

热等静压对铝合金铸件冶金质量和组织的影响研究

冀晓磊, 李 杨, 邢昌勇, 王立召, 潘煜曜, 王子阳, 张荣强

(河北钢研德凯科技有限公司, 河北保定 072750)

摘要: 通过对比热等静压前后铝合金铸件的冶金质量和金相组织的变化, 研究了热等静压对铝合金铸件冶金质量和组织致密度的影响。结果表明, 铸件经热等静压处理后, 可有效修复铸件中的显微缩孔及疏松缺陷, 使铸件组织更加致密均匀, 但对于严重的海绵状疏松及宏观疏松, 热等静压无法使其愈合。

关键词: 热等静压; 铝合金; 冶金质量; 金相组织

热等静压 (HIP) 技术是将铸件置入可承受高温和高压的密闭容器内, 对容器抽真空, 然后充入高压的惰性气体^[1-3], 再将气体加热至预定温度, 利用高压气体作为外力均匀作用于铸件, 从而消除铸件内部缺陷^[4-7], 提高铸件致密度和力学性能的一种工艺方法^[8-10]。而铝合金铸件因其金属液有吸氢特性, 铸件凝固后氢气析出而产生针孔缺陷, 同时又会因补缩不足、浇注参数设计不合理和熔体净化不够等原因产生疏松缺陷, 而产生的缺陷又不易通过工艺改进的方法进行消除, 因此引入热等静压技术消除疏松和针孔缺陷, 提高铸件冶金质量^[11-12]。本文对铝合金铸件的冶金缺陷进行了分类, 并对缺陷程度进行了评判, 然后将带有缺陷的铸件进行热等静压, 最后分析热等静压对铸件冶金缺陷和组织的影响。

1 试验材料及方法

本试验选用材料为ZL101A的铝合金铸件进行研究, 材料化学成分见表1, 将实际生产过程中出现冶金缺陷的铸件进行收集, 然后将铸件进行热处理, 热处理工艺见表2, 将热处理后的铸件进行X射线无损检测, 根据检测结果对不同的冶金缺陷进行分类, 同时评判出铸件出现缺陷的严重程度, 然后对铸件中无冶金缺陷的位置、存在缩孔缺陷位置和存在疏松缺陷的位置切取试块, 用于金相试验, 切取试块后再将剩余铸件进行热等静压工艺处理, 热等静压工艺参数如表3所示, 热等静压工艺完

作者简介:

冀晓磊 (1988-), 男, 工程师, 硕士, 主要研究方向为轻质合金精密铸造工艺设计。E-mail: 1203052021@qq.com

中图分类号: TG156.9;
TG146.21

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977 (2024) 12-1709-05

收稿日期:

2024-03-11 收到初稿,
2024-05-09 收到修订稿。

表1 ZL101A合金化学成分
Table 1 Chemical composition of ZL101A alloy
w_B /%

成分	Si	Mg	Ti	Fe	Al
标准成分	6.5~7.5	0.25~0.45	≤0.2	≤0.2	余量
实际成分	6.95	0.38	0.1	0.1	余量

表2 热处理工艺参数 (T6)
Table 2 Heat treatment process parameters (T6)

项目	温度/℃	时间/h	冷却介质
固溶处理	530	12	水
时效处理	155	7	水

表3 热等静压工艺参数
Table 3 Hot isostatic pressing process parameters

名称	温度/℃	压力/MPa	时间/h
参数	520 ± 5	100 ± 5	2~4

成后将铸件再进行X射线无损检测，并对比分析热等静压前后铸件冶金缺陷的变化情况，再将原来铸件中无冶金缺陷的位置、存在缩孔缺陷位置和存在疏松缺陷的位置进行试块切取，同样用于金相观察，最后对比热等静压前后铸件组织致密度的变化情况。

2 试验结果及分析

2.1 热等静压对铸件冶金质量的影响

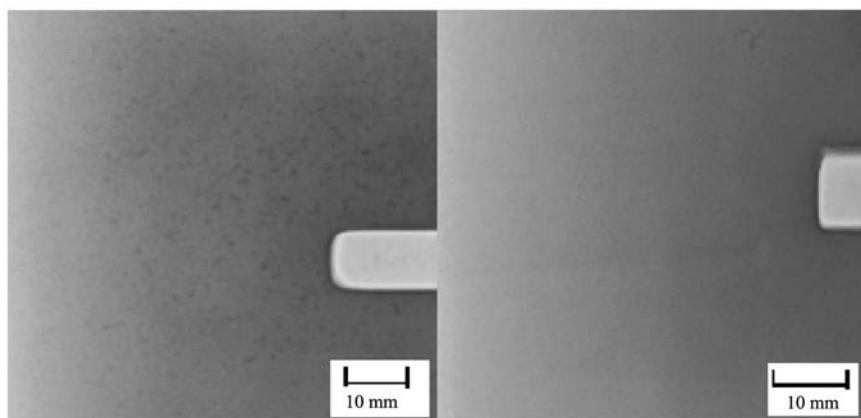
对热处理后的铸件进行X射线无损检测，将铸件有缩孔、分散疏松、海绵状疏松和宏观疏松缺陷的位置进行标注，并识别缺陷的严重程度，然后将铸件按照表3的工艺参数进行热等静压工艺处理，热处理后再对标记位置进行X射线无损检测，热等静压前后缺陷位置的对比情况如表4所示，热等静压前后各缺陷位置的X射线检测结果如图1-4所示。

从表4和图1、图2可以看出，热等静压可以有效解决铸件的针孔缺陷和分散性疏松缺陷，分析原因热等静压工艺过程是通过高温和高压使金属发生塑性流动，将铸件封闭的疏松和缩孔进行压合，然后合金

表4 热等静压前后铸件缺陷程度对比
Table 4 Comparison of casting defects degree before and after hot isostatic pressing

项目	缩孔	分散疏松	海绵状疏松	宏观疏松
评判标准	GB11346	HB5397	HB5397	—
热等静压前	2~5级	1~5级	1~3级	宏观疏松
热等静压后	无缺陷	无缺陷	1~3级	宏观疏松

元素发生扩散与蠕变，从而解决铸件的针孔和疏松缺陷；从表4和图3、图4可以看出，对于铸件海绵状的疏松缺陷和宏观疏松缺陷无法通过热等静压工艺解决，分析原因，海绵状的疏松因其局部区域存在较大的孔洞，无法通过金属的塑性流动进行填充，故不能通过热等静压工艺解决；而宏观疏松属于开放性的疏松缺陷，在热等静压时无法形成闭合的空间，因此宏观的疏松也不能通过热等静压工艺解决；对于严重的海绵状疏松局部存在较大孔洞，而宏观疏松无法形成闭合的空间，因此即使提高热等静压的压力也无法使缺陷修复。

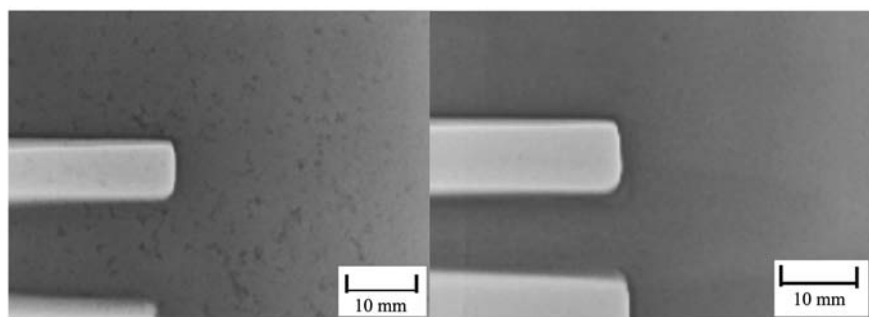


(a) 热等静压前

(b) 热等静压后

图1 铸件针孔缺陷对比图

Fig. 1 Comparative diagram of pinhole defects in the castings

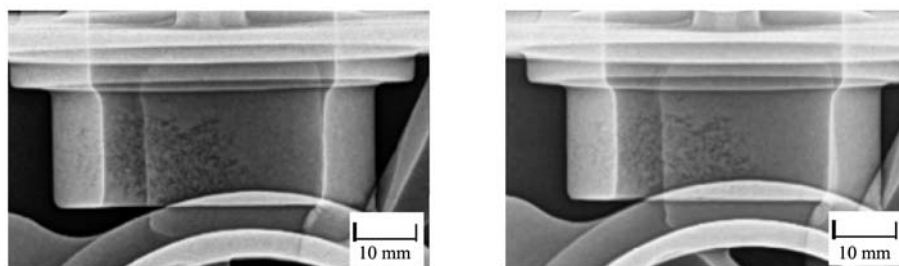


(a) 热等静压前

(b) 热等静压后

图2 铸件分散性疏松缺陷对比图

Fig. 2 Comparison of dispersed and loose shrinkage defects in the castings

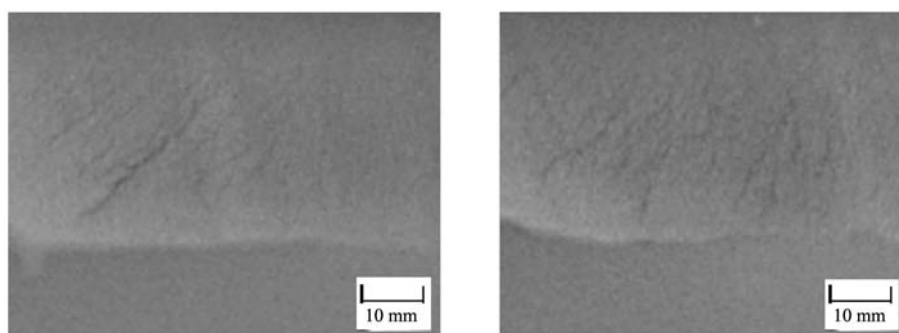


(a) 热等静压前

(b) 热等静压后

图3 铸件海绵状疏松缺陷对比图

Fig. 3 Comparison diagram of sponge like shrinkage defects in the castings



(a) 热等静压前

(b) 热等静压后

图4 铸件宏观疏松缺陷对比图

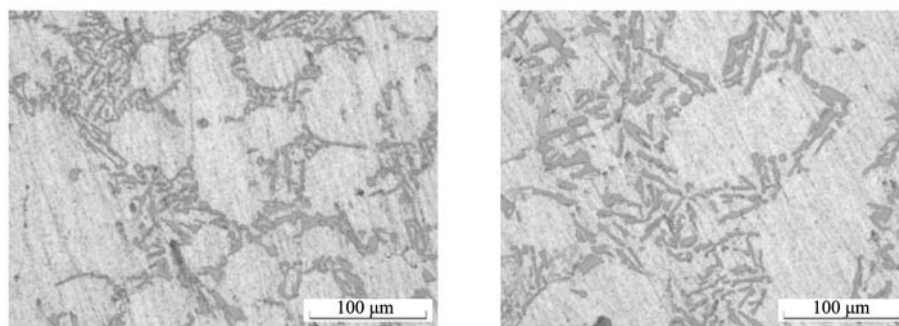
Fig. 4 Comparative diagram of macro shrinkage defects of the castings

2.2 热等静压对铸件金相组织的影响

为了研究热等静压对金相组织致密度的影响,从热处理后的铸件上选出无冶金缺陷、有缩孔缺陷和有疏松缺陷的区域,然后从这些区域上切取一部分试片用于金相试验观察,再将剩余的铸件进行热等静压处理,等热处理后在原来有冶金缺陷和无冶金缺陷的位置同样切取试片进行金相观察,铸件位置无冶金缺陷热等静压前后的金相组织如图5所示;铸件位置有疏松缺陷热等静压前后的金相组织如图6所示;铸件位置有针孔缺陷热等静压前后金相组织如图7所示。从图5中可以看出,热等静压前,共晶硅呈粗大的树枝状,热

等静压后,共晶硅变成了细小的颗粒状,这是因为树枝状的共晶硅在520℃左右的温度下发生了熔断,并且在熔断过程中共晶硅棱角发生钝化使枝晶外表面光滑,这说明热等静压工艺能使共晶硅实现颗粒化;从图6和图7中可以看出,热等静压工艺可以使铸件中的显微缩孔和疏松等缺陷有效愈合,使组织形态更加致密。

取带有缺陷的试样,进行热等静压前后的拉伸断口的SEM图分析,从图8中可以看出,铸件的孔洞缺陷,在热等静压后得到了有效的修复。



(a) 热等静压前

(b) 热等静压后

图5 铸件无冶金缺陷金相组织对比图

Fig. 5 Comparison diagram of metallographic microstructures without metallurgical defects in the castings

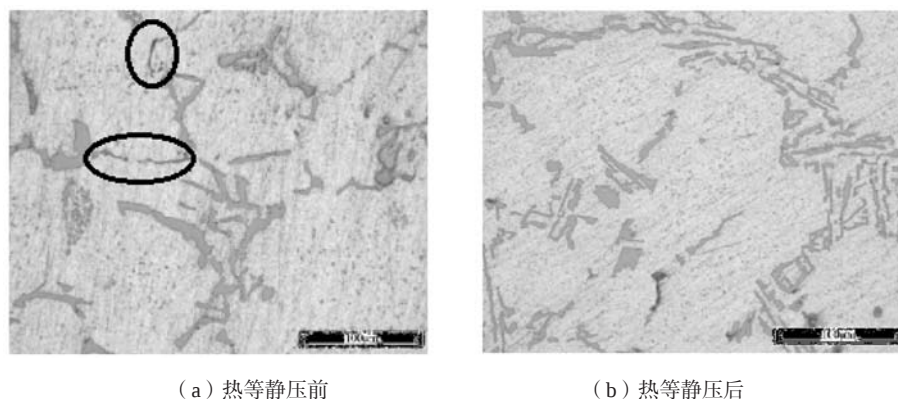


图6 铸件疏松缺陷金相组织对比图

Fig. 6 Comparison diagram of metallographic microstructures for the casting with shrinkage defects

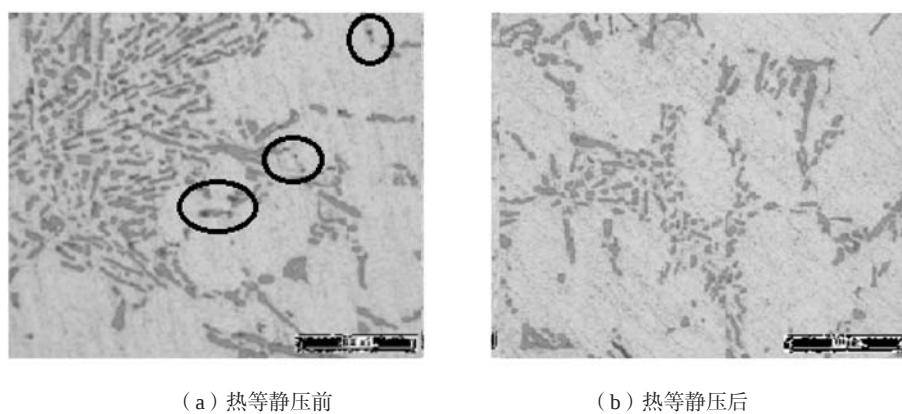


图7 铸件缩孔缺陷金相组织对比图

Fig. 7 Comparison diagram of metallographic microstructures for shrinkage defects in the castings

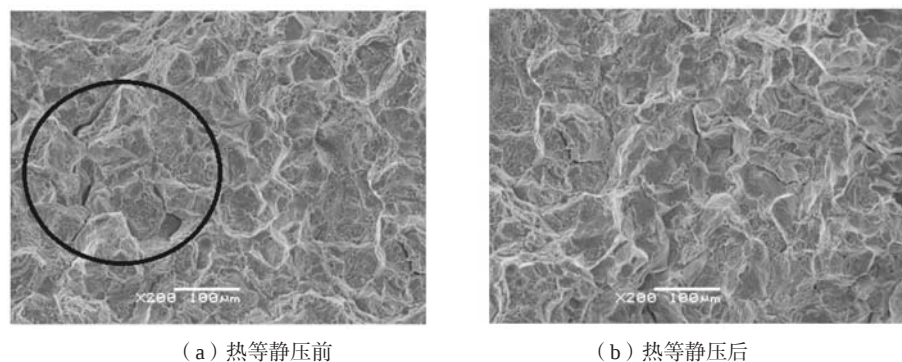


图8 铸件断口的SEM图

Fig. 8 SEM images of fracture surface of the castings

3 结论

(1) 通过对比热等静压前后的X射线底片可知, 热等静压可有效修复铸件中的显微缩孔及疏松缺陷, 但对于严重的海绵状疏松及宏观疏松, 热等静压无法

使其愈合。

(2) 通过对比热等静压前后的金相组织可知, 热等静压可以使铸件无冶金缺陷区域的金相组织更加细化, 使有缩孔和疏松缺陷的组织更加致密。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] XU Qian, LI Wen, YIN Yajun, et al. Finite element simulation of real cavity closure in cast Ti6Al4V alloy during hot isostatic pressing [J]. China Foundry, 2022 (1): 55-62.
- [3] 李军义, 谢焱, 王东新, 等. 热等静压对铍铝合金组织及性能的影响 [J]. 稀有金属与硬质合金, 2018, 46 (1): 65-69.
- [4] 李波, 王宇飞, 张立新, 等. K4169合金大型薄壁铸件热等静压试验 [J]. 铸造, 2016, 65 (12): 1206-1209, 1213.
- [5] 杜旭初, 洪润洲, 杨守杰, 等. 热等静压对铝合金铸件组织和性能的影响 [J]. 轻合金加工技术, 2016, 44 (6): 55-59.
- [6] 张喆, 洪润洲, 周永江, 等. 铝合金铸件疏松缺陷的热等静压处理 [J]. 热加工工艺, 2012, 41 (23): 34-35, 38.
- [7] 孟晓东, 崔婧钰, 冀晓磊, 等. 热等静压对ZL116铝合金组织和性能的影响 [J]. 铸造, 2023, 72 (7): 852-856.
- [8] 曲银辉, 韩鹏江, 纪校君, 等. 热等静压对铸造铝合金气孔缺陷的影响 [J]. 铸造, 2021, 70 (10): 1228-1232.
- [9] 丁剑, 李亚辉. 热等静压在铝合金铸件中的应用 [J]. 铸造, 2021, 70 (7): 850-854.
- [10] 卫振华, 毛红奎, 张文达, 等. 热等静压对铸造AlSi7Cu2Mg合金缺陷及性能的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41 (3): 349-353.
- [11] 徐文才, 郎利辉, 黄西娜, 等. 铝合金复杂薄壁件热等静压成形数值模拟 [J]. 锻压技术, 2019, 44 (6): 65-72.
- [12] 周永江, 张喆, 洪润洲. 热等静压对ZL114A铸件组织和性能的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2016, 36 (7): 687-689.

Effect of Hot Isostatic Pressing on Metallurgical Quality and Microstructure of Aluminum Alloy Castings

JI Xiao-lei, LI Yang, XING Chang-yong, WANG Li-zhao, PAN Yu-yao, WANG Zi-yang, ZHANG Rong-qiang
(Hebei Steel Research Dekai Technology Co., Ltd., Baoding 072750, Hebei, China)

Abstract:

By comparing the changes in metallurgical quality and microstructure of aluminum alloy castings before and after hot isostatic pressing, the effect of hot isostatic pressing on the metallurgical quality and microstructure density of the aluminum alloy castings was studied. The results showed that after hot isostatic pressing treatment, micro shrinkage and porosity defects in castings were effectively repaired, making the microstructure of castings more dense and uniform. However, for severe sponge like and macroscopic porosity, hot isostatic pressing could not heal them.

Key words:

HIP; alloy; metallurgical quality; microstructure