

# Ti6Al4V 钛合金热等静压过程温度与压力对孔洞闭合行为的影响

郅喜望<sup>1, 2</sup>, 李文<sup>1</sup>, 殷亚军<sup>1</sup>, 徐倩<sup>3</sup>, 南海<sup>2</sup>, 周建新<sup>1</sup>

(1. 华中科技大学材料成形与模具技术国家重点实验室, 湖北武汉 430074;

2. 北京航空材料研究院股份有限公司, 北京 100094; 3. 武汉轻工大学机械工程学院, 湖北武汉 430023)

**摘要:** 通过数值模拟研究了HIP温度(800~950 °C)和压力(20~160 MPa)对钛合金铸件内部孔洞闭合的影响, 并分析影响孔洞闭合的关键工艺参数。此外, 以920 °C/140 MPa热等静压工艺条件为例, 分析热等静压不同阶段孔洞闭合情况。结果表明, 当热等静压工艺参数 $T \geq 890$  °C且 $P \geq 80$  MPa时, 孔洞完全闭合, 且在该区间内, 压力参数对孔洞闭合的调控效果优于温度; 孔洞体积在HIP升温升压阶段(第I阶段)剧烈收缩, 该阶段是孔洞闭合的主导阶段。

**关键词:** 钛合金; 热等静压; 孔洞闭合; 温度与压力; 相对体积

## 作者简介:

郅喜望(1982-), 男, 博士生, 主要从事钛合金铸造和热处理技术研究。

E-mail: xyw\_963@163.com

## 通信作者:

殷亚军, 男, 副教授, 博士生导师。E-mail: yinyajun\_436@hust.edu.cn

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2025)08-1081-06

## 基金项目:

国家自然科学基金项目(52201042, 52401164)。

## 收稿日期:

2025-04-29 收到初稿,  
2025-06-06 收到修订稿。

Ti6Al4V钛合金因其低密度和高比强度的特性, 在航空航天领域得到广泛应用<sup>[1-2]</sup>。由于航空零部件普遍具有复杂几何结构, 精密铸造技术已成为钛合金复杂构件的首选成形工艺。然而该合金在凝固过程中存在显著体积收缩特性, 加之较宽的液固两相共存区间, 导致铸造过程中易形成缩孔和疏松等内部缺陷。为了获得具有高致密度的航空级精密钛合金铸件, 铸造后实施热等静压(Hot Isostatic Pressing, HIP)处理已被国际业界确立为标准工艺流程, 并作为关键工序纳入生产工艺体系<sup>[3]</sup>。该技术通过将铸件置于密闭容器中, 在高温环境下施加各向同性的静压力, 促使材料发生蠕变扩散, 从而实现内部孔洞的闭合与致密化<sup>[4]</sup>。

近年来, 针对热等静压工艺参数对钛合金显微组织及力学性能的影响机制已形成较系统的研究成果。王晓林等<sup>[5]</sup>对TC10合金的热等静压行为研究表明, 该处理显著改变了 $\beta$ 相转变路径: 原始粗大 $\beta$ 晶粒发生破碎重组, 同时晶内针状 $\alpha$ 集束通过界面迁移形成片层状结构, 该组织演变使合金伸长率、断面收缩率和冲击韧性均大幅度提升, 但强度略有损失。类似地, 曹恒等<sup>[6]</sup>在新型高温钛合金ZTi700SR中发现, 热等静压促使 $\alpha$ 相发生粗化转变, 导致室温及650 °C高温抗拉强度略有下降。Tianyu Liu等<sup>[7]</sup>通过构建Ti60合金工艺-组织-性能关系模型, 证实随着热等静压温度与压力的协同增加, 铸件内部孔洞通过塑性变形与扩散机制实现梯度闭合, 其中960 °C/125 MPa/2 h参数组合为最优工艺参数。综合研究结果表明, 热等静压通过消除铸造缺陷与优化相组成( $\alpha$ 片层结构粗化), 可使钛合金韧性指标提升, 同时因位错密度降低导致强度产生3%~8%可控范围内的适度下降。

热等静压温度与压力的协同作用对孔洞体积演化具有显著调控效应, 然而针对钛合金铸件在HIP过程中的孔洞闭合动力学机制仍缺乏系统性研究。当前孔洞闭合理论体系主要建立在锻压和轧制等塑性加工领域, 且普遍采用数值建模作为核心研究手段。孔洞闭合主要分为两个阶段: 孔面贴合(孔洞的机械闭合), 接触界面的焊合(冶金结合), 目前关于孔洞闭合的研究大多都只考虑孔洞的机械闭合。宁新禹<sup>[8]</sup>创新性地提出一种基于孔洞截面面积的压合判据, 并利用该判据对车轴钢在轧制过程中内部孔洞的演变行为进行数值模拟研究。田继红等<sup>[9]</sup>针对空心钢锭中存在的孔隙缺陷, 构建了可以反应体积变形率与塑性变形功率比值的孔洞闭合新判据, 成功预

测了空心钢锭内部孔洞缺陷在锻粗和自由锻等工序中孔洞闭合行为。Inseo Kim等<sup>[10]</sup>开发了一种适用于热锻过程的孔洞闭合预测模型,利用该模型确定孔隙完全闭合所需的压缩比或应变,并证明了该模型在热锻过程中的适用性。Antoine Geisler等<sup>[11]</sup>对大尺寸AISI410马氏体不锈钢模锻成形过程中的孔洞闭合进行了研究,对模锻过程孔洞闭合行为进行了解析建模和有限元模拟相结合的方法,以预测获得孔洞闭合所需的应力和应变,并通过代表工业锻造条件的圆柱试样热锻试验验证了模拟结果。HIP过程与锻造过程的孔洞闭合研究具有相似性,且由于HIP试验成本高等限制,本文采用数值模拟手段,基于已验证过的热弹性-蠕变本构模型<sup>[12]</sup>探究不同HIP工艺下孔洞闭合行为。

本文对不同HIP温度与压力下的孔洞闭合行为进行有限元数值模拟研究,分析HIP温度与压力对孔洞相对体积的影响,并以920 °C/140 MPa热等静压工艺参数为例,分析孔洞闭合过程特征点的应力应变演变过程,为Ti6Al4V钛合金铸件HIP工艺优化提供理论支撑。

## 1 模拟方法

### 1.1 几何模型

本文选用中国航发北京航空材料研究院制备的圆柱试样作为模拟的几何模型,圆柱试样的X光片如图1

(a)所示,可以看到,试样中心存在一个球形缩孔,由于该圆柱试样结构对称,为了节省计算资源,本文采用实际试样的四分之一进行数值模拟,模型中间孔洞为缩孔,几何模型的尺寸如图1(b)所示。

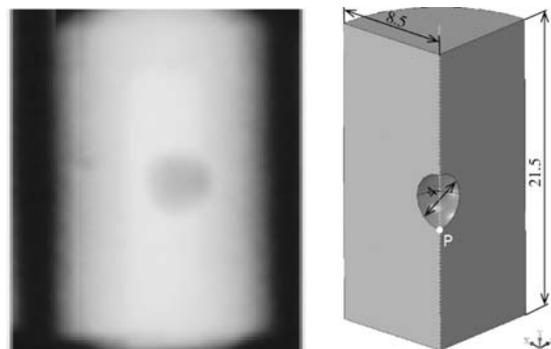


图1 Ti6Al4V合金试样几何模型

Fig. 1 Geometric model of the Ti6Al4V titanium alloy sample

### 1.2 模拟参数

在本文开展的有限元数值模拟研究中,Ti6Al4V钛合金的弹性模量、热导率、比热容及热膨胀系数等关键热力学参数均通过定制试验进行测定,其温度相关的热物性参数详见表1。鉴于材料密度随温度变化数值变化较小,模拟过程中将该参数恒定设为4.31 g/cm<sup>3</sup>。材料泊松比数据引自文献<sup>[5]</sup>。

表1 Ti6Al4V钛合金温度相关的热物性参数  
Tab. 1 Thermophysical parameters related to temperature of the Ti6Al4V titanium alloy

热力学性能	温度/°C					
	25	200	400	600	800	920
热导率/(W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	6.7085 2	8.3626 5	10.682 8	12.675 5	15.162 2	16.432 7
比热容/(J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	550	569	612	655	698	646
杨氏模量/GPa	112	104	92	76	56	42
泊松比 <sup>[13]</sup>	0.34	0.34	0.37	0.39	0.41	0.42
热膨胀系数/(1/K)	6.3 × 10 <sup>-6</sup>	9.2 × 10 <sup>-6</sup>	9.9 × 10 <sup>-6</sup>	1.1 × 10 <sup>-5</sup>	1.2 × 10 <sup>-5</sup>	1.2 × 10 <sup>-5</sup>

### 1.3 边界条件的设置

为确保数值模拟的顺利进行且还原HIP的工艺条件,需保证模型不产生刚体位移并施加相应的温度与压力载荷。本研究的约束体系设置如下:(1)模型底面施加法向位移约束( $U_z=0$ );(2)利用结构对称性特点,对A、B对称面施加对称边界条件;(3)孔结构表面定义自接触边界条件以防止穿透现象。在载荷边界条件设置方面,模型外表面同时承受热-力耦合作用,如图2所示。

### 1.4 孔洞体积计算方法

在数值模拟的后处理阶段,为精确表征孔洞演化

过程中体积动态变化,需计算孔洞体积。具体实现过程为:将孔洞表面离散化处理形成的三角网格单元作为计算基底,基于表面三角形单元与质心的空间几何关系,构建四面体微元体积的积分计算模型。通过累加各四面体微元体积,即可获得孔洞整体体积V,如公式(1)所示。

$$V = \frac{1}{6} \sum_{\tau \in \Gamma} \begin{vmatrix} x_{\tau,1} - x_0 & y_{\tau,1} - y_0 & z_{\tau,1} - z_0 \\ x_{\tau,2} - x_0 & y_{\tau,2} - y_0 & z_{\tau,2} - z_0 \\ x_{\tau,3} - x_0 & y_{\tau,3} - y_0 & z_{\tau,3} - z_0 \end{vmatrix} \quad (1)$$

式中: $\tau$ 是孔表面单元, $x_{\tau,i}$ 、 $y_{\tau,i}$ 和 $z_{\tau,i}$ ( $i=1, 2, 3$ )是三角形 $\tau$ 的顶点坐标, $x_0$ 、 $y_0$ 和 $z_0$ 是质心坐标,如图2

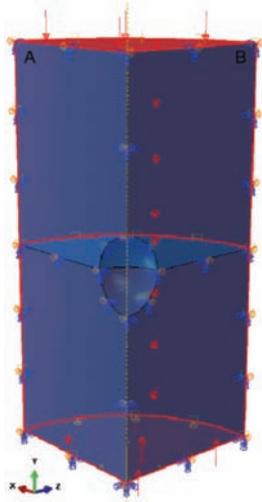


图2 边界条件的设置

Fig. 2 Settings of boundary conditions

所示。针对孔洞演化特征的定量表征需求，提取各时间步的孔洞表面节点坐标，通过式(1)实现体积的精确求解，即可得到HIP过程孔洞体积随时间的变化曲线。

## 2 结果与分析

### 2.1 HIP 温度与压力对孔洞闭合行为的影响

为定量研究HIP温度与压力对Ti6Al4V孔洞闭合的

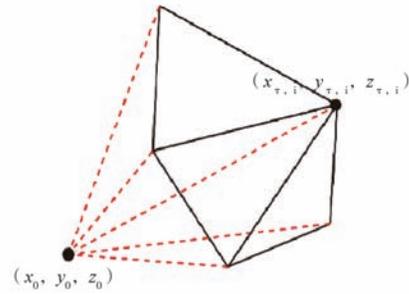


图3 孔洞体积求解方法示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the method for solving pore volume

影响规律，设计了不同温度（800，830，860，890，920，950 ℃）和压力（20，80，100，120，140，160 MPa）的组合方案。所有方案均采用20 min保温保压时间以保证工艺可比性。本文只考虑孔洞的机械闭合，参照文献[14]定义孔洞相对体积 $\eta=V/V_0 \leq 0.1\%$ 作为孔洞完全闭合的判据。图4展示了温度-压力参数空间内孔洞相对体积随时间的变化曲线，提取所有曲线的最终孔洞相对体积汇总于表2。结果表明，当 $T \geq 890$  ℃且 $P \geq 80$  MPa时，孔洞完全闭合，文献[15]中的试验结果验证了本文的模拟结果。在孔洞闭合工艺区间内，计算单位温度与单位压力增量引起的孔洞相对体积变化率，计算结果如图5所示。可以发现，随着HIP温度与压力的增加，孔洞相对体积变化率均呈现递减趋势，

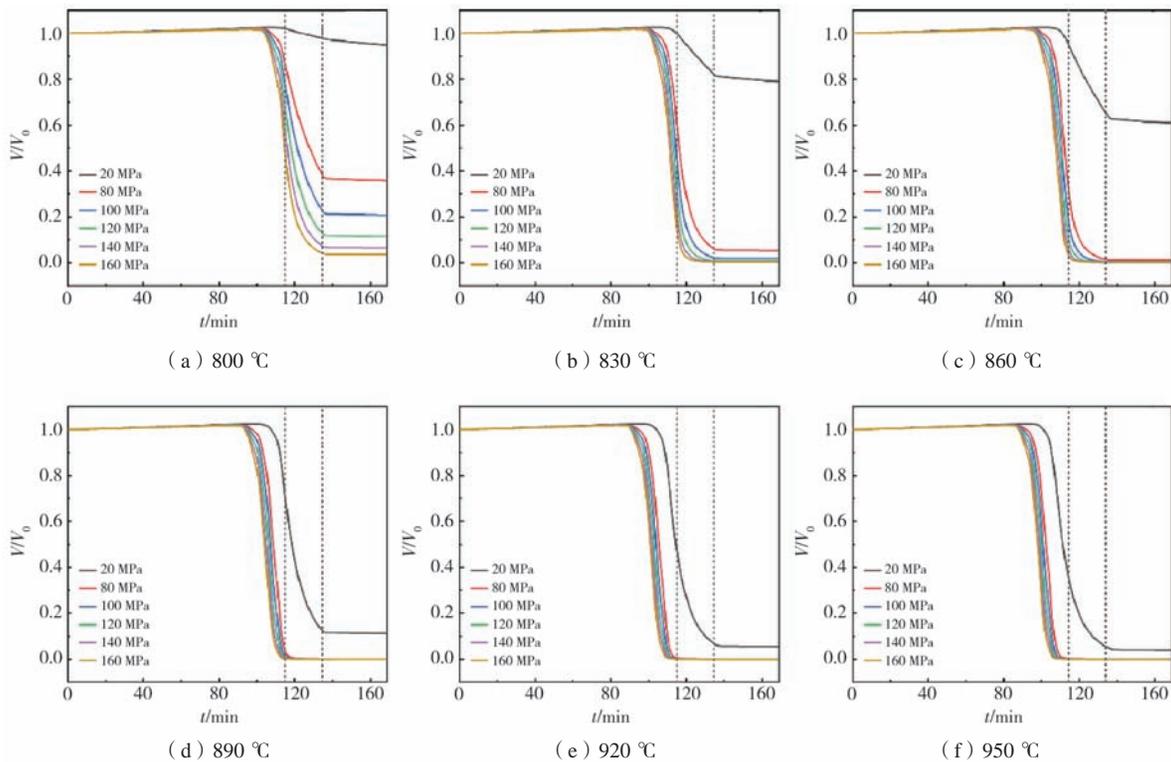


图4 不同HIP温度下孔洞相对体积演变过程

Fig. 4 Evolution of the relative volume of the pore under different HIP pressures

表2 不同HIP温度与压力下最终孔洞相对体积  
Tab. 2 The final relative volume of the pore under different HIP temperatures and HIP pressures %

温度/℃	压力/MPa					
	20	80	100	120	140	160
800	94.84	35.88	20.81	11.65	11.65	3.69
830	79.08	5.39	1.91	0.81	0.81	0.31
860	71.00	1.19	0.52	0.28	0.28	0.13
890	11.11	0.079	0.045	0.030	0.030	0.015
920	5.51	0.043	0.025	0.015	0.015	0.008
950	3.97	0.036	0.020	0.013	0.013	0.006

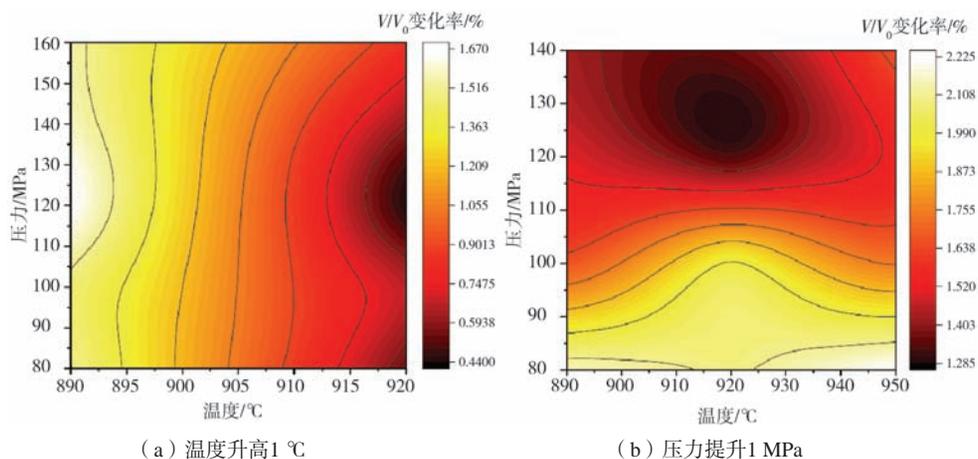


图5 HIP工艺参数对孔洞相对体积变化率的影响:  
Fig. 5 The influence of HIP process parameters on the change rate of relative volume of the pore

温度每提升1℃对应 $\eta$ 范围约为0.44%~1.67%，而压力每增加1 MPa对应 $\eta$ 范围约为1.285%~2.225%，压力参数对孔洞闭合的调控效果优于温度参数，这是由于随着压力的升高，等效应力场对位错运动的激活效率显著提升，且加速驱动空位从孔洞表面（高化学势）向晶界/位错（低化学势）定向迁移，导致孔洞在压力的影响下更容易闭合。

## 2.2 HIP 过程孔洞闭合行为分析

以HIP工艺参数920℃/140 MPa为例，分析HIP过程三个不同阶段孔洞的闭合行为，其中升温升压过程定义为第Ⅰ阶段（0~115 min），保温保压过程定义为第Ⅱ阶段（115~135 min），降温降压过程定义为第Ⅲ阶段（135~168.3 min）。孔洞相对体积随时间的变化曲线如图6中的黑色曲线所示，孔洞闭合速率随时间的变化曲线用红色虚线表示，可以看出，在第Ⅰ阶段，气孔相对体积先缓慢增加，这是源于材料热弹性应变主导的膨胀效应，第Ⅰ阶段热变形为主要变形方式，随后孔洞相对体积迅速降至0.109%，这是由于随着温度和压力的升高，在位错滑移与扩散蠕变耦合的作用下，孔洞体积迅速下降；在第Ⅱ阶段，孔洞相对体积

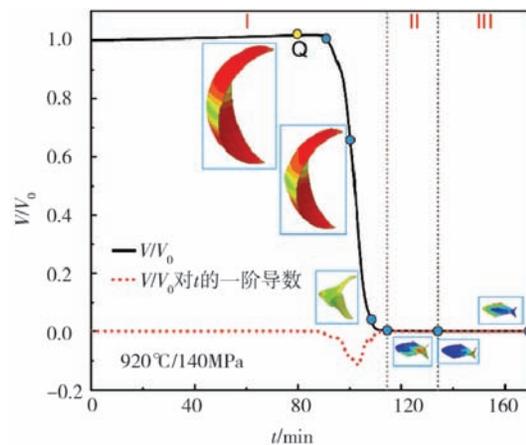


图6 920℃/140 MPa热等静压工艺下孔洞相对体积演变过程  
Fig. 6 Evolution of relative volume of the pore under HIP at 920℃/140 MPa

降至0.011%；在第Ⅲ阶段，孔洞体积几乎保持不变。整个闭合过程中，第Ⅰ阶段变形最为剧烈，贡献了总致密化量的99.89%。

为直观了解HIP气孔闭合过程，选取六个时间点： $t=92.52$ 、 $100.85$ 、 $107.52$ 、 $115$  min（第Ⅰ阶段）， $t=135$  min（第Ⅱ阶段结束）和  $t=168.33$  min（第Ⅲ阶段

结束), 这些节点下 Ti6Al4V 的 Mises 应力云图如图7 (a-f) 所示。可以发现, 在整个HIP过程中, Mises应

力主要分布于孔周, HIP结束后, 孔周Mises应力随着外部应力的释放而逐渐降低, 但残余应力仍然存在。

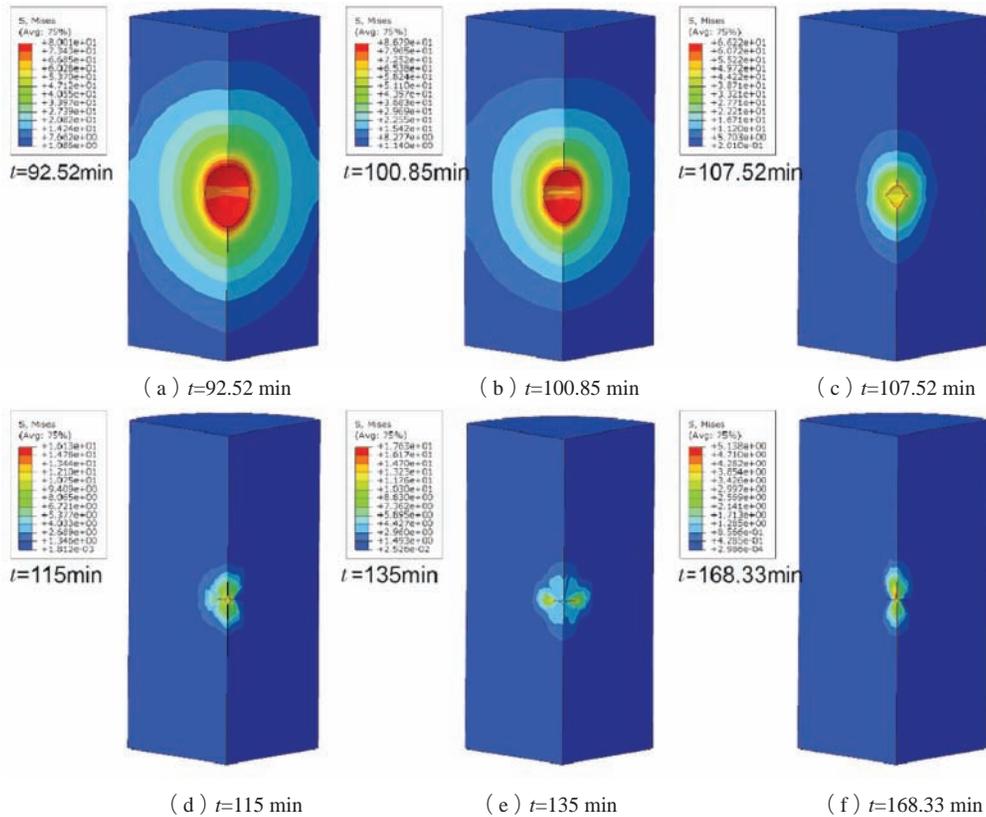


图7 不同时刻HIP过程孔洞闭合行为

Fig. 7 Closure behavior of the pore during hot isostatic pressing at different times

为阐明孔洞闭合过程的力学机制演变规律, 绘制了特征节点P[标记于图1(b)中]随时间变化的Mises应力、蠕变应变曲线, 并结合第I阶段峰值特征点A的力学状态进行解析, 如图8所示。发现当加载至A点 ( $t=80\text{ min}$ ) 时, 等效应力达到峰值112.4 MPa, 此时材料进入塑性流动临界状态。由于蠕变激活引发应力弛豫效应, 应力值在后续时段下降31.8%至76.7 MPa, 此阶段处于HIP初期, 温度较低, 受限于较低的蠕变活性, 孔洞体积未发生明显变化。随着继续升温升压, 材料进入扩散蠕变主导阶段, 蠕变速率呈指数上升, 孔洞体积开始剧烈下降。当HIP结束, P处的蠕变应变为2.09。

### 3 结论

- (1) 当 $T \geq 890\text{ }^\circ\text{C}$ 且 $P \geq 80\text{ MPa}$ 时, 孔洞完全闭合。
- (2) 在 $T \geq 890\text{ }^\circ\text{C}$ 且 $P \geq 80\text{ MPa}$ 区间内, 压力参数对孔洞闭合的调控效果优于温度参数, 这是由于等效

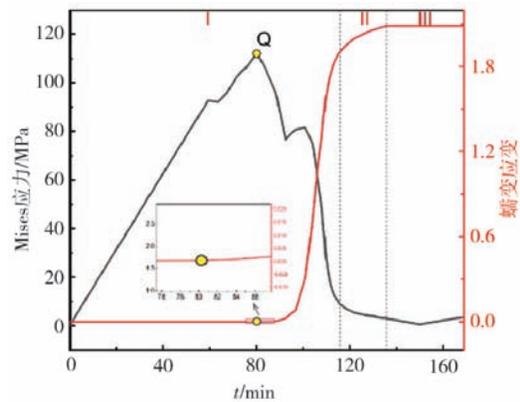


图8 920 °C/140 MPa热等静压工艺下孔洞特征点处蠕变应变  
Fig. 8 Creep strain at the characteristic point of the pore under HIP at 920 °C/140 MPa

应力场对位错运动的激活效率显著提升, 导致孔洞在压力的影响下更容易闭合。

- (3) 孔洞闭合过程中, 第I阶段变形最为剧烈, 这是由于材料进入扩散蠕变主导阶段, 蠕变速率呈指数上升, 孔洞体积开始剧烈下降。

## 参考文献:

- [1] 张鹏飞, 张林嘉, 周瑜, 等. 钛合金精密铸造技术在航空航天领域的应用进展 [J]. 航空制造技术, 2025, 68 (7): 22-36.
- [2] 冉兴, 陈义斯, 高晓慧, 等. 离心精铸大型钛合金机匣铸造模拟及缩松缩孔缺陷分析 [J]. 铸造, 2025, 74 (3): 344-349.
- [3] 邵冲, 尹法杰, 朱小平, 等. 热等静压对铸件致密化及组织演变机理的影响研究 [J/OL]. 粉末冶金工业, 2016, 26 (2): 63-67.
- [4] 冯广召, 李少楠, 程运超, 等. 热等静压处理对ZL205A合金组织的影响 [J]. 铸造, 2021, 70 (9): 1043-1046.
- [5] 王晓林, 王兰芳, 朱仲忍, 等. 热等静压处理对TC10合金铸造组织与性能的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2011, 31 (8): 760-761.
- [6] 曹恒, 刘茵琪, 刘喜波. HIP对新型高温钛合金ZTi700SR微观组织及拉伸性能的影响 [J]. 材料开发与应用, 2023, 38 (4): 89-91.
- [7] LIU T Y, SHI K, ZHAO J, et al. Effect of hot isostatic pressing processing parameters on microstructure and properties of Ti60 high temperature titanium alloy [J]. China Foundry, 2023, 20 (1): 49-56.
- [8] 宁新禹. 车轴钢连铸坯热芯大压下轧制工艺孔洞压合及损伤开裂研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2022.
- [9] 田继红, 张铭心, 袁海伦, 等. 自由锻工序对空心钢锭内部孔洞闭合规律的影响 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (10): 176-184.
- [10] KIM I, PARK J, KIM J, et al. A generalized void closure model in hot forging process of superalloys [J/OL]. Journal of Materials Research and Technology, 2025[2025-04-28].
- [11] GEISLER A, SADEGHIFAR M, MORIN J B, et al. Void closure during open die forging of large size martensitic stainless-steel ingots: an experimental-analytical-numerical study [J/OL]. International Journal of Material Forming, 2022, 16 (1): 11.
- [12] XU Q, LI W, YIN Y, et al. Closure behavior of the artificial gas pore inside the as-cast Ti6Al4V alloy during HIP: constitutive modeling and numerical simulation [J]. Metals, 2021, 11 (10): 1598.
- [13] 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.
- [14] CZEMPAS D, LIEBSCH C, HIRT G. Integration of a void healing criterion in multi-scale modeling of hot rolling [J]. Advances in Industrial and Manufacturing Engineering, 2024, 8: 100134.
- [15] XU Q, ZHOU J X, NAN H, et al. Effects of hot isostatic pressing temperature on casting shrinkage densification and microstructure of Ti6Al4V alloy [J]. China Foundry, 2017, 14 (5): 429-434.

---

## Influences of Temperatures and Pressures on the Pore Closure Behavior During the Hot Isostatic Pressing Process of Ti6Al4V Titanium Alloy

QIE Xi-wang<sup>1,2</sup>, LI Wen<sup>1</sup>, YIN Ya-jun<sup>1</sup>, XU Qian<sup>3</sup>, NAN Hai<sup>2</sup>, ZHOU Jian-xin<sup>1</sup>

(1.State Key Laboratory of Materials Processing and Die & Mould Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China; 2. Beijing Institute of Aeronautical Materials Co., Ltd., Beijing 100094, China; 3. School of Mechanical Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, Hubei, China)

**Abstract:**

The effects of HIP temperature (800-950 °C) and pressure (20-160 MPa) on internal pore closure in a titanium alloy casting were investigated via numerical simulation. Key process parameters influencing pore closure were systematically analyzed. Taking the HIP condition of 920 °C /140 MPa as an example, the pore closure behavior was further examined across different HIP stages. The results indicated that complete pore closure was achieved when  $T \geq 890$  °C and  $P \geq 80$  MPa. Within this parameter range, HIP pressure exhibited a more pronounced regulatory effect on pore closure compared to HIP temperature. Additionally, the pore volume underwent drastic contraction during the heating and pressurization stage (Stage I), which was identified as the dominant phase for pore closure.

**Key words:**

titanium alloy; hot isostatic pressing; pore closure; temperature and pressure; relative volume