

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2024.4063

Al₂O₃ 型壳与 DZ125 高温合金的润湿性及界面反应研究

王石磊¹, 李治辉², 张洪雪¹, 李 波¹, 李 飞², 陈晓燕², 赵彦杰², 戚诚康²

(1. 中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司, 辽宁 沈阳 110041; 2. 上海交通大学 材料科学与工程学院 上海市先进高温材料及其精密成型重点实验室, 上海 200240)

摘 要: DZ125 合金因其优异的性能和较低的成本被广泛用于航空发动机的涡轮叶片。航空发动机涡轮叶片通常由熔模铸造技术制备, 而陶瓷型壳是熔模铸造技术的基础和保障。陶瓷型壳与高温合金的润湿性及界面反应是高温合金涡轮叶片表面质量及尺寸精度的重要影响因素。以电熔白刚玉粉、EC95 粉和电熔白刚玉砂为原料, 以 1030C 硅溶胶为粘结剂, 设计了涡轮叶片定向凝固成型用陶瓷型壳浆料配方, 并制备了陶瓷型壳。在研究 Al₂O₃ 型壳的微观结构和表面粗糙度的基础之上, 重点研究了 Al₂O₃ 型壳与 DZ125 高温合金的润湿性及界面反应。结果表明, 制备的 Al₂O₃ 型壳具有光滑平整的表面, 表面粗糙度达 1.973 μm; Al₂O₃ 型壳对 DZ125 高温合金具有良好的惰性, 两者的润湿角为 119.54°; DZ125 合金表面发生了轻微的化学粘砂, 粘砂层厚度仅约 0.5 μm, 化学反应产物主要为合金元素 Ta、Cr、W 和 Ti 的氧化物。Al₂O₃ 型壳与 DZ125 高温合金的界面处化学粘砂被有效抑制的主要原因为 Al₂O₃ 型壳的光滑平整表面及其对 DZ125 高温合金展现出良好的不润湿性。

关键词: Al₂O₃ 型壳; DZ125 合金; 润湿性; 界面反应

中图分类号: TG24

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2024)06-0565-09

Research on Wetting Behaviors and Interfacial Reactions between Al₂O₃-based Ceramic Shells and DZ125 Superalloys

WANG Shilei¹, LI Zhihui², ZHANG Hongxue¹, LI Bo¹, LI Fei², CHEN Xiaoyan²,
ZHAO Yanjie², QI Chengkang²

(1. AECC Shenyang Liming Aero-Engine Co., Ltd., Shenyang 110041, China; 2. Shanghai Key Laboratory of High-temperature Materials and Precision Forming, School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: DZ125 superalloys are widely used in aeroengine turbine blades because of their excellent performance and low cost. Aeroengine turbine blades are usually prepared by investment casting, of which ceramic shells are the basis. The wetting angle and interfacial reactions between the ceramic shell and superalloy are key factors affecting the quality and dimensional accuracy of superalloy turbine blades. In this paper, using white fused corundum powder, EC95 powder, and white corundum sand as raw materials and silica sol as a binder, the slurry composition of ceramic shell was designed for the directional solidification molding of turbine blades, and the ceramic shell was then prepared. The microstructure and surface roughness of the Al₂O₃-based ceramic shell were studied, and the wetting behavior and interfacial reaction between the Al₂O₃-based ceramic shell and DZ125 superalloy were analysed. The results show that the prepared Al₂O₃-based shell has a smooth surface and that the surface roughness is 1.973 μm. The Al₂O₃-based shell shows excellent inertia to the DZ125 superalloy, and the wetting angle reaches 119.54°. The DZ125 superalloy shows slight chemical sand adhesion, and

收稿日期: 2024-03-26

基金项目: 国家自然科学基金(52074183); 国家重点基础研究发展计划(2022YFB3706300)

作者简介: 王石磊, 1983 年生, 高工。主要从事精密铸造方面的工作。Email: wsl685@163.com

通讯作者: 李治辉, 1985 年生, 助理研究员, 博士。研究方向为基于增材制造的高温精密熔模铸造及纤维增强。

Email: lizhihui985@sjtu.edu.cn

李 波, 1966 年生, 研究员级高级工程师。主要从事高温合金精密铸造研究方面的工作。Email: fri20090424@163.com

引用格式: 王石磊, 李治辉, 张洪雪, 李波, 李飞, 陈晓燕, 赵彦杰, 戚诚康. Al₂O₃ 型壳与 DZ125 高温合金的润湿性及界面反应研究[J]. 铸造技术, 2024, 45(6): 565-573.

WANG S L, LI Z H, ZHANG H X, LI B, LI F, CHEN X Y, ZHAO Y J, QI C K. Research on wetting behaviors and interfacial reactions between Al₂O₃-based ceramic shells and DZ125 superalloys[J]. Foundry Technology, 2024, 45(6): 565-573.

the thickness of the sand layer is only approximately 0.5 μm . The chemical reaction products are mainly oxides of Ta, Cr, W and Ti. The slight chemical sand adhesion of the DZ125 superalloy is attributed to not only the smooth surface of the Al_2O_3 -based shell but also the excellent nonwetting performance of the Al_2O_3 -based shell to DZ125 superalloy.

Key words: Al_2O_3 -based ceramic shell; DZ125 superalloy; wetting behavior; interfacial reaction

航空发动机是飞机的心脏,集中体现了一个国家的科技水平、工业基础和综合国力^[1-2]。DZ125镍基高温合金(下文简称DZ125合金)具有较高的力学性能和优异的物理性能,且由于不含铼(Re)和钌(Ru)等贵金属而成本较低,被广泛用于制造航空发动机的涡轮叶片^[3-5]。熔模铸造通常被称为失蜡铸造或精密铸造,是人类历史上最古老的金属成型工艺之一^[6-7]。熔模铸造具有成本低、铸件精度高和表面质量好的优点,是制备镍基高温合金叶片的主要技术手段^[8-12]。熔模铸造用陶瓷型壳通常由面层和加固层(包括过渡层、背层和封层)组成,其中面层与高温合金液直接接触,对高温合金液的润湿性(接触角)直接影响着它与高温合金液的界面反应,进而影响高温合金铸件的表面质量、高温合金组织和力学性能^[13-15]。高温合金铸件与陶瓷型壳之间的界面作用非常复杂,不但有熔融合金液对陶瓷型壳的渗透和冲击等机械作用,还有合金熔体与陶瓷型壳之间的元素扩散、化学反应等物理化学作用,并且机械作用与物理化学作用往往同时发生^[16]。

型壳材料主要包括耐火粉料和黏结剂,常用于高温合金铸件的耐火粉料有锆英和白刚玉。锆英($\text{ZrO}_2 \cdot \text{SiO}_2$)具有耐火度高、热膨胀系数低、热稳定性和化学稳定性高的特点,且对高温合金液呈惰性^[14,17-21]。然而,国内锆英资源有限,导致其价格偏高,因此需要寻求低成本耐火粉料^[19,22-23]。电熔白刚玉($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$)是以工业氧化铝或煅烧氧化铝为原料,在电弧炉内高温熔化而成,具有熔点高(2 030 $^{\circ}\text{C}$)、结构稳定、导热性好、热膨胀系数小($8.6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)的特点^[22-23]。与锆英相比,电熔白刚玉的耐火度更高、化学稳定性更好,热膨胀系数相近,资源广泛、价格更低^[23]。陶瓷型壳用黏结剂主要有硅溶胶、水玻璃、硅酸乙酯和醋酸锆等^[19,24]。其中,硅溶胶是无定形二氧化硅颗粒高度分散在水介质中形成的稳定胶体,是一种新型优

质水基黏结剂,具有黏度低、分散性和润湿性好的特点,有利于获得表面光滑且高温强度优良的陶瓷型壳^[13,19,21,24-30]。

目前,熔模铸造制备DZ125镍基高温合金涡轮叶片仍存在粘砂现象,导致铸件表面质量不高。需开发制备出性能优异的陶瓷型壳,并理清其与合金元素的界面反应机理。基于此,本文采用电熔白刚玉粉、EC95粉和电熔白刚玉砂为耐火材料,以硅溶胶为黏结剂,通过沾浆淋砂工艺制备 Al_2O_3 型壳,借助扫描电子显微镜和表面粗糙度仪研究型壳的表面形貌和微观结构。采用座滴法研究 Al_2O_3 型壳对DZ125合金的润湿性,并结合界面元素含量和元素面分布图分析两者的界面反应。研究结果为制备表面质量良好的DZ125合金涡轮叶片提供重要参考和借鉴。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

面层粉体为325目白刚玉粉,加固层粉体为325目EC95粉,砂料为低钠白刚玉砂(面层砂90目、过渡层砂54目、背层砂24目)。黏结剂采用1030C低钠硅溶胶。DZ125合金由北京航空材料研究院提供,其化学成分如表1所示。

1.2 实验方法

利用激光粒度仪(S3500)测定原料粉和砂的粒度分布;采用X射线衍射仪(D8 ADVANCE Da Vinci, Bruker, 德国)分析型壳样品的物相组成。通过沾浆淋砂工艺制备得到由1层面层、1层过渡层、3层背层和1层封浆层组成的陶瓷型壳,型壳面层和加固层成分及浆料性能如表2所示。

为烧除残蜡和确保型壳强度,将湿胚型壳放入马弗炉中,以5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速率升温至1 150 $^{\circ}\text{C}$,保温2 h。采用配有能谱分析系统的扫描电子显微镜(MIRA3, TESCAN, 捷克)分析样品的微观形貌;利用表面粗

表 1 DZ125 合金化学成分
Tab.1 Chemical composition of the DZ125 alloy

(mass fraction/%)								
Element	C	Cr	Co	W	Mo	Ta	Al	Ti
Content	0.10	8.95	10.05	7.10	1.95	3.85	5.15	0.95
Element	Hf	B	Ni	Si	Mn	Fe	Zr	P
Content	1.50	0.015	Residual	≤ 0.15	≤ 0.15	≤ 0.30	≤ 0.08	≤ 0.010
Element	S	Pb	Sn	Sb	Bi	As	Ag	
Content	≤ 0.010	$\leq 0.000\ 5$	≤ 0.001	≤ 0.001	$\leq 0.000\ 05$	≤ 0.001	$\leq 0.000\ 5$	

表 2 型壳的面层和加固层原料及特性
Tab.2 Face-coat and strengthening-coat materials and properties of the ceramic shell

Item	Slurry							Sand	
	Silica sol(1030C)/kg	Al ₂ O ₃ powder /kg	EC95 powder /kg	Wetting agent /kg	Defoamer /kg	Solid-to-liquid ratio	Viscosity /s	Al ₂ O ₃ (mesh)	No.(coat)
Face-coat	50	210	-	0.3	0.3	4.2	38	90	1
								54	2
								24	3
Strengthen- ing-coat	50	-	125	-	0.2	2.5	20	24	4
								24	5
								-	6

糙度仪(TR 200,北京吉泰科仪检测设备有限公司)测试型壳的表面粗糙度;利用带有冷冻样品杆的生物型场发射透射电镜(Talos F200C G2,FEI公司,美国)分析硅溶胶的形貌,样品制备和观察均在液氮环境中。采用座滴法测试合金熔体与陶瓷样品的润湿性,具体为:

采用双室真空炉(HZJ2-65型,北京华翔电炉技术有限责任公司)将DZ125合金(熔点1 350~1 425 ℃)方块熔化成球状熔滴,合金冷却凝固后形成与润湿角大小有关的轮廓形貌,利用游标卡尺测量凝固后的合金轮廓尺寸即可计算出润湿角的大小。焙烧工艺为:以5 ℃/min升至1 000 ℃,保温10 min;接着以3 ℃/min升至1 300 ℃,保温10 min;再以2 ℃/min升至1 550 ℃,保温40 min;最后,以5 ℃/min降至1 000℃后,随炉冷却。整个焙烧过程中,真空炉舱室的真空度保持 10×10^{-2} Pa。

2 实验结果及讨论

2.1 型壳原辅料成分、微观组织和粒度分析

电熔白刚玉粉(325目)、EC95粉(325目)和白刚玉砂的成分、微观形貌和粒度如图1所示。从图1a中可以看出,白刚玉粉、EC95粉和白刚玉砂的主要成分为Al₂O₃相。白刚玉粉和EC95粉由不同粒径的板条状颗粒Al₂O₃组成;白刚玉粉(图1b和g)的粒径范围是1.26~176.00 μm,平均粒径15.10 μm;EC95粉(图1c和h)的粒径范围是1.50~104.70 μm,平均粒径18.13 μm。相比型壳加固层用的EC95粉,型壳面层的电熔白刚玉粉平均粒径更小,细小的白刚玉粉更易获得表面光滑的型壳,从而改善铸件的质量;较粗的EC95粉可提高型壳的透气性。80目、46目和24目的电熔白刚玉砂颗粒呈板条状,粒径较为均匀(图1d~f)。根据图1g~i,电熔白刚玉粉、EC95粉和白刚玉砂粒度呈典型的正态分布,在陶瓷型壳中,这种正态分布的小颗粒填塞在大颗粒空隙中,通过硅溶胶的黏结作用和高温烧结作用,能形成较为坚

实的致密多孔结构,有利于获得强度和透气性综合性能良好的陶瓷型壳。

硅溶胶的胶体颗粒内部是由Si-O-Si键连接形成的三维网络结构,胶体颗粒与水的界面形成Si-OH水化膜^[31]。比表面积大的二氧化硅颗粒具有较高的表面负电荷,能提高它们之间的静电斥力,从而提高硅溶胶的稳定性^[30]。图2为电子透射电子显微镜下1030C硅溶胶的形貌,从图中可以看出,1030C硅溶胶中SiO₂粒子呈球状,分散均匀,粒径约20 μm。这种均匀分散的SiO₂微球有较大的比表面积和表面电荷,从而有利于提高硅溶胶的稳定性^[13,24,27,30]。

2.2 Al₂O₃型壳的微观形貌和性能

2.2.1 Al₂O₃型壳的微观形貌和表面粗糙度

图3为Al₂O₃型壳的微观形貌及表面粗糙度。可以看出,制备的Al₂O₃型壳面层较为光滑平整(图3a1和a2),表面粗糙度为1.973 μm(图4a)。光滑平整的面层有利于改善型壳表面对高温合金液的不润湿性,能抑制型壳与合金液的界面反应,从而有利于获得表面光洁的高温合金铸件。根据图3所示,制备的刚玉陶瓷型壳内部均匀分布着大小不同的微孔,这些微孔增加了型壳的孔隙率,能有效改善陶瓷型壳的透气性。

2.2.2 Al₂O₃型壳与合金熔体的润湿性

铸件粘砂是一种常见的表面缺陷,为防止粘砂,型壳(主要是型壳面层)应与金属液发生反应。型壳与金属液的润湿性是二者能否发生反应的一个重要指标,为抑制界面反应,通常要求型壳对金属液具有不润湿性。座滴法是一种常用的测试型壳与合金熔体润湿性的方法,具有经济便捷的优点^[32-33]。其测试模型如图4b所示,可描述为:将待测金属切成小方块(约3 mm×3 mm×3 mm),经磨光处理并清洗后放置在型壳样品上;将型壳样品与金属小方块放入高温真空炉中;高温下将金属小方块熔化成金属熔滴;降温过程中合金熔滴凝固形成与润湿角有关的椭球体(图4c)。通过测量该椭球形的几何参数 r 、 d 及 h (示意图如图4d),进而通过几何公式(1~4)计算得出润湿

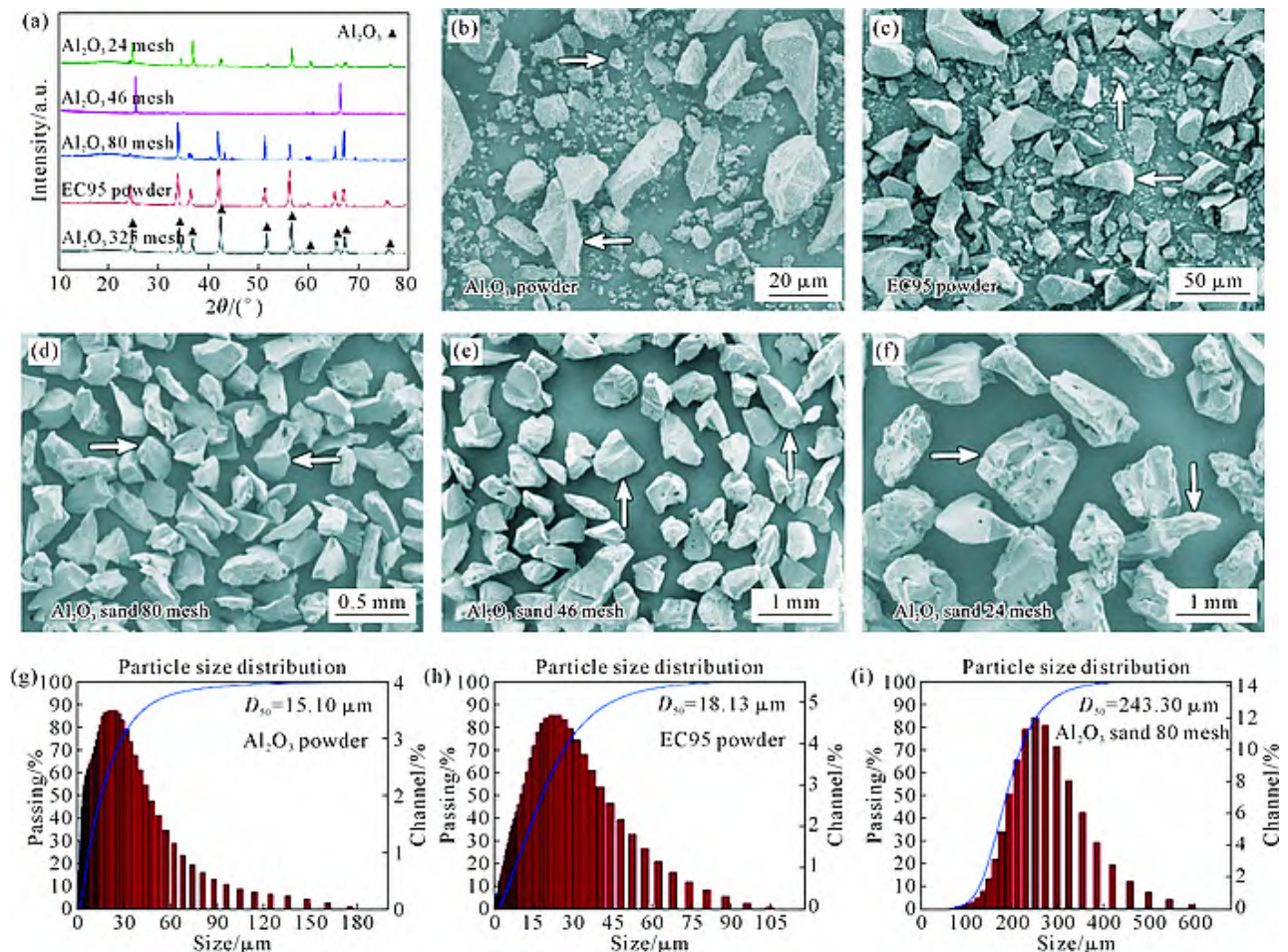


图1 白刚玉粉、EC95 粉和白刚玉砂的成分、微观形貌和粒度分布:(a) 白刚玉粉、EC95 粉和白刚玉砂 XRD 图谱;(b~f) 白刚玉粉、EC95 粉和白刚玉砂的 SEM 图;(g~i) 白刚玉粉、EC95 粉和 80 目白刚玉砂的粒度分布

Fig.1 XRD patterns, SEM images, and particle size distributions of corundum powder, EC95 powder, and corundum sand: (a) XRD patterns of corundum powder, EC95 powder, and corundum sand; (b~f) SEM images of corundum powder, EC95 powder, and corundum sand; (g~i) particle size distributions of corundum powder, EC95 powder, and corundum sand with a mesh of 80

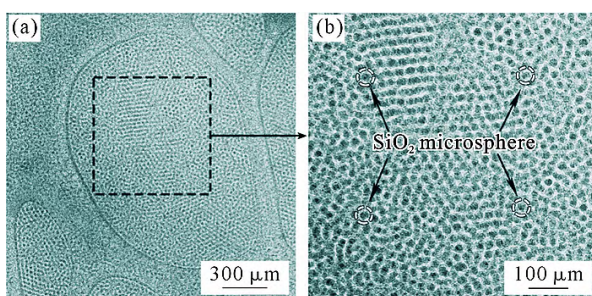


图2 透射电镜下 1030C 硅溶胶形貌:(a) 低倍;(b) 高倍
Fig.2 TEM images of 1030C silica sol: (a) low magnification; (b) high magnification

角 θ 。经计算,DZ125合金/陶瓷型壳的润湿角为 119.54° ,大于 90° ,这表明制备的 Al_2O_3 型壳对DZ125合金具有不润湿性。

$$\alpha + \beta = 90^\circ \quad (1)$$

$$\theta = 90^\circ + (\beta - \alpha) = \alpha + \beta + \beta - \alpha = 2\beta \quad (2)$$

$$\beta = \tan^{-1} \frac{h}{r} = \tan^{-1} \frac{2h}{d} \quad (3)$$

$$\theta = 2 \tan^{-1} \frac{2h}{d} \quad (4)$$

式中, r 为合金/陶瓷型壳接触圆半径; d 为合金/陶瓷型壳接触圆直径; h 为合金球冠高度; α 和 β 为用于计算合金/陶瓷型壳的润湿角的辅助角度; θ 为合金/陶瓷型壳的润湿角。

2.2.3 Al_2O_3 型壳与DZ125合金的界面反应

高温合金叶片的铸造温度高、冷却时间长,易造成陶瓷型壳与合金液的界面反应,最终表现为合金冷却凝固后表面的化学粘砂及物理粘砂。影响陶瓷型壳/高温合金界面化学稳定性的因素主要包括陶瓷材料的成分、合金组分、浇注温度、气氛条件、保温时间等。根据不同的反应机理^[34],合金与陶瓷型壳的界面反应主要可分为以下几类:型壳面层材料(Al_2O_3 、 SiO_2 等)的分解;型壳面层材料分解产生的原子进入合金熔体中,其扩散速度远高于固态扩散;合金熔体中的元素向界面处扩散;界面处合金元素与型壳面层材料分解产生的原子发生化学反应,反应生成气体或氧化物^[15,21]。上述反应可用以下公式进行描述:

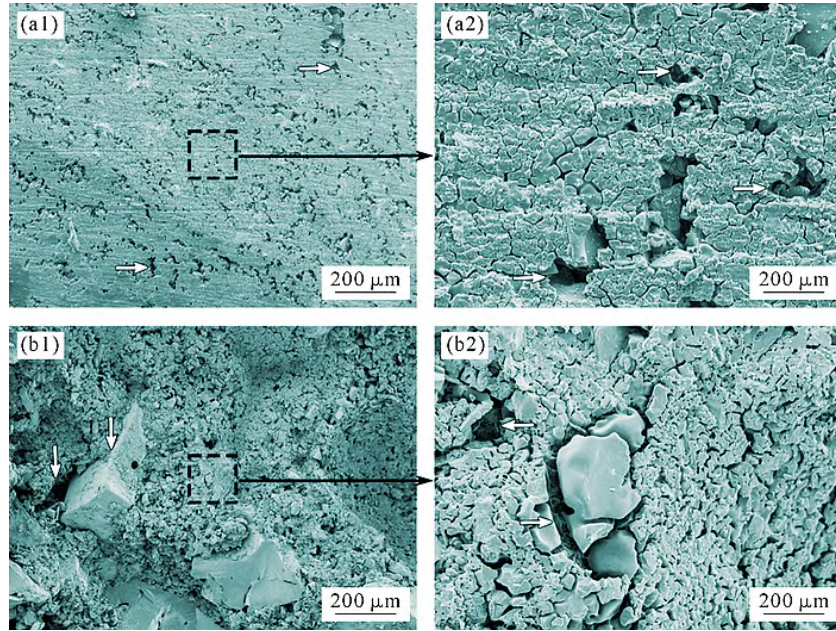


图3 Al₂O₃型壳(1 150 °C焙烧)的微观形貌:(a1, a2) 面层;(b1, b2) 横截面
Fig.3 Morphology of the Al₂O₃-based ceramic shell (1 150 °C sintered): (a1, a2) surface; (b1, b2) cross section

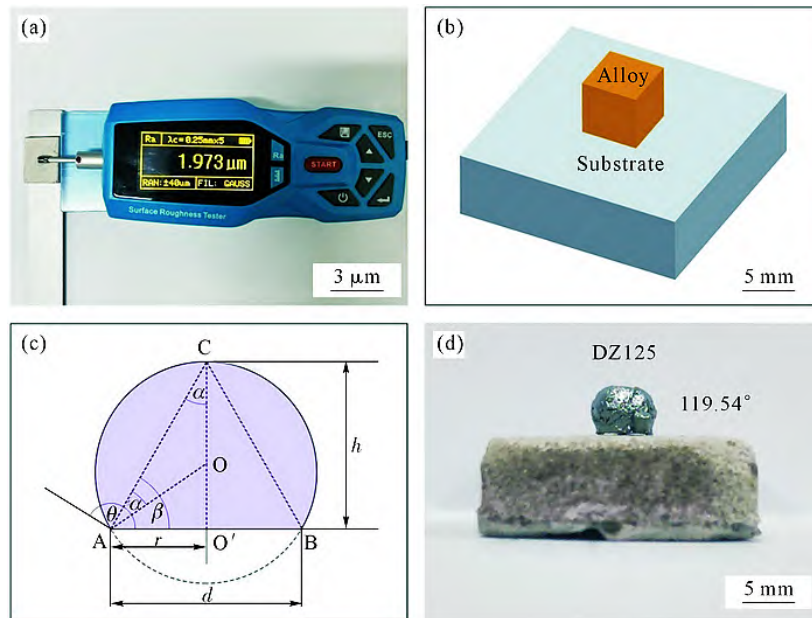
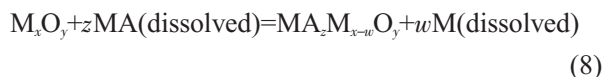
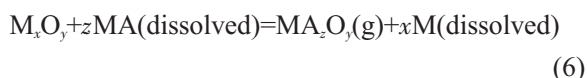


图4 Al₂O₃型壳(1 150 °C)的表面粗糙度和润湿性:(a) Al₂O₃型壳面层的粗糙度;(b)座滴法测合金/陶瓷型壳润湿性模型;(c)几何参数与润湿角示意图;(d) DZ125合金凝固后形成的椭球体及润湿角示意图
Fig.4 Surface roughness and wetting behaviors of the Al₂O₃-based ceramic shell (1 150 °C sintered): (a) face-coat surface roughness of the Al₂O₃-based ceramic shell; (b) model of the sessile drop method used to test the wettability of the alloy/shell; (c) geometric parameters and wetting angle of the alloy/shell; (d) diagram of the spheroid and wetting angle formed after solidification of the DZ125 alloy



式中, M_xO_y 表示陶瓷基体材料中某种氧化物, MA表

示合金组分中某种元素, 括号表示对应物质所处的状态。反应式(5)和(9)是指氧化物的分解反应, 分解后的原子会溶解到熔融的高温合金中。反应式(6~8)是指陶瓷氧化物与合金熔体之间的置换反应, 如合金中Al、Cr、Hf、Ta等元素易与陶瓷材料中的SiO₂发生置换反应^[35]。反应式(10)是指陶瓷氧化物本身发生了由固相向液相的转变, 虽然该过程不会引起氧化物吉布斯能的实质变化, 但是液相的形成会增加氧化物的流动性, 导致型壳机械稳定性的降低, 从而增

加了高温合金熔体向陶瓷型壳渗透或侵蚀陶瓷表面的可能性,在某种程度上为界面反应的发生提供了条件^[34]。

Al_2O_3 型壳与DZ125合金的界面反应情况如图5和6所示。图6为图5a中粘砂层(虚线框处)的能谱结果。根据图5a,宏观下DZ125合金叶片铸件表面几乎没有化学粘砂,而扫描电镜下, Al_2O_3 型壳/DZ125合金界面处分布着零星的粘砂,粘砂层厚度约0.5 μm 。根据上述合金与熔体的界面反应机理^[34],结合 Al_2O_3 型壳与DZ125合金的界面能谱数据(图5和6),DZ125合金参与反应的元素主要为Ta、Cr、W、Ti。 Al_2O_3 型壳/DZ125合金界面处粘砂反应可描述为:①型壳面

层材料中的耐火粉料 Al_2O_3 和硅溶胶黏结剂中的 SiO_2 在高温下发生分解,生成Al、Si和O原子;②生成的Al、Si和O原子进入到DZ125合金熔体中;③合金熔体中的Ta、Cr、W和Ti等元素向 Al_2O_3 型壳/DZ125合金界面扩散;④Ta、Cr、W和Ti等合金元素与O原子发生化合反应,或与型壳面层中的 SiO_2 发生置换反应,最终的反应产物为Ta、Cr、W和Ti的氧化物。根据DZ125合金的熔点1 350~1 425 $^{\circ}\text{C}$ 和座滴法测试温度1 550 $^{\circ}\text{C}$,并结合相关文献[15,36],推测界面反应温度区间为1 450~1 550 $^{\circ}\text{C}$ 。

综上所述, Al_2O_3 型壳与DZ125合金的界面处化学粘砂层很薄,且零星分布,可以认为,使用该 Al_2O_3

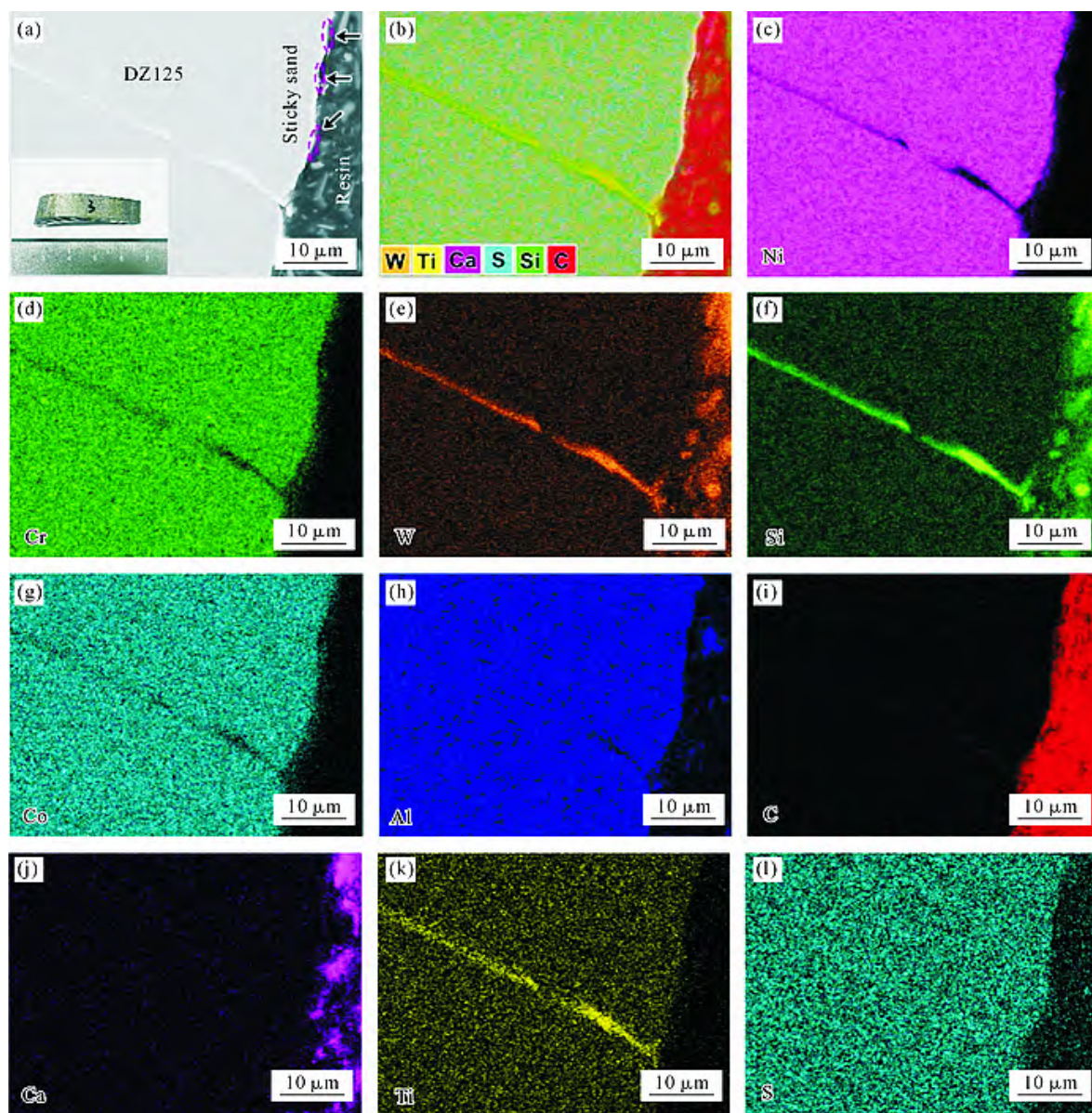
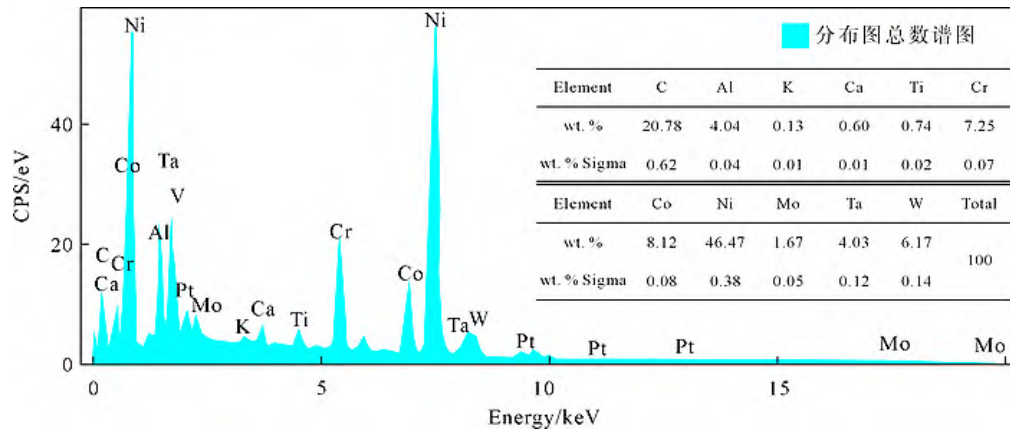


图5 Al_2O_3 型壳与DZ125合金的界面结构及元素面分布:(a) DZ125合金铸件表面的粘砂和DZ125合金/ Al_2O_3 型壳界面的微观结构;(b~l) Al_2O_3 型壳/DZ125合金界面的元素面分布图

Fig.5 Interfacial reaction between the Al_2O_3 -based ceramic shell and the DZ125 superalloy: (a) bonded sand formed on the surface of the DZ125 superalloy cast, and SEM image of the interface between the DZ125 superalloy and the Al_2O_3 -based ceramic shell; (b~l) EDS elemental mappings of the interface between the DZ125 superalloy and the Al_2O_3 -based ceramic shell

图6 Al₂O₃型壳与DZ125合金界面反应产物元素含量Fig.6 Contents of the interfacial reaction products of the Al₂O₃-based ceramic shell and DZ125 superalloy

型壳,DZ125合金表面的化学粘砂被有效抑制,其主要原因Al₂O₃型壳的光滑平整表面(粗糙度为1.973 μm)及其对DZ125合金展现出良好的不润湿性(润湿角为119.54°)。此外,需要补充说明的是,能谱检测到的K(图6)和Ca(图5j和图6)源自于型壳原料Al₂O₃粉中的微量杂质K₂O和CaO,K和Ca的出现也表明Al₂O₃型壳/DZ125合金界面出现了粘砂;能谱检测到Pt(图6)为样品喷Pt(靶材,改善样品的导电性)所致。

3 结论

(1)以电熔白刚玉粉、EC95粉和电熔白刚玉砂为原料,以硅溶胶为黏结剂,通过沾浆淋砂工艺制备出表面光滑的Al₂O₃型壳,型壳的表面粗糙度为1.973 μm,物理层面上光滑平整的表面有利于增强型壳对合金液的不润湿性。

(2)制备的Al₂O₃型壳对DZ125合金具有良好的惰性,二者的润湿角为119.54°;宏观下,座滴实验后DZ125合金几乎没有化学粘砂;扫描电镜下,界面处只分布着零星的粘砂,粘砂层厚度约0.5 μm。Al₂O₃型壳对DZ125合金的不润湿性有效抑制了界面化学粘砂。

(3)在1 450~1 550 °C时,Al₂O₃型壳/DZ125合金发生界面反应,其反应过程为:①型壳面层中的Al₂O₃和硅溶胶中的SiO₂发生分解,生成Al、Si和O原子;②分解生成的Al、Si和O原子扩散到DZ125合金熔体中;③熔体中的Ta、W、Ti和Hf合金等元素向型壳/合金界面扩散;④合金元素Ta、Cr、W和Ti等或与O原子发生化合反应,或与面层中的SiO₂进行置换反应,反应产物主要为Ta、Cr、W和Ti的氧化物。

参考文献:

[1] 刘巧沐,李园春.航空发动机材料及工艺发展浅析[J].航空动力,

2021(6): 9-12.

LIU Q, LI Y. Analysis to development of aero engine materials and processes[J]. Aerospace Power, 2021(6): 9-12.

[2] 向巧,黄劲东,胡晓煜,晏武英,侯薇.航空动力强国发展战略研究[J].中国工程科学,2022,24(2): 106-112.

XIANG Q, HUANG J D, HU X Y, YAN W Y, HOU W. Research on aero engine empower development strategy[J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(2): 106-112.

[3] NING T, ZHANG S K, ZHANG P, TIAN S G, ZHAO G Q, YU F. Influence of solution temperature on microstructure and high temperature creep properties of DZ125 nickel-base alloy [J]. Materials at High Temperatures, 2021, 38(3): 186-196.

[4] HU X A, YANG X G, SHI D Q, YU H C, REN T T. Constitutive modeling of a directionally solidified nickel-based superalloy DZ125 subjected to thermal mechanical creep fatigue loadings[J]. Rare Metals, 2019, 38: 922-936.

[5] ZHANG J L, ZHAO A Z H, KONG Y H, ZHANG Z, ZHONG Q P. Crack initiation and propagation mechanisms during thermal fatigue in directionally solidified superalloy DZ125[J]. International Journal of Fatigue, 2019, 119: 355-366.

[6] FERREIRA J C, MATEUS A. A numerical and experimental study of fracture in RP stereolithography patterns and ceramic shells for investment casting[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 134(1): 135-144.

[7] SINGH S, SINGH R. Precision investment casting: A state of art review and future trends [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2016, 230(12): 2143-2164.

[8] JONES S, YUAN C. Advances in shell moulding for investment casting[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 135 (2-3): 258-265.

[9] 姜不居,吕志刚,周泽衡.调结构 重环保 求发展——中国熔模铸造发展之路[J].特种铸造及有色合金,2009,29(12): 1132-1136, 1075.

JIANG B J, LU Z G, ZHOU Z H. Survey of investment casting at the China[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2009, 29(12): 1132-1136, 1075.

[10] 吕志刚.世界熔模精密铸造产业动态——参加2013东京精密铸造国际研讨会有感[J].特种铸造及有色合金,2014,34(1): 70-73.

- LYU Z G. Development status of investment casting industry in the world--Review of international seminar on investment casting tokyo 2013[J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2014, 34(1): 70-73.
- [11] SZELIGA D, KUBIAK K, ZIAJA W, CYGAN R, SUCHY J S, BURBELKO A, NOWAK W J, SIENIAWSKI J. Investigation of casting-ceramic shell mold interface thermal resistance during solidification process of nickel based superalloy[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2017, 87: 149-160.
- [12] KUMAR V, MITRA S. Development in investment casting-A review[J]. *Journal of Critical Reviews*, 2020, 7(10): 892-897.
- [13] 包彦坤, 俞炼聪, 匡阿根, 徐丽文. 熔模铸造用硅溶胶涂层的流变特性和工艺性能研究[J]. *特种铸造及有色合金*, 1993(5): 4-8.
- BAO Y K, YU L C, KUANG A G, XU L W. On rheological and technological properties of colloidal silica sol slurry for investment casting[J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 1993(5): 4-8.
- [14] 杜剑平, 胡建, 安璐, 李田田, 雍小晋, 洪志兴. 电熔刚玉复合涂料在转K6型摇枕、侧架铸钢件上的应用[J]. *现代机械*, 2014(5): 79-81.
- DU J P, HU J, AN L, LI T T, YONG X J, HONG Z X. Fused corundum composite coating applications on the K6 swing bolster and side frame castings[J]. *Modern Machinery*, 2014(5): 79-81.
- [15] 陈晓燕, 肖旅, 余建波, 孙宝德, 李飞. 熔模铸造高温合金与陶瓷材料界面反应研究进展[J]. *特种铸造及有色合金*, 2016, 36(8): 844-848.
- CHEN X Y, XIAO L, YU J B, SUN B D, LI F. Research status of the interface reactions between superalloys and ceramic materials in investment casting[J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2016, 36(8): 844-848.
- [16] 瞿赞. Re和Y元素对高温合金熔体与陶瓷材料界面反应的影响[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020.
- ZI Y. Effects of Re and Y elements on interface reactions between superalloy melts and ceramic materials[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2020.
- [17] 杨爱新. 面层材料对钛合金熔模精密铸造型壳性能的影响[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- YANG A X. Effect of refractory materials and binders used in face coating on properties of ceramic mould for investment casting of titanium alloys[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [18] 姚忠, 周旭. 电熔刚玉制造型壳面层的应用研究[J]. *科教导刊*, 2016(30): 51-52.
- YAO Z, ZHOU X. Application research on the modeling of the surface layer of fused corundum[J]. *The Guide of Science & Education*, 2016(30): 51-52.
- [19] 顾国明, 景宗梁. 熔模精密铸造技术及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2022.
- GU G M, JING Z L. Investment precision casting technology and application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2022.
- [20] 王迪, 李九霄, 董安平, 隋大山, 刘明亮, 王旭彤, 孙红飞, 赵志伟. 熔模铸造型壳用材料研究进展[J]. *精密成形工程*, 2023, 15(4): 205-216.
- WANG D, LI J X, DONG A P, SUI D S, LIU M L, WANG X T, SUN H F, ZHAO Z W. Research progress of materials for investment casting molding shells[J]. *Journal of netshape forming engineering*, 2023, 15(4): 205-216.
- [21] 肖涵松, 玄伟东, 戴睿卿, 刘泳鸿, 李俊杰, 任忠鸣. 高温合金精密铸造用陶瓷型壳及其与合金界面反应的研究进展[J]. *材料导报*, 2023.
- XIAO H S, XUAN W D, DAI R Q, LIU Y H, LI J J, REN Z M. Research progress of ceramic shell for superalloy investment casting and its interface reaction with alloy[J]. *Materials Reports*, 2023.
- [22] 姜不居. 熔模精密铸造[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- JIANG B J. Investment precision casting[M]. Beijing: China Machine Press, 2004.
- [23] 闫炳江. 电熔刚玉替代锆英砂做型壳面层的研究[J]. *特种铸造及有色合金*, 2013, 33(2): 157-158.
- YAN B J. Face layer of mold shell making with fused corundum instead of zircon sand[J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2013, 33(2): 157-158.
- [24] 林波, 陈云祥. 熔模精密铸造型壳制备工艺研究进展[J]. *铸造技术*, 2021, 42(10): 925-927.
- LIN B, CHEN Y. Research progress on shell mold making technology of investment casting[J]. *Foundry Technology*, 2021, 42(10): 925-927.
- [25] WANG F, LI F, HE B, WANG D H, SUN B D. Gel-casting of fused silica based core packing for investment casting using silica sol as a binder[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2013, 33(13-14): 2745-2749.
- [26] 毛蒲. 复合纤维含量对硅溶胶浆料及增强精铸型壳性能的影响[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2015.
- MAO P. Effect of composite fiber content on properties of silicon sol slurry and shell reinforced by fiber for investment casting[D]. Nanchang: Nanchang Aeronautic University, 2015.
- [27] SÖGAARD C, FUNEHAG J, ABBAS Z. Silica sol as grouting material: A physio-chemical analysis[J]. *Nano Convergence*, 2018, 5: 6.
- [28] ZHANG Y, SATYAJIT C. Study on rheological properties of silica sol in sisal fiber reinforced investment casting[J]. *Key Engineering Materials*, 2020, 852: 180-188.
- [29] LI Z X, LIU X D, LU Y, LYU K. Influence of rice husk on the properties of fiber-reinforced silicon sol shells used in investment casting process[J]. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2022, 36(5): 469-489.
- [30] 李倩, 刘智鹏, 赵巍, 李勇, 张强, 沈滨, 周悍坤, 吕永乐, 董龙沛. 精密铸造陶瓷型壳用硅溶胶研究进展[J]. *铸造技术*, 2022, 43(11): 989-995.
- LI Q, LIU Z P, ZHAO W, LI Y, ZHANG Q, SHEN B, ZHOU H K, LV Y L, DONG L P. Research progress on colloidal silica for ceramic shells in investment casting[J]. *Foundry Technology*, 2022, 43(11): 989-995.
- [31] 季晓玲, 王珍, 鲍慧, 翟丽莉. 稳定透明钇溶胶的制备及表征[J]. *稀土*, 2011, 32(2): 87-89.
- JI X L, WANG Z, BAO H, ZHAI L L. Preparation and characterization of stable and transparent yttrium sol[J]. *Chinese Rare Earths*, 2011, 32(2): 87-89.
- [32] PAN Z H, ZHOU L J, WANG W L. Study on the interaction process between mold flux and TiN/TiO₂ by sessile drop method

- [M]//The Minerals, Metals & Materials Society. TMS 2020 149th Annual Meeting & Exhibition Supplemental Proceedings. Cham: Springer, 2020: 67-74.
- [33] PONOMAR M, KRASNYUK E, BUTYLSKII D, NIKONENKO V, WANG Y M, JIANG C X, XU T W, PISMENSKAYA N. Sessile drop method: Critical analysis and optimization for measuring the contact angle of an Ion-exchange membrane surface [J]. Membranes, 2022, 12(8): 765.
- [34] CINGI C. Mold-metal reactions in magnesium investment castings [D]. Helsinki: Helsinki University of Technology, 2006.
- [35] VALENZA F, MUOLO M L, PASSERONE A. Wetting and interactions of Ni- and Co-based superalloys with different ceramic materials[J]. Journal of Materials Science, 2010, 45: 2071-2079.
- [36] LI Q, SONG J X, WANG D G, YU Q, XIAO C B. Effect of Cr, Hf and temperature on interface reaction between nickel melt and silicon oxide core[J]. Rare Metals, 2011, 30: 405-409.