

铸造镍基高温合金 K417G 中高温 拉伸断裂机理研究

鲍俊¹, 玄伟东², 樊志明², 曹后帆², 李寒松¹, 王保军², 任忠鸣²

(1. 中国航发商用航空发动机有限责任公司, 上海 200241;

2. 上海大学省部共建高品质特殊钢冶金与制备国家重点实验室, 上海 200444)

摘要: 研究了高温合金K417G热等静压热处理后700 °C和950 °C时拉伸的断裂机制, 使用万能试验机进行中高温拉伸试验, 通过扫描电子显微镜对组织、断口形貌、断口纵截面进行观察。结果表明: 热处理后试样枝晶形貌明显, 枝晶干上 γ' 相相方度较高, 尺寸为0.4~0.5 μm , 且排列整齐, 枝晶间有尺寸为1.5~2.6 μm 的花瓣形 γ' 相析出。与700 °C时试样的拉伸性能相比, 950 °C时抗拉强度降低了46.3%, 而伸长率提高了200%, 这说明高温拉伸强度降低, 塑性增加。中温拉伸时, 枝晶间长条形碳化物是断裂的主要裂纹源及扩展通道。而高温拉伸时, 晶界处的碳化物、共晶成为裂纹源, 裂纹沿晶界扩展, 形成了沿晶断裂形貌。

关键词: 高温合金; K417G; 热等静压热处理; 高温拉伸; 断裂机理

作者简介:

鲍俊(1990-), 男, 工程师, 硕士生, 主要研究方向为高温合金铸造。E-mail: xuanbaojun@sina.cn

中图分类号: TG132.3⁺2

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2024)04-0476-05

基金项目:

国家自然科学基金(52274386, 92060104); 上海市经信委工业强基项目(GYQJ-2022-2-02); 航空科学基金重点项目(2022Z0470S6001); 上海市商用飞机发动机联合创新项目(No.AR966)。

收稿日期:

2023-12-25 收到初稿,

2024-01-23 收到修订稿。

高温合金作为关键材料在航空航天、能源、化工等领域扮演着不可或缺的角色^[1-2]。由于高温合金具有出色的中高温强度、抗氧化性能和耐腐蚀性^[3-4], 为满足极端工作条件下的要求提供了可靠的解决方案。其优异的力学性能和热稳定性使其成为高温结构材料和零部件的理想选择。近年来, 航空业发展迅速, 高温合金叶片服役温度不断提高, 因此对高温性能有了更高的要求^[5-6]。研究表明, 晶粒细化对镍基铸造高温合金K417G中低温拉伸性能有显著影响, 室温时, 合金的强度和塑性均随晶粒细化而提高, 700 °C时随着晶粒细化, 屈服强度和抗拉强度增加, 而塑性降低^[7]。Epishin等人^[8]证实, 热等静压可以显著提升高温合金中低温疲劳寿命, 但对高温疲劳寿命及蠕变强度没有影响。Baskov等人^[9]对EP741NP合金进行不同类型热加工后发现, 热等静压和热处理后, 试样的孔隙率降低了87.9%, 同时, 抗拉强度提升了34.3%。Du等人^[10]研究了铸态K417G高温合金的中低温拉伸和蠕变性能, 研究表明其拉伸试验温度从21 °C升高到700 °C, K417G合金的屈服强度和抗拉强度略有下降。

目前, 对于镍基多晶高温合金, 研究主要集中于中低温性能。但随着发动机推动比的提升, 发动机进出口温度提升, 对其高温性能也有较大的挑战。本文以K417G高温合金为研究对象, 通过热等静压和热处理后, 对其组织中 γ' 相、碳化物进行分析, 并在700 °C和950 °C下进行拉伸试验, 对其断口形貌和断口纵截面进行表征和分析, 阐明K417G合金的中高温拉伸断裂机制, 为K417G高温合金的工程应用奠定理论基础。

1 材料与方法

本研究使用的高温合金为K417G合金, 化学成分如表1所示。将铸态试棒置于热等静压炉中, 在氩气环境下进行热等静压处理, 在真空管式炉中将热等静压(1 185 °C/170 MPa/4 h)后的试样进行热处理, 热处理分两步进行, 分别是固溶处理(1 220 °C × 4 h/空冷)和时效处理(980 °C × 16 h/空冷)。使用线切割机在试棒中部切取10 mm × 10 mm × 10 mm的立方体试样, 用于组织分析, 对试样进行打磨、

表1 K417G合金化学成分
Table 1 Chemical composition of K417G alloy

项目	B	C	Al	Mo	V	Zr	Co	Cr	Ti	Ni
范围	0.011~0.024	0.11~0.22	4.70~5.70	2.40~3.50	0.55~0.90	0.045~0.09	8.90~11.0	8.40~9.50	4.00~4.70	余量
实测	0.017	0.17	5.23	3.04	0.75	0.063	10.18	8.92	4.3	余量

抛光后进行超声清洗,使用FEI-Quanta 450型扫描电镜对试样中 γ' 相、碳化物等组织形貌进行观察。根据ASTM-E21标准进行拉伸试样制备,在万能试验机上进行700 °C和950 °C的拉伸试验,通过扫描电镜对拉伸断口、断口纵截面进行分析,从而确定裂纹源及断裂机制。

2 结果与讨论

2.1 显微组织

热处理后试样的显微组织形貌如图1所示。图1a为枝晶形貌,枝晶间和枝晶干形貌不同,在枝晶间有条状、块状碳化物析出。选取枝晶干放大后如图1b所示,①区域为枝晶干,②区域为枝晶间,可以看出,两区域 γ' 相大小、形貌均有较大差别。枝晶干中 γ' 相为细小的立方体状,尺寸为0.4~0.5 μm ,且排列整齐,如图1c所示,而枝晶间的 γ' 相有大尺寸的花瓣形和小尺寸立方状两种类型,如图1d所示,花瓣形 γ' 相尺寸为1.5~2.6 μm ,而小尺寸立方状 γ' 相的尺寸与枝晶干相比也有所增加。这些 γ' 相作为高温合金中的主要强化相,对合金的强度、韧性和耐腐蚀性等有很大影响。

γ' 相为 Ni_3Al ,它是面心立方晶体结构L12,Al原子在立方体角上,Ni原子在端面的中心上,表现出强烈的化学有序度,其有序化温度接近于熔点1375 °C,正因如此,高温合金的高温性能得以保障。有学者表示^[11],镍基高温合金的强化相粗化后,材料的硬度与材料中 γ' 相的数量、形状和分布特征密切相关。Jiang等^[12]认为 γ' 相在如暴露后发生显著变化,高温合金的硬度随 γ' 相的体积分数的减小而降低。在塑性变形过程中, γ' 相通过抑制位错运动从而提高了材料的力学性能。

在试样组织中,晶界处和晶内都有碳化物形成,如图2所示,其中,富Cr的 M_{23}C_6 型点状碳化物主要分布在晶界处,而晶内则主要为富Ti、Mo的MC型长条状和链条状碳化物。在合金服役过程中,碳化物可以阻碍原子运动,能有效提高合金的硬度和强度,增加其耐磨性和耐腐蚀性,但是,由于其硬质特征,大颗粒长条状的碳化物也会降低合金的韧性,使其在受力时更容易在碳化物处萌生裂纹并扩展,发生脆性断裂。Koul等^[13]研究了IN 738 LC合金的蠕变行为,并指出沿着晶界分布的连续 M_{23}C_6 碳化物降低了合金的蠕变断裂

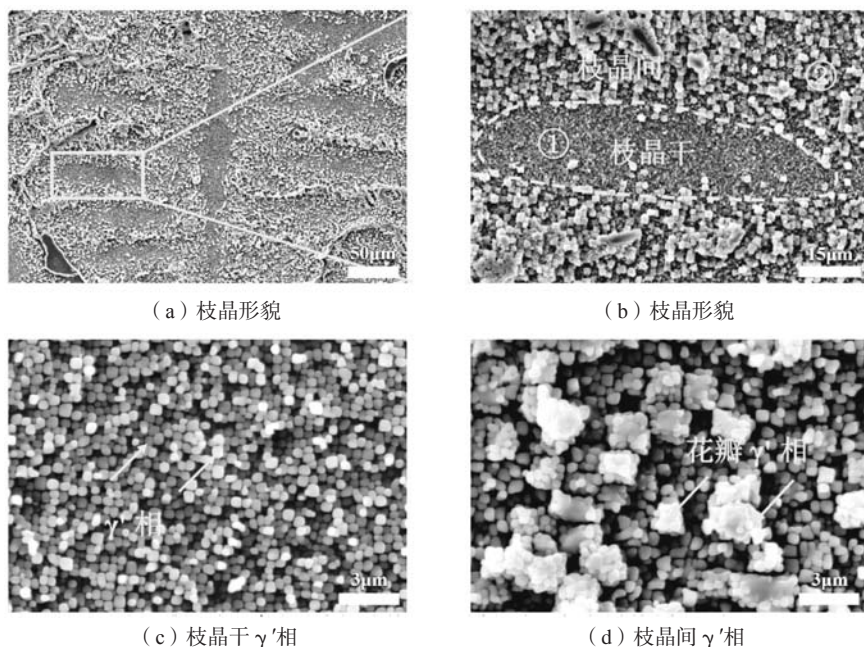


图1 枝晶中的 γ' 相形貌图

Fig. 1 Morphology of γ' phase in dendrites

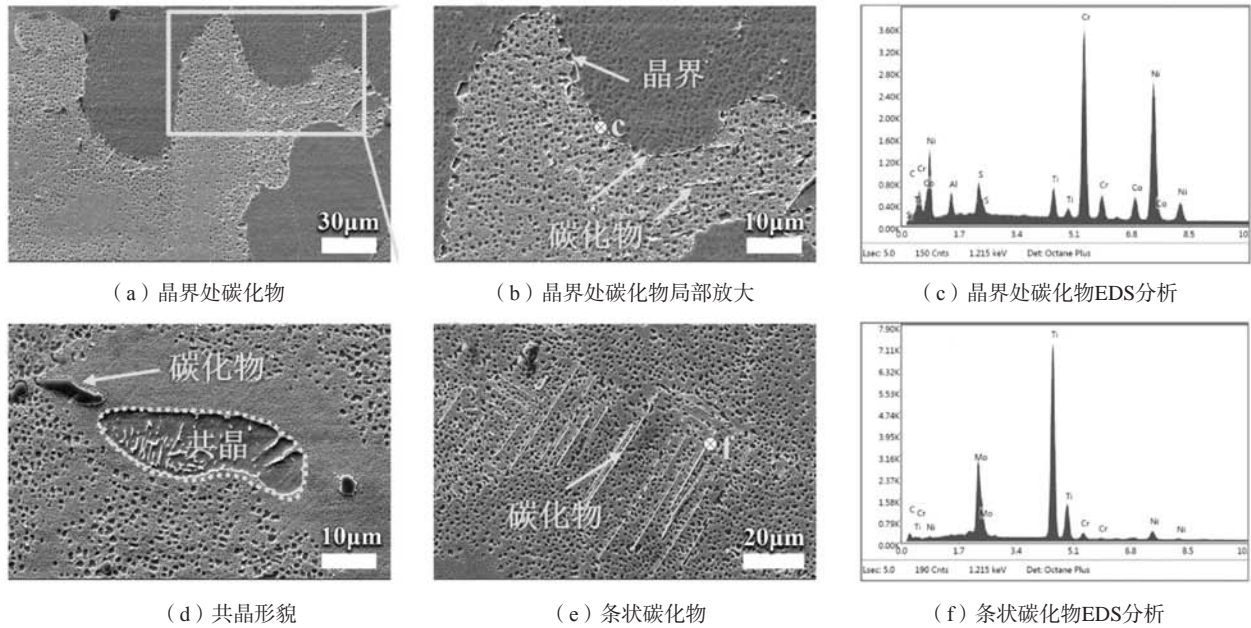


图2 试样的组织形貌

Fig. 2 The microstructure of the sample

寿命。离散的碳化物可通过阻碍晶界的滑动来改善蠕变塑性^[14]。

2.2 拉伸性能

使用万能试验机在700 °C和950 °C条件下进行拉伸试验，每个条件下测试两组平行试样，工程应力应变曲线如图3所示。从图中可以看出，两种温度下的抗拉强度分布在不同的数据段。700 °C拉伸时，平均抗拉强度为922 MPa，伸长率为7%；与700 °C时试样的拉伸性能相比，950 °C时抗拉强度降低了46.3%，而伸长率提高了200%，说明在950 °C拉伸时，强度降低，塑性增加，其断裂方式较700 °C条件时发生了明显的变化。

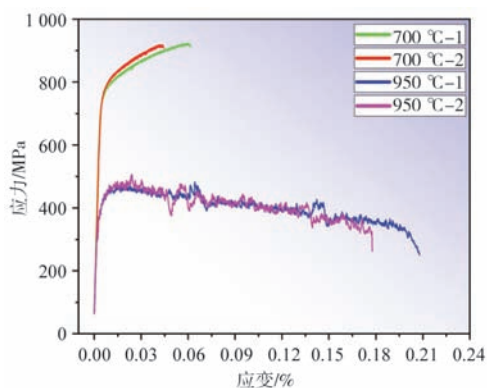


图3 700 °C和950 °C时拉伸的应力应变曲线

Fig. 3 The engineering stress-strain curves at 3 700 °C and 950 °C

2.3 断口形貌

两种不同温度下的拉伸断口形貌如图4所示，图4a-c为700 °C时的断口形貌，图4d-f为950 °C时的断口形貌。从图中可以看出，中、高温拉伸断裂方式明显不同。700 °C拉伸断口为灰白色，属于枝晶型断口形貌，且断口相对整齐，白色撕裂棱明显，为脆性断裂。而950 °C时，断口呈灰色，无明显撕裂棱，断口表面凹凸不平，观察到明显颈缩现象。在高温拉伸时，合金内部的位错运动会更加活跃，这会降低合金的内部应力，使得材料更容易发生塑性变形，从而提高了伸长率^[15]。对700 °C拉伸断口局部放大后发现，断口中有脆裂发生，且有面积较大的解理面，如图4b, c所示。这是由于碳化物与基体的结合性差，在外力作用下，裂纹从碳化物处萌生，并沿着碳化物进行扩展，形成了脆裂面。对950 °C拉伸断口局部放大后发现，脆裂面数量明显减少，且观察到有很多浅韧窝出现，说明拉伸温度提高后，塑性提升。

为进一步探究合金的不同温度拉伸断裂机制，将拉伸断口沿纵截面剖开，观察裂纹的起源及扩展通道，如图5所示。从图中可以看出，700 °C拉伸试样断口纵剖面上裂纹数量较少，主要集中在断口处，且断口平整。而950 °C时纵剖面上裂纹较多，集中于晶界处，断口呈“V”形，为典型的沿晶断裂。中温拉伸时，枝晶间长条形碳化物是断裂的主要裂纹源及扩展通道，如图5b, c所示，而高温拉伸时，晶界处的碳化

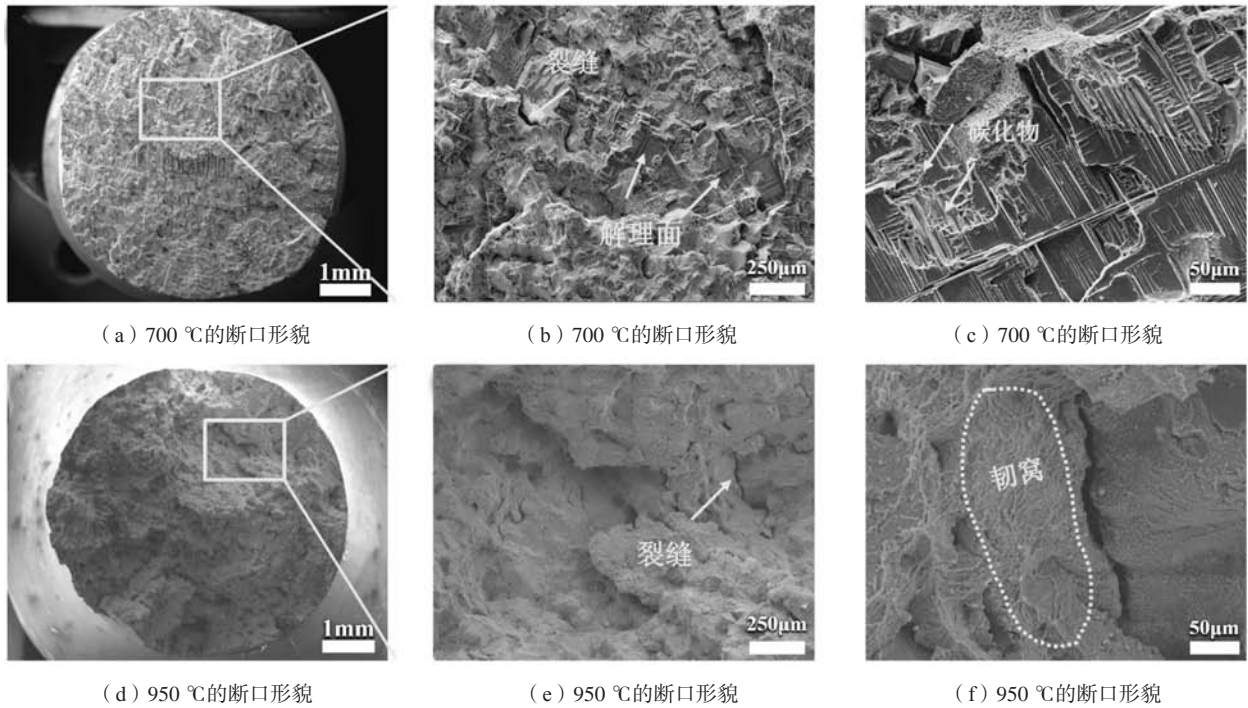


图4 700 °C和950 °C时拉伸的断口形貌

Fig. 4 Fracture morphology of tensile at 700 °C and 950 °C

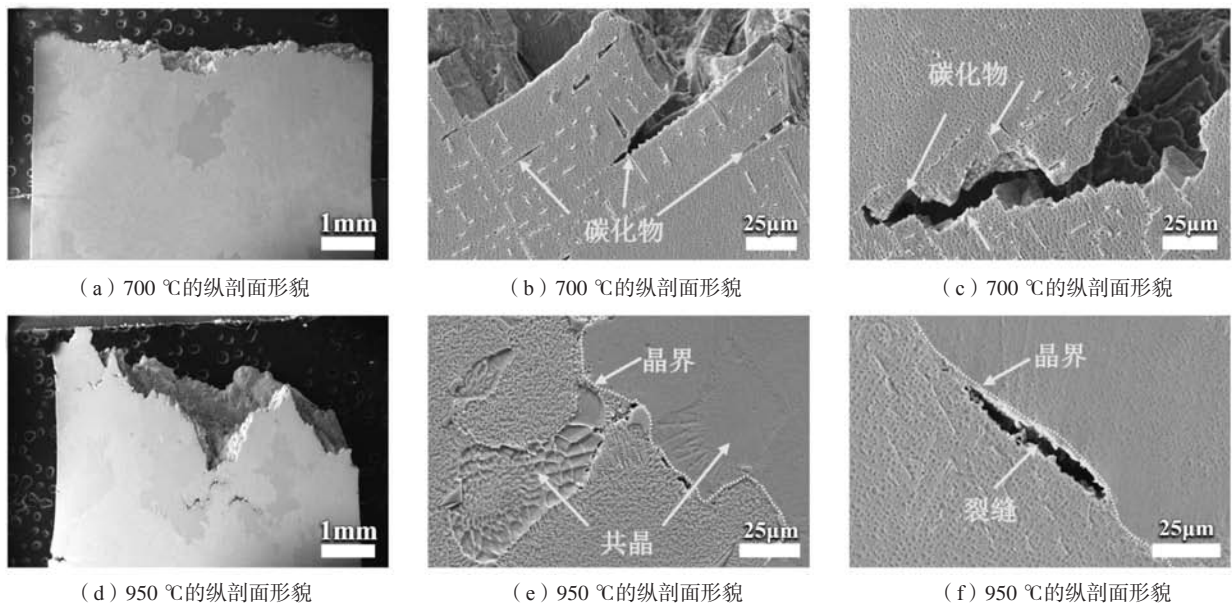


图5 700 °C和950 °C时拉伸的纵剖面形貌

Fig. 5 The morphology of longitudinal section at 700 °C and 950 °C

物、共晶成为裂纹源，如图5e、f所示，裂纹沿晶界扩展，形成了沿晶断裂形貌。

3 结论

(1) 热等静压热处理后，试样枝晶干中 γ' 相为细小的立方体状，尺寸为 $0.4\sim 0.5\ \mu\text{m}$ ，且排列整齐，枝晶间有尺寸为 $1.5\sim 2.6\ \mu\text{m}$ 的花瓣形 γ' 相析出。

(2) 700 °C拉伸时，抗拉强度为922 MPa，伸长率为7%，与700 °C时试样的拉伸性能相比，950 °C时抗拉强度降低了46.3%，而伸长率提高了200%。

(3) 中温拉伸时，枝晶间长条形碳化物是断裂的主要裂纹源及扩展通道，而高温拉伸时，晶界处的碳化物、共晶成为裂纹源，裂纹沿晶界扩展，形成了沿晶断裂形貌。

参考文献:

- [1] 熊艳才. 航空复杂构件精确成形技术基础研究 [J]. 航空制造技术, 2010 (2): 54-57.
- [2] 杜金辉, 吕旭东, 董建新, 等. 国内变形高温合金研制进展 [J]. 金属学报, 2019, 55 (9): 1115-1132.
- [3] REEDRC. The superalloys: fundamentals and applications [M]. Cambridge University Press, 2008.
- [4] 孙长波, 吴保平, 冯秋水, 等. B元素对某Ni₃Al基高温合金的微观组织和力学性能的影响研究 [J]. 铸造, 2023, 72 (1): 7-10.
- [5] 张燕, 李寒松, 鲍俊. 热处理对一种低铼二代单晶高温合金组织和持久性能的影响 [J]. 铸造, 2021, 70 (11): 1307-1312.
- [6] SALWANGK, SUBBARAOR, MONDALS. Comparison and selection of suitable materials applicable for gas turbine blades [J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 46: 8864-8870.
- [7] DU Beining, HU Ziyang, SHENG Liyuan, et al. Tensile, creep behavior and microstructure evolution of an as-cast Ni-based K417G polycrystalline superalloy [J]. Journal of materials science & technology, 2018, 34 (10): 1805-1816.
- [8] EPISHIN A I, LINK T, FEDELICH B, et al. Hot isostatic pressing of single-crystal nickel-base superalloys: mechanism of pore closure and effect on mechanical properties [J]. MATEC Web of Conferences, 2014, 14: 08003.
- [9] BASKOV F A, SENTRYURINA Z A, KAPLANSKII Y Y, et al. The influence of post heat treatments on the evolution of microstructure and mechanical properties of EP741NP nickel alloy produced by laser powder bed fusion [J]. Materials Science and Engineering A, 2021, 817: 141340.
- [10] DU Beining, YANG Jinxia, CUI Chuanyong, et al. Effects of grain refinement on the microstructure and tensile behavior of K417G superalloy [J]. Materials Science and Engineering A, 2015, 623: 59-67.
- [11] ZHANG Shunyong, ZHAO Jianfeng, LIANG Yanxiang, et al. Degradation and anisotropy characteristics of fracture toughness in Ni-based superalloys after phase coarsening [J]. Materials Science and Engineering A, 2024, 889: 145852.
- [12] LI Dongwei, LIU Jinxiang, SUN Yantao, et al. Microstructure and mechanical degradation of K403 Ni-based superalloy from ultra-long-term serviced turbine blade [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023, 957: 170378.
- [13] KOUL A K, CASTILLO R. Assessment of service induced microstructural damage and its rejuvenation in turbine blades [J]. Metallurgical Transactions A, 1988, 19: 2049-2066.
- [14] GAROSSHEN T J, MCCARTHY G P. Low temperature carbide precipitation in a nickel base superalloy [J]. Metallurgical Transactions A, 1985, 16: 1213-1223.
- [15] 江河, 董建新, 张麦仓, 等. 服役条件下镍基高温合金应力松弛微观机制 [J]. 金属学报, 2019, 55 (9): 1211-1220.

Study on Tensile Fracture Mechanism of Cast Nickel-Based Superalloy K417G at Medium-High Temperature

BAO Jun¹, XUAN Wei-dong², FAN Zhi-ming², CAO Hou-fan², LI Han-song¹, WANG Bao-jun², REN Zhong-ming²
 (1. AECC Commercial Aircraft Engine Cooperation Ltd., Shanghai 200241, China; 2.State Key Laboratory of Advanced Special Steel, Shanghai 200444, China)

Abstract:

The fracture mechanism of the K417G high-temperature alloy under tensile conditions at 700 °C and 950 °C after hot isostatic pressing heat treatment was studied. Tensile tests at elevated temperatures were conducted using a universal testing machine, and observations of microstructures, fracture surfaces, and longitudinal sections were carried out through scanning electron microscopy. The results reveal that the dendritic morphology of the samples after heat treatment is pronounced, with a high degree of cuboidal γ' phase on the dendrite branches, measuring 0.4-0.5 μm and arranged in an orderly fashion. Petal-shaped γ' phase with sizes ranging from 1.5-2.6 μm precipitates between the dendrites. Comparing the tensile properties of samples at 950 °C to those at 700 °C, the tensile strength decreases by 46.3%, while the elongation increases by 200%. This indicates a reduction in high-temperature tensile strength and an increase in plasticity. During moderate-temperature tensile testing, elongated carbides between the dendrites serve as the primary crack initiation and propagation paths. In contrast, during high-temperature tensile testing, carbides at grain boundaries and eutectic constituents act as crack initiation sources, with cracks propagating along grain boundaries, forming a transgranular fracture morphology.

Key words:

superalloy; K417G; hot isostatic pressing heat treatment; high-temperature tensile; fracture mechanism