

引用格式: 高威, 徐倩, 殷亚军, 等. ZTC4 钛合金热等静压内部缺陷弥合区组织演变[J]. 航空材料学报, 2026, 46(3): 18-27.
GAO Wei, XU Qian, YIN Yajun, et al. Microstructure evolution of internal defect healing zone in ZTC4 titanium alloy during hot isostatic pressing[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2026, 46(3): 18-27.

ZTC4 钛合金热等静压内部缺陷弥合区组织演变

高威¹, 徐倩², 殷亚军³, 冯新^{1*}

(1. 中国航发北京航空材料研究院 铸造钛合金技术中心, 北京 100095; 2. 武汉轻工大学 机械工程学院, 武汉 430048; 3. 华中科技大学 材料成形与模具技术全国重点实验室, 武汉 430074)

摘要: 采用数值模拟与实验相结合的方法, 分析不同时刻热等静压 ZTC4 钛合金内部缩孔周边的位移变化、应力应变分布及缺陷弥合区内微观组织的演变规律。结果表明, 在热等静压高温高压作用下, 缩孔周边形成高应力应变区, 距离缩孔表面越近, 应力越大, 随缩孔尺寸减小, 应变集中程度增加。热等静压后缩孔位置形成放射状缩孔弥合区组织, 弥合区内不同 α/β 集束的塑性变形程度不均匀, 位错滑移系易开动的 α/β 集束内变形量较大, 从而形成等轴晶组织。

关键词: 钛合金; 热等静压; 有限元方法; 弥合区; 等轴晶

doi: 10.11868/j.issn.1005-5053.2025.000024

CSTR: 32420.14.j.issn.1005-5053.2025.000024

中图分类号: V252.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2026)03-0018-10

Microstructure evolution of internal defect healing zone in ZTC4 titanium alloy during hot isostatic pressing

GAO Wei¹, XU Qian², YIN Yajun³, FENG Xin^{1*}

(1. Cast Titanium Alloy Research and Development Center, AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China; 2. School of Mechanical Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430048, China; 3. State Key Laboratory of Materials Processing and Die and Mould Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The internal displacement change around shrinkage pores, stress and strain distribution, and microstructural evolution in the defect healing zone of ZTC4 titanium alloy during hot isostatic pressing (HIP) are investigated by numerical simulation combined with experimental methods. The results demonstrate that under the high-temperature and high-pressure conditions of HIP, high stress-strain zones form around the shrinkage pores. The stress magnitude shows an inverse relationship with the distance from pore surfaces, exhibiting higher stress levels in proximity to the pore boundaries. As the shrinkage pore size decreases, the strain concentration intensifies. After HIP, a radial pore-healing zone microstructure develops at the original shrinkage pore sites. Within this healed region, heterogeneous plastic deformation occurs among distinct α/β colonies. Colonies with more readily activated dislocation slip systems experience greater deformation magnitudes, ultimately leading to the formation of equiaxed grain structures.

Key words: titanium alloy; hot isostatic pressing; finite element method; healing zone; equiaxed grain

ZTC4 钛合金熔模精密铸造过程中, 熔炼浇注和热等静压是决定铸件最终质量的两大关键工艺环节。由于金属熔体在型壳内冷却凝固收缩和体积变化, 铸件内部不可避免地产生疏松、缩孔、气孔等孔洞类缺陷, 严重破坏材料的连续性。为消除

铸件的内部孔洞类缺陷, 提高铸件质量, 将热等静压技术应用于钛合金铸件的生产制造, 目前热等静压成为航空航天用钛合金铸件制造必不可少的重要工序。虽然经过热等静压, 钛合金铸件整体致密度显著提升, 可以消除铸件内部绝大多数缺陷, 致

密化程度接近 100%^[1],且力学性能提高,分散度降低,但是在铸件内部疏松缺陷位置处形成与基体微观组织不同的缺陷湮灭区。在 ZTC4 钛合金铸件承载拉伸、疲劳或蠕变持久过程中,铸件内部缺陷湮灭区会形成非均匀的应变分布,降低 ZTC4 钛合金铸件服役寿命和可靠性。多年来,研究人员在热等静压工艺参数对 ZTC4 钛合金组织和力学性能影响规律的研究方面,取得了一些成果^[2-7]。但是由于实验条件有限,在钛合金铸件热等静压缺陷弥合行为相关研究中,对内部孔洞类缺陷热等静压过程湮灭机理和整个湮灭生命周期的演变却鲜有研究,因此无法解释孔洞类缺陷弥合区变形组织的分布规律和组织特征产生差异的原因。

国内外科研工作者大多采用有限元数值模拟与实验相结合的方法研究金属材料孔洞缺陷湮灭机理。在热等静压数值模拟方面,采用有限元方法对热等静压缺陷闭合效果、应力场分布等数值模拟,并建立热等静压过程热力耦合模型,但是忽略了缺陷弥合区应力集中对孔周微观组织演变规律的影响^[8-11]。通过研究 7050 铝合金在热压缩过程中内部孔洞的演化行为,揭示了孔周应力集中对基体应力分布的影响机制^[12]。以扩散连接时的塑性变形机制、表面源机制与蠕变机制作用为基础,研究基体处理扩散连接界面孔洞闭合过程中各种机制作用的动力学条件,并建立金属扩散连接的孔洞闭合模型^[13]。对大锻件内部孔洞型缺陷的扩散焊合过程进行研究,在无压力条件下,孔洞首先在表面扩散机制控制下球形化,之后通过基体扩散焊合;在有压力条件下,孔洞在表面扩散和界面扩散机制共同作用下焊合^[14]。杨修波^[15]研究表明,孔洞型缺陷焊合的主要因素为温度、变形量、保温时间及应变速率,其中温度是影响焊合的主导因素。同时,采用热力耦合有限元法模拟锻造时大锻件内部孔洞的闭合过程,获得孔洞闭合过程中形状的演化过程。Epishin 等^[16]模拟了镍基高温合金 1/48 球体热等静压孔洞湮灭过程,并给出孔湮灭机制的数学模型。赵丽^[11]也提出一种高温合金热等静压工艺下蠕变孔洞的数学模型,该模型为选择合适的温度和压力提供依据。上述研究大多采用数值模拟有限元方法,研究内部孔洞变形、弥合和焊合过程中应力、应变和组织变化规律,鲜有采用数值模拟与准原位热等静压实验相结合的方法,准确揭示热等静压过程中内部孔洞缺陷压合机制及孔周组织演变规律。

本工作通过对铸造钛合金内部缩孔三维形状

尺寸及孔周微观组织演变的热等静压过程准原位跟踪研究,解答尚未明确的两个科学问题:第一,钛合金内部疏松缩孔缺陷压合过程中,变形组织仅形成于缩孔缺陷附近区域,而在远离缩孔缺陷位置组织不发生变形的原因;第二,疏松缩孔缺陷附近不同 α/β 集束的变形量和组织变形特征不同的原因。实验分析结果可为航空航天领域钛合金铸件损伤容限设计、强度、寿命估算等提供理论支撑,也为发动机低耗油率、长寿命和高可靠性设计提供技术支持。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

本工作所用材料为真空感应凝壳炉浇注热等静压 ZTC4(Ti6Al4V)钛合金,化学成分见表 1,试块尺寸为 20 mm×15 mm×15 mm。

表 1 ZTC4 钛合金化学成分(质量分数/%)
Table 1 Chemical composition of ZTC4 titanium alloy (mass fraction/%)

Al	V	O	N	H	C	Fe	Ti
6.58	4.22	0.16	0.011	< 0.001	0.007	0.14	Bal.

1.2 实验方法

分别采用型号为 GE X-Cub 的实时成像系统和型号为 Versa XRM-500 的三维 X 射线计算机断层扫描(3D X-ray computed tomography, 3D X-ray CT)系统表征 ZTC4 钛合金内部缩孔形貌,并对试样及其内部孔洞进行三维扫描数据重构,采用型号为 OLYMPUS GX71 的金相显微镜表征试块基体和缺陷弥合区微观组织,基于目前工程用 ZTC4 钛合金铸件的热等静压工艺参数(温度 900~930 °C、保温保压时间 120~180 min、压力 130~150 MPa),设计本工作热等静压温度、时间和压力参数。利用 ABAQUS 有限元模拟软件对 ZTC4 试样热等静压过程的应力应变场进行数值模拟,对几何模型进行网格划分,网格类型为 C3D10MT,数量为 15663。对热等静压应力-应变进行数值模拟过程中,采用修正后的弹塑性模型公式和 Norton 蠕变模型公式^[17],分别为式(1)和式(2):

$$\dot{\varepsilon} = A[\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (1)$$

$$\varepsilon = B\sigma^m \quad (2)$$

式中: $\dot{\varepsilon}$ 为应变速率; A 为材料的结构因子; α 和 B 为材料常数; σ 为等效应力; n 为应力指数; Q 为变形激活能; R 为气体常数; T 为变形温度; ε 为应变;

m 为 Norton 应力指数。通过压缩实验, 得到压缩应力-应变曲线, 采用 Arrhenius 方程^[18] 对塑性变形阶段进一步拟合, 得到 $n=5.9213$, $Q=428.957$ kJ/mol。采用 Norton 蠕变模型与文献 [19-20] 中单轴拉伸

蠕变曲线实验结果进行对比, 如图 1 所示, 吻合较好。采用 Norton 蠕变模型对 ZTC4 合金 500 °C 以上蠕变实验曲线进行拟合, 得到 B 和 m 参数的值, 如表 2 所示。

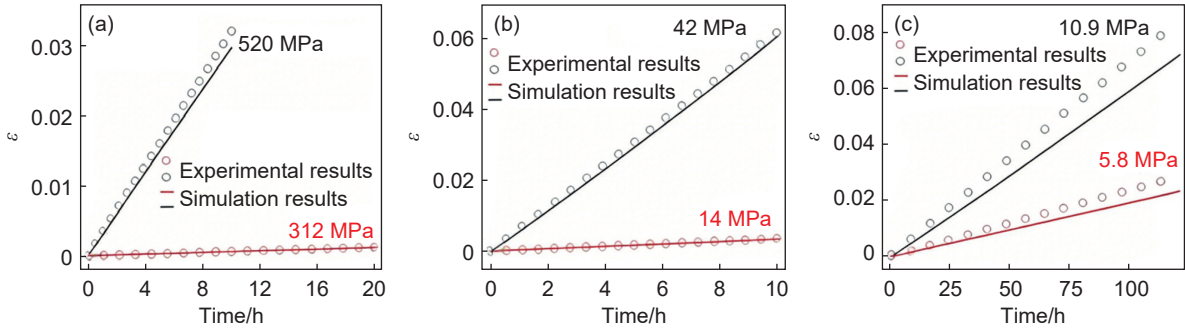


图 1 不同温度蠕变过程应变随时间变化关系实验与数值模拟对比^[19-20] (a)500 °C; (b)700 °C; (c)900 °C

Fig. 1 Comparison of experimental and numerical simulation results for the strain-time relationship during creep at different temperatures^[19-20] (a) 500 °C; (b) 700 °C; (c) 900 °C

表 2 不同温度 B 和 m 参数值

Table 2 Values of B and m parameters at different temperatures

$T/^\circ\text{C}$	B	m
500	1.5×10^{-29}	9.5
700	2.4×10^{-11}	4.2
900	1.2×10^{-5}	1.7

2 结果与分析

2.1 铸造 ZTC4 钛合金内部缩孔形貌及孔周微观组织

首先对铸造 ZTC4 钛合金热等静压前内部缩孔几何形貌进行表征, 作为热等静压试样的初始结构。图 2(a)、(b) 分别为 ZTC4 钛合金试样内部铸造缩孔缺陷二维实时成像和内部缩孔 3D X-ray

CT 三维形貌照片。从二维实时成像照片中可以看出, 试块中心存在多个缩孔缺陷, 但是由于个别缩孔形貌重叠, 无法准确识别各缩孔的三维结构几何尺寸和相对位置。采用 3D X-ray CT 技术可以精确地对内部缺陷进行三维扫描重构, 定量表征各缩孔的三维结构尺寸及不同缩孔间相对位置, 并输出用于可网格划分的 3D X-ray CT 点云数据, 并以此数据建立热等静压数值模拟用三维模型。

在热等静压过程中, 外部施加应力和内部缩孔三维结构尺寸共同影响孔周应力矢量大小, 进而影响内部缩孔体积收缩至湮灭的整个过程, 因此缩孔三维结构尺寸是影响热等静压缺陷弥合和孔周组织演变的直接因素。本工作采用铸造钛合金内部缩孔实际三维几何形状, 而非简化的球形或椭球形, 作为热等静压模拟用初始数学模型, 建立实际缩孔三维形貌与缩孔周边变形组织的同步演变规律, 准确揭示钛合金铸造缩孔热等静压弥合机理。

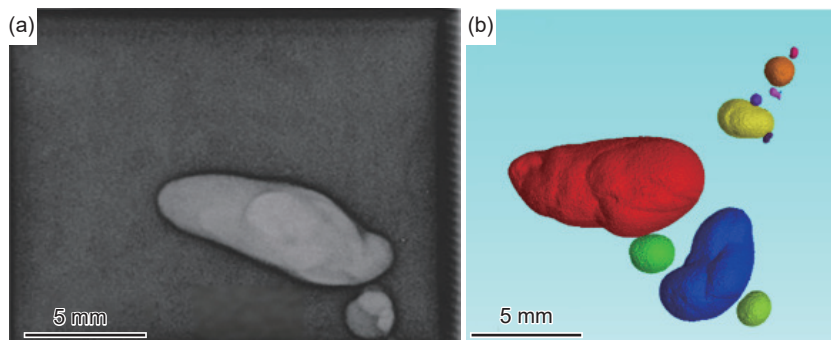


图 2 ZTC4 钛合金内部缩孔形貌 (a)试块实时成像照片; (b)3D X-ray CT 照片

Fig. 2 Morphologies of internal porosities in ZTC4 titanium (a) real time image of specimen; (b) 3D X-ray CT image

在热等静压保温保载过程中,孔周组织是影响载荷传递的主要因素。图3为ZTC4钛合金内部缩孔周边微观组织形貌,可以看出孔周边组织与基体组织形貌特征相同,均为由 α/β 集束和 α 相晶界组

成的魏氏组织,且未观察到沿孔周边 α/β 板条的扭折变形、等轴晶特征等,这是因为钛合金熔体冷却凝固过程体积收缩时,在缩孔周边未受到收缩阻力。

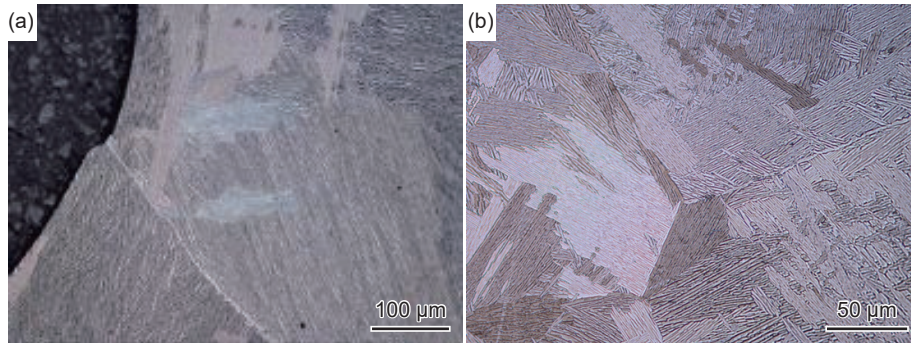


图3 ZTC4钛合金内部缩孔微观组织 (a)孔周;(b)基体

Fig. 3 Microstructures of the shrinkage pore in ZTC4 titanium alloy (a) surrounding area of the pore; (b) matrix

2.2 热等静压过程缩孔邻域应力、应变演变规律

ZTC4钛合金热等静压工艺曲线如图4所示,合金熔点高达1600~1700℃,热等静压保温温度一般设置为材料熔点的50%~80%,因此,热等静压工艺温度和压力参数分别选择为920℃和

130 MPa。本工作将ZTC4钛合金试样热等静压过程的应力场数值模拟过程分为3个阶段:(1)以8℃/min的速率进行升温直至920℃,升温过程同时升压;(2)在920℃/130 MPa条件下保温保压5 min;(3)随炉冷却至300℃后出炉。由于蠕变第1阶段时间较短,第3阶段对缺陷和组织演变没有影响,本工作仅考虑第2阶段稳态蠕变。本模拟用到的材料参数见表3^[21-22]。

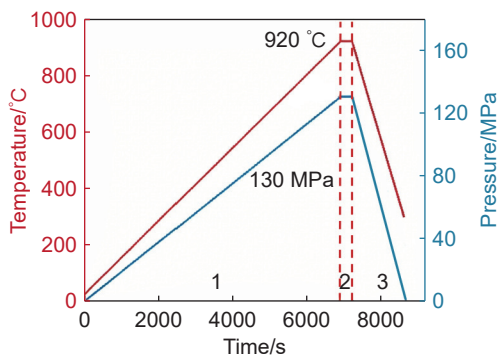


图4 ZTC4钛合金热等静压工艺曲线

Fig. 4 Hot isostatic pressing process curves of ZTC4 titanium alloy

网格划分后的模型如图5(a)所示,沿试样表面到内部缩孔表面的网格密度逐渐增加,以图5(b)中O点(红点)为原点,约束相邻3个面的法向位移,对试样所有外表面施加相同的应力和温度载荷。

ZTC4钛合金试样内部缩孔在热等静压过程170、5784、7200 s和9200 s 4个时刻位移、应力和应变的数值模拟结果如图6所示。对比4个时刻位移变化(图6(a-1)~(a-4)),可以看出在热等静压初期,材料受热向外膨胀的位移大于受热等静压压力向内收缩的位移,因此试样整体向外膨胀,位

表3 ZTC4钛合金模拟所用参数

Table 3 Parameters of ZTC4 titanium alloy used for the simulation

Temperature/°C	Thermophysical parameter		Young's modulus/GPa ^[21]	Poisson's ratio ^[22]	Density/(kg·m ⁻³) ^[21]	Yield strength/MPa ^[21]
	Thermal conductivity/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹) ^[21]	Specific heat capacity/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹) ^[21]				
25	6.368	589.35	114	0.3201	4418.0	900.13
300	11.70	636.76	99.6	0.3313	4382.8	645.06
700	17.85	786.95	77.2	0.3492	4323.5	190.85
900	21.80	1100.7	70.2	0.3663	4303.2	40.34
1000	24.20	669.66	69.6	0.3798	4305.5	22.78

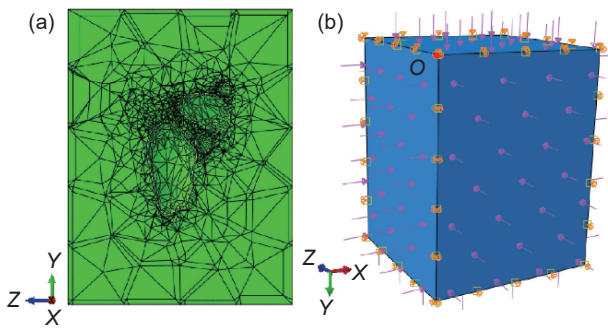


图5 有限元网格(a)及边界条件(b)

Fig. 5 Finite element meshes (a) and boundary conditions (b)

移梯度比较均匀。在热等静压升温升压阶段后期和保温阶段($t=5784\sim 7200$ s),材料受到热膨胀的影响微弱,外界应力占据主导地位,可以看出内部缩孔体积明显缩小,缩孔的湮灭主要发生在本阶段。对比不同时刻应力、应变变化(图6(b-1)~(b-4)、图6(c-1)~(c-4)和图6(d-1)~(d-4)),可以看出在热等静压过程中,从孔周到试样表面的等效应力和应变量逐渐减小,孔周发生明显蠕变和塑性变形,即在孔周邻域应力急剧增大,随着与孔周距离增大,应力迅速减小且趋于均匀,这是典型的应力集中

现象^[23],这一现象将持续到最大局部应力到达极限强度。在两个缩孔连通处和尖角部位呈现显著的应力应变集中,最大蠕变应变和最大塑性应变均发生在两孔连通位置,其值分别为0.044和1。另外,应力集中与孔径大小无关,而与孔周的几何形状有关^[1]。

对连通孔周的应力云图进行局部放大,如图7所示。在热等静压之前($t=0$ s),可以明显看出两个孔通过一个小通道相连(图7(a)中箭头所示)。当 $t=170\sim 5784$ s时,孔相连的位置出现应力集中(图7(b)、(c)),在 $t=6900$ s时,热等静压第1阶段结束通道闭合,连通孔分成两个独立的孔(图7(d))。由于两个孔的距离较近,小孔的变形受到大孔的牵制,小孔形状从球形变为椭球形,长轴方向指向大孔(图7(d)、(e))。这说明相邻两个孔在受热等静压高温高压作用下,大孔和小孔同时发生高温蠕变变形。由于大孔向内的位移变形量远大于小孔的位移量,因此小孔受到相邻大孔的位移牵引作用,而向大孔方向变形,由球形变为椭球形,并且在大孔、小孔连接处形成应力集中,随热等静压时间延长,在不断增加的应力作用下,连通孔闭合形成两个独立孔(图7(f))。这与以往研究结论一致,即

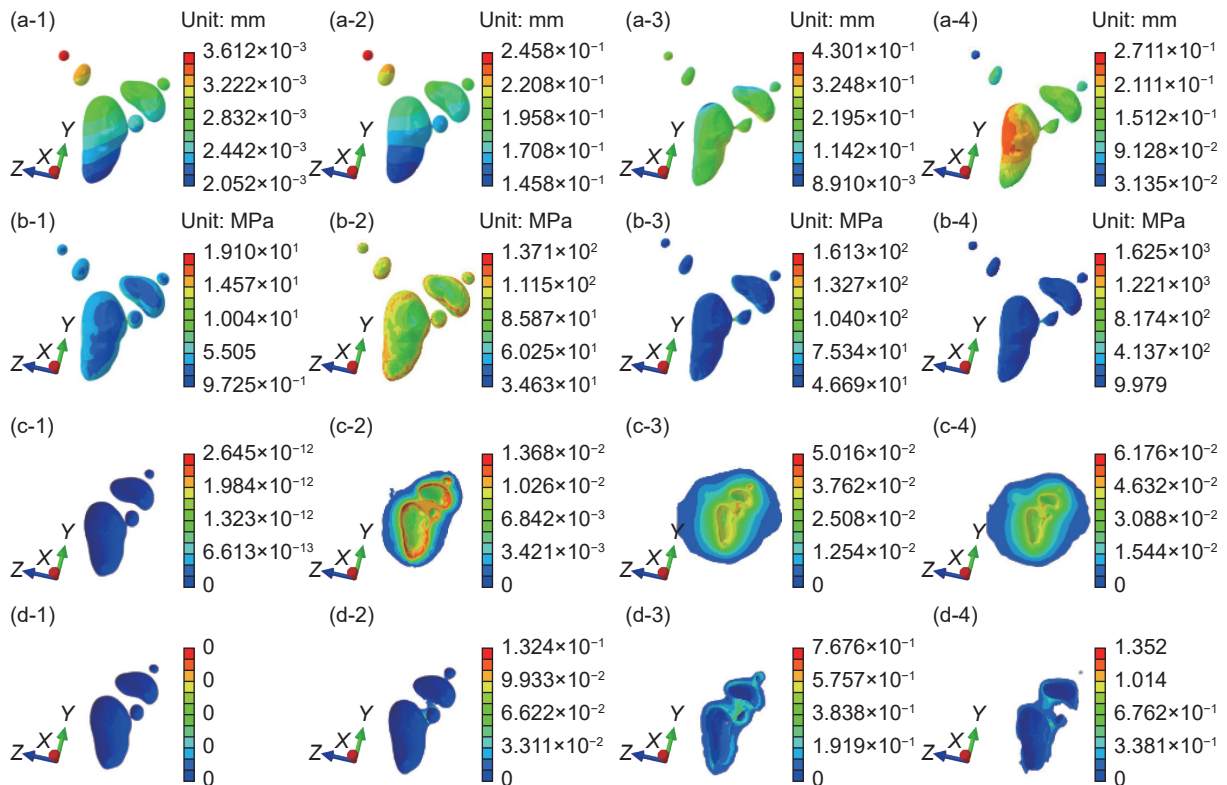


图6 ZTC4钛合金内部缩孔热等静压不同时刻位移(a)、Mises应力(b)、等效蠕变应变(c)和等效塑性应变(d)数值模拟结果 (1)170 s; (2)5784 s; (3)7200 s; (4)9200 s

Fig. 6 Numerical simulation results of displacement (a), Mises stress (b), equivalent creep strain (c), and equivalent plastic strain (d) for shrinkage pores in ZTC4 titanium alloy at different time during hot isostatic pressing (1) 170 s; (2) 5784 s; (3) 7200 s; (4) 9200 s

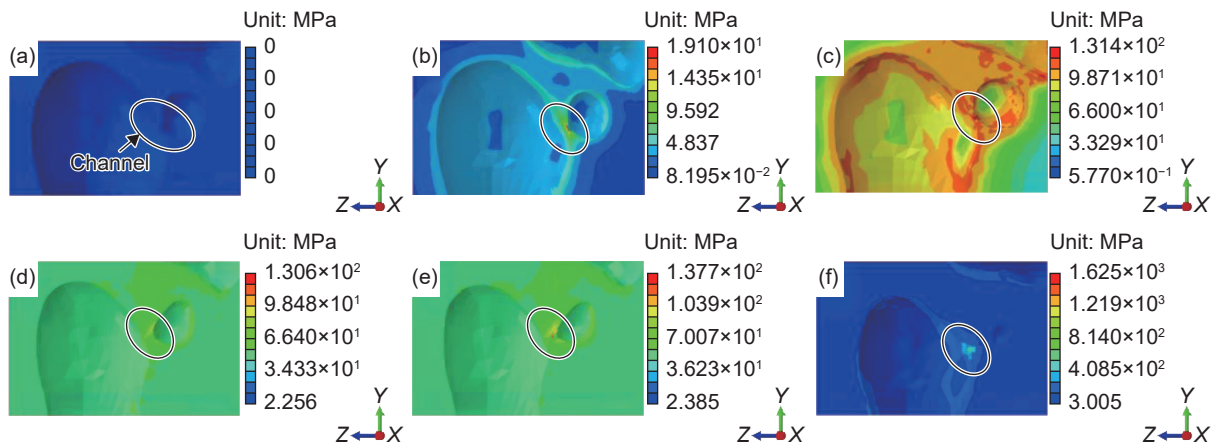


图 7 不同时刻孔周应力分布 (a) $t=0\text{ s}$; (b) $t=170\text{ s}$; (c) $t=5784\text{ s}$; (d) $t=6900\text{ s}$; (e) $t=7200\text{ s}$; (f) $t=9200\text{ s}$

Fig. 7 Distribution of stress around pores at different time (a) $t=0\text{ s}$; (b) $t=170\text{ s}$; (c) $t=5784\text{ s}$; (d) $t=6900\text{ s}$; (e) $t=7200\text{ s}$; (f) $t=9200\text{ s}$

孔洞边界周围的应力最大值位于孔洞拐角附近^[24]。

2.3 内部缩孔缺陷弥合区微观组织演变规律

图 8 为 ZTC4 钛合金热等静压 20 min 后缺陷弥合区微观组织形貌, 从图 8(a) 中可以看出缺陷处已形成放射状组织的缺陷弥合区, 而且在弥合区中心存在残留的未扩散焊合的孔洞(图 8(b)), 表明热等静压时间太短, 不足以将缩孔缺陷焊合, 这是由于缩孔焊合过程需要在一定的高温高压下, 自由面之间的原子活性达到一定条件进行, 且界面原子有足够时间扩散充分, 缩孔自由表面才能完全焊

合^[25]。所以热等静压保温保压 20 min 不足以满足缩孔自由面接触后充分扩散的条件, 因此遗留下未焊合的孔洞(图 8(b))。

在热等静压保温保压过程中, 孔周附近形成应力应变集中区(图 6 和图 7), 孔周附近微区受应力作用向孔内体积收缩变形, 于是在弥合区形成以孔心为中心的放射状变形组织。在放射状变形组织区, 以 α/β 集束为变形单元, 不同集束内变形量和变形组织特征不同。在个别集束内部(图 8(c))或集束界面处(图 8(d))形成等轴状晶粒, 然而有些

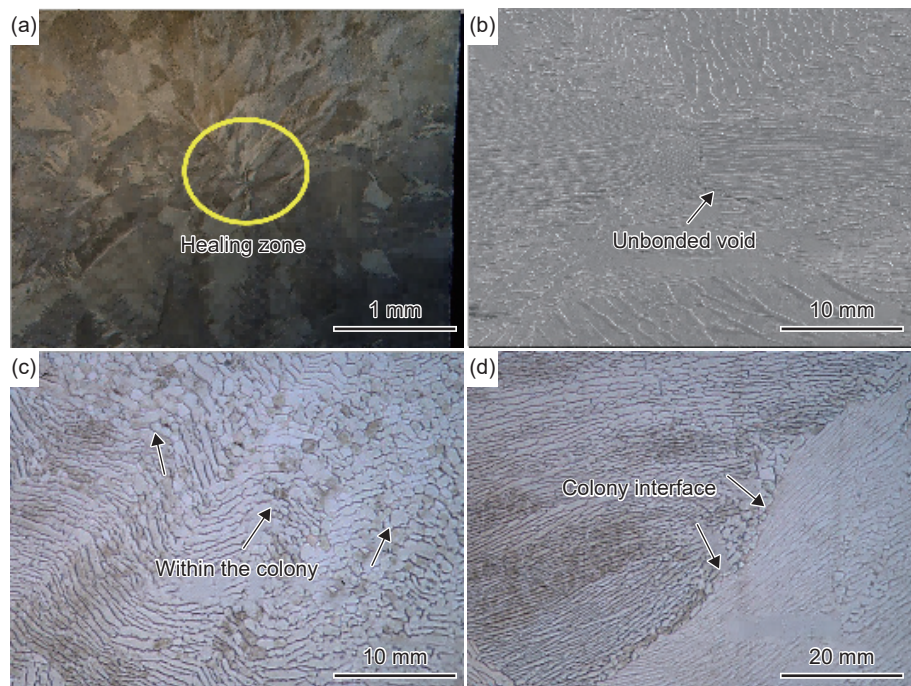


图 8 热等静压 20 min 后 ZTC4 钛合金内部缺陷弥合区(a)及其内部未焊合孔洞(b)、集束内部(c)和集束界面(d)微观组织

Fig. 8 Microstructures of the defect healing zone (a) as well as unbonded void (b), within the colony (c) and at the colony interface (d) in the zone of ZTC4 titanium alloy after 20 min of hot isostatic pressing

集束仅发生少量扭折变形,有些集束仅发生 α/β 板条粗化(图8(c)、(d)箭头所示位置),说明缺陷弥合区内不同集束内变形量并非均匀分布。在热等静压过程中,孔周邻域不同集束内 α/β 片层组织会发生扭折、破碎、等轴化等一系列组织演变行为。其中,不同集束中片层组织扭折程度不同,这与该集束等效应力大小和矢量方向相关,不同集束内等效应力不同导致板条扭折程度的差异^[26]。研究表明,这种差异取决于不同集束几何位置、晶体学取向和应力矢量大小造成的变形难易程度^[27],等轴晶形成位置与集束开动滑移系、临界分切应力有关。在ZTC4钛合金中,a型基面滑移和a型柱面滑移位错滑移所需临界分切应力(critical resolved shear stress, CRSS)比锥面滑移小,更容易开动,因此 α/β 板条集束中沿平行或垂直板条方向均容易开启位错滑移^[28],几何方向、晶体学取向均与压缩应力轴向平行的集束变形抗力最低^[29]。在平行 α 板条位错滑移系开动的集束中,应力分布相对均匀,因此等轴晶粒较均匀地形成于集束内部(图8(c));而在垂直 α 板条的位错滑移系开动的集束中,位错在集束界面处塞集,随着塞集位错密度增大,集束界面处应力增大,在高温高应力条件下相邻集束界面处的板条发生等轴化。同时,因为板条等轴化释放集束界面处位错塞集应力,未能引发相邻集束中新位错的启动,所以等轴晶仅产生于集束界面处,而未扩展至相邻的集束内(图8(d))。

图9为试样热等静压150 min后缺陷弥合区微观组织特征,可以看出试样内部缩孔均已被压合,并与热等静压20 min后的试样弥合区组织特征相似,在缺陷弥合区形成放射状微观组织,其中试样内部出现两个热等静压弥合区,说明该剖面存在两个独立的被压合缩孔缺陷。弥合区内 α/β 集束同

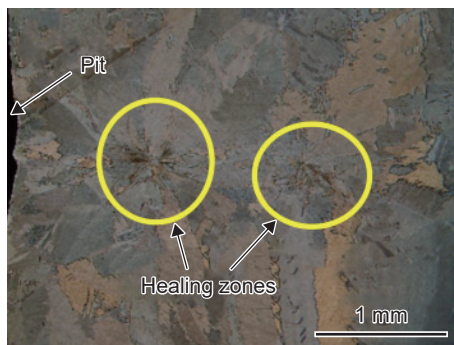


图9 热等静压150 min后ZTC4钛合金内部缺陷弥合区微观组织

Fig. 9 Microstructure of defect healing zone in ZTC4 titanium alloy after 150 min of hot isostatic pressing

样也发生了等轴化或扭折变形,说明在热等静压高温高压条件下,在高应力集中作用下缩孔缺陷周边微观组织发生塑性变形,而远离缩孔周边的片层组织仅发生粗化长大,这与图6中Mises应力和等效应变的数值模拟结果一致。

热等静压150 min后,在弥合区中心无残留孔洞,说明缩孔自由内表面在长时间保温保压条件下已发生原子扩散,完全被焊合。内部缩孔缺陷体积收缩后,在试样表面形成热压凹坑(图9),这是由于金属材料塑性变形体积不变,内部缩孔体积变小,相应试样外廓尺寸发生变化。因此,易发生变形的薄弱位置发生塑性变形,表面形成凹坑。对比热等静压150 min和20 min后的缺陷弥合区的变形组织面积,可以看出随着热等静压时间延长,缺陷弥合区变形组织面积增大,说明随着时间增加,孔周应力集中作用下,片层组织不断发生片层扭折、断裂和等轴化,这与文献[27]的研究结果一致。对比发现,热等静压150 min与20 min的相同集束组织变形特征一致,不同集束中组织变形特征均不同,在个别集束组织内部形成等轴晶,其他集束中 α 片层仅发生扭折变形而并未发生等轴化,说明不同 α/β 集束中的塑性变形量不同,导致组织变形特征不同,这取决于集束的晶体取向和等效应力矢量大小。因此,需进一步对比分析缺陷弥合区内不同变形组织特征的 α/β 集束晶体取向差异,以揭示 α/β 集束晶体取向、等效应力与变形组织特征之间关系。

为揭示ZTC4钛合金内部缺陷弥合区不同 α/β 集束变形组织特征不同的原因,对比分析弥合区集束变形组织特征与晶体取向关系,如图10所示。可以看出缺陷弥合区组织变形特征与图7中应力分布以及图8中组织变形特征相同,在集束4、5、6和7中均形成等轴晶组织,而其他集束中发生不同程度的扭折变形。扭折组织形成后集束晶体取向偏转,变形抗力降低,集束扭折区应变高于其他未变形区,在热等静压持续高温条件下板条易等轴化。对比发现,形成等轴晶的集束4、5和7的a型基面相互平行,且与集束6的a型柱面平行,施密特因子相差较小,而等轴晶的集束4、5、6和7与其他未等轴化的集束晶体取向相差较大。这表明,晶体取向相近的集束4、5、6和7的滑移系开动需要的最小分切应力更小,位错滑移系更容易开动;而其他集束晶体取向的基面和柱面滑移系开动临界分切应力更高,位错源开动更为困难,仅发生不同程度的扭折变形。这证明位错滑移系的开动与晶

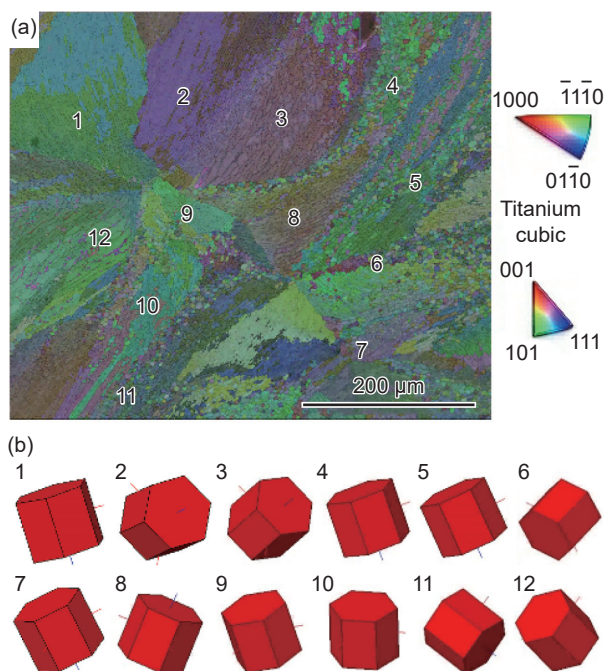


图 10 ZTC4 钛合金缺陷弥合区微观组织(a)及对应集束晶体取向(b)

Fig. 10 Microstructures of the defect healing zone in ZTC4 titanium alloy (a) and crystal orientation of the corresponding bundle (b)

体取向和外加应力密切相关^[27]。研究表明,高温低速加载条件下, α 板条比 β 板条的强度高3~5倍^[30-31],因此在热等静压高温低速加载工艺过程中,影响集束片层组织变形的关键行为是 α/β 板条的应变分离和转动,即从变形抗力较高的“硬”取向转动到变形抗力较低的“软”取向,这是导致局部特征晶体取向的 α/β 集束组织结构软化与热软化效应耦合,热等静压缺陷弥合区应变和变形组织局域化萌生和演化的原因。

3 结论

(1)以 ZTC4 钛合金试样的实际内部缩孔缺陷为研究对象,采用数值模拟和准原位实验表征相结合的方法,建立缩孔周边组织变形特征与孔周应力应变之间的关系规律,揭示热等静压过程中内部缩孔缺陷闭合、焊合及周边组织变形的主要机制。

(2)采用 3D X-ray CT 技术和 ABAQUS 有限元软件对热等静压过程中 ZTC4 试样内部缩孔周边的位移场和应力应变场进行数值模拟,结果表明,缩孔湮灭主要发生在热等静压升温升压阶段后期和保温保压阶段。热等静压过程中,等效应力从孔周到表面逐渐减小,并在缩孔表面有通道、尖锐面等地方出现应力集中,小孔的变形行为受到大孔

的牵制,热等静压过程中小孔的形状从球形变为椭圆形,长轴方向指向大孔。

(3) ZTC4 钛合金缩孔缺陷弥合区内的微区塑性变形分布不均匀,主要与 α 集束晶体取向和微区应力矢量大小相关。缺陷弥合区在位错滑移系容易开动的 α/β 集束中发生等轴化,在不易开动滑移系的 α/β 集束中形成不同程度的扭折组织,在个别集束中无变形仅发生板条粗化。这说明影响热等静压弥合区组织等轴化的主要机制是由集束晶体取向、等效应力矢量大小等引起的 α/β 板条应变分离和转动。

参考文献:

- [1] 江剑,孟凡昕,王海涛,等.热等静压工艺提升铸件致密度的研究[J].*中国铸造装备与技术*,2024,59(3):33-37.
JIANG J, MENG F X, WANG H T, et al. Research on hot isostatic pressing process to improve the density of castings[J]. *China Foundry Machinery & Technology*, 2024, 59(3): 33-37.
- [2] ATKINSON H V, DAVIES S. Fundamental aspects of hot isostatic pressing: an overview[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2000, 31(12): 2981-3000.
- [3] DU P A, ROSSOUW P. Investigation of porosity changes in cast Ti6Al4V rods after hot isostatic pressing[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2015, 24(8): 3137-3141.
- [4] 杨伟光,赵嘉琪,南海,等.热等静压工艺参量对 ZTC4 钛合金组织的影响规律[J].*材料工程*,2011,39(9):25-28.
YANG W G, ZHAO J Q, NAN H, et al. Effects of HIP treatment parameters on microstructure of ZTC4 casting titanium alloy[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2011, 39(9): 25-28.
- [5] 赵嘉琪,杨伟光,南海,等.热等静压工艺参数对 ZTC4 钛合金力学性能的影响[J].*材料工程*,2011,39(10):42-46.
ZHAO J Q, YANG W G, NAN H, et al. Effects of hot isostatic pressing treatment parameters on mechanical properties of ZTC4 casting titanium alloy[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2011, 39(10): 42-46.
- [6] 陈凯,田雪勇,石鹏.不同热处理状态 ZTC4 的铸件组织演变与性能研究[J].*铸造工程*,2023(增刊1):13-17.
CHEN K, TIAN X Y, SHI P. Study on the microstructure evolution and properties of ZTC4 castings in different heat treatment states[J]. *Foundry Engineering*, 2023(Suppl 1): 13-17.

- [7] 纪志军, 吴国清, 孙智, 等. 热等静压对 ZTC4 钛合金铸件内部孔洞缺陷显微组织性能的影响[J]. *铸造工程*, 2022, 46(4): 18-24.
JI Z J, WU G Q, SUN Z, et al. Effect of hot isostatic pressing on microstructure and microhardness of internal hole defects in ZTC4 titanium alloy castings[J]. *Foundry Engineering*, 2022, 46(4): 18-24.
- [8] 甘恬, 尹昊, 陈宇豪, 等. 基于 ABAQUS 的 ZTC4 合金热等静压变形数值模拟[J]. *特种铸造及有色合金*, 2024, 44(7): 928-934.
GAN T, YIN H, CHEN Y H, et al. Numerical simulation of hot isostatic pressing deformation of ZTC4 alloy based on ABAQUS[J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2024, 44(7): 928-934.
- [9] 田文卿, 蔡超, 郭瑞鹏, 等. 热等静压近净成形数值模拟研究现状与展望[J]. *机械工程学报*, 2024, 60(1): 13-26.
TIAN W Q, CAI C, GUO R P, et al. A review on numerical simulation of near net shaping hot isostatic pressing: current status and future prospects[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2024, 60(1): 13-26.
- [10] 李勇进, 马迎松, 屈浩宇, 等. 基于热-弹塑性-蠕变-相对密度耦合本构模型的热等静压数值模拟[J]. *广西科技大学学报*, 2024, 35(2): 136-144.
LI Y J, MA Y S, QU H Y, et al. Hot isostatic pressure numerical simulation based on thermos-elastoplastic-creep-relative density coupled constitutive model[J]. *Journal of Guangxi University of Science and Technology*, 2024, 35(2): 136-144.
- [11] 赵丽. 热等静压条件下镍基高温合金蠕变缺陷组织修复的机制及模拟[D]. 安徽: 安徽工业大学, 2021.
ZHAO L. Mechanism and simulation of microstructure repair of creep defect in nickel-based superalloy under hot isostatic pressing[D]. Anhui: Anhui University of Technology, 2021.
- [12] WU Y F, JIANG H X, ZOU C, et al. Numerical simulation of pore evolution of 7050 aluminum alloy during hot compression process[J]. *Materials Science Forum*, 2016, 879: 2119-2124.
- [13] 马瑞芳, 李森泉, 李宏, 等. 基于金属扩散连接机制动力学条件的空洞闭合模型[J]. *中国科学: 技术科学*, 2012, 42(9): 1081-1091.
MA R F, LI M Q, LI H, et al. Modeling of void closure in diffusion bonding process based on dynamic conditions[J]. *Science China: Technological Sciences*, 2012, 42(9): 1081-1091.
- [14] 刘丽娟. 大锻件材料内部空洞型缺陷高温焊接过程的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2010.
LIU L J. Study on the bonding process of inner void defects in heavy forging at high temperature[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2010.
- [15] 杨修波. Al-Zn-Mg(Cu) 合金的热处理、微观结构与性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2014.
YANG X B. Research on microstructures and properties of Al-Zn-Mg(Cu) alloy after different heat treatment[D]. Changsha: Hunan University, 2014.
- [16] EPISHIN A, FEDELICH B, LINK T, et al. Pore annihilation in a single-crystal nickel-base superalloy during hot isostatic pressing: experiment and modelling[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2013, 586: 342-349.
- [17] NORTON F H. The creep of steel at high temperature[M]. New York: McGraw-Hill, 1929.
- [18] SELLARS C M, MCTEGART W J. On the mechanism of hot deformation[J]. *Acta Metallurgica*, 1966, 14(9): 1136-1138.
- [19] REIS D A P, SILVA C R M, NONO M C A, et al. Effect of environment on the creep behavior of the Ti-6Al-4V alloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2005, 399(1/2): 276-280.
- [20] WARREN J, HSIUNG L M, WADLEY H N G. High temperature deformation behavior of physical vapor deposited Ti-6Al-4V[J]. *Acta Metallurgica et Materialia*, 1995, 43(7): 2773-2787.
- [21] 徐倩. Ti6Al4V 钛合金铸件热等静压孔洞缺陷湮灭行为及孔周组织演变规律的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2022.
XU Q. Research on the annihilation behavior of pore defects and evolution of microstructure around pore defects during hot isostatic pressing of Ti6Al4V titanium alloy castings [D]. Wuhan: Hua Zhong University of Science and Technology, 2022.
- [22] 周兆锋, 陈明和, 范平, 等. 钛合金 TC4 热应力校形的数值模拟[J]. *南京航空航天大学学报*, 2009, 41(5): 620-625.
ZHOU Z F, CHEN M H, FAN P, et al. Numerical simulation on hot sizing of titanium alloy TC4[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2009, 41(5): 620-625.
- [23] 闫思江, 曾显波, 李凡国, 等. 圆孔孔边的应力集中分析及优化[J]. *锻压装备与制造技术*, 2014, 49(6): 68-70.
YAN S J, ZENG X B, LI F G, et al. Integrated analysis and optimization of the stress concentrated on the hole edge[J]. *China Metal Forming Equipment & Manufacturing Technology*, 2014, 49(6): 68-70.
- [24] 白玉建. 远端均匀应力和/或非均匀温度加载作用下平面孔洞或异质夹杂周围应力集中问题研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2021.
BAI Y J. Research on stress concentration around planar holes or heterogeneous inclusions under remote stress and/or non-uniform temperature loading[D]. Nanchang:

- Nanchang University, 2021.
- [25] ALANKAR A, EISENLOHR P, RAABE D. A dislocation density-based crystal plasticity constitutive model for prismatic slip in α -titanium[J]. *Acta Materialia*, 2011, 59(18): 7003-7009.
- [26] FAN X G, ZENG X, YANG H, et al. Deformation banding in β working of two-phase TA15 titanium alloy[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2017, 27(11): 2390-2399.
- [27] 姜雪琦. TA15 钛合金应变局部化的组织相关性与预测研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2021.
- JIANG X Q. Study on the correlation between strain localization and microstructure of TA15 titanium alloy and its prediction[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2021.
- [28] ELETI R R, CHOKSHI A H, SHIBATA A, et al. Unique high-temperature deformation dominated by grain boundary sliding in heterogeneous necklace structure formed by dynamic recrystallization in HfNbTaTiZr BCC refractory high entropy alloy[J]. *Acta Materialia*, 2020, 183: 64-77.
- [29] 赵蒙, 李萍, 李成铭, 等. TA15 钛合金高温变形过程的介观模拟计算[J]. *稀有金属材料与工程*, 2015, 44(4): 927-932.
- ZHAO M, LI P, LI C M, et al. Mesoscale simulation on plastic deformation of TA15 titanium alloy at high temperature[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2015, 44(4): 927-932.
- [30] BIELER T R, SEMIATIN S L. The origins of heterogeneous deformation during primary hot working of Ti-6Al-4V[J]. *International Journal of Plasticity*, 2002, 18(9): 1165-1189.
- [31] FAN X G, YANG H. Internal-state-variable based self-consistent constitutive modeling for hot working of two-phase titanium alloys coupling microstructure evolution[J]. *International Journal of Plasticity*, 2011, 27(11): 1833-1852.

收稿日期: 2025-02-26; 录用日期: 2025-05-30

基金项目: 稳定支持项目(2019-363)

通讯作者: 冯新(1983—), 女, 博士, 高级工程师, 研究方向为铸造钛铝合金、钛合金, 联系地址: 北京市 81 信箱 21 分箱(100095), E-mail: xfeng12b@alum.imr.ac.cn

(本文责编: 陈 卉)