

热等静压对铸造铝合金气孔缺陷的影响

曲银辉¹, 韩鹏江², 纪校君³, 王书晗¹, 胡大川¹, 姜宏顺¹, 王涛¹, 董生生¹, 吴华峰¹

(1. 沈阳铸造研究所有限公司, 辽宁沈阳 110022; 2. 空军装备部驻辽阳地区军事代表室, 辽宁辽阳 110043;
3. 北京新风航天装备有限公司, 北京 100044)

摘要: 研究了热等静压对ZL205A合金气孔缺陷的影响。结果表明: 热等静压处理会压扁气孔, 但由于存在氧化膜, 界面之间没有形成各元素的完全扩散, 未达到冶金结合, 经热等静压和热处理后原有气孔缺陷变成线性缺陷。

关键词: ZL205A; 热等静压; 气孔缺陷

热等静压 (Hot Isostatic Pressing, 即HIP) 是一种在加热过程中, 利用高压气体作为外力均匀作用于铸件, 消除铸件中某种孔洞类缺陷, 提高铸件的致密度从而提高铸件力学性能的一种工艺方法。目前主要应用于核材料、航空航天材料、硬质合金、高温合金与陶瓷材料的制备与开发, 高温合金、钛合金、铝合金等铸件的致密化处理或缺陷修复等领域的开发及应用。目前铝合金铸件热等静压工艺对力学性能及疲劳性的影响有研究, 对铝合金铸件各种缺陷的消除效果的研究很少^[1-4]。本文研究了热等静压对ZL205A合金气孔缺陷的影响, 以期对相关技术人员提供参考。

1 试验过程

为了解热等静压对ZL205A合金气孔缺陷的影响, 设计了模拟试验, ZL205A合金成分如表1, 表2为热等静压工艺参数^[5]。为避免过烧, 热压温度不能超过ZL205A合金的固溶温度 (538 °C), 考虑到热压处理炉的炉温偏差等因素, 选择 (520 ± 10) °C; ZL205A合金在热压温度下强度不高于100 MPa, 所以热压压力选择120 MPa, 保压时间2 h。热压处理炉内的气体介质为氩气。

1.1 试样制作

使用ZL205A金属型试棒加工成 $\Phi 14 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 的试样, 并在试样的中心加工出 $\Phi 4 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 的小孔, 然后在周边加工出45°的坡口, 共加工6个。加工后每两个试样对焊在一起, 使用本体焊丝采用氩弧焊的焊接工艺。加工试样尺寸见图1, 中间形成密闭的孔洞, 类似铸件中的气孔缺陷, 共制作3个。

1.2 试验过程

将对焊后的试样进行X光检测, 检测结果见图2a。然后对试样进行热等静压, 热压后再次进行X光检测, 检测结果见图2b。可以看出, 热等静压后, 从X光结果来看, 气孔缺陷未发现。然后将试样进行热处理, 热处理工艺见表3。热处理后再次进行X光检测, 检测结果见图3, 发现原气孔缺陷位置出现“丫”形线状缺陷显示, 同时试样的对接面出现裂纹。

将图3中1号试样沿轴方向从中间切开, 观察“丫”形线状缺陷位置 (图4中方框区域) 的金相组织。将2号试样沿横向开裂面断开, 观察对接面开裂处的表面形貌和化学成分。

作者简介:

曲银辉 (1979-), 男, 高级工程师, 主要从事铝、镁合金铸造技术工作。
E-mail: qyhsy@163.com

中图分类号: TG146.21
文献标识码: B
文章编号: 1001-4977 (2021) 10-1228-05

收稿日期:

2020-12-24 收到初稿,
2021-07-03 收到修订稿。

表1 ZL205A合金化学成分
Table 1 Chemical composition of ZL205A alloy

主要元素								杂质元素			
Cu	Mn	Ti	Cd	V	Zr	B	Al	Fe	Si	Mg	其他元素
4.6~5.3	0.3~0.5	0.15~0.35	0.15~0.25	0.05~0.3	0.05~0.2	0.005~0.06	余量	≤0.15	≤0.06	≤0.05	≤0.3

表2 热等静压工艺参数
Table 2 Parameters of hot isostatic pressing process

温度/°C	压力/MPa	保压时间/h
520 ± 10	120	2

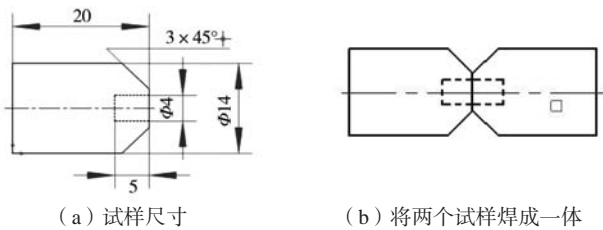


图1 模拟气孔试样制作示意图
Fig. 1 Schematic diagram of simulated sample with pores

表3 热处理工艺
Table 3 Heat treatment process

工艺方法	固溶、时效温度/°C	时间/h	冷却温度/°C	冷却介质
固溶处理	538 ± 5	10	50 ± 5	
人工时效	175 ± 5	4		空气

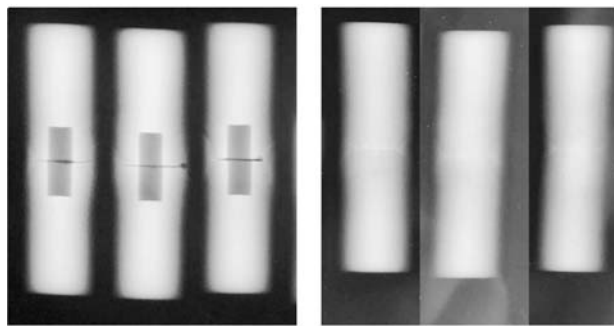


图2 试样热压前后X光检测结果
Fig. 2 X-ray inspection results of samples before and after HIP

观察1号试样的金相组织，具体见图5。可以看出，确实存在未熔合区域，即热等静压对气孔缺陷虽然能够在一定程度上弥合，但不能达到完全冶金结合。

使用电镜观察2号试样开裂面的表面形貌（图6），并用电子探针检测表面化学成分（图7）。从开裂面表面形貌来看，表层为典型的氧化物结构。从表面的化学成分构成来看，除了正常的合金元素外，含

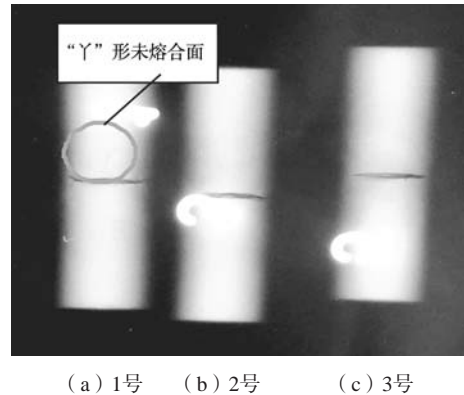


图3 试样经热压、热处理后X光检测结果
Fig. 3 X-ray inspection results of samples after HIP and heat treatment

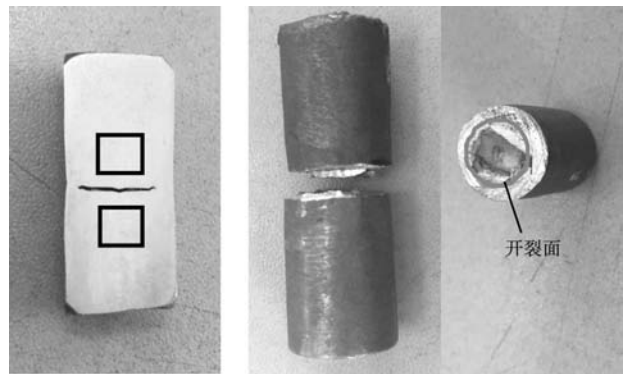


图4 分析试样示意图
Fig. 4 Schematic diagram for analytical samples

有一定比例的氧元素。

2 结果与分析

综上所述，将试样热压并热处理后原气孔位置出现的“Y”形线状缺陷的产生过程及机理分析如下。

2.1 “Y”形线状缺陷形成过程

图8所示为试样的示意图，图中虚线为气孔热压前的轮廓，箭头方向为试样在热压过程中的受力方向，在高温高压力的作用下气孔周围的部分开始发生塑性变形，并向气孔内部延展，最终在气孔内部形成“Y”形的弥合界面，当进行X光检测时会显示为“Y”形线状缺陷。

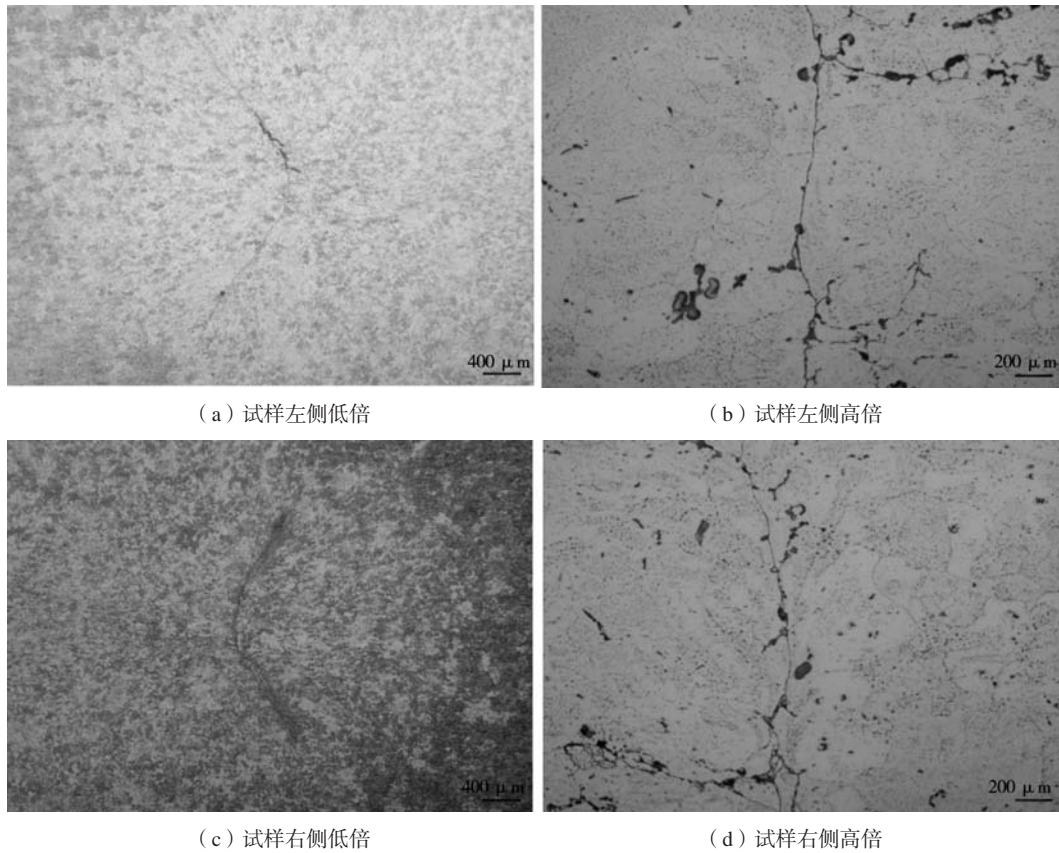


图5 1号试样金相组织图

Fig. 5 Metallographic structure of No.1 sample

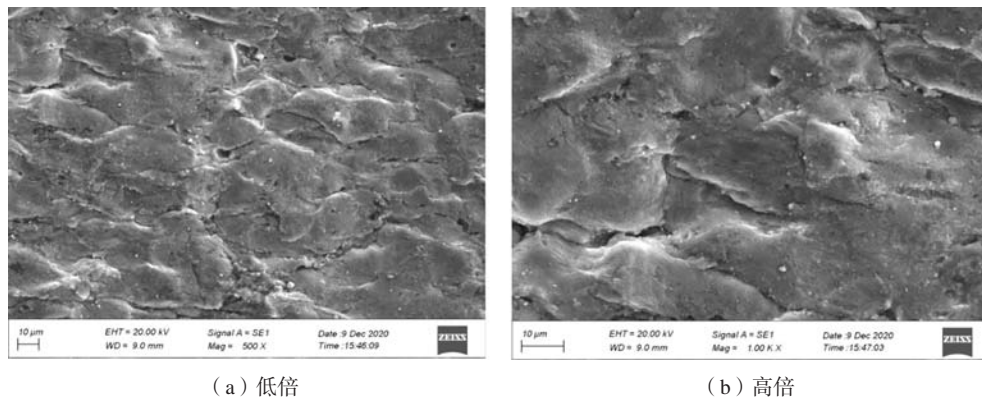


图6 2号试样开裂面表面形貌

Fig. 6 Crack surface morphology of No.2 sample

2.2 “Y”形线状缺陷及对接面裂纹形成机理

在试样的制作过程中气孔表面与空气接触后表面会形成一层氧化膜。当试样对焊后，其内部的密闭气孔中为空气，而热压过程的高温也会促进空气中的氧气与气孔表面反应产生氧化膜。氧化膜的成分一般为氧化铝 (Al_2O_3)，熔点为 $2\ 054\ ^\circ\text{C}$ ，以一种惰性化合物的状态分布在气孔表面。当进行热等静压处理时，气孔周围的合金组织在高温高压的作用下产生塑性变形，进而向缺陷内部延展、蠕变，填补气孔缺陷使其

在一定程度上弥合，形成弥合界面。然而由于氧化膜的存在，在弥合时形成的界面上各元素之间没有达到完全的化学扩散，未达到冶金结合，界面没有完全消失，缺陷形成线性的密闭空腔。而热处理时又使合金处于高温状态，但没有外在的高压压力作用，原来扩散到合金内部的气体再次析出，弥合界面处的密闭空腔体积增大，在宏观上显示为线状缺陷。同理，对接面在压力的作用下弥合，但因为氧化膜的存在，未达到冶金结合，热处理过程气体再次析出使得弥合面分

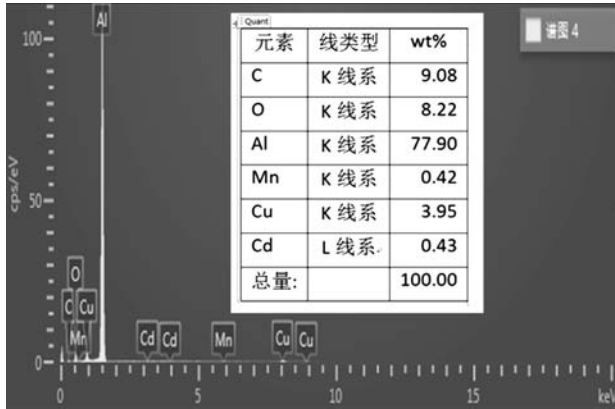


图7 开裂面表面化学成分构成
Fig. 7 Chemical composition of crack surface zone

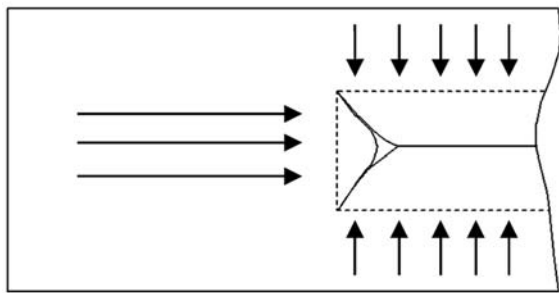


图8 “Y” 线状缺陷形成示意图
Fig. 8 Forming a schematic of Y style defect

开，宏观上显示为裂纹缺陷。

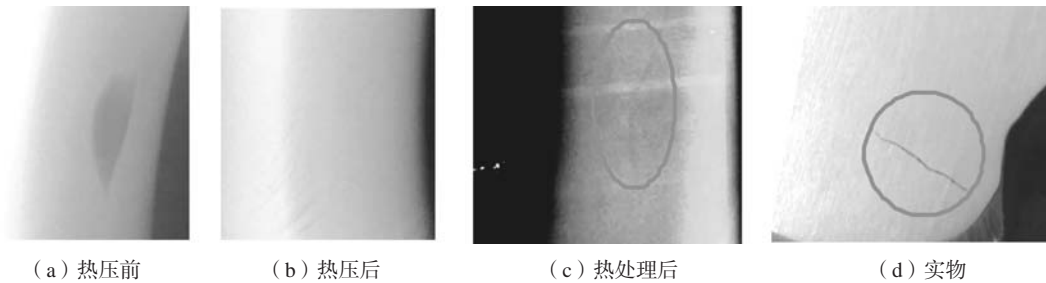
3 实际验证

为了对上述的试验结果进一步验证，从铸件上寻找一个带有气孔缺陷（直径约10 mm）的试样进行热压，热压前、热压及热处理后的X光检测结果和实物见图9。即热压后X光检测未发现气孔缺陷，但热处理后发现原气孔缺陷位置变成线性缺陷，将试样按缺陷位置剖开，肉眼可视存在线状缺陷。也就是说通过热压将气孔压扁，但界面之间没有形成各元素的完全扩散，没有达到冶金结合。

4 结束语

通过ZL205A合金的热等静压模拟气孔试验和实际验证结果，发现热等静压处理会使铝合金内部的气孔缺陷在一定程度上弥合，但由于气孔表面存在氧化膜，阻碍了界面上各元素的完全扩散，界面上未达到冶金结合状态，因而通过热处理后压扁的气孔缺陷变为线状缺陷，与裂纹缺陷类似，对铸件的危害性增加。也就是说，热等静压处理不适合消除铝合金内部的气孔缺陷。

采用热等静压来消除铝合金铸件疏松等其他孔洞类缺陷时，需要对存在的气孔缺陷采用传统的方式提前修复，以免其变成线状缺陷，增加铝合金铸件的危害性。



(a) 热压前 (b) 热压后 (c) 热处理后 (d) 实物

图9 热压前后及热处理后的X光检测结果和实物图
Fig. 9 X-ray inspection results of samples before and after HIP and sample with HIP + heat treatment, sample photo

参考文献:

- [1] 张喆, 洪润洲, 周永江, 等. 铝合金铸件缩松缺陷的热等静压处理 [J]. 热加工工艺, 2012 (23): 34-35, 38.
- [2] ANDOVER, Steph J Mashi. Bodycote HIP Inc., combining alumium heat treat with hot isotatic pressing: A comparison of structure, properties, and processing routes for a cast Al-Si-Mg alloy [C]//Transactions of Materials and Heat Treatment Proceedings of the 14th IFHTSE Congress, 2004, 25 (5): 546-551.
- [3] WANG G, LANG L H, YU W J, et al. Influences of hot-isostatic-pressing temperature on the microstructure, tensile properties and tensile fracture mode of 2A12 powder compact [J]. Acta Metall Sin, 2016, 29: 963-974.
- [4] XU L, GUO R, BAI C, et al. Effect of hot isostatic pressing conditions and cooling rate on microstructure and properties of Ti-6Al-4V alloy from atomized powder [J]. Mater. Sci Technol, 2017, 30: 1289-1295.
- [5] 曲银辉, 姚红, 车洪艳, 等. 热等静压对ZL205A壳体铸件缺陷及力学性能的影响 [J]. 铸造, 2017, 66 (9): 998-1000.

Effect of Hot Isostatic Pressure on Porosity Defects of Cast Aluminum Alloy

QU Yin-hui¹, HAN Peng-jiang², JI Xiao-jun³, WANG Shu-han¹, HU Da-chuan¹, JIANG Hong-shun¹, WANG Tao¹, DONG Sheng-sheng¹, WU Hua-feng¹

(1. Shenyang Research Institute of Foundry Co., Ltd, Shengyang 110022, Liaoning, China; 2. Liaoyang Military Representative Office of Air Force Equipment Department, Liaoyang 110043, Liaoning, China; 3. Beijing Xinfeng Aerospace Equipment Co., Ltd., Beijing 100044, China)

Abstract:

The paper is a study on the effect of hot isostatic pressure (HIP) on the porosity defects of ZL205A alloy. The results show that the HIP can press pores; however, due to the existence of oxide film, complete diffusion of each element between the interfaces can not be realized. Therefore, the metallurgical bonding interface was not formed. After HIP and heat treatment, the original porosity defects become linear defects.

Key words:

ZL205A; hot isostatic pressing; porosity defects