

激光定向能量沉积钴基合金热疲劳行为

杨旭东¹, 潘 攀¹, 焦自贤¹, 张新宇², 罗 暘¹, 丁稷萍¹

(1. 上海空间推进研究所, 上海 201112;

2. 上海交通大学, 上海 200240)

摘要 针对再生冷却推力室等零件在服役过程中经受循环热冲击, 容易发生热疲劳失效等问题, 采用机械球磨混粉和激光定向能量沉积相结合的方法, 在 Stellite 6 合金中添加铝和镍元素, 制备了新型钴基合金。在室温至 600 °C 进行自约束热疲劳测试, 并采用扫描电子显微镜、X 射线衍射和激光共聚焦显微镜等多种方式系统表征了测试前后钴基合金的显微组织演变和裂纹萌生及扩展过程。结果表明: 与商用 Stellite 6 钴基合金相比, 铝和镍元素的添加抑制了沉积态钴基合金中 ϵ -Co 的出现, 并且在热疲劳过程中也限制了 γ -Co 向 ϵ -Co 的转变。3Al 合金和 3Al5Ni 合金热疲劳裂纹出现的临界循环次数分别提高了 250 次和 550 次, 裂纹扩展速率降低了 7.5% 和 12.25%。新型钴基合金拥有更高的层错能, 组成相更稳定, 热疲劳过程中 γ/ϵ 相界面更少, 减少了热疲劳裂纹萌生和扩展, 从而大幅提升抗热疲劳性能。

关键词 激光定向能量沉积; 钴基合金; 热疲劳; 层错能

中图分类号 TG146.1 **文献标识码** A **文章编号** 1672-9374(2023)04-0106-09

Thermal fatigue behaviors of cobalt-based alloys manufactured by laser directed energy deposition

YANG Xudong¹, PAN Pan¹, JIAO Zixian¹, ZHANG Xinyu², LUO Yang¹, DING Jiping¹

(1. Shanghai Institute of Space Propulsion, Shanghai 201112, China;

2. Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract The regeneration cooling thrust chamber is prone to thermal fatigue failure owing to cyclic thermal shock during the service process. To solve the problem, novel cobalt-based alloys were prepared by adding Al and Ni into Stellite 6 alloy through mechanical ball milling and laser directed energy deposition. The test was carried out on the self-confined thermal fatigue equipment from room temperature to 600 °C. The evolutions of microstructures and cracks during the thermal fatigue test were systematically characterized through SEM, XRD and LSM. The results indicated that the additions of Al and Ni inhibit the formation of ϵ -Co in the deposited cobalt-based alloy compared with Stellite 6 alloy, meanwhile, the transformation of γ -Co to ϵ -Co is also restricted during the thermal fatigue test. The critical cycles of thermal fatigue crack of 3Al alloy and 3Al5Ni alloy increased by 250 and 550 cycles respectively. Moreover,

收稿日期: 2022-12-30; 修回日期: 2023-02-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(52101139); 上海市“科技创新行动计划”启明星培育(扬帆专项)项目(23YF1428100)

作者简介: 杨旭东(1992—), 男, 博士, 工程师, 研究领域为高温合金增材制造。

the crack propagation rates of the alloys were reduced by 7.5 % and 12.25 %. Novel cobalt-based alloys exhibit higher stacking fault energy which could stabilize phases. It also decreases the amounts of γ/ϵ phase boundaries that easily occur thermal fatigue cracks, which is beneficial for improving thermal fatigue resistance.

Key words laser directed energy deposition; cobalt-based alloy; thermal fatigue; stacking fault energy

0 引言

随着我国空间探索任务的不断发展,对姿轨控发动机长时间服役的要求也不断提高^[1]。空间姿轨控发动机目前选用一甲基肼作为燃料,在使用过程中推力室处于复杂严苛的热环境,为了保证长期可靠的工作,需要采用有效的热防护措施,常见的有再生冷却、液膜冷却和发汗冷却等^[2-4]。其中1903年由Tsiolkovsky提出的再生冷却方法是将燃料作为冷却剂,在燃烧前进入推力室侧壁流道进行换热,降低壁面温度的同时吸收能量进行预热,再进入燃烧室参与燃烧,具有能量利用率高和冷却性能优异等特点,广泛用于各类推进系统。再生冷却推力室在服役过程中由于两侧温度梯度较大,会承受循环热冲击,产生热疲劳裂纹导致失效^[5]。目前空间姿轨控发动机再生冷却推力室常采用镍基高温合金,强度较高且抗氧化能力较好,但是抗热疲劳性能较差,在长时间服役过程中容易出现热疲劳失效的问题。

钴基合金是一种高强度合金,一般通过Cr、Mo、Si和W等元素进行强化,并形成MC、 M_6C 、 $M_{23}C_6$ 和 M_7C_3 碳化物,随着温度的升高强度下降较慢,与镍基合金相比,具有更加优异的高温强度、耐腐蚀性能和抗热疲劳性能^[6-7]。但是目前国内钴基合金种类较少,仅有GH5188、GH159和DZ40M等几种牌号。国外的钴基合金发展更为成熟,拥有Stellite合金、Triballoy合金和哈氏合金等系列,在航空航天、生物医疗以及化工等领域广泛应用^[8]。针对钴基合金的热疲劳失效行为和内在机制,科研人员也进行了相关研究。Wen等认为热疲劳过程中应力来源较多,钴基合金中碳化物的状态会直接影响抗热疲劳性能^[9]。Wu等对激光定向能量沉积制备的Stellite 6合金进行热疲劳测试,结果表明裂纹倾向于沿着网状共晶相和 γ/ϵ 相界面进行扩展^[10]。

增材制造作为快速成形方式目前广泛用于制

备空间推进器的各类复杂零件,如燃烧室、流道分配器和头部等。激光定向能量沉积作为一种增材制造方法,是通过将三维模型转化为加工路径,采用激光热源熔化粉末或丝材,凝固后形成零件的技术。同时其加工过程也具有冷却速度快($\approx 10^6$ K/s)、温度梯度大、热应力较高等特点。同轴送粉式激光定向能量沉积方法成形精度较高,稳定性较好,而且使用粉末作为原材料,可通过调整粉末的配比来实现合金成分的优化设计。目前增材制造钴基合金的研究多针对现有牌号,难以满足空间发动机再生冷却推力室在温差较大、频率较高的冷热循环状态下的服役需求。本研究通过机械球磨混粉和激光定向能量沉积复合的方式制备了新型钴基合金,进行了自约束热疲劳测试,热疲劳裂纹萌生临界循环次数增加,裂纹扩展速率降低,提高了抗热疲劳性能。此外,本研究分析了铝和镍元素添加对钴基合金显微组织和裂纹行为的影响,阐明了钴基合金热疲劳的失效机制和强化方法,为钴基合金再生冷却推力室的制造和应用提供可靠的试验数据和理论支持。

1 试验方法

试验采用激光定向能量沉积方法,通过同轴送粉方式在AISI H13钢基板上经激光熔化制备出钴基合金,双层沉积路径如图1(a)所示,工艺参数为激光功率800 W,扫描速度5 mm/s,送粉速率7 g/min,气体流量12 L/min,离焦量3.5 mm。粉末为从中航迈特购买的Stellite 6钴基合金粉末[见图1(b)]、99.9%的纯铝和纯镍粉末,通过湿法球磨的方式制备出新型钴基合金粉末,机械球磨参数为:球料比1:6,转速100 r/min,时间5 h。采用氧化锆磨球,酒精作为分散系,并充入氩气进行保护,防止在球磨过程中粉末破碎或氧化。粉末各元素的质量分数如表1所示,其中3Al粉末是在Stellite 6粉末中添加质量分数为3%的铝,3Al5Ni粉末则是在Stellite 6粉

末中添加质量分数为 3 % 铝和 5 % 镍。由于钴基合金层错能较低,激光定向能量沉积过程中容易发生应变诱发马氏体相变,前期研究中钴基合金的热力学计算结果和相关文献表明^[10,11],向 Stellite 6 合金中加入质量分数为 3 % 的铝可以有效抑制沉积过程中 γ 相向 ϵ 相的转变。在此基础上添加镍元素可以进

一步提高层错能,从而探究热疲劳过程中钴基合金的相变对热疲劳裂纹行为的影响。沉积态钴基合金经机加工得到热疲劳试样,尺寸如图 1(c) 所示,其表面依次用 320 #、600 #、800 # 和 1200 # 砂纸打磨,再经金刚石抛光液进行抛光,随后使用酒精洗净并吹干。

表 1 钴基合金粉末与基板各元素的质量分数

Tab. 1 Mass fraction for different element of cobalt-based powder and substrate

单位: %

粉末与基板	$w(\text{Cr})$	$w(\text{W})$	$w(\text{Si})$	$w(\text{Al})$	$w(\text{Fe})$	$w(\text{Co})$	$w(\text{Ni})$	$w(\text{Mo})$	$w(\text{V})$	$w(\text{C})$
Stellite 6	31.75	4.48	1.2	—	1.48	Bal.	—	—	—	0.87
3Al	30.80	4.34	1.15	3	1.43	Bal.	—	—	—	0.84
3Al5Ni	29.21	4.11	1.10	3	1.36	Bal.	5	—	—	0.80
AISI H13 钢	5.14	—	0.97	—	Bal.	—	—	1.24	0.85	0.41

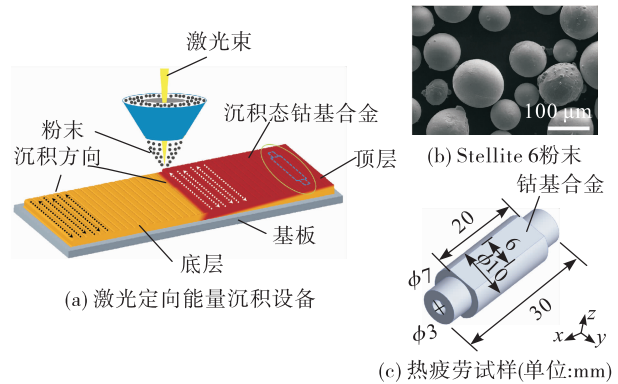


图 1 激光定向能量沉积设备、Stellite 6 粉末及热疲劳试样

Fig. 1 Laser directed energy deposition equipment, Stellite 6 powder and thermal fatigue sample

热疲劳测试采用自制的自约束型热疲劳试验机,由高频感应加热、机械固定装置和水冷系统组成,如图 2(a) 所示。在测试过程中,将试样夹持在线圈中央,调整水冷位于试样测试面,采用 K 型热电偶测量试样表面温度,温升曲线如图 2(b) 所示。根据实际工况及文献[12-13],热疲劳参数为 5.5 s。将试样表面温度从室温加热至 600 ℃,再水冷 10 s 降至室温,即每个热疲劳循环周期为 15.5 s。

热疲劳测试过程中每隔 50 次,通过扫描电子显微镜(TESCAN, LYRA3GMU, SEM)对样品中部进行观察,当出现长度大于 50 μm 的裂纹,定义此刻热疲劳次数为临界循环次数。

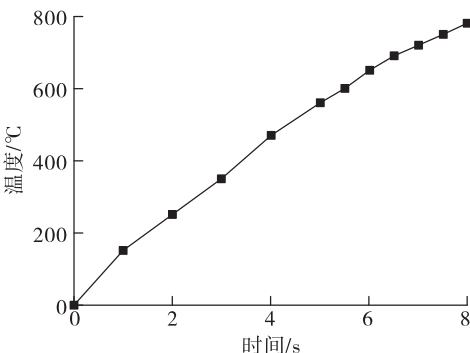


图 2 热疲劳试验装置及温升曲线

Fig. 2 Thermal fatigue equipment and relation curve of induction heating time versus temperature

再进行热疲劳测试,通过扫描电子显微镜和激光共聚焦显微镜(Zeiss, LSM 900, LSM)准确测量裂纹扩展速率,从而对比 3 种钴基合金抗热疲劳性能差异。每种合金均测试 3 个试样,临界循环次数和裂纹扩展速率均为平均值。同时,采用电子背散射衍射(EBSD)和 X 射线衍射(XRD)等方法对热疲劳测试过程中组成相的变化进行表征,从而探索影响性能的因素。

2 结果与讨论

2.1 沉积态钴基合金显微组织

沉积态钴基合金的抗热疲劳性能与微观组织密切相关,本节采用多尺度表征方法重点分析 3 种合金的晶粒形态和组成相。

2.1.1 沉积态钴基合金晶粒形态

如图 3(a)~图 3(c)所示,激光定向能量沉积制备的 3 种钴基合金厚度均约 500 μm ,成形良好,无裂纹和气孔等明显缺陷。

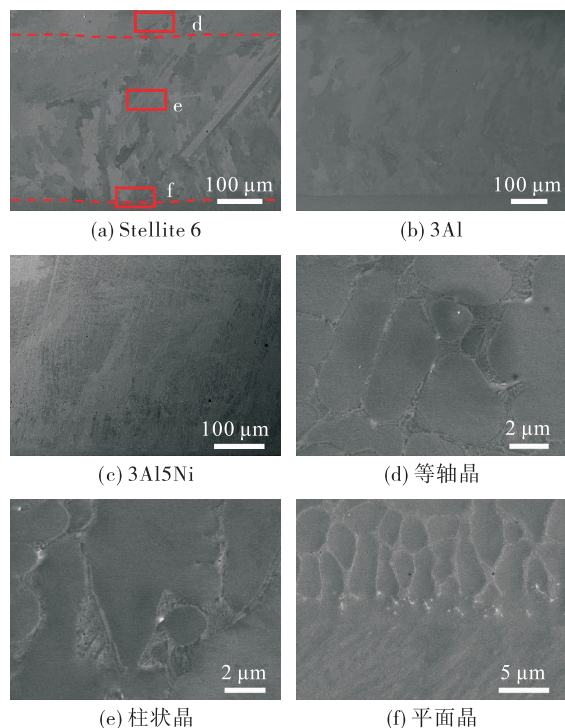


图 3 沉积态钴基合金显微组织

Fig. 3 Microstructures of deposited cobalt-based alloys

图 3(d)、图 3(e)、图 3(f)分别为图 3(a)中区域 d、e、f 的局部放大图。从局部放大图中可以看

到,沉积态 Stellite 6 合金从顶层至基板分别由等轴晶[见图 3(d)]、柱状晶[见图 3(e)]和平面晶[见图 3(f)]组成,这与凝固过程密切相关,由温度梯度和生长速率之比(G/R)决定^[14]。沉积初期,激光热源的能量密度很高,沉积速度很快,在靠近 AISI H13 钢板处散热较快,温度梯度 G 较大,而生长速率 R 较小,从而形成比较薄的平面晶。随着凝固过程的进行,散热变慢,温度梯度减小,生长速率升高,平面晶向柱状晶发生转变。当接近顶部时, G/R 值进一步减小,显微组织则呈现等轴晶的形态。在热疲劳过程中,裂纹主要在顶部等轴晶区萌生并扩展,故对此区域作重点分析。

2.1.2 沉积态钴基合金组成相

如图 4 所示,3 种钴基合金的等轴晶区呈现树枝晶特点,这主要与钴基合金成分有关。根据文献[15],当碳含量小于 2.5%时,钴基合金为亚共晶组织,即凝固过程中先形成钴基枝晶,然后在枝晶间再形成钴固溶体和碳化物的共晶相。在深灰色钴基枝晶间分布有浅灰色和白色 2 种碳化物,通过能谱分析(见表 2)可以确定存在富铬和富钨 2 种碳化物。

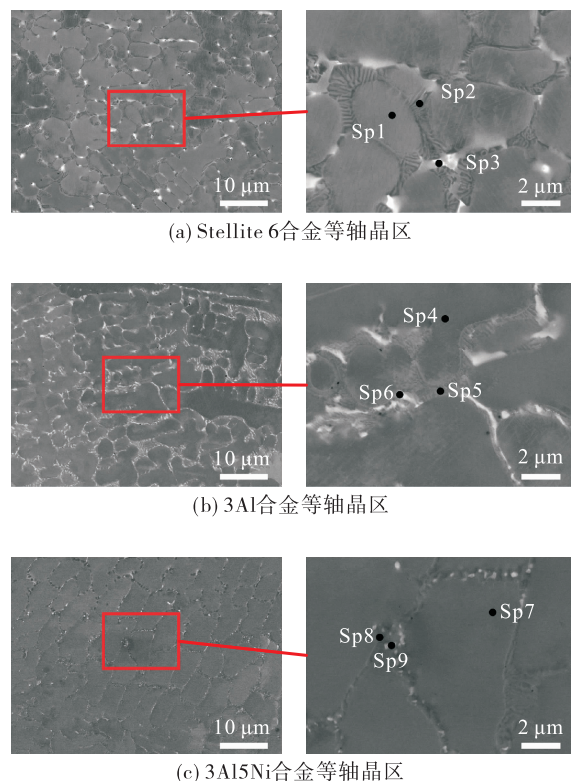


图 4 沉积态钴基合金等轴晶区显微组织

Fig. 4 Microstructures of equiaxed dendrite grain area of deposited cobalt-based alloys

表 2 图 4 中测试点的元素质量分数

Tab. 2 Mass fraction of different element of test points in Fig. 4

单位: %

位置	$w(\text{Cr})$	$w(\text{W})$	$w(\text{Si})$	$w(\text{Fe})$	$w(\text{Co})$	$w(\text{Al})$	$w(\text{Ni})$
Sp1	22.72	3.13	1.25	8.34	64.56	—	—
Sp2	33.44	4.01	2.23	4.29	56.03	—	—
Sp3	27.37	12.65	3.17	4.90	51.91	—	—
Sp4	21.82	2.96	1.18	7.91	63.52	2.61	—
Sp5	32.85	3.91	2.15	4.19	55.49	1.41	—
Sp6	26.95	11.99	3.11	4.87	51.69	1.39	—
Sp7	19.96	2.01	0.51	7.02	61.25	2.46	6.79
Sp8	31.11	3.64	1.89	4.01	54.81	0.97	3.57
Sp9	25.37	11.61	2.56	4.76	50.80	0.72	4.18

为了进一步确定 3 种钴基合金的组成相,进行了 XRD 测试,图 5 显示在添加铝和镍元素后碳化物的类型保持不变,均为 M_{23}C_6 和 M_7C_3 ,而 $\epsilon\text{-Co}$ 相仅出现在 Stellite 6 合金中。这主要是因为纯钴在高温时是 FCC 相,即 $\gamma\text{-Co}$ 相,而低于 $417\text{ }^\circ\text{C}$ 时为 HCP 相,即 $\epsilon\text{-Co}$ 相,两者的转变是无扩散马氏体相变^[16]。而激光定向能量沉积过程中冷却速度较快,使大量高温 $\gamma\text{-Co}$ 相保持至低温,当层错能较低时,部分 $\gamma\text{-Co}$ 相转变为 $\epsilon\text{-Co}$ 相。根据文献[11, 17-18],加入铝和镍元素均可以提高钴基合金的层错能,从而抑制凝固过程中 $\gamma\text{-Co}$ 相向 $\epsilon\text{-Co}$ 相的转变。

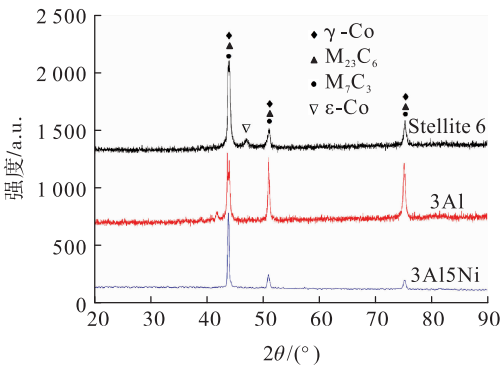


图 5 沉积态钴基合金 XRD 衍射图谱

Fig. 5 XRD diffractions of deposited cobalt-based alloys

2.2 沉积态钴基合金抗热疲劳性能

3 种钴基合金的抗热疲劳性能如图 6 所示。其中 Stellite 6 合金裂纹出现最早(1 700 次),裂纹扩展速率最快,加入铝元素后临界循环次数有所增加

(1 950 次),裂纹扩展速率下降了 7.5 %。而 3Al5Ni 合金的抗热疲劳性能显著提高,临界循环次数提升至 2 250 次,裂纹扩展速率下降了 12.25 %。

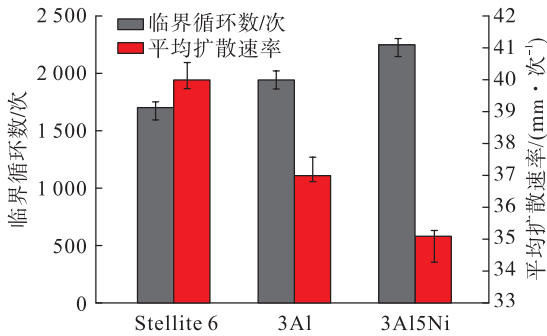


图 6 热疲劳裂纹萌生和扩展统计图

Fig. 6 Statistical graph of thermal fatigue cracks initiation and propagation

为分析 3 种沉积态钴基合金抗热疲劳性能差异之间的内在机制,采用扫描电子显微镜和激光共聚焦显微镜对热疲劳测试后合金表面进行观察。首先,分别对 3 种合金热疲劳裂纹萌生时的形貌进行表征,均具有沿晶断裂的特征,但也存在较多不同。如图 7(a) 和图 8(a) 所示,Stellite 6 合金和 3Al 合金热疲劳裂纹比较集中,向四周扩展,而 3Al5Ni 合金表面的热疲劳裂纹分布则更为分散[见图 9(a)]。当热疲劳循环次数达到 3 000 次时,Stellite 6 合金热疲劳裂纹明显扩展[见图 7(b)]。如图 7(c) 和图 7(d) 所示,通过 LSM 对合金表面三维形貌进行分析可以看到,在裂纹附近存在大量的氧化物,这是因为在

开裂过程中暴露出的新鲜表面容易被氧化,严重降低了合金的表面质量,粗糙度降为 $0.615\ \mu\text{m}$ 。如图 8(b) 所示,沉积态 3Al 合金裂纹扩展较慢,而且三维形貌显示裂纹附近氧化物较少[见图 8(c) 和图 8(d)],表面粗糙度为 0.354 ,说明其具有更好的抵抗热疲劳裂纹的能力。如图 9(b) 所示,沉积态

3Al5Ni 合金裂纹扩展最慢,而且裂纹附近氧化物最少,并通过 LSM 测试结果可知[见图 9(c) 和图 9(d)],合金表面质量较高,粗糙度为 $0.205\ \mu\text{m}$ 。这也说明了随着铝和镍元素的加入,热疲劳过程中钴基合金可以更好地保持表面状态,潜在裂纹源也有所减少。

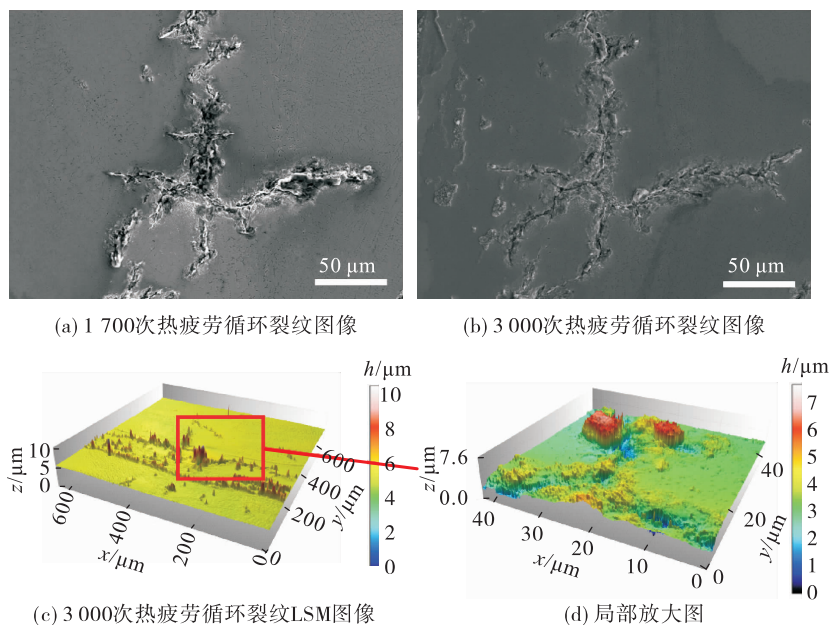


图7 Stellite 6 合金热疲劳裂纹形貌

Fig. 7 Thermal fatigue cracks morphologies of Stellite 6 alloy

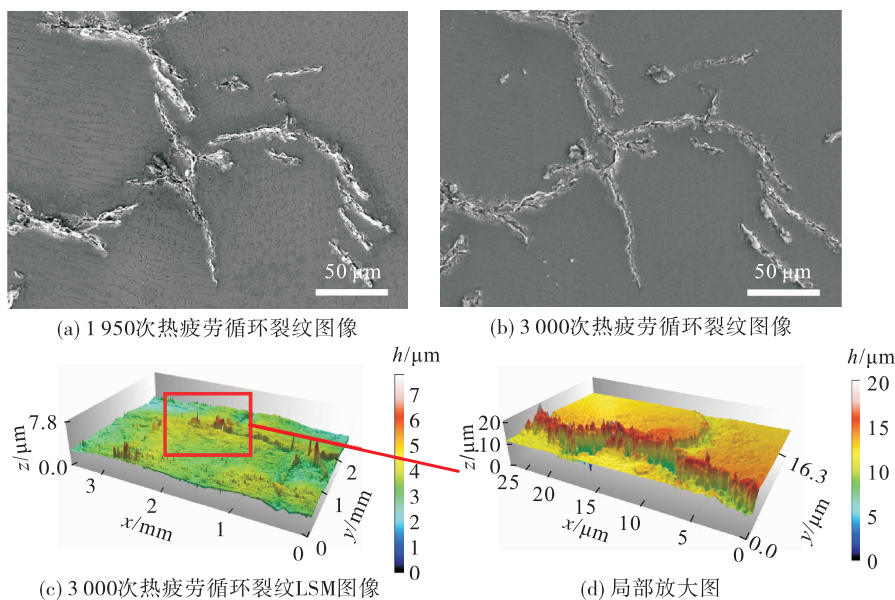


图8 3Al 合金热疲劳裂纹形貌

Fig. 8 Thermal fatigue cracks morphologies of 3Al alloy

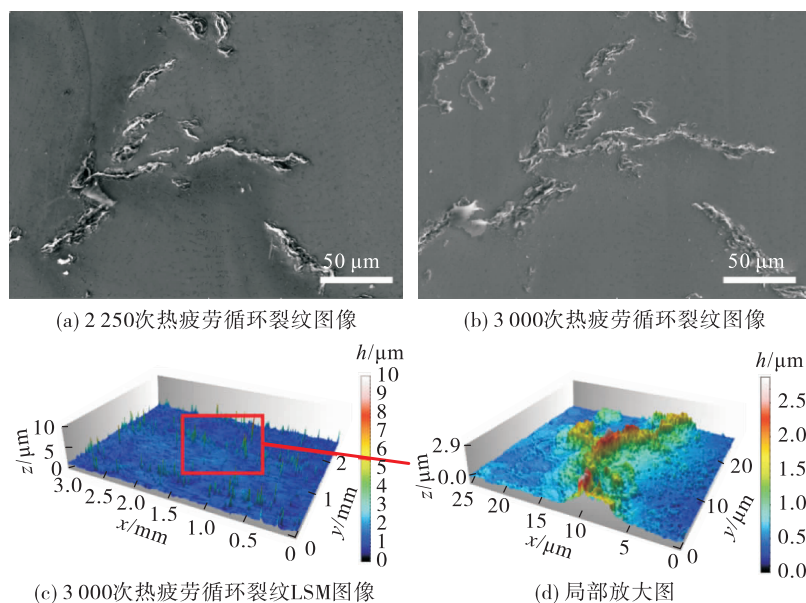


图 9 3Al5Ni 合金热疲劳裂纹形貌

Fig. 9 Thermal fatigue cracks morphologies of 3Al5Ni alloy

2.3 沉积态钴基合金显微组织热疲劳过程中的组织演变及断裂机制

如图 10 所示,进一步对热疲劳过程中 3 种钴基合金的显微组织变化进行分析,根据前文 XRD 测试结果可知,沉积态钴基合金中仅有 Stellite 6 合金中存在 ϵ -Co 相,而 3Al 合金和 3Al5Ni 合金的枝晶均为 γ -Co 相。但经过热疲劳测试后,3 种钴基合金中均出现了 ϵ -Co 相,如图 10(d) ~ 图 10(e)所示。这主要是因为热疲劳过程中冷热循环产生较大的应

力应变,从而引起 γ -Co 相向 ϵ -Co 相的应变诱发马氏体相变^[19]。但是通过对组成相的统计(如图 11 所示),3Al 合金中碳化物的数量增多,尺寸变大, ϵ -Co 相的含量较少(3.2%);3Al5Ni 合金中碳化物的数量有所降低,尺寸变小,而且热疲劳测试过程中形成的 ϵ -Co 相的含量更少(1.1%),减少了 γ/ϵ 相界面的数量,而热疲劳裂纹也更倾向于在相界面快速扩展^[20]。

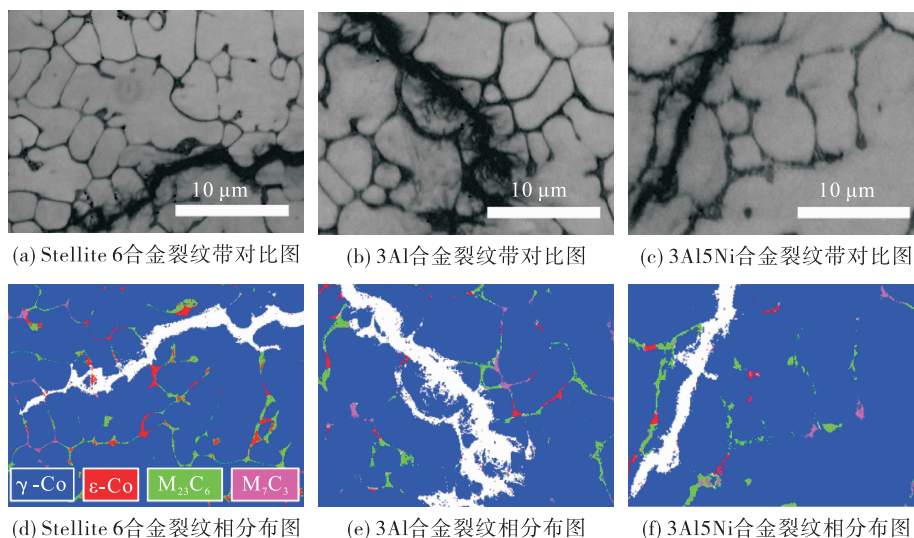


图 10 沉积态钴基合金热疲劳裂纹 EBSD 分析结果

Fig. 10 EBSD analysis for thermal fatigue cracks of deposited cobalt-based alloys

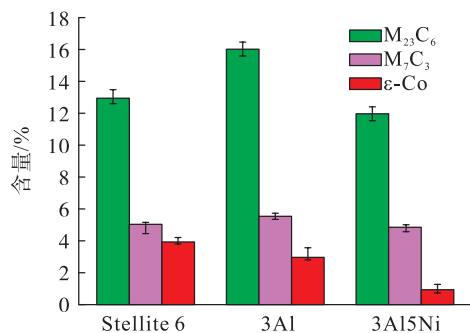


图 11 沉积态钴基合金热疲劳测试后组成相统计图

Fig. 11 Statistical graph of phase compositions of deposited cobalt-based alloys after thermal fatigue test

热疲劳过程中,钴基合金表面经受循环的热冲击,根据 Huntz 理论可知^[9],应力来源于加热和冷却过程中由热传导引起的应力,以及基体和碳化物之间热膨胀系数差异,分别为:

$$\sigma = \frac{E}{1 - \nu} \alpha \Delta T \quad (1)$$

$$\sigma_{\text{CTEs-m}} = \frac{E_m (\alpha_p - \alpha_m)}{(1 - \nu_m) \left[1 + \frac{d_m E_m (1 - \nu_p)}{d_p E_p (1 - \nu_m)} \right]} \Delta T \quad (2)$$

$$\sigma_{\text{CTEs-p}} = \frac{E_p (\alpha_m - \alpha_p)}{(1 - \nu_p) \left[1 + \frac{d_p E_p (1 - \nu_m)}{d_m E_m (1 - \nu_p)} \right]} \Delta T \quad (3)$$

式中:下标 m 和 p 分别表示钴基枝晶和碳化物; E 为弹性模量; ν 为泊松比; α 为热膨胀系数; d 为晶粒尺寸; ΔT 为温度差。在热疲劳过程中,升温段试样表面为压应力;降温段为拉应力,是裂纹萌生的主要阶段。通过试验测定的 3 种合金的参数如表 3 所示,根据式(1)可求解出 3 种合金表面热应力极限值分别为 2 GPa、2.3 GPa 和 2.4 GPa,这说明随着铝和镍元素的加入,样品表面最高热应力值有所上升。此外,针对基体和碳化物之间热膨胀系数差异引起的热应力进行计算,根据前文分析,在加入铝元素后 d_m/d_p 的值减小, γ -Co 相与碳化物之间的应力增大,但同时由于层错能的升高,热疲劳过程中形成的 ϵ -Co 相减少,容易成为裂纹源的 γ/ϵ 相界面变少,与 Stellite 6 合金相比,3Al 合金裂纹萌生更晚,扩展速度更慢。这也说明了在热循环过程中, γ -Co 相与碳化物之间的应力在早期无法破坏晶界产生裂纹,而应力更为集中的 γ/ϵ 相界面则成为裂纹

萌生的薄弱位置,即钴基合金中抑制 γ -Co 相向 ϵ -Co 相的转变有利于提高抗热疲劳性能。而 3Al5Ni 合金的层错能更高,且碳化物含量及尺寸均降低, d_m/d_p 的值增大,碳化物与钴基枝晶间的应力下降,而且 γ/ϵ 相界面更少,可以更为有效地抑制热疲劳裂纹的萌生和扩展。

表 3 钴基合金参数

Tab. 3 Parameters of cobalt-based alloys

合金	E/GPa	ν	$\alpha/10^{-6} (\text{ }^\circ\text{C}^{-1})$
Stellite 6	208	0.3	11.5
3Al	201	0.346	12.7
3Al5Ni	198	0.36	13.1

综上所述,铝和镍元素的加入虽然会导致试样表面峰值热应力上升,但由于热疲劳裂纹更容易在 γ/ϵ 相界面萌生,抑制 γ 相向 ϵ 相的转变有助于抑制热疲劳裂纹,所以 3Al 合金比 Stellite 6 合金具有更优异的抗热疲劳性能。此外,镍元素的加入降低了碳化物与基体之间的应力,并进一步抑制 ϵ 相的出现,从而展现出更好的抗热疲劳性能。

3 结论

本文主要研究了激光定向能量沉积钴基合金的热疲劳行为和失效机制,通过添加铝和镍元素对钴基合金的组成相进行调控,并根据再生冷却推力室实际服役环境,采用自约束热疲劳设备进行服役性能测试。通过 SEM、LSM 和 XRD 等多种分析方法,详细表征了热疲劳过程中表面状态的变化及显微组织的演变,阐明了抗热疲劳性能提升的方法,为激光定向能量沉积钴基合金在工程实际中的应用提供指导,主要结论如下。

1) 沉积态钴基合金从表层至基体依次为等轴晶、柱状晶和平面晶,其中等轴晶由钴基枝晶和枝晶间的共晶相组成。沉积态 Stellite 6 合金由 γ -Co 相、 ϵ -Co 相、 M_{23}C_6 相和 M_7C_3 相组成,而沉积态 3Al 合金和 3Al5Ni 合金由于层错能较高,并未出现 ϵ -Co 相,碳化物的类型保持不变。

2) 添加铝和镍元素均有助于提高抗热疲劳性能,沉积态 3Al5Ni 合金的抗热疲劳性能最佳,与沉积态 Stellite 6 合金相比,热疲劳临界循环次数提高

了 550 次,裂纹扩展速率下降了 12.25%。

3) 提高钴基合金的层错能,减少 γ/ϵ 相界面,同时降低碳化物的尺寸和含量,均有助于延缓热疲劳裂纹的萌生和扩展。

参考文献

- [1] 陈明亮,刘昌国,徐辉,等. 远征三号上面级轨控发动机研制及在轨验证[J]. 火箭推进,2020,46(3):11-18.
CHEN M L,LIU C G,XU H,et al. Development and in-orbit verification of orbit-control engine in YZ-3 upper stage[J]. Journal of Rocket Propulsion,2020,46(3):11-18.
- [2] 张北辰. 面向液体火箭发动机再生冷却的微小通道相变传热过程研究[D]. 长沙:国防科技大学,2019.
- [3] 侯瑞峰,李龙飞,陈建华,等. 液体火箭发动机不同室压下降冷却方案适用范围[J]. 航空动力学报,2022,37(12):2797-2806.
- [4] 吴有亮,丁煜朔,刘潇,等. 再生冷却推力室准二维传热数值计算[J]. 火箭推进,2023,49(2):66-73.
WU Y L,DING Y S,LIU X,et al. Quasi-2D heat transfer calculation method of regenerative cooling thrust chamber[J]. Journal of Rocket Propulsion,2023,49(2):66-73.
- [5] 李斌,闫松,杨宝锋. 大推力液体火箭发动机结构中的力学问题[J]. 力学进展,2021,51(4):831-864.
- [6] 钟晓康. 新型多组元钴基高温合金的加工工艺及强韧化机理研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2020.
- [7] WANG W,HOU Z Y,LIZÁRRAGA R,et al. An experimental and theoretical study of duplex fcc + hcp cobalt based entropic alloys[J]. Acta Materialia,2019,176:11-18.
- [8] YANG D Z,HUA C,QU S Z,et al. Isothermal transformation of γ -Co to ϵ -Co in stellite 6 coatings[J]. Metallurgical and Materials Transactions A,2019,50(3):1153-1161.
- [9] WEN J X,CAO R,CHE H Y,et al. The oxidation effect on the cracking behavior of a Co-based alloy under thermal shocks[J]. Corrosion Science,2020,173:108828.
- [10] WU Y,LIU Y,CHEN H,et al. Developing the ductility and thermal fatigue cracking property of laser-deposited Stellite 6 coatings by adding titanium and nickel[J]. Materials & Design,2019,162:271-284.
- [11] YANG X D,LI C W,ZHANG M,et al. Study on tensile and thermal fatigue behaviors of additively manufactured cobalt-based alloys alloying with Al and Ni[J]. Materials Science and Engineering:A,2022,840:142914.
- [12] 徐绍桐,王长辉,杨成骁. 液体火箭发动机再生冷却结构弹塑性分析[J]. 航空动力学报,2022,37(8):1664-1673.
- [13] 刘迪,孙冰,马星宇. 液氧/甲烷发动机推力室多循环热-结构分析[J]. 推进技术,2021,42(7):1615-1627.
- [14] ZHENG M Y,LI C W,ZHANG X Y,et al. The influence of columnar to equiaxed transition on deformation behavior of FeCoCrNiMn high entropy alloy fabricated by laser-based directed energy deposition[J]. Additive Manufacturing,2021,37:101660.
- [15] FALQUETO L E,BUTKUS D J,DE MELLO J D B,et al. Sliding wear of cobalt-based alloys used in rolling seamless tubes[J]. Wear,2017,376/377:1739-1746.
- [16] WU Y,LIU Y,CHEN H,et al. Microstructure evolution and crack propagation feature in thermal fatigue of laser-deposited Stellite 6 coating for brake discs[J]. Surface and Coatings Technology,2019,358:98-107.
- [17] ACHMAD T L,FU W X,CHEN H,et al. Computational thermodynamic and first-principles calculation of stacking fault energy on ternary Co-based alloys[J]. Computational Materials Science,2018,143:112-117.
- [18] CUI G J,LIU H Q,LI S,et al. Effect of Ni,W and Mo on the microstructure, phases and high-temperature sliding wear performance of CoCr matrix alloys[J]. Science and Technology of Advanced Materials, 2020, 21 (1): 229-241.
- [19] TANG N,LI Y P,TUNTHAWIROON P,et al. Thermo-mechanical fatigue test of a wrought Co-based alloy as potential tooling material for die casting[J]. Materials Science and Engineering:A,2014,615:164-168.
- [20] SU R Z,NEFFATI D,CHO J,et al. Phase transformation induced plasticity in high-strength hexagonal close packed Co with stacking faults[J]. Scripta Materialia,2019,173:32-36.