

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2022.12.002

GH909 合金热盐腐蚀行为及力学性能衰减研究

淳道勇¹, 詹中伟^{2*}, 葛玉麟², 孙志华²

(1. 海装广州局贵阳军代室, 贵州 贵阳 550014;

2. 中国航发北京航空材料研究院 航空材料先进腐蚀与防护航空科技重点实验室, 北京 100095)

摘要: 在盐雾环境和高温工况下, 航空发动机的 GH909 合金等零件会发生严重的热盐腐蚀, 进而影响其服役性能。本文采用高温涂盐腐蚀实验, 研究 GH909 合金的热盐腐蚀行为, 采用腐蚀增重测试拟合了 GH909 合金的热盐腐蚀动力学; 采用扫描电镜等观察了 GH909 合金的腐蚀形貌; 采用拉伸测试和旋转弯曲疲劳测试检测 GH909 合金热盐腐蚀不同时间的力学性能, 并对疲劳断口进行分析。研究结果显示, GH909 合金热盐腐蚀过程中持续增重, 但增重速率逐渐降低; 腐蚀过程为均匀腐蚀, GH909 合金表面的腐蚀裂纹逐渐加宽加深, 并形成孔洞结构, 经过 100 h 后的腐蚀深度可达 40 μm 左右, 并有持续深入的趋势。热盐腐蚀对 GH909 合金的室温及 650 $^{\circ}\text{C}$ 高温拉伸性能影响不明显, 对高温旋转弯曲疲劳寿命有一定降低。

关键词: GH909 合金; 热盐腐蚀; 腐蚀动力学; 力学性能

中图分类号: TQ153.2 **文献标识码:** A

Hot Salt Corrosion Behavior and Mechanical Property Reduction of GH909 Alloy

CHUN Daoyong¹, ZHAN Zhongwei^{2*}, GE Yulin², SUN Zhihua²

(1. Guiyang Military Representative Office of Guangzhou Bureau of Naval Equipment Department of PLA Navy, Guiyang 550014, China; 2. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Advanced Corrosion and Protection for Aviation Material, AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

Abstract: Under combination of salty environment and high temperature, severe hot salt corrosion will significantly erode metallic parts of aero engine and weaken their mechanical property, such as GH909 alloy. Hot salt corrosion behavior of GH909 alloy was studied. The corrosion mass gains were measured and derived to simulate hot salt corrosion kinetics of GH909 alloy. The corrosion morphology was investigated by SEM. The tensile and rotating bending fatigue properties were tested at different corrosion time. The results indicate that corrosion mass gain continuously increases, with decreasing gain rate. A uniform corrosion morphology of GH909 alloy is observed during the hot salt corrosion test. By extending the corrosion time, the cracks on surface generally propagate both in width and depth. After 100 h of hot salt corrosion, the linked cracks turn to pore structure, with a 40 μm depth and deepening tendency. The tensile strength of GH909 alloy at room temperature and 650 $^{\circ}\text{C}$ is barely undermined by hot salt

收稿日期: 2022-06-11

修回日期: 2022-09-18

作者简介: 淳道勇 (1975—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为航空发动机及相关零部件研制开发, email: 847133795@qq.com

*通信作者: 詹中伟 (1982—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为航空材料先进表面处理技术研究, email: espz-zwei@163.com

corrosion. However, the rotating bending fatigue life of GH909 alloy remarkably declines.

Keywords: GH909 alloy; hot salt corrosion; corrosion kinetics; mechanical property

GH909 合金是一种 Fe-Ni-Co 基低膨胀高温合金,在 650 °C 下具有良好的强度、较低的膨胀系数,且弹性模量基本恒定,这使其非常适合制造航空发动机上需要精确控制间隙的零部件,如涡轮外环、压气机和封严环等,因此 GH909 合金在先进航空发动机上的应用非常广泛^[1-6]。然而 GH909 合金成分中 Cr 含量非常低,导致其在高温下有应力加速晶界氧化的倾向,在腐蚀介质中存在严重的腐蚀风险。当前我国航空装备的服役环境已由单一的内陆环境逐渐向海洋、极寒、高原等全域环境转变,其中高温、高湿、高盐雾的海洋环境对航空发动机零部件的抗腐蚀性能提出了苛刻的要求^[7-10]。处于发动机气流通道内的 GH909 等零件表面往往会沉积严重的盐类物质,其在发动机运行过程中会对金属基体产生严重的热盐腐蚀^[11-12]。

国内外对于 GH909 合金的研究主要集中在加工工艺方面,如热处理^[13-14]、焊接^[15-17]、喷丸强化^[18]等,但是对 GH909 合金抗腐蚀性能的研究相对较

少。韩光炜等^[19]人研究了海洋环境下不同低膨胀高温合金腐蚀抗力的对比,结果显示 GH907、GH909 和 GH929C 在常温模拟海洋盐雾环境下的耐腐蚀性较差,盐雾实验的沉积盐还会显著降低 GH909 在 650 °C 下的抗拉强度和持久寿命;但是该研究中的腐蚀仍然是常温腐蚀,尚无法模拟实际工作过程中的高温热盐腐蚀情况。本研究采用热盐腐蚀实验研究 GH909 合金的腐蚀行为,并分析了热盐腐蚀对 GH909 合金力学性能衰减的影响规律,包括拉伸性能和高温旋转弯曲疲劳性能。

1 实验部分

1.1 实验材料及规格

实验材料为 GH909 合金,化学成分详见表 1。热盐腐蚀实验的平板试样规格为 30 mm×10 mm×3 mm,拉伸试样规格如图 1 所示,高温旋转弯曲疲劳试样为单截面光滑轴向应力疲劳试样($K_t=1$),如图 2 所示。

表 1 GH909 合金化学成分

Tab.1 Composition of GH909 alloy

元素	C	Si	Ni	Co	Nb	Ti	Al
含量/(wt.%)	0.010	0.420	38.410	13.080	4.760	1.410	<0.100
元素	Mn	Cr	Cu	S	P	B	Fe
含量/(wt.%)	<0.200	<0.050	<0.100	0.004	<0.010	0.006	余量

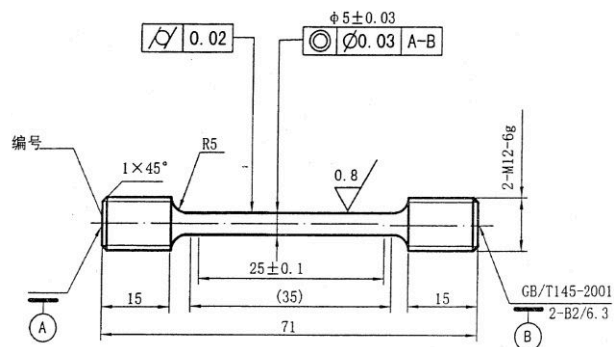


图 1 拉伸试样

Fig.1 Specimen for tensile test

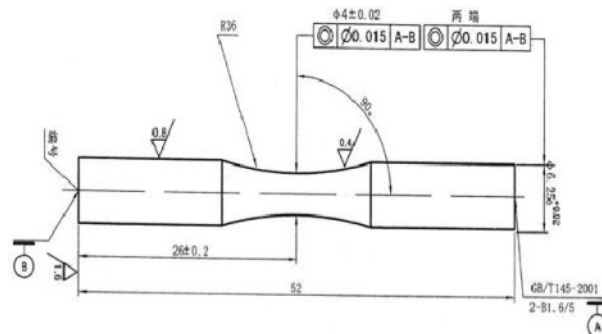


图 2 旋转弯曲疲劳试样

Fig.2 Specimen for rotating bending fatigue test

1.2 实验和表征

按照 HB 20401—2016《涂盐热腐蚀试验方法》的要求对 GH909 平板试样和力学试样进行热盐腐蚀,实验用盐由质量比 5%NaCl(化学纯)和 95%Na₂SO₄

(化学纯)组成,用去离子水配制成 100 g/L 溶液,充分雾化后均匀沉积在试样测试面,烘干后保证盐的沉积量为 30±5 g/m²。实验温度 550 °C,周期为 100 h,每 25 h 取出试样冷却,水洗去除表面盐,烘干

并静置 1 h 后,观察表面,并采用电子天平称重。实验结束后,取出平板试样和力学试棒。其中平板试样称重后,按照 HB 20401—2016 的碱洗方法去除腐蚀产物,碱洗溶液成分为 40%NaOH+60%Na₂CO₃,温度 550 °C,电流密度 50 A/dm²,时间 4 min。

采用 JEOL 公司的 JSM-7900F 型扫描电镜观察表面及断面的微观形貌。拉伸试棒分别按照 GB/T 228.1—2021《金属材料拉伸试验第 1 部分:室温试验方法》和 GB/T 4338—2006《金属材料高温拉伸试验方法》的规定检测室温和 650 °C 的拉伸性能,包括抗拉强度 R_m 和屈服强度 $R_{p0.2}$ 等;疲劳试棒按照 HB 5153—1996《金属高温旋转弯曲疲劳试验方法》检测 550 °C 下的旋转弯曲疲劳性能,频率 120 Hz,应力 550 MPa,实测试棒的疲劳寿命 N 。

2 实验结果与讨论

2.1 腐蚀动力学

GH909 合金在涂盐热腐蚀实验过程中,合金中的 Fe、Ni 等金属元素高温下与空气中的氧发生反应,生成氧化物,同时盐类物质在高温下活性增强,其中的 Cl、S 等元素会破坏氧化物层,使其变得疏松,为氧和盐类物质向内部渗透创造的通道。如此反复,GH909 合金的金属元素持续消耗,宏观上表现为热盐腐蚀。相关研究表明^[20],合金的高温热盐腐蚀动力学能够通过其腐蚀产物增重和时间的方程表示:

$$\Delta m/A = Kt^n + C \quad (1)$$

其中: Δm 为试样质量变化,单位 g; A 为试样表面积,单位 m²; K 为腐蚀速率常数; t 为热盐腐蚀实验,单位 h; n 为腐蚀动力学指数; C 为常数。对方程(1)进行对数处理,可以获得 $\log(\Delta m/A)$ 与 $\log t$ 之间的线性关系,如方程(2)所示。

$$\log(\Delta m/A) = n \cdot \log t + \log K \quad (2)$$

通过计算 GH909 平板试样不同热盐腐蚀时间的增重,对 $\log(\Delta m/A)$ 与 $\log t$ 进行线性拟合,结果显示相关系数 R^2 值约为 0.94。由此可以获得 GH909 合金在 550 °C 热盐腐蚀动力学曲线,如图 3 所示,其中腐蚀动力学常数 n 约为 0.24。可以发现,随着热盐腐蚀时间的延长,GH909 合金一直处于增重状态,表明其腐蚀产物的堆积逐渐增多。动力学曲线的斜率能够定性反映热盐腐蚀反应的速率,图 3 中曲线的斜率逐渐减小,显示热盐腐蚀反应速率逐渐

降低,这可能是由于腐蚀产物的堆积一定程度上对合金表面形成了保护,使得氧和盐类物质向内部扩散逐渐困难,降低了腐蚀反应速率。

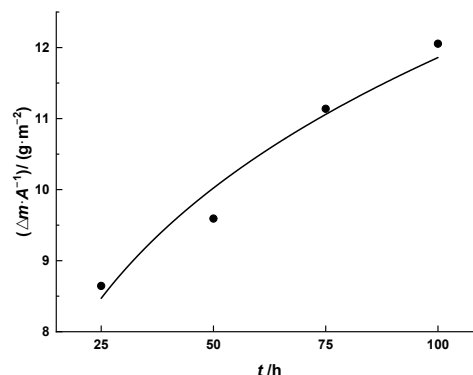


图 3 GH909 合金在 550 °C 的热盐腐蚀动力学曲线

Fig.3 GH909 alloy kinetic curve of hot salt corrosion at 550 °C

2.2 腐蚀微观形貌

图 4 所示为 GH909 合金 100 h 热盐腐蚀后表面的腐蚀产物微观形貌。腐蚀 100 h 后, GH909 合金表面杂乱堆积了大量的颗粒状腐蚀产物,其间密布裂纹,显示出腐蚀产物非常疏松。由于腐蚀产物一般为氧化物,导电性较差,导致微观形貌图片偏白。

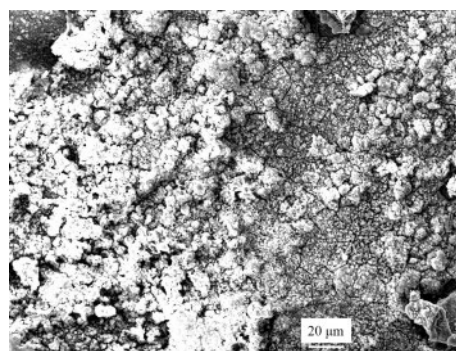


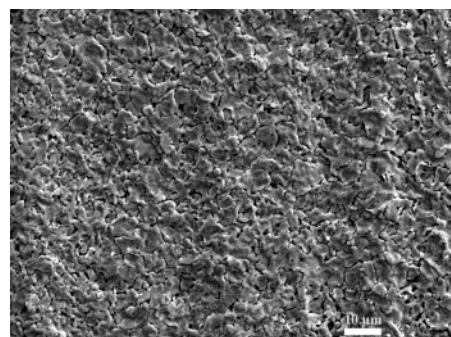
图 4 GH909 合金热盐腐蚀 100 h 后腐蚀产物微观形貌

Fig.4 Morphology of corrosion product of GH909 alloy after 100 h hot salt corrosion

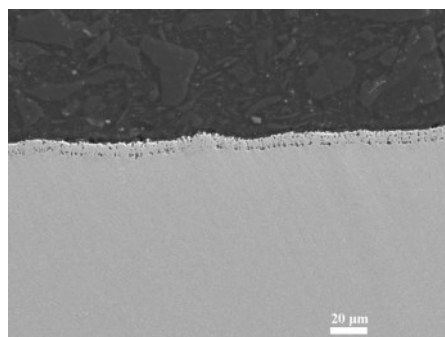
腐蚀产物的堆积掩盖了基体金属的腐蚀形貌,因此采用碱洗方法去除掉腐蚀产物,并观察 GH909 金属基体在不同实验时间的微观形貌变化,如图 5 所示。经过 25 h 热盐腐蚀后, GH909 合金表面密布大量细小裂纹,整体呈现支离破碎状,显示腐蚀向基体内部发展,如图 5(a) 所示;断面微观形貌表明

GH909 表面出现均匀的腐蚀裂纹,深度约为 $9\sim 10\ \mu\text{m}$,如图 5(b)所示。热盐腐蚀 50 h 后, GH909 合金表面裂纹显著加宽加长,局部相互连接形成孔洞,如图 5c 所示;其断面形貌显示裂纹进一步向基体内部均匀渗透,疏松程度明显增大,深度约 $18\sim 21\ \mu\text{m}$ 。当热盐腐蚀 100 h 结束时, GH909 合金表面非常疏松,整体已失去完整性,且不同区域出现较为明显的腐蚀程度差异,严重的区域内孔洞已相

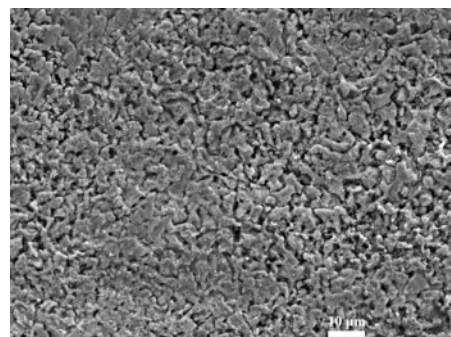
互互联,如图 5(e)所示;这也在其断面微观形貌得到的反映,腐蚀严重的区域,最外层金属可能由于太过疏松已发生脱落,腐蚀最深处可能已超过 $40\ \mu\text{m}$,同时腐蚀层与基体的界面处还能够观察到大量的细小裂纹,这表明腐蚀仍在向基体延伸。综合不同热盐腐蚀实验时间后的腐蚀形貌,可以发现 GH909 在 $550\ ^\circ\text{C}$ 下的热盐腐蚀宏观表现为均匀腐蚀,并且在整个实验周期内持续向基体内部扩展。



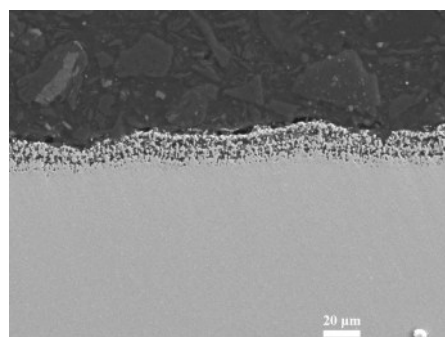
(a) 25 h 表面微观形貌



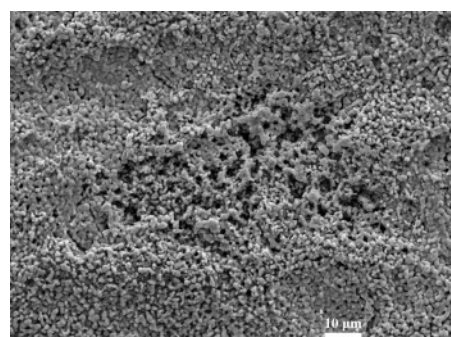
(b) 25 h 断面微观形貌



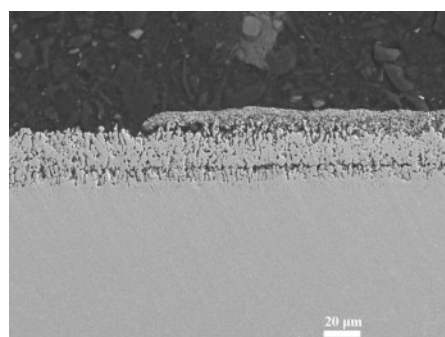
(c) 50 h 表面微观形貌



(d) 50 h 断面微观形貌



(e) 100 h 表面微观形貌



(f) 100 h 断面微观形貌

图5 不同时间热盐腐蚀试样碱洗后表面和断面微观形貌

Fig.5 Surface and cross-section morphology of GH909 alloy after caustic wash at different time of hot salt corrosion

2.3 拉伸性能影响

图 5 所示的腐蚀在 GH909 表面造成大量缺陷,并且向基体内部延伸,甚至会造成零件尺寸的变化,从而显著影响拉伸性能。图 6 所示为 GH909 合金经过热盐腐蚀不同时间后的拉伸性能变化,包括室温和 650 °C 拉伸。可以发现, GH909 合金在室温和 650 °C 的抗拉强度随着实验时间延长的变化并不明显,显示热盐腐蚀对抗拉强度的影响有限。经过 50 h 热盐腐蚀后,室温抗拉强度几乎未下降,650 °C 下抗拉强度仅降低约 2.0%;而 100 h 后,室温抗拉强度仅降低约 0.8%,650 °C 下抗拉强度下降约 3.5%。

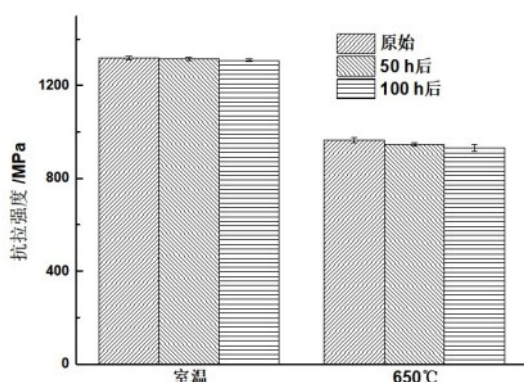


图 6 GH909 合金室温和 650 °C 抗拉强度随热盐腐蚀时间的衰减

Fig.6 Tensile strength reduction of GH909 alloy at room temperature and 650 °C with hot salt corrosion time

2.4 旋转弯曲疲劳性能影响

图 7 所示为 GH909 合金经过热盐腐蚀不同时间后高温(550 °C)旋转弯曲疲劳性能的变化。GH909 合金的初始旋转弯曲疲劳寿命 N 为 4.02×10^6 次;经过 50 h 的热盐腐蚀后,疲劳寿命 N 约为 1.48×10^6 次;经过 100 h 的热盐腐蚀后,疲劳寿命 N 约为 1.16×10^6 次。图 8 所示为经过 100 h 热盐腐蚀后的疲劳断口。低倍形貌可以发现疲劳裂纹源位于试样表面位置,如图 8(a) 中圆框所示。将断口试样倾斜 15°, 使圆框的裂纹源区及对应的表面形貌同时显示出来,如图 8(b) 所示中方框区域,从中可以明显观察到从表面向内部深入的腐蚀裂纹;同时箭头是指区域疑似为腐蚀产物脱落,这与图 5(f) 所示的腐蚀断面形貌相吻合。其他经过 100 h 热盐腐蚀的疲劳试样进行断口分析,也发现了相似的情形。由此可判断,热盐腐蚀在

GH909 合金表面形成的腐蚀裂纹等缺陷成为其疲劳断裂的起源,从而降低了疲劳寿命。

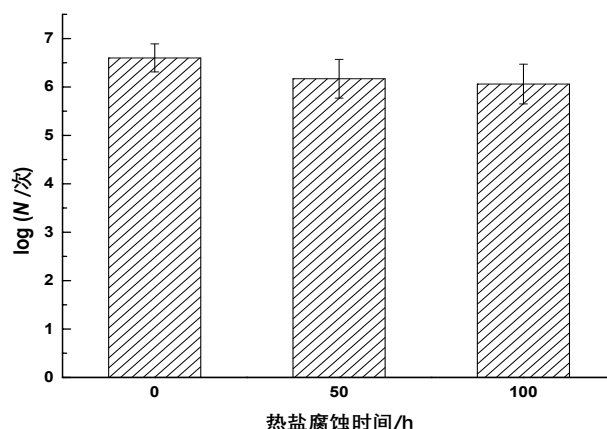
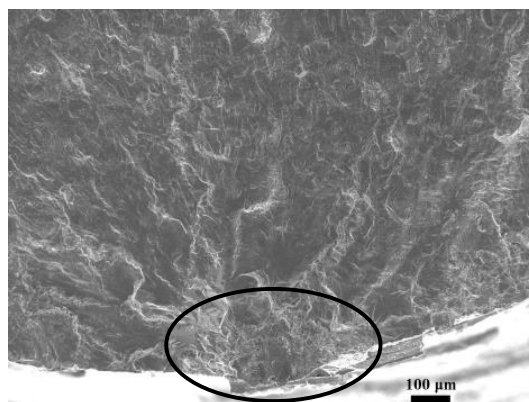
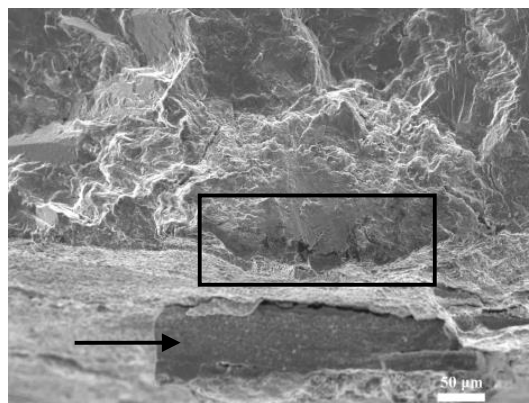


图 7 GH909 合金 550 °C 旋转弯曲疲劳寿命衰减

Fig.7 Rotating bending fatigue life reduction of GH909 alloy at 550 °C



(a) 裂纹源($\times 100$)



(b) 裂纹源($\times 300$, 倾斜)

图 8 GH909 合金 100 h 热盐腐蚀后旋弯疲劳断口

Fig.8 Rotating bending fatigue fracture of GH909 alloy after 100 h hot salt corrosion

3 结论

(1)GH909合金在热盐腐蚀过程中始终处于增重状态,但增重速率逐渐降低。

(2)GH909合金经过100 h热盐腐蚀后表面生成大量腐蚀产物,腐蚀裂纹深入基体达40 μm ,并有继续延伸的趋势。

(3)100 h热盐腐蚀对GH909合金拉伸性能影响不明显,但会降低其高温旋转弯曲疲劳性能,腐蚀裂纹等缺陷成为疲劳源。

参考文献

- [1] 高玉魁,赵宇新,殷源发.低膨胀高温合金GH909再结晶研究[J].金属热处理,2005,30(1):77-79.
- [2] 林政,张绍维,吴学仁,等.低膨胀高温合金膨胀系数的物理表征[J].航空材料学报,1999,19(01):1-5.
- [3] 邓波,陈淦生,龙正东,等.微量元素对低膨胀Fe-Ni基高温合金抗氧化性能的影响[J].金属学报,2000,36(2):155-158.
- [4] 陈琼,田世藩,张绍维.低膨胀高温合金GH907和GH909的铸态组织及其均匀化处理[J].航空材料学报,1993(1):13-21.
- [5] Yao Z H, Wu S C, Dong J X, et al. Constitutive behavior and processing maps of low-expansion GH909 superalloy[J]. International Journal of Minerals Metallurgy and Materials, 2017, 24(4): 432-443.
- [6] 黄宗峥,李坚,欧阳志高,等.GH909平板在模拟叶片冲击下失效模式分析[J].失效分析与预防,2022,17(2):81-85+95.
- [7] 史为民,李明,常海娟.舰载机环境分析及环境试验技术探讨[J].航空标准化与质量,2014(2):29-32.
- [8] 由宝财,滕佰秋,邢丕臣,等.海洋环境下航改燃气轮机腐蚀防护与控制[J].航空发动机,2010,36(4):41-44.
- [9] 马明昭,郑震山.海军航空发动机腐蚀防护与控制工程设计[J].航空维修与工程,2009,(4):53-55.
- [10] 苏少燕,廖国栋,吴国华.舰载飞机常用铝合金材料在西沙海洋环境试验研究[C].中国航空学会,中国航空学会可靠性工程专业委员会第十届学术年会论文集.昆明,2006:515-519.
- [11] 杨宏波,王源升,王轩,等.燃气轮机在海洋环境下的热腐蚀与防护技术研究进展[J].表面技术,2020,49(1):163-172.
- [12] 孙慧艳.GH907合金耐高温抗腐蚀表面防护涂层制备与性能研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015.
- [13] 赵宇新,张绍雄.GH909合金在700 $^{\circ}\text{C}$ 长期时效稳定性研究[J].航空材料学报,2006,26(3):56-59.
- [14] 赵宇新,张绍雄.GH909合金长期时效后组织和性能的研究[J].航空材料学报,2000,20(3):6-10.
- [15] Zhu Z W, Ma X Q, Jiang P, et al. Planar-cellular-dendritic transformation in the fusion zone of a GH909 superalloy weldment[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021 (10): 960-975.
- [16] Chen L, Wang C M, Zhang X, et al. Effect of parameters on microstructure and mechanical property of dissimilar joints between 316L stainless steel and GH909 alloy by laser welding[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021 (65): 60-69.
- [17] Liu T, Yan F, Liu S, et al. Microstructure and mechanical properties of laser-arc hybrid welding joint of GH909 alloy[J]. Optics & Laser Technology, 2016 (80): 56-66.
- [18] 高玉魁,殷源发,李向斌,等.GH909合金喷丸强化残余应力场的研究[J].材料工程,2002(4):40-42.
- [19] 韩光伟,邓波,杨玉军,等.海洋环境下不同低膨胀高温合金腐蚀抗力的比较研究[J].钢铁研究学报,2011(2):21-24.
- [20] 李铁藩.金属高温氧化和热腐蚀[M].北京:化学工业出版社,2003.