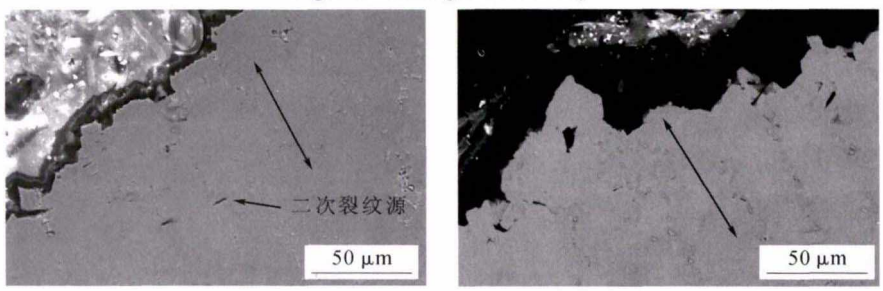


(a)1#合金 (b)2#合金

(c)1#合金 (d)2#合金

图 2 合金扫描电镜形貌

Fig.2 SEM images of the alloy



(a)1#合金 (b)2#合金

图 3 合金断口的背散射形貌

Fig.3 Backscattering fracture images of alloy

合金中 C、Cr 元素含量存在差异性。由于 1# 合金和 2# 合金均取自同一母合金锭，且化学成分一致，造成 C、Cr 元素存在差异性的主要原因之一是熔炼温度。由于在真空熔炼过程中，熔体温度过高时，导致 C、Cr 元素挥发，其含量减少。同时，高温熔体处理还起到细化 MC 型碳化物的作用[4]。同时，研究表明[5-11]：汉字状碳化物能够提高合金抗拉强度和屈服强度，降低合金的伸长率和收缩率。而表 2 中，1# 合金比 2# 合金强度低的原因在于，1# 合金组织中存在大量缩松（见图 2），导致显微缩松与基体的界面上产生的应力集中作用于薄弱的晶间组织，导致产生裂纹，裂纹不断扩展将缩松连在一起；当裂纹的面积扩大到一定程度时，发生断裂，从而降低合金的强度[12,13]。

4 结论

（1）K424 合金中主要为 MC 型碳化物和（$\gamma+\gamma'$）共晶组织；MC 型碳化物形貌可分为汉字骨架状和颗粒长条状，其中，汉字骨架状的 MC 型碳化物不利于提高合金伸长率和断面收缩率。

（2）真空熔炼 K424 合金过程中，应控制熔体处理温度，防止温度过高导致 C、Cr 元素挥发，影响合金力学性能的稳定性。

参考文献：

[1] 赵展，董建新，张麦仓，等. K424 高温合金凝固特征及冷却速度对其影响规律[J]. 工程科学学报. 2018，40(11)：1332-1341.

[2] 邵冲，赵明汉，李俊涛，等. 铸造工艺对 K424 合金中 σ 相析出的影响[J]. 钢铁研究学报，2005，17(5)：72-75.

[3] 袁晓飞，吴剑涛，李俊涛，等. K424 合金超温后的显微组织与典型性能[J]. 稀有金属材料与工程. 2018，47(6)：1779-1785.

[4] 杨敬明，于 波，苏贵桥. 熔体处理温度对 K424 高温合金凝固组织和性能的影响[J]. 铸造，2017，66(6)：548-553.

[5] 王晓轩，国振兴，于兴福，等. 浇注温度对 K417G 合金组织及力学性能的影响[J]. 铸造，2014，63(9)：924-928.

[6] 吴凯西，刘宏萱，彭 真，等. 浇注工艺对 K403 合金初生碳化物及持久性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金，2019，39(1)：51-56.

[7] 李振瑞. 碳含量对 K423 高温合金组织及性能的影响[J]. 钢铁研究学报. 2003，15(s1)：183-186.

（下转第 830 页）

[9] 晁芬,周勇,吴航. 新型塑料电力金具材料的制备及性能研究[J]. 江苏科技信息,2015,(31): 53-55

[10] 牛海军,付斌,朱宽军. 改性复合材料间隔棒和悬垂线夹的研制及应用[J]. 电力建设,2014,35(6): 97-101.

[11] 宋宁宁,王景朝,严行建. 高效节能系列电力金具的研制与应用[J]. 电网与清洁能源,2010,26(9): 34-37.

[12] 袁刚,赵杰. 一种节能螺栓型耐张线夹[P]. 中国: ZL201110172835.1,2011. 10. 19.

[13] 丁玎, 吴斌, 张雍斌, 等. 一种新型节能悬垂线夹. 201711479046.6[P]. 2018-06-01.

[14] Li S L, Wei Z Y, Jun D, et al. Research on the manufacturing of electrical power fittings based on metal droplet deposition [J]. Appl. Phys. A, 2017, 123: 405-411.

[15] 范志刚,祝德春,吴明,等. 3D 打印在电网设备结构设计与制造中的应用概述[J]. 机械制造,2016,45(6): 56-59.

[16] ASTM E8/E8M-08, Standard test methods for tension testing of metallic materials[S]. the United States of America: ASTM, 2008.

[17] ASTM G102-89. Standard practice for calculation of corrosion rates and related information from electrochemical measurements [S]. the United States of America: ASTM, 2004.

[18] 王宏伟. 金属材料低温性能的研究 [D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学,2015.

(上接第 822 页)

[8] 刘从庆,赵文学,王帆,等. 碳含量对一种高温合金铸态组织的影响[J]. 铸造技术,2019,40(2):372-375.

[9] 杨金侠,魏薇,刘路,等. 镍基高温合金中的初生碳化物及其强化作用[J]. 稀有金属材料与工程,2016,45(4):979-981.

[10] 张雷雷,陈晶阳,骞磊,等. 浇注温度对 K439B 合金显微组织和力学性能的影响[J]. 材料热处理学报,2019,40(9):57-63.

[11] 安宁,郭文东,牛永吉,等. IN738 合金显微组织和高温性能[J]. 金属材料研究,2019,45(2):20-23.

[12] 王宇飞,满延林,闫红梅,等. 浇注温度对 K424 合金疏松影响的数值模拟[J]. 铸造,2014,63(3):245-248.

[13] 艾厚望,吕志刚,郭馨. 熔模铸造条件下 K424 合金枝晶间缩松及微观偏析研究 [J]. 稀有金属材料与工程,2017,46(9):2476-2480.

(上接第 822 页)

(93):36-40.

[4] 马敬仲,丁建中,尤其光,等. 高速列车转向架轴箱铸件的生产试验——-40℃超低温高韧性球墨铸铁件的生产技术 [J]. 现代铸造,2012(5):15-21.

[5] 丁建中,马敬仲,曾艺成,等. 低温铁素体球墨铸铁的特性及质量稳定性研究[J]. 铸造,2015, 64(3):193-201.

[6] 季火绩,丁杰,于赟,等. 热处理对 QT400-18AL 低温韧性球墨铸铁力学性能的影响[J]. 铸造,2016,65(4):383-385.

[7] 陈琦,彭兆弟主编. 铸件热处理应用手册[M]. 北京:机械工业出版社,2012.

[8] 张华锋,孙树峰,朱于国,等. 超低温传动齿轮箱用铁素体球墨铸铁的开发[J]. 铸造技术,2018,39(12):2766-2768.

[9] 戴起勋主编. 金属材料学第二版 [M]. 北京: 化学工业出版社,2011.

[10] 邓军伟,李俊强,李会涛,等. 球墨铸铁感应淬火过热过烧缺陷分析[J]. 制造技术与材料《汽车与配件》,2013(10):30-33.

[11] 刘宗昌,冯佃臣主编. 热处理工艺学[M].北京:冶金工业出版社,2015.

[12] 张羿. 金属材料和零部件断裂形式和失效原因的分析与探讨——谈金属材料中晶界上碳化物的影响[C] // 湖北省机械工程学会热处理专业委员会.湖北省第九届热处理年会论文集.湖北:2004:93-96.

技术资料邮购

《铸造抗磨产品实用生产技术集》

《铸造抗磨产品实用生产技术集》本书由李德臣教授级高工编著。 共8章: 1、关于锰钢生产技术; 2、球墨铸铁与蠕墨铸铁生产技术; 3、抗磨产品生产技术; 4、锤头生产技术; 5、消失模、V法生产技术; 6、典型铸件的生产技术; 7、还原罐生产技术; 8、关于企业管理。全书22万字。特快专递邮购价: 98元。

邮购咨询: 李巧凤　　电话/传真: 029-83222071