

• 今日铸造 Today Foundry •  
DOI: 10.16410/j.issn1000-8365.2020.12.021

# 合金元素对 K4169 高温合金析出相影响研究现状

周丽<sup>1</sup>, 逯红果<sup>1,2</sup>, 马中钢<sup>2</sup>, 赵国才<sup>2</sup>, 李化坤<sup>2</sup>, 伊洁<sup>2</sup>, 王雷<sup>2</sup>, 刘成红<sup>2</sup>, 殷凤仕<sup>3</sup>, 李道乾<sup>2</sup>

(1. 山东理工大学化学化工学院, 山东淄博 255049; 2. 山东瑞泰新材料科技有限公司, 山东淄博 256100; 3. 山东理工大学机械工程学院, 山东淄博 255049)

**摘要:** 综述分析了沉淀强化元素、固溶强化元素、微合金化元素及杂质元素对 K4169 高温合金中析出相的影响, 特别是对 MX 型碳化物、Laves 相和  $\delta$  相形状、大小和分布的影响, 并总结了 K4169 合金的最新研究进展。

**关键词:** K4169 高温合金; 合金元素; 析出相

中图分类号: TG132.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2020)12-1186-05

## Research Status of Effect of Alloying Elements on the Precipitation Phase of K4169 Superalloy

ZHOU Li<sup>1</sup>, LU Hongguo<sup>1,2</sup>, MA Zhonggang<sup>2</sup>, ZHAO Guocai<sup>2</sup>, LI Huakun<sup>2</sup>, YI Jie<sup>2</sup>, WANG Lei<sup>2</sup>,  
LIU Chenghong<sup>2</sup>, YIN Fengshi<sup>3</sup>, LI Daoqian<sup>2</sup>

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China; 2. Shandong Ruitai New Material Technology Co Ltd, Zibo 256100, China; 3. School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

**Abstract:** The effects of precipitation strengthening elements, solid solution strengthening elements, microalloying elements and impurity elements on the microstructure, especially on the morphology and distribution of MX-type carbide, Laves phase and  $\delta$  phase in K4169 superalloy are reviewed in this paper. The current research results of the K4169 superalloy are also summarized.

**Key words:** K4169 superalloy; alloying elements; precipitates

K4169 合金是以体心四方  $\gamma''$  和面心立方  $\gamma'$  为沉淀强化相的铸造镍基高温合金, 其成分与 IN718 合金类似, 在 -253~700 °C 具有良好的综合性能<sup>[1,2]</sup>, 主要应用于 650 °C 以下航空发动机用叶轮、导向环、扩压器、机匣和其它结构件<sup>[3]</sup>。K4169 合金成分范围见表 1。K4169 合金是一种为数不多的高 Nb 铸造镍基高温合金, Nb 元素偏析会使合金中析出 Laves 相; 同时, 还存在不同形状和分布的块状  $M_{23}C_6$  型和 MX 型碳化物<sup>[4,5]</sup>、硼化物和针状  $\delta$  相, 对合金力学性能影响较大<sup>[5-7]</sup>。近年来, 随着航空航天工业的发展, 对材料的使用性能提出更高的要求。

由于 K4169 合金应用广泛, 研究者对如何进一步改进 K4169 合金的性能作出了大量的研究, 主要是通过调整合金的成分<sup>[7-35]</sup>和控制有害元素含量<sup>[36-47]</sup>的方式来改善合金性能, 目前已取得较好的进展。本文作者通过对沉淀强化元素(铌、铝、钛)、固溶强化元素(碳、钴、钼、铬)以及微量元素(锆、铜、磷、硫、硅和硼)研究结果进行总结, 为后续研究工作提供理论支持。

## 1 固溶强化元素

### 1.1 C 和 N 对合金组织和性能的影响

C 在 K4169 合金中主要起到固溶强化作用<sup>[1]</sup>, 并与 Ti、Nb 形成 MX 型碳化物, 形状主要有颗粒状、长条状和汉字骨架状<sup>[4]</sup>。碳化物的形状和分布对合金性能的影响较大<sup>[1-4]</sup>。研究表明, 当碳化物呈颗粒状分布在晶界时, 颗粒状的碳化物会起到钉扎作用, 阻碍晶粒长大, 提高合金强度<sup>[5]</sup>; 长条状和汉字骨架状的碳化物有利于提高抗拉强度和屈服强度, 但是, 塑性和伸长率降低<sup>[6]</sup>。图 1 为不同 C 含量对 MC 碳化物形貌的影响。碳化物的形状随着 C 含量的变化而改变<sup>[7]</sup>。当碳含量由 0.05% 逐渐升高至

收稿日期: 2020-08-10

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); 淄博市“双十”项目(2019SS090001)

作者简介: 周丽(1967-), 女, 山东淄博人, 硕士, 高级实验师。研究方向: 金属材料中的析出相。电话: 15169226899, E-mail: zhouli@sdut.edu.cn.

通讯作者: 殷凤仕(1967-), 山东日照人, 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。电话: 13605331243, E-mail: fsyin@sdut.edu.cn

表1 K4169合金元素范围 w(%)  
Tab.1 The chemical composition of K4169 alloy

C	Cr	Ni	Mo	Al	Ti	Nb	B
0.02~0.08	18.00~21.00	51.00~55.00	2.85~3.30	0.40~0.70	0.75~1.15	4.80~5.50	≤0.006
Co	Cu	Si	P	S	O	N	Fe
≤1.00	≤0.20	≤0.35	≤0.015	≤0.001	≤0.002	≤0.002	余量

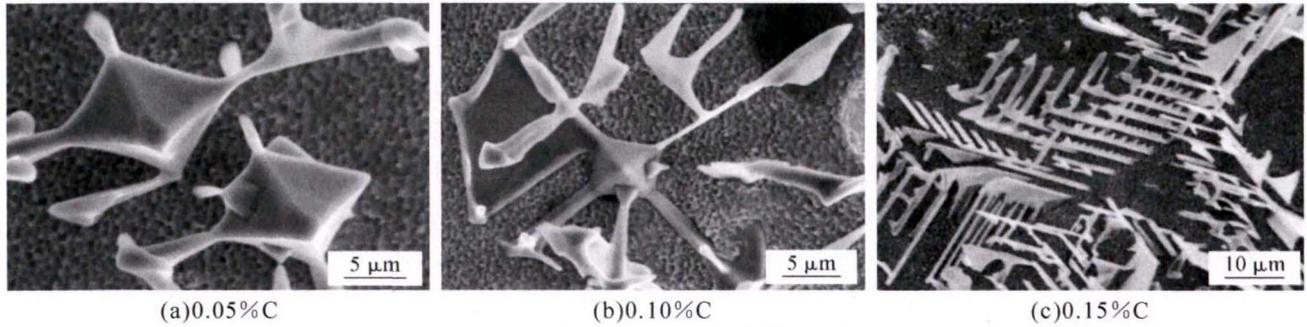


图1 碳含量对 MC 碳化物形貌的影响

Fig.1 Effect of carbon content on MC-type carbide morphology

0.18%时,合金中 MX 型碳化物形状由“颗粒状”变成“汉字状”<sup>[7]</sup>。

N 在 K4169 合金中属于有害元素,其主要来源于原材料中的金属铬、返回料表面氮化物<sup>[8-10]</sup>。在 K4169 合金含有 Ti 和 Nb 元素,氮元素主要以氮化钛、氮化铌形式存在。研究表明:合金凝固过程中,大尺寸氮化物能够阻塞枝晶间通道,降低合金液的流动性和补缩性,形成显微疏松<sup>[9,10]</sup>。针对 K4169 合金,氮化物不仅对显微疏松的形成有影响,还对析出相产生影响。图 2 为氮含量对针状 δ 相的影响。可以看出,在 K4169 高温合金中,当氮含量由 0.02% 增加到 2.00%时,针状 δ 相减少,室温拉伸强度显著提高<sup>[11]</sup>。但是,拉伸过程中,裂纹源易在氮化物附近形成,降低伸长率和断面收缩率。同时,N 对合金的凝固行为、凝固组织产生不利影响<sup>[12,13]</sup>。故 K4169 合金中氮的含量应控制在极低范围内。

### 1.2 Mo 和 Co 对合金性能影响

Mo 在 K4169 合金主要起固溶强化作用,对合金中 Laves 相和 δ 相数量和形状也存在影响<sup>[13,14]</sup>。研究表明:随着 Mo 含量的提高,枝晶间块状 Laves 相析出量增加,δ 相析出量减少;当 Mo 含量高于 5.50%

时,晶界上不再析出 δ 相<sup>[14]</sup>。同时,Mo 具有细化晶粒、增大基体晶格畸变和提高 Laves 相初始熔化温度的作用<sup>[13,15]</sup>。

Co 在 K4169 合金中主要起到固溶强化作用。但是,在 K4169 合金中,Co 能提高 Nb、Mo、Ti 在 Laves 相中的质量分数,促使 Nb 元素在 Laves 相富集,进一步促进 Laves 相的形成,导致枝晶干贫 Nb 元素,不利于提高合金的性能<sup>[16,17]</sup>。

## 2 沉淀强化元素

### 2.1 Nb 对合金性能影响

Nb 在 K4169 合金中,主要参与形成 Ni<sub>3</sub>Nb 相、MC-型碳化物和 Laves 相;热处理后,形成 γ'相和 δ 相<sup>[18-22]</sup>。研究表明:Nb 元素除了影响组织偏析外,还对合金的凝固温度有影响。随着 K4169 合金中 Nb 含量增加,合金的初熔点和终熔点均降低,凝固区间扩大,进一步加剧凝固过程中元素偏析<sup>[18,19]</sup>。但是,凝固区间的扩大,对合金中平衡析出相的种类影响不大,仅对析出温度和析出量产生影响<sup>[20]</sup>;具体表现为:随着 Nb 含量的增加,Laves 相析出量增多且析出温度升高;但是,MC 型碳化物的析出温度降低,起

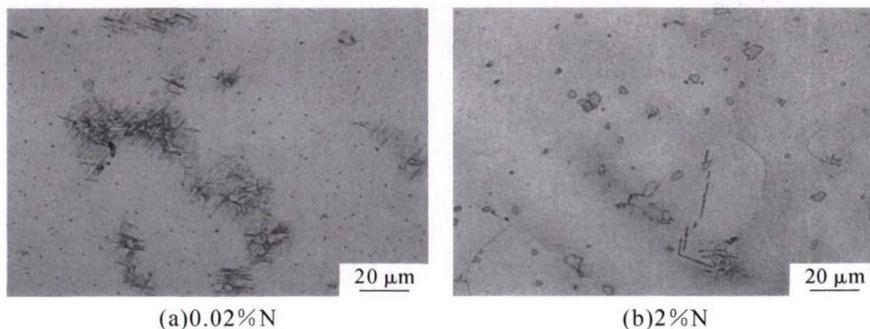


图2 氮含量对 δ 相影响

Fig.2 The effect of nitrogen content on δ phase

到抑制 MC 型碳化物析出的作用<sup>[21,22]</sup>。

## 2.2 Al 和 Ti 对合金性能影响

Al 在 K4169 合金中主要起到减轻组织偏析、促进二次枝晶生长、影响凝固区间和形成  $\gamma'$  ( $\text{Ni}_3\text{Al}$ ) 相等作用<sup>[23-26]</sup>。研究表明<sup>[23,24]</sup>: 在 K4169 高温合金中, Al 含量由 0.45% 升至 1.45% 时, 二次枝晶臂变得发达, Nb、Mo、Ti 和 Fe 元素偏析程度减轻, 并增加合金  $\gamma'$  和  $\gamma'$  相析出总量, 提高  $\gamma'$  相稳定性。但是, 随着 Al 含量升高, 析出相数量和形状发生变化; 当 Al 含量为 0.45% 时, 晶界主要析出针状  $\delta$  相; 当 Al 含量为 1.25% 时, 晶界析出块状 Laves 相和少量  $\text{M}_7\text{C}_3$  相及  $\sigma$  相; 当 Al 含量为 1.45% 时, 析出相类型未发生改变, 但是数量增多。对于合金的性能而言, 大量块状 Laves 相的析出恶化了合金的拉伸塑性, 但颗粒状或少量针状  $\delta$  相能够提高合金的塑性<sup>[25]</sup>。同时, Al 含量不仅影响析出相类型, 还影响合金凝固区间及固液相线。研究表明: 当 Al 含量由 7.5% 提高到 8.5% 时, 合金的液相线温度由 1 370 °C 降低到 1 360 °C, 固相线温度由 1 300 °C 降低到 1 280 °C<sup>[26]</sup>。

Ti 与 Al 共同作用, 较单独添加 Ti 与 Al 具有较好的强化效应。研究表明<sup>[27-29]</sup>: 提高 Al+Ti 含量和 Al/Ti 质量比, 能够增强  $\gamma'$  析出, 并且改变晶界内析出相种类和形状, 有利于提高合金的持久性能。图 3 为不同铝、钛含量的 K4169 合金中析出相 SEM 照片。从图 3 看出, 提高 Al/Ti 质量比能够改变析出相形貌和分布<sup>[27]</sup>: 低 Al/Ti 比情况下(图 a 与图 b), 热处理态组织形貌差别不大; 高 Al/Ti 比(图 c)情况下,  $\delta$  相形貌发生明显变化, 呈颗粒状分布于晶界。

## 3 微量元素

### 3.1 B 和 Zr 对合金组织和性能的影响

B 和 Zr 在 K4169 合金中主要存在于晶界, 具有改善晶界形态、抑制碳化物析出、改变晶界能, 减少合金缩松和提高持久性能及蠕变性能等作用<sup>[30-35]</sup>。

B 在 K4169 合金中要求  $\leq 0.006\%$ 。已知, B 在 K4169 合金中固溶度为 60 mg/kg, 当 B 含量超过其固溶度时, 形成低熔点硼化物, 影响钢液的流动性, 易形成缩松, 降低合金力学性能<sup>[30]</sup>。朱耀宵等人<sup>[31]</sup>研究表明: 高硼(0.1%, 质量分数)合金凝固过程中, 会在已凝固的固体周围形成一层高硼低熔点的液体金属, 类似蜘蛛网似的补缩通道, 起到补缩钢液的作用, 减少缩松; 而低硼(0.01%, 质量分数)与无硼合金凝固过程中, 枝晶干之间会形成孤立的液体池, 最终形成缩松。对于低硼合金, 随着合金中 B 含量的增加, 晶界处易于析出层状硼化物<sup>[32]</sup>, 并对合金相变温度、偏析行为、碳化物形状存在影响<sup>[33,34]</sup>。图 4 为不同 B 含量对碳化物形貌的影响<sup>[34]</sup>, 随着 B 含量的增加, 碳化物由长条状向块状发生转变<sup>[34]</sup>。

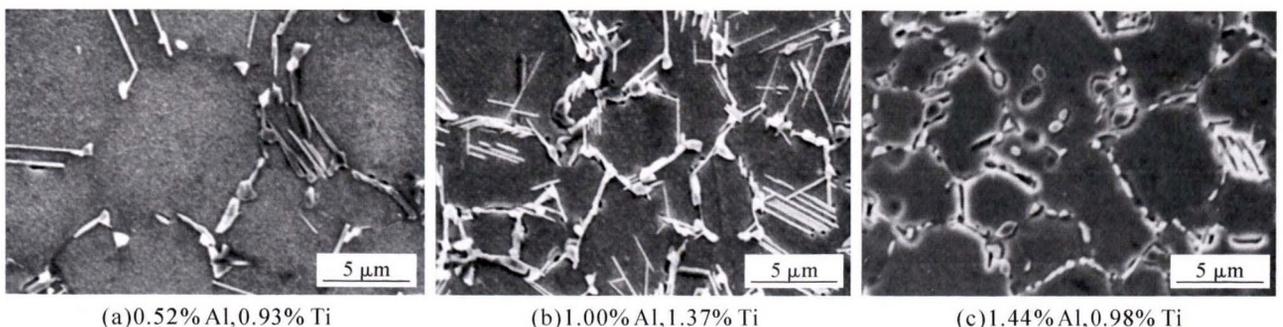
Zr 具有强烈的晶界偏析倾向。研究表明<sup>[35]</sup>: Zr 在 K4169 合金能促进 Nb、Mo、Ti 等元素的偏析, 使晶界析出的 Laves 相和碳化物数量增多; 随着 Zr 含量的增加, 错配度大的 Zr 原子将错配度小的 Nb、Mo 等原子从晶界驱逐到 MC 碳化物, 促使晶界碳化物析出量增多。

### 3.2 P 和 S 对合金组织和性能的影响

P 在高温合金中具有双重作用。P 偏聚于晶界增加晶界结合力, 提高晶界强度<sup>[36]</sup>; 同时, 适量 P 含量可以提高合金的持久性能和蠕变性能<sup>[37-40]</sup>。但 P 增加合金凝固偏析和有害相析出。对于 K4169 合金而言, P 含量控制得愈低愈好。

郭建亭等人<sup>[39]</sup>研究了 P 含量 K4169 合金组织和力学性能的影响。结果发现, 当 P 的质量分数不超过 0.008% 时, 对室温瞬时拉伸性能影响不大; 当 P 的质量分数大于 0.008% 时, 明显降低了合金的强度与塑性, 严重恶化持久寿命与持久塑性。

S 在 K4169 合金中偏析于相界或晶界, 弱化相界或晶界, 降低合金的韧性; 同时, 硫促进有害 Y 相的形成<sup>[41,42]</sup>。S 在 K4169 合金凝固过程中, 易于偏析到枝晶间, 促进 Nb、Ti、Mo 等元素偏析和 Laves 相



(a)0.52% Al,0.93% Ti

(b)1.00% Al,1.37% Ti

(c)1.44% Al,0.98% Ti

图 3 不同铝、钛含量的 K4169 合金中析出相 SEM 照片

Fig.3 The SEM images of the precipitates in K4169 superalloy with different aluminum and titanium contents

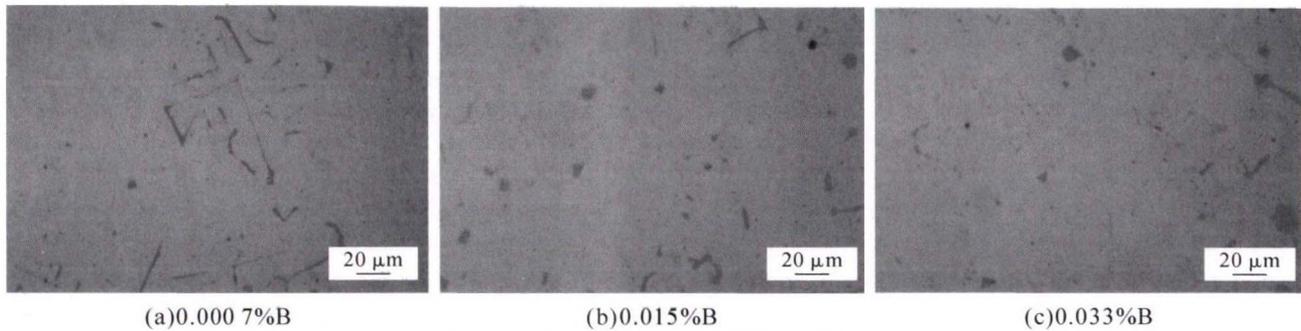


图4 不同 B 含量对碳化物形貌的影响

Fig.4 Morphology of the carbides in K4169 superalloy with various B contents

析出,降低合金的组织均匀性和力学性能<sup>[41,43]</sup>。

### 3.3 Cu 和 Si 对合金组织和性能的影响

Cu 在 K4169 合金中主要富集于枝晶臂上,促进 Nb、Mo、Fe 等元素的偏析。同时,降低 Laves 相初熔温度与合金的熔点,使晶界析出 Laves 相和碳化物数量增多<sup>[44]</sup>。

从图 5 可以看出,不同 Cu 含量的合金铸态组织均呈枝晶状;且随着 Cu 含量的增加, $\gamma$  枝晶臂粗化,枝晶间析出相明显增多,二次枝晶臂也有所长大。

Si 在 K4169 合金中是有害元素,主要偏析于枝晶间及晶界,改变界面组成和结构,促进有害相的析出,影响材料的性能<sup>[45]</sup>;同时,微量 Si 能改善合金的铸造性能、可焊性、耐磨性、抗氧化和抗腐蚀性<sup>[46]</sup>。

K4169 合金中,随着 Si 含量的提高,Laves 相数量增多且形状发生改变。当 K4169 合金中 Si 含量为 0.03%~0.23%(质量分数)时,Laves 相呈网状析出;当 Si 含量为 0.42%~0.65%时,Laves 相呈块状析出<sup>[45-48]</sup>。同时,Si 促进 Nb 元素的偏析富集,促进块状和颗粒状 NbC 析出,影响合金的持久性能和伸长率<sup>[47]</sup>。

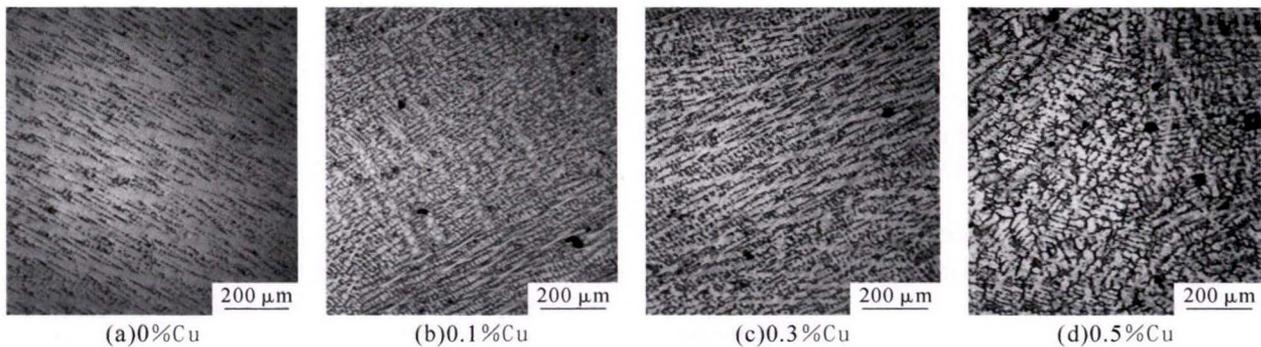


图5 不同 Cu 含量 K4169 合金的铸态组织

Fig.5 As cast microstructure of K4169 alloy with different Cu contents

## 4 结束语

目前,K4169 合金主要用于生产航空发动机机匣。由于机匣结构的复杂性,对 K4169 合金的力学性能要求较严格。K4169 合金中元素含量对析出相的类型和分布影响较大,进而影响合金的力学性能。通过分析 K4169 合金中主要元素 C、Nb、Al 和 Ti 以及杂质元素 O、N、P 和 S 等对 MX 型碳化物、Laves 相和  $\delta$  相大小、形状和分布的影响,可为后续优化 K4169 合金成分配比、提高合金性能方面提供支持和帮助。

### 参考文献:

[1] 余乾. 微量元素 C 和 Mg 对一种镍基高温合金组织和力学性能的影响[J]. 航空材料学报,2006,26(4): 11-13.

- [2] 范强, 刘海稳. 碳元素对 K536 合金拉伸和持久性能的影响[J]. 金属材料研究,2011,37(4):12-19
- [3] 田宁, 田素贵, 于慧臣, 等. 块状碳化物的形态演化及对镍基合金蠕变性能的影响 [J]. 中国有色金属学报,2019,29(7): 1427-1436.
- [4] 梁思祖, 廖景娉, 谢常欢, 等. 高温对 H21 合金中碳化物的影响 [J]. 机械工程材料,2002,26(12):42-45.
- [5] 张晓宇, 王忠堂, 程明, 等. 高温合金 IN690 碳化物析出及对组织的影响[J]. 沈阳理工大学学报, 2013, 32(4):64-69.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Holt R T, Wallace. Impurities and trace elements in nickel-base superalloys[J]. International Metals Reviews, 1976(3): 1-24.
- [9] 袁超, 郭建亭, 李谷松, 等. 铸造高温合金中氮的影响机理与控制[J]. 中国有色金属学报,2011,21(4):733-746.

- [10] 高杨,牛永吉,田建军,等. 铸造高温合金中氮的影响机理与控制研究[J]. 金属材料研究,2018,44(2):1-16.
- [11] 王颜臣,李华兵. 氮化物含量对 K4169 合金组织与性能的影响[J]. 现代冶金,2018,46(4),1-4.
- [12] 滕雨均,欧美琼,邢伟伟,等. 氮对 K4169 合金微观组织和力学性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程,2019,48(5):1506-1517.
- [13] 韩大尉,孙文儒,于连旭,等. 钼对 IN718 合金凝固过程中钨元素的偏析和均匀化的影响[J]. 热处理,2018,33(4):5-13.
- [14] 韩大尉,孙文儒,于连旭,等. Mo 含量对 IN718 合金组织和力学性能的影响[J]. 航空材料学报,2018,38(4):64-74.
- [15] 韩大尉,孙文儒,刘芳,等. Mo 对 IN718 合金长期时效组织及拉伸性能的影响[J]. 特钢技术,2018,24(2):4-11.
- [16] 李爱兰,汤鑫,盖其东,等. 热处理工艺对 K4169 合金微观组织的影响[J]. 航空材料学报,2006,26(3):311-312.
- [17] 李亚敏,刘洪军,刘杰,等. Co 对 K4169 合金凝固组织及元素偏析的影响[J]. 沈阳工业大学学报,2018,32(4):385-390.
- [18] 曹国鑫,张麦仓,董建新,等. Nb 含量对 GH4169 合金钢锭凝固及均匀化过程相演化规律的影响[J]. 稀有金属材料与工程,2014,43(1):103-108.
- [19] 张麦仓,郑磊,姚志浩,等. Nb 含量对 GH4169 合金钢锭偏析规律的影响[J]. 热加工工艺,2013,42(10):45-49.
- [20] 李亚敏. Co, Zr, Cu 在 K4169 合金中作用的研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2011.
- [21] 缪竹骏. IN718 系列高温合金凝固偏析及均匀化处理工艺研究[D]. 上海交通大学,2001. 06.
- [22] 董建新,张麦仓,曾燕屏,等. 含钨高温合金液相中钨偏聚行为[J]. 北京科技大学学报,2005,27(2):197-201.
- [23] 刘芳,孙文儒,杨树林,等. Al 对 IN718 合金拉伸性能及稳定性的影响[J]. 稀有金属材料与工程,2008,35(6):1046-1050.
- [24] 刘杰,李亚敏,刘洪军,等. Al 对 K4169 合金铸态组织和力学性能的影响[J]. 热加工工艺,2010,39(11):37-40.
- [25] 李相辉,张勇,谷怀鹏,等. K4169 合金热处理组织和性能研究[J]. 钢铁研究学报,2011,23(2):427-430.
- [26] 刘喜中,王晓峰. 铝对镍基高温合金凝固行为的影响[J]. 热加工工艺,2015,44(23):107-108.
- [27] 宫磊,付书红,董建新. 新型 718 合金的元素强化作用及组织稳定性研究[J]. 稀有金属材料与工程,2017,36(12):2179-2182.
- [28] 谢锡善,董建新,陈卫,等.  $\gamma'$  和  $\gamma''$  复合析出强化新型镍基高温合金的研究[J]. 金属热处理学报,1997,18(3):37-47.
- [29] 阳大云,张炫,金涛,等. 钽、钨和铪对镍基单晶高温合金持久性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程,2005,34(8):1295-1299.
- [30] 周伟,刘林,介子奇,等. 硼对 K4169 高温合金流动性及缩松的影响[J]. 稀有金属材料与工程,2014,42(12):3082-3088.
- [31] 朱耀宵,张顺南,徐乐英,等. 中国金属学会高温合金中微量元素的控制及其作用鉴定会,金属学报[J]. 1985,21(1):1.
- [32] WU B, LI L, WU J, et al. Effect of boron addition on the microstructure and stress-rupture properties of directionally solidified superalloys[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy Materials, 2014, 21(11): 1120-1126.
- [33] Qin H U, Liu L, Zhao X B, et al. Effect of carbon and boron additions on segregation behavior of directionally solidified nickel-base superalloys with rhenium [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(11):3257-3264.
- [34] 吴保平,吴剑涛,李俊涛,等. B 元素对 DZ424 定向凝固合金凝固特性及性能的影响[J]. 材料热处理学报,2018,39(9):36-43.
- [35] 李亚敏,陈毅,郝远,等. Zr 在 K4169 合金凝固过程中作用的研究[J]. 热加工工艺,2012,41(11):31-35.
- [36] 张鹏,杨凯,朱强,等. 微量元素对镍基高温合金微观组织与力学性能的影响[J]. 精密成形工程,2018,10(2):1-6.
- [37] 李娜,郭守仁,卢德忠,等. 微量元素磷、硼对直接时效合金 IN718 持久蠕变性能的影响[J]. 金属学报 2003,39(12):1255-1258.
- [38] 宋洪伟,郭守仁,卢德忠,等. 磷含量对 IN718 合金持久和蠕变性能的影响[J]. 中国有色金属学报,2000,10(3):301-306.
- [39] Guo J T, Zhou L Z. The effect of phosphorus, sulphur and silicon on segregation, solidification and mechanical properties of cast alloy 718[J]. Superalloys 1996, 1996:451-455.
- [40] Qin H U, Liu L, Zhao X B, et al. Effect of carbon and boron additions on segregation behavior of directionally solidified nickel-base superalloys with rhenium [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013,23(11): 3257-3264.
- [41] 杨松岗,王福会,朱圣龙,等. 硫偏聚对高温合金氧化性能影响的研究进展[J]. 腐蚀科学与防护技术,2000,12(6):350-353.
- [42] 周兰章,郭建亭. 微量硫对 K4169 合金组织与性能的影响[J]. 金属学报,1995,31(6):1-5.
- [43] 谢可伟. 硫对 K4169 高温合金组织性能的影响及其去除的冶金机理[D]. 东北大学,2017.
- [44] 李亚敏,胡伟,陈毅,等. Cu 对 K4169 合金凝固过程及凝固偏析的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2013,33(10),895-899.
- [45] 魏翔云,杨奇斌. Mn 和 Si 对一种 Fe-Ni 基高温合金持久缺口敏感性的影响[J]. 金属学报,1984,20: 261-263.
- [46] Douglass D L, Armijo J S. The effect of silicon and manganese on the oxidation mechanism of Ni-20 Cr [J]. Oxidat. Metals, 1970, 2: 207.
- [47] 李小亮,陈波,邢伟伟,等. Si 对铸造高温合金 K4169 的凝固行为和力学性能的影响[J]. 材料研究学报 2018,32(12):936-938.
- [48] Wang A C, Li YY, Fan C G, et al. Effect of P and Si (Mn) on the solidification segregation in an iron-based superalloy [J]. Scripta Metall. Mater, 1994, 31: 1695.

## 《铸件均衡凝固技术及应用实例》

《铸件均衡凝固技术及应用实例》由西安理工大学魏兵教授编著。共 8 章:1、铸铁件均衡凝固与有限补缩;2、铸铁件冒口补缩设计及应用;3、压边浇冒口系统;4、浇注系统大孔出流理论与设计;5、铸件均衡凝固工艺;6、铸钢、白口铸铁、铝、铜合金铸件的均衡凝固工艺;7、浇注系统当冒口补缩设计方法;8、铸件填充与补缩工艺定量设计实例。全书 320 页,特快专递邮购价 280 元。

邮购咨询:李巧凤 029-83222071,技术咨询:13609155628