

浇注工艺对 K416B 合金组织和持久性能的影响

韦 林¹ 曹 夕² 王振江² 孙士杰² 柴宏宇² 盛乃成² 侯桂臣² 康 涌¹ 王 标¹
(1.中国航发四川燃气涡轮研究院; 2.中国科学院金属研究所)

摘 要 通过调整浇注温度及冷却方式制备了 K416B 镍基高温合金,对其组织形貌进行了观察分析,测试了在 975 ℃、235 MPa 条件下的持久性能,研究了浇注温度和冷却方式对 K416B 合金组织及持久性能的影响。结果表明,提高冷却速率可以减小铸态合金的枝晶间距,改变共晶形貌,同时减小 γ' 相尺寸。采用埋砂冷却获得的组织主要是大尺寸 γ' 共晶,而单壳冷却时以 $(\gamma+\gamma')$ 共晶为主。较高的浇注温度可增大铸态合金的晶粒尺寸,同时减小枝晶间残余共晶尺寸及含量,而对 γ' 尺寸的影响不大。在 975 ℃、235 MPa 条件下的持久断裂机制主要为裂纹沿晶界处、共晶与基体的界面处以及枝晶间疏松区域萌生及扩展。其中,在 1 550 ℃ 浇注及单壳冷却的浇注工艺获得的晶粒尺寸较大,枝晶间共晶及疏松含量少且 γ' 相细小而均匀,是其具有较好持久性能的主要原因。

关键词 K416B 合金;浇注工艺;显微组织;持久性能

中图分类号 TG244⁺.1;TG146.1⁺5 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.08.012

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Pouring Process on Microstructure and Durability of K416B Alloy

Wei Lin¹, Cao Xi², Wang Zhenjiang², Sun Shijie², Chai Hongyu², Sheng Naicheng², Hou Guichen², Kang Yong¹, Wang Biao¹

(1.AECC Sichuan Gas Turbine Research Establishment;
2.Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences)

Abstract: The microstructure of K416B nickel-based superalloy prepared by adjusting the pouring temperature and cooling method were observed and analyzed, and the durability at 975 ℃ and 235 MPa were tested to investigate the influence of pouring temperature and cooling method on microstructure and durability of K416B alloy. The results indicate that with increasing in the cooling rate, the interdendritic distance of the as-cast alloy can be reduced, and the eutectic structure and the size of γ' are refined. The large-size eutectic γ' can be obtained in the as-cast structure of the alloy by sand cooling, which is mainly composed of $(\gamma+\gamma')$ eutectic by single shell cooling. A higher pouring temperature can increase the grain size of as-cast alloy and decrease the size and content of residual eutectic between dendrites, which has little effect on size of γ' . The persistent fracture mechanism of the alloy during stress rupture at 975 ℃ and 235 MPa is dominated by cracks initiation and propagation along the grain boundary, the interface between eutectic and matrix and the interdendritic loose area. Among them, grain size obtained by casting and single shell cooling at 1 550 ℃ is larger, and content of interdendritic eutectic and shrinkage is low with fine and uniform γ' phase, which is the main reasons for desirable durability.

Key Words: K416B Alloys, Pouring Process, Microstructure, Durability

高镍高温合金因其良好的抗氧化性以及优异的承温能力,广泛应用于航空发动机涡轮叶片等热端部件^[1~4]。其中 K416B 镍基合金具有良好的抗热腐蚀以及抗热疲劳性能,是目前承温能力较高的等轴晶高温合金之一^[5]。K416B 合金的高温性能与铸态组织中的共晶、碳化物以及 γ' 相形态、尺寸和含量密切相关,而浇注温度及冷却速率作为控制合金铸态组织的关键工艺

参数,可使合金在凝固过程中获得最优的过冷度,进而调控铸态组织晶粒度、枝晶间距、析出相形貌、分布以及凝固缺陷,保证合金性能^[6,7]。

浇注温度及冷却速率会影响凝固过程,改变合金铸态组织形貌及分布,进而影响合金的高温力学性能。本课题在不同浇注温度及冷却方式下制备了 K416B 镍基高温合金,测试其在 975 ℃、235 MPa 条件下的持久性

收稿日期:2022-03-28

第一作者简介:韦林,男,1989 年出生,工程师,成都(610000),E-mail: 18180230547@163.com

通信作者:盛乃成,男,1986 年出生,研究员,沈阳(110016),E-mail: ncsheng@imr.ac.cn

引用格式:韦林,曹夕,王振江,等. 浇注工艺对 K416B 合金组织和持久性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2022,42(8):979-984.
WEI L, CAO X, WANG Z J, et al. Effects of pouring process on microstructure and durability of K416B alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(8):979-984.

能,通过对试棒持久断裂前、后的组织形貌及断口形貌进行观察,研究了铸造工艺参数对合金组织性能的影响,为 K416B 合金试棒的浇注工艺及持久性能优化提供参考。

1 试验材料及方法

试验合金为 K416B 高温合金,其化学成分见表 1。采用 VIM-F25 型真空感应单室炉进行母合金熔铸,经高温精炼后分别降温至 1 440、1 480、1 520 和 1 550 ℃ 后浇注为标距为 25 mm,直径为 8 mm 的试棒。在凝固过程中分别采用两种冷却方式:单壳冷却(简称 DK)和埋砂冷却(简称 MS)。

表 1 K416B 合金的化学成分

Tab.1 Chemical compositions of K416B alloy %										
w_B										
C	Cr	Co	Al	W	Ti	Nb	Hf	Zr	B	Ni
0.11	5.0	7.0	5.9	16.0	1.0	1.8	1.1	0.01	0.01	余量

用线切割将不同状态的试棒沿纵向剖开,经机械研磨抛光腐蚀后观察试棒的晶粒尺寸,在试棒标距段取样观察合金的组织。利用扫描仪(CanoScan 8800F)及扫描电镜(SEM,FEI Quanta 450FEG)观察不同浇注温度下试棒的晶粒形貌、共晶组织、 α -W 及 γ' 相及其分布情况。采用 Image J 软件统计 γ' 相尺寸。腐蚀液采用 20 g 的 $CuSO_4 + 5\text{ mL 的 } H_2SO_4 + 100\text{ mL 的 } HCl + 80\text{ mL 的 } H_2O$ 溶液。将不同浇注温度的试棒加工成标准

持久试棒,利用 F-25 型持久试验机在 975 ℃、235 MPa 条件下测试持久性能;随后清洗持久断口,通过扫描电镜观察其断口形貌,将持久断裂后试棒纵剖、磨抛和腐蚀后观察断裂特征,分析 K416B 合金的断裂机制。

2 试验结果与分析

2.1 浇注工艺对晶粒分布的影响

图 1 为不同浇注温度及不同冷却方式下 K416B 合金的纵截面晶粒形貌。可以看出,当在 1 440 ℃ 浇注,单壳冷却时获得的主要为细小的柱状晶,局部位置有较为粗大的晶粒。随着浇注温度上升到 1 550 ℃,标距段内细小的柱状晶逐渐减少,晶粒尺寸增大,组织中柱状晶几乎全部消失。埋砂冷却获得的组织晶粒相对粗大,在 1 520 ℃ 浇注时标距段局部出现细小柱状晶,浇注温度为 1 550 ℃ 时,组织中多为尺寸较大且均匀的晶粒。浇注温度较低时,由于合金液与型壳的平衡温度过低,浇注后快速冷却形核,生长为细长的柱状晶。另一方面,相同浇注温度下,埋砂冷却的组织晶粒尺寸大于单壳的。合金的晶粒尺寸主要受浇注温度以及型壳温度的影响^[3,8]。试验中型壳预热温度都设定为 900 ℃,但是由于型壳介质不同,型壳从预热炉取出到真空炉的过程中会发生持续降温。单壳蓄热效率低于埋砂,因此浇注时单壳型壳的温度低于埋砂型壳。在实际工程过程中,尽管浇注温度相同,单壳系统的冷却速率高于埋砂

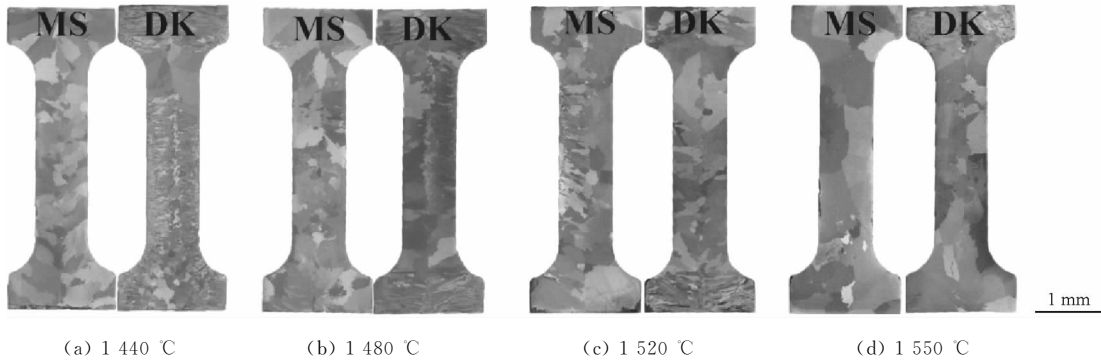


图 1 不同浇注工艺下 K416B 合金的晶粒宏观形貌
Fig.1 Macro morphologies of grains in the K416B alloy under various pouring process

系统的^[9]。

2.2 浇注工艺对显微组织的影响

图 2 为不同浇注工艺下 K416B 合金的铸态组织。可以看出,与埋砂工艺相比,单壳工艺获得的组织中枝晶间距更小。而同种冷却方式下,浇注温度越高,枝晶干粗化现象越明显,枝晶间距越大。在定向凝固过程中,增加冷却速率会细化铸态合金中的枝晶组织,同时降低一次枝晶间距^[10~12]。

埋砂获得的共晶组织主要为块状,而单壳工艺获得

的共晶组织多为花瓣状。单壳冷却的共晶含量整体高于埋砂冷却的,而相同冷却方式下,随着浇注温度提高,共晶组织比例总体呈减少趋势。由于埋砂的蓄热量高于单壳的,合金液凝固后埋砂的热量仍保持较长时间,此过程为埋砂的自热处理过程,在此过程中共晶受自热处理的均匀化影响而减少,而单壳蓄热量较少,因此,单壳冷却的共晶含量高于埋砂的。镍基高温合金以 $L \rightarrow \gamma \rightarrow MC \rightarrow$ 共晶 $\rightarrow \gamma'$ 顺序凝固^[13]。分析认为,单壳冷却的共晶种类主要为 $(\gamma + \gamma')$ 形貌的共晶,是由于冷却速

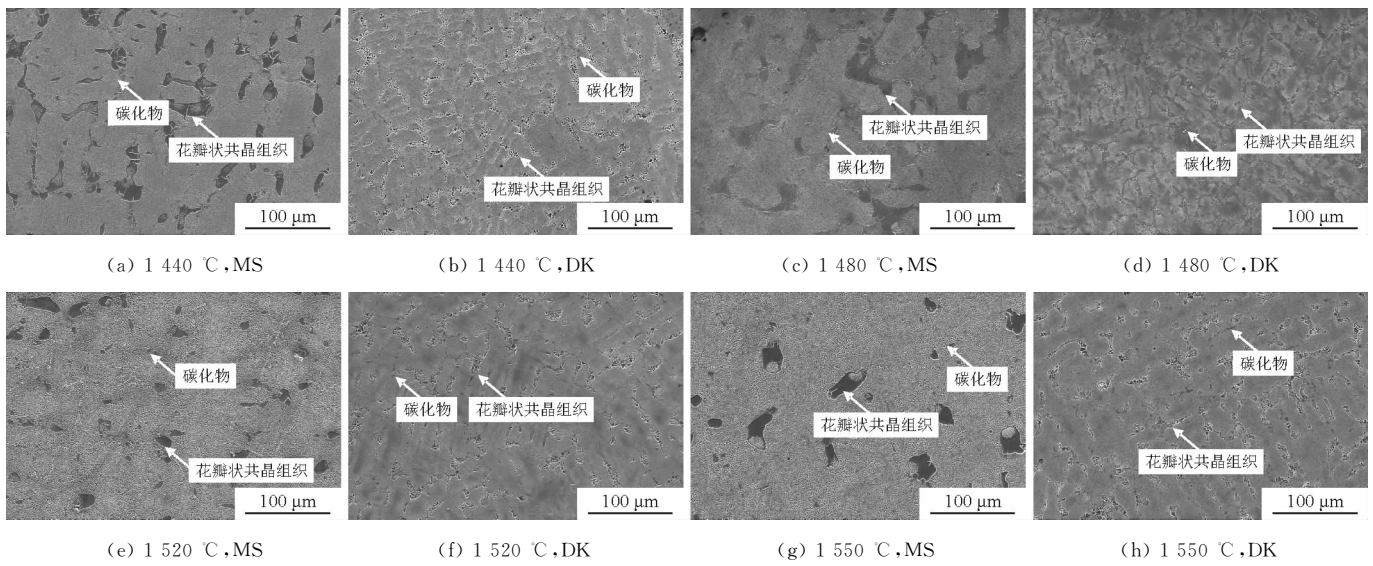


图 2 不同浇注工艺下 K416B 合金的显微组织

Fig.2 Morphologies of K416B alloy under different pouring processes

率快,温度降低至共晶点附近时,枝晶间仍存在较高体积分数的残余液相,液相中较高的 Al、Ti 浓度导致合金产生花瓣状形貌共晶,但埋砂冷却时花瓣状共晶中 γ 相发生退化,导致埋砂冷却后合金中仅为单一的 γ' 相。浇注温度的变化和冷却方式的改变对碳化物组织形貌影响较小,并且组织中未发现明显的 α -W 相。

图 3 为不同浇注工艺下 K416B 合金铸态组织中的

γ' 相形貌。表 2 为不同浇注工艺下获得的 γ' 相尺寸统计结果。可以看出,铸态下 γ' 相形状不规则,随着浇注温度提高, γ' 相尺寸呈逐渐增大趋势,这是由于高温合金凝固结束后,随着温度的降低基体中开始析出强化相 γ' 。当浇注温度较低时, γ' 相高温下生长时间较短,导致其尺寸较小,而随着浇注温度的提高, γ' 相逐渐变得粗大。

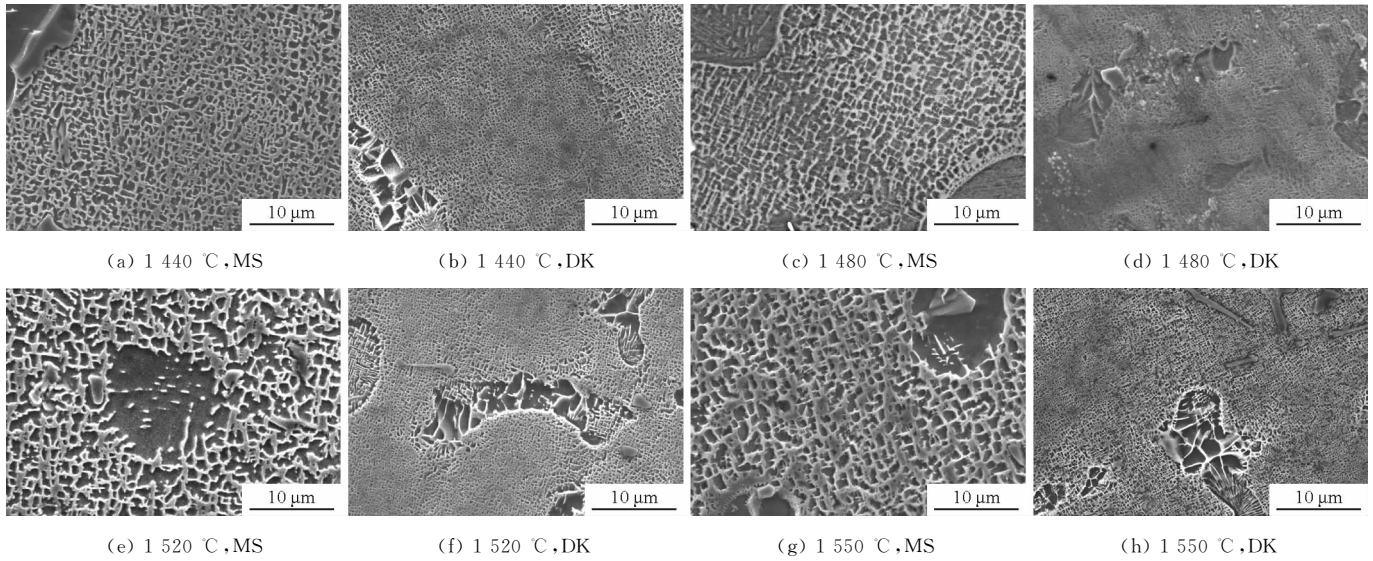


图 3 不同浇注工艺下 K416B 合金中 γ' 相形貌

Fig.3 Morphologies of γ' phase in K416B alloy under different pouring processes

表 2 不同浇注工艺下 K416B 合金中 γ' 相尺寸

Tab.2 Size of γ' phase in K416B alloy under different

pouring processes			
状态	尺寸/ μm	状态	尺寸/ μm
1440-MS	1.28	1440-DK	0.43
1480-MS	1.48	1480-DK	0.55
1520-MS	1.65	1520-DK	0.57
1550-MS	1.68	1550-DK	0.59

另一方面,在相同浇注温度下,埋砂冷却后合金 γ' 相尺寸较大,约为单壳冷却后合金 γ' 相尺寸的 3 倍。

铸态合金晶粒尺寸、枝晶间距、共晶含量和 γ' 相尺寸受到浇注温度及冷却速率的影响很大。固定浇注温度时,提高冷却速率可以减小晶粒尺寸、枝晶间距以及 γ' 相尺寸并使共晶趋于花瓣化生长;固定冷却速率,提高浇注温度,可使枝晶干粗化,减少枝晶间残余共晶含

量,适当增加 γ' 相尺寸。

2.3 浇注工艺对合金持久性能的影响

图 4 为不同浇注工艺下 K416B 合金在 975 ℃、235

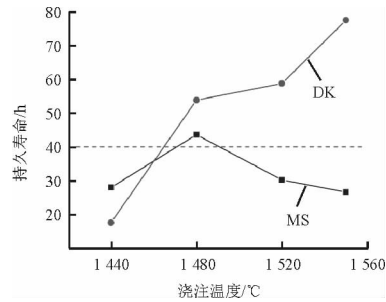
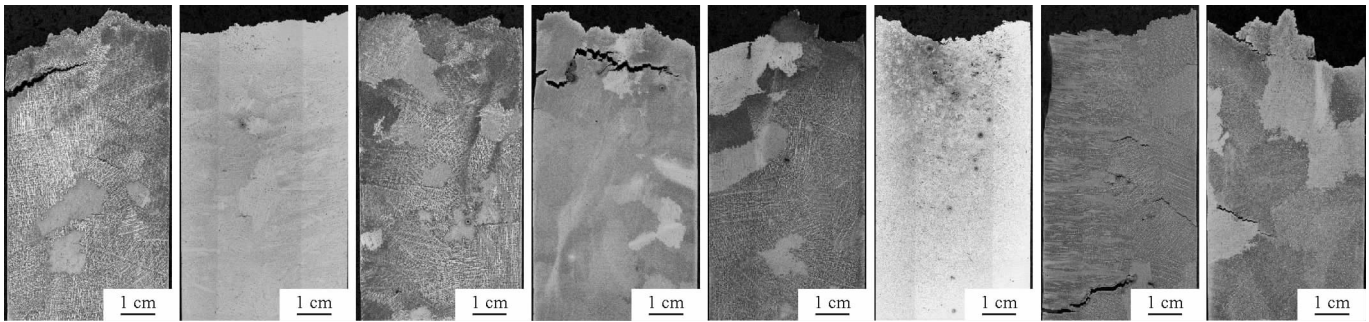


图 4 不同浇注工艺 K416B 合金在 975 ℃、235 MPa 条件下的持久寿命

Fig.4 Endurance life of K416B alloy under different pouring processes at 975 °C/235 MPa

MPa 条件下的持久寿命。可以看出,单壳冷却时,在 1 440、1 480、1 520、1 550 ℃下 K418B 合金的持久寿命分别为 17.6、53.8、58.7 和 77.4 h。随着浇注温度升高,持久寿命呈现逐步升高的趋势。在埋砂冷却的情况下,在 1 440、1 480、1 520、1 550 ℃下 K418B 合金的持久寿命分别为 28、43.6、30.2 和 26.6 h,持久寿命呈现先升高后降低的趋势。可以看出,采用较快的冷却速率(单壳冷却)及较高的浇注温度(1 550 ℃)有利于提高合金的持久性能。

采用 OM 观察持久断裂试棒纵剖面形貌见图 5。可以看到,晶界、枝晶间以及缩松周围是裂纹萌生及扩展的薄弱部位。裂纹尖端多止于与裂纹扩展方向呈一定角度的晶界,而且呈晶粒尺寸均匀的等轴晶组织时晶界阻碍裂纹扩展的能力更强。

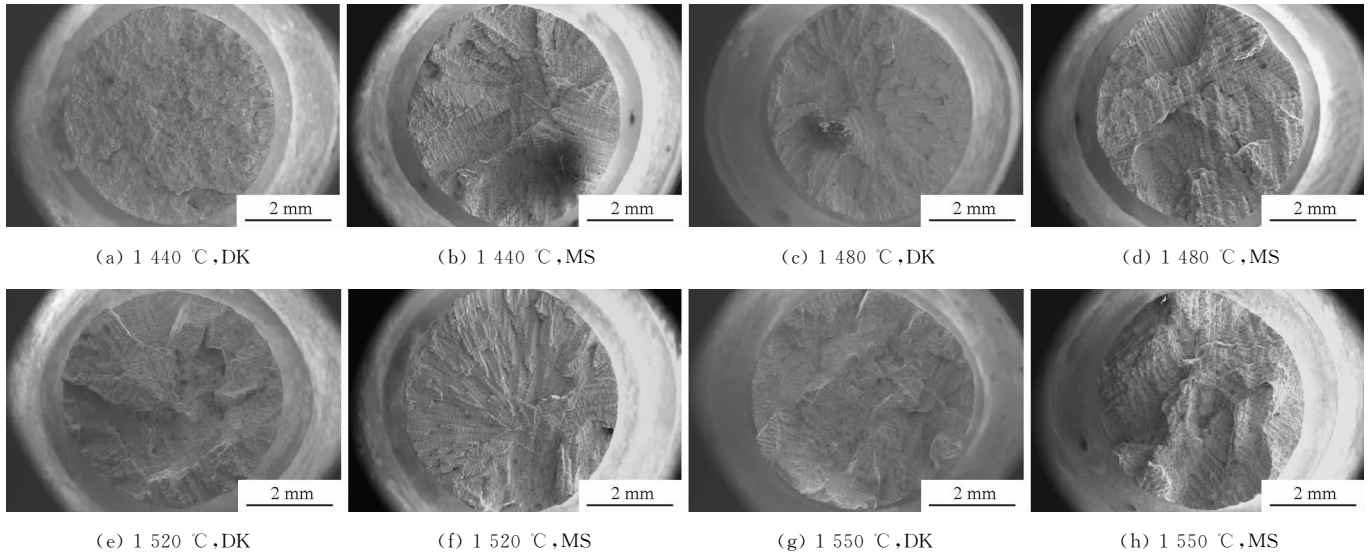


(a) 1 440 ℃,DK (b) 1 480 ℃,DK (c) 1 520 ℃,DK (d) 1 550 ℃,DK (e) 1 440 ℃,MS (f) 1 480 ℃,MS (g) 1 520 ℃,MS (h) 1 550 ℃,MS
图 5 不同浇注工艺 K416B 合金持久断口纵剖面形貌

Fig.5 Longitudinal profile of persistent fracture of K416B alloy under different pouring processes

图 6 和图 7 分别为不同浇注工艺下合金的持久断口低倍和高倍形貌。可以看出,不同工艺制备合金断口呈不规则特征,且沿枝晶解离的痕迹清晰可见。埋砂冷却获得的合金持久断口枝晶形貌更为清晰整齐,结合图 5 分析,其断裂方式基本以沿晶断裂为主。而低浇注温

度、单壳冷却获得合金的持久断口有大面积的显微缩松,是裂纹主要的萌生及扩展区域。随着浇注温度升高,显微缩松萌生裂纹的现象逐渐减弱。合金凝固过程中残余液相补缩不足是显微缩松产生的原因。另一方面,共晶与基体界面易产生裂纹并沿着共晶边缘发生扩



(a) 1 440 ℃,DK (b) 1 440 ℃,MS (c) 1 480 ℃,DK (d) 1 480 ℃,MS (e) 1 520 ℃,DK (f) 1 520 ℃,MS (g) 1 550 ℃,DK (h) 1 550 ℃,MS
图 6 不同浇注工艺下 K416B 合金持久断口低倍形貌

Fig.6 Persistent fracture morphologies of K416B alloy at low magnification under different pouring processes

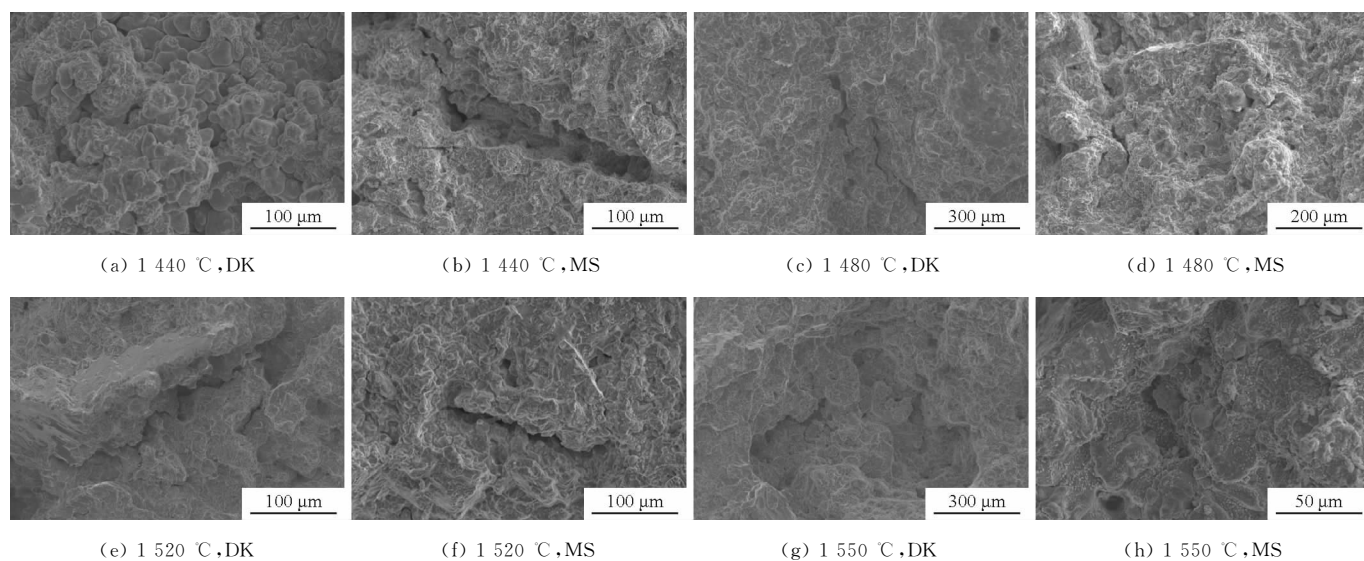


图 7 不同浇注工艺下 K416B 合金的高倍持久断口形貌

Fig.7 Persistent fracture morphologies of K416B alloy at high magnification under different pouring processes

展,其中大尺寸块状共晶相较于小尺寸花瓣状共晶边缘更容易导致裂纹萌生及扩展。

上述分析表明,较高的冷却速率可以降低合金的晶粒尺寸,增加晶界数量,并且细化枝晶,改变共晶形貌,减少枝晶间残余共晶含量,同时获得较细小规整的 γ' 相。较小的 γ' 相可以在后续的变形过程中更有效地阻碍晶界和位错的运动,提升合金强度^[14],进而有利于合金在 975 °C/235 MPa 下的持久性能;而提高浇注温度可以促进合金获得均匀的等轴晶,减少枝晶间残余共晶含量,有利于提升合金的持久性能。通过分析不同工艺制备的合金持久寿命可以推断出,本试验中冷却方式对合金 975 °C / 235 MPa 持久性能产生了更为显著的影响。

3 结 论

(1)较快的冷却速率可以减小 K416B 合金铸态合金的枝晶尺寸,改变共晶形貌,同时减小 γ' 相尺寸。采用埋砂冷却获得的合金铸态组织中的共晶以大尺寸 γ' 共晶为主,而单壳冷却时以 $(\gamma+\gamma')$ 共晶为主。

(2)较高的浇注温度可以增大 K416B 合金铸态合金的晶粒尺寸,同时减小枝晶间共晶尺寸及含量,而对 γ' 相尺寸的影响不大。

(3)K416B 合金在 975 °C、235 MPa 持久期间,晶界处、共晶与基体的界面处以及枝晶间疏松区域为裂纹的主要萌生及扩展位置。

(4)较快的冷却速率有助于细化 K416B 合金中的 γ' 相、减小晶粒尺寸、增加晶界,从而阻碍位错,强化合金性能;较高的浇注温度有助于减少合金枝晶间共晶及疏松等薄弱区域的分布,避免由局部显微裂纹连接产生

大尺寸宏观裂纹。因此,采用 1 550 °C 浇注及单壳冷却的浇注工艺是获得合金持久性能较好的主要原因。

参 考 文 献

- [1] YABANSU Y C, ISKAKOV A, KAPUSTINA A, et al. Application of Gaussian process regression models for capturing the evolution of microstructure statistics in aging of nickel-based superalloys [J]. Acta. Mater., 2019, 178(1): 45-58.
- [2] CHEN M K, XIE J, SHU D L, et al. Effect of long-term thermal exposures on tensile behaviors of K416B nickel-based superalloy [J]. Acta. Metall. Sin. (English Letters), 2020, 33(12): 1 699-1 708.
- [3] 朱玉平,盛乃成,谢君,等. 高钨镍基高温合金 K416B 富 W 相的析出行为[J]. 金属学报, 2020, 57(2): 215-223.
- [4] 谢君,于金江,孙晓峰,等. 温度对高 W 含量 K416B 镍基合金拉伸行为的影响[J]. 金属学报, 2015, 51(8): 943-950.
- [5] 谢君,于金江,孙晓峰,等. 高钨 K416B 铸造镍基合金高温蠕变期间碳化物演化行为[J]. 金属学报, 2015, 51(4): 458-464.
- [6] 杨金侠,孙元,金涛,等. 一种细晶铸造镍基高温合金的组织与力学性能[J]. 金属学报, 2014, 50(7): 839-844.
- [7] 张磊,祁峰,张伟红,等. 一种高 W 高温合金中 μ 相析出及其对拉伸性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2012, 41(11): 1 965-1 969.
- [8] 熊玉华,李培杰,曾大本,等. 铸造工艺参数和细化剂对 K4169 高温合金铸态组织的影响 I. 晶粒组织及晶粒细化机理[J]. 金属学报, 2002, 38(5): 529-533.
- [9] 吴凯西,刘宏莹,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): 52-56.
- [10] 顾林喻. 高温合金定向凝固枝晶间距与冷却速率的关系[J]. 西安工业学院学报, 1999, 19(2): 63-66.
- [11] LI G, CHEN B, LONG Z, et al. Effect of cooling rate on microstructure, microsegregation and mechanical properties of cast Ni-based superalloy K417G[J]. J. Mater. Sci. Technol., 2018, 34(5): 811-820.
- [12] 严春亮,王凤鸣,张庆军. 不同冷却速度下 45 钢枝晶生长过程的原位观察[J]. 金属功能材料, 2015, 22(5): 21-24.

交流磁场对 Mg-Gd-Y-Zr 合金组织和力学性能的影响

谢东原¹ 周 全¹ 陈乐平¹ 陈 舸²

(1.南昌航空大学航空制造工程学院; 2.上海航天精密机械研究所)

摘 要 利用 OM、SEM 及万能拉伸试验机等测试手段,探究了不同参数的连续交流磁场和间断交流磁场对 Mg-6Gd-3Y-0.6Zr 合金凝固组织和力学性能的影响。结果表明,连续和间断交流磁场均可细化 Mg-6Gd-3Y-0.6Zr 合金的晶粒尺寸并提高其力学性能;两种磁场处理合金的晶粒尺寸无明显差别,但间断交流磁场处理后合金的力学性能比连续交流磁场处理后的低。连续交流磁场处理条件下,在 200~600 ℃内,随着模具预热温度升高,合金晶粒尺寸逐渐减小;在 0~300 V 范围内,随着交流电压增加,合金晶粒尺寸先减小后增大,转折点为 250 V。间断交流磁场处理条件下,当放电频率在 1~10 Hz 内或占空比在 10%~40%内,随着放电频率或占空比提高,合金晶粒尺寸先减小后增大,转折点分别为 5 Hz 和 20%。

关键词 Mg-Gd-Y-Zr 合金;交流磁场;凝固组织;力学性能

中图分类号 TG146.22;TG113.25;TG391 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.08.013

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of AC Magnetic Field on Structure and Mechanical Properties of Mg-Gd-Y-Zr Alloy

Xie Dongyuan¹, Zhou Quan¹, Chen Leping¹, Chen Ge²

(1.School of Aeronautical Manufacturing Engineering,Nanchang Hangkong University;

2.Shanghai Spaceflight Precision Machinery Institute)

Abstract: Using OM, SEM, universal tensile testing machine and other testing methods, effects of continuous AC magnetic field and intermittent AC magnetic field with different parameters on solidification structure and mechanical properties of Mg-6Gd-3Y-0.6Zr alloy were explored. The results indicate that both continuous AC magnetic field and intermittent AC magnetic field can refine grains of Mg-6Gd-3Y-0.6Zr alloy and improve its mechanical properties effectively. There is no significant difference in grain size of the alloy under the two different magnetic field treatment conditions, however mechanical properties of the alloy with intermittent AC magnetic field treatment is lower than those of ones with continuous AC magnetic field treatment. Under the condition of continuous AC magnetic field, in the range of 200~600 ℃, with the increase of mold preheating temperature, grain size of the alloy is decreased gradually. In the range of 0~300 V, with the increase of AC voltage, grain size of the alloy is decreased at first and then increased, and the turning point is 250 V. Under the condition of intermittent AC magnetic field, when the discharge frequency is 1~10 Hz or the duty cycle is 10%~40%, as the discharge frequency or duty cycle increases, grain size of the alloy is decreased at first and then increased, where the turning point is 5 Hz or 20%, respectively.

Key Words: Mg-Gd-Y-Zr Alloy, AC Magnetic Field, Solidification Structure, Mechanical Properties

镁合金因具有较高的比强度、比刚度,良好的尺寸 稳定性及优良的导电、导热性而被广泛使用^[1]。在镁合

收稿日期:2021-11-14;修改稿收到日期:2022-01-20
基金项目:上海航天科技创新基金资助项目(SAST2019-130)
第一作者简介:谢东原,男,1996 年出生,硕士研究生,南昌(330063),E-mail:xdy080300@163.com
通信作者:周全,男,1976 年出生,教授,南昌(330063),E-mail:lgclzq@sina.com
引用格式:谢东原,周全,陈乐平,等. 交流磁场对 Mg-Gd-Y-Zr 合金组织和力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2022,42(8):984-989.
XIE D Y, ZHOU Q, CHEN L P, et al. Effects of AC magnetic field on structure and mechanical properties of Mg-Gd-Y-Zr alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(8):984-989.

[13] 刘巧沐,黄顺洲,刘芳,等. B 含量对 K417G 合金凝固过程中组织演变和力学性能的影响[J]. 金属学报, 2019, 55(6): 720-728.

[14] 杨伟,夏卫,徐志锋,等. 近平衡与亚快速凝固条件下 K424 高温合金的组织演化规律[J]. 稀有金属材料与工程, 2016, 45(1): 117-121.

(编辑:刘卫)