

热等静压对 ZL116 铝合金组织和性能的影响

孟晓东, 崔婧钰, 冀晓磊, 李园园, 邢昌勇, 万里

(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 ZL116 铝合金的拉伸性能和组织缺陷, 研究了热等静压对 ZL116 合金铸件组织和性能的影响。结果表明, 热等静压可使铸件力学性能提高 (抗拉强度提高 15%、伸长率提高 100%、硬度提高 16%), 热等静压对铸件中缩孔、显微缩松等缺陷能进行有效修复。

关键词: 热等静压; ZL116 铝合金; 铸件; 铸造缺陷; 力学性能

热等静压 (HIP) 技术从 20 世纪 50 年代开始发展并应用^[1-3], 它是将有成分偏析、显微疏松、内部缩孔缺陷的铸件, 置入可承受高温、高压的密闭容器内, 对容器先抽真空、然后充入高压的惰性气体^[4-5], 加热升温至预定温度, 在高温和超过被处理材料的屈服强度和蠕变强度的各向等静压作用下, 将铸件内部封闭的气孔、疏松被压实连接成为致密的组织, 从而提高铸件的可靠性^[6-7]。

随着现代科学技术的飞速发展, 铝合金作为一种较为成熟的合金材料, 被广泛应用于航空航天等领域^[8-9]。ZL116 铝合金因其具有良好的铸造性能、焊接性能和室温力学性能, 经常被用于制造发动机关键承力部件。而航空用大型发动机反推装置主要就是采用 ZL116 铝合金材料, 因此, 该材料的先进性和高水平的制造技术直接决定了大型发动机的性能^[10-12]。本文以大型发动机反推装置 ZL116 铝合金精密铸件导轨梁为研究对象, 分别测试了铸件热等静压前后的室温力学性能, 比较了热等静压前后 X 光射线底片, 分析了热等静压对 ZL116 铸件的拉伸性能、组织致密度的影响, 为热等静压工艺改善铸件质量提供了参考。

1 试验材料及方法

试验件采用如图 1 所示的导轨梁铸件, 该铸件属于典型的大型、复杂、薄厚不均的异型结构件, 该铸件最大轮廓尺寸为 1 500 mm × 470 mm × 350 mm, 铸件最厚处为 40 mm, 最薄处为 3 mm, 且整体多为腔体半封闭的细长结构。该铸件所使用材料为 ZL116 铝合金, 化学成分见表 1。

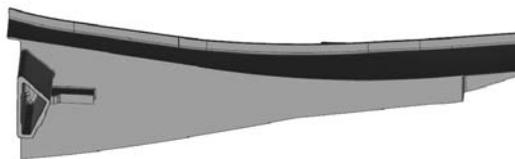


图1 铝合金铸件

Fig. 1 Aluminum alloy castings

表1 ZL116合金化学成分

Table 1 Chemical compositions of the ZL116 alloy

w_B /%

成分	Si	Mg	Ti	Fe	余量
标准成分	6.5~8.5	0.35~0.55	0.1~0.3	≤0.6	Al
实际成分	6.65	0.48	0.21	0.1	Al

作者简介:

孟晓东 (1990-), 男, 工程师, 主要研究方向为轻质合金精密铸造工艺设计。E-mail: 1204620661@qq.com

通讯作者:

崔婧钰, 女, 硕士, 工程师。电话: 17725198856, E-mail: cuijingyu815@163.com

中图分类号: TG156.9;
TG146.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977 (2023) 07-0852-05

收稿日期:

2022-11-29 收到初稿,
2022-12-22 收到修订稿。

采用熔模铸造工艺进行导轨梁铸件的制备。经过蜡模制备、蜡模组焊、制壳、脱蜡、型壳焙烧、铝液浇注、清壳和冒口切除等一系列工序后得到导轨梁铸件，并对铸件进行X射线无损检测。检测完后确定缺陷位置，根据需要将铸件进行剖切；将剖切下来的试块一部分用于拉伸试验，一部分用于观察金相，剩余的铸件进行热等静压工艺处理。热等静压工艺参数如表2所示，热等静压处理后再将铸件进行X射线无损检测，检测结果与热等静压处理前结果进行对比，分析热等静压对铸件缺陷的改善情况；将热等静压后的铸件再进行剖切，剖切的试块用作拉伸试验和金相观察，与热等静压前拉伸试验和金相组织作比较；将所有的试块在做拉伸试验前或金相观察前进行热处理，热处理工艺如表3所示，最后将用于拉伸试验的试块按要求进行尺寸加工如图2所示，在电子拉力机上检测力学性能。

表2 热等静压工艺参数
Table 2 Hotisostatic pressing process parameters

温度/℃	压力/MPa	时间/h
520 ± 10	100 ± 5	2~4

表3 热处理工艺参数 (T5态)
Table 3 Heat treatment process parameters (T5 State)

项目	温度/℃	时间/h	冷却介质
固溶处理	535 ± 5	8~12	60~100 ℃水
时效处理	175 ± 5	4~8	空冷

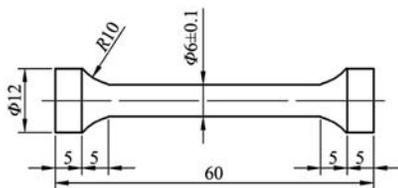


图2 拉伸试样
Fig. 2 Tensile specimen

2 试验结果及分析

2.1 热等静压对室温力学性能的影响

将热等静压前后的试棒全部进行热处理工艺处理后再进行拉伸试验，测得的拉伸数据见表4。

由表4可知，经过热等静压处理后，试棒抗拉强度提高了约15%，伸长率提高了100%，布氏硬度提高了16%，说明热等静压能显著提高ZL116合金材料的力学性能。

2.2 热等静压对铸件组织致密性的影响

将浇注的铸件进行X光无损检测，并标出缺陷位

表4 热等静压前后试棒的力学性能
Table 4 Mechanical properties of the test bars before and after hot isostatic pressing

序号	热等静压前			热等静压后		
	抗拉强度/MPa	伸长率/%	布氏硬度HB	抗拉强度/MPa	伸长率/%	布氏硬度HB
1	293	2.1	95	329	6.1	107
2	293	2.9	89.7	330	7.2	101
3	274	1.5	89.7	322	3.4	101
4	268	1.7	84.7	320	3.4	114
5	291	2.7	90	331	5.5	107
6	284	3.0	85	332	6.0	114
7	251	1.4	89	290	1.4	95
8	248	1.8	86	307	3.0	101
9	295	2.0	92	323	3.4	101
10	283	2.4	90	314	3.7	95.0
平均值	278	2.15	89.11	319.8	4.31	103.6

置，确定缺陷等级。X射线检测后将铸件部分有缺陷的位置进行剖切，进行金相组织的分析；然后将铸件进行热等静压工艺处理，再用X光进行检测。将热等静压前后X光底片进行对比，确定热等静压后铸件缺陷的等级程度，并找出热等静压工艺处理后缺陷愈合的部分区域进行剖切，然后做金相组织分析。热等静压前后缺陷程度对比如表5所示；热等静压前后射线检测情况如图3、4、5所示；热等静压前后金相组织如图6、7所示。

通过对热等静压前后铸件的缺陷程度对比分析可以发现，热等静压工艺可以将2~5级的针孔、缩孔、1~5级的分散疏松全部排除掉，但海绵状的疏松却不能排除。原因是热等静压利用高温、高压将缩孔、缩松的体积进行压缩，然后合金元素发生扩散与蠕变，从而消除缺陷，让组织更加紧密；而海绵状疏松存在体积相对较大，周边金属没有足够的体积向疏松区进行扩散和蠕变，因此无法使海绵状疏松愈合。通过对热等静压前后铸件缩孔缺陷X射线检查结果和金相组织图对比分析，确定热等静压工艺可以使铸件中的显微缩孔、缩松等缺陷有效愈合，使组织形态更加致密。

取带有缺陷试样，分析其热等静压前后拉伸断口

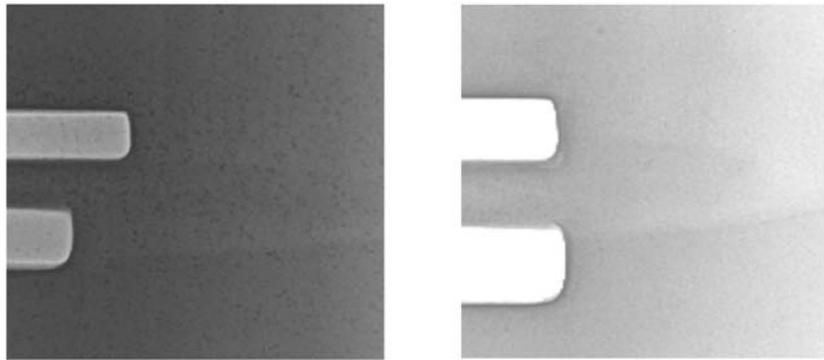
表5 热等静压前后缺陷程度对比
Table 5 Comparison of the defects before and after HIP

项目	针孔	分散疏松	海绵状疏松
评判标准	GB11346	HB5397	HB5396
热等静压前	2~5级	1~5级	1~3级
热等静压后	无缺陷	无缺陷	1~3级

的SEM图, 并进行比较, 从图8中可以看出, 铸件的孔洞缺陷在经热等静压后, 得到了有效的修复。

ZL116铝合金铸件经过热等静压工艺处理, 内部金属会发生蠕变和塑性变形, 铸件内部的缩孔和显微缩

松缺陷经过扩散、粘结而愈合, 因此铸件的组织会变得均匀、致密性好。实践证明, 铸件经过热等静压处理后, 一部分缺陷会得到愈合, 其组织会更加均匀, 其抗拉强度、伸长率和硬度均得到一定程度的提高。

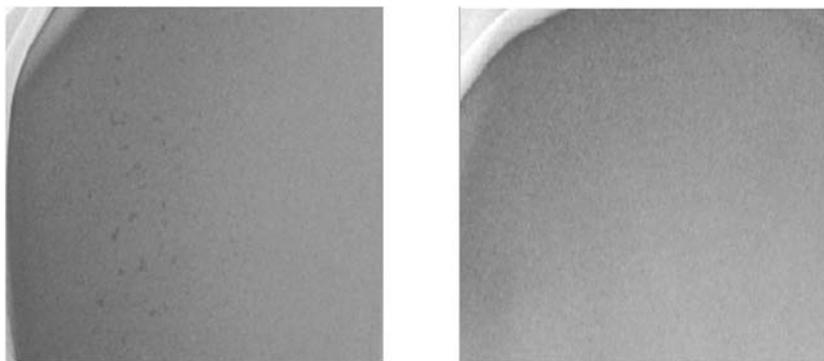


(a) 热等静压前

(b) 热等静压后

图3 热等静压前后铸件缩孔缺陷检测结果

Fig. 3 Inspection results of the shrinkage cavity defects of the castings before and after HIP

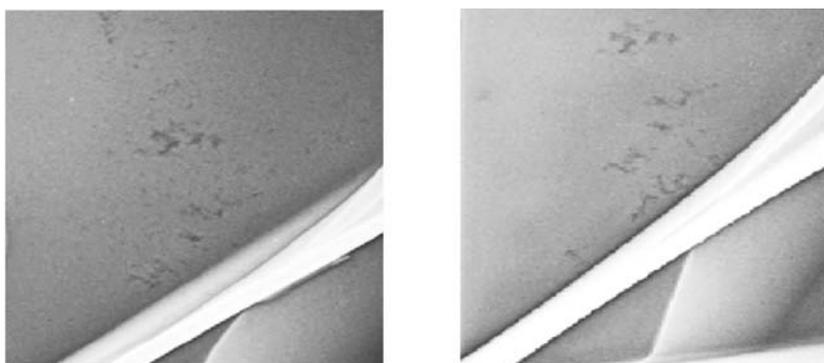


(a) 热等静压前

(b) 热等静压后

图4 热等静压前后铸件缩松缺陷检测结果

Fig. 4 Inspection results of the shrinkage defects of the castings before and after HIP

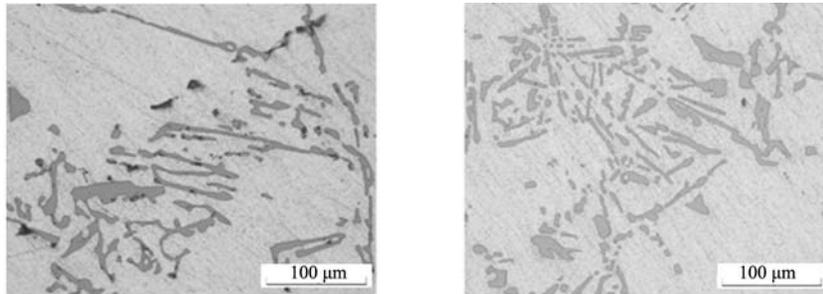


(a) 热等静压前

(b) 热等静压后

图5 热等静压前后铸件海绵状松缺陷检测结果

Fig. 5 Test results of the sponge like loose defects of the castings before and after HIP

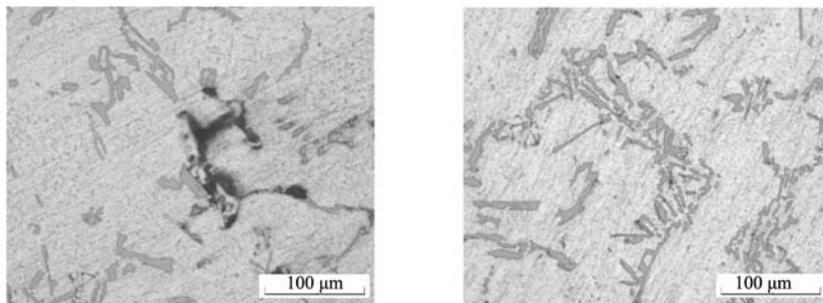


(a) 热等静压前

(b) 热等静压后

图6 热等静压前后铸件缩孔缺陷金相组织图

Fig. 6 Metallographic microstructures of the shrinkage defects of the castings before and after HIP

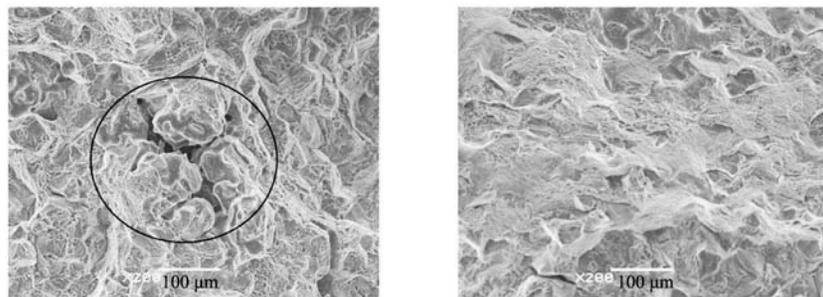


(a) 热等静压前

(b) 热等静压后

图7 热等静压前后铸件缩松缺陷金相组织图

Fig. 7 Metallographic microstructures of the dispersed shrinkage defects of the castings before and after HIP



(a) 热等静压前

(b) 热等静压后

图8 热等静压前后铸件断口的SEM图

Fig. 8 SEM images of the fractures of the casting before and after HIP

3 结论

(1) 铸件经过热等静压处理，其室温力学性能得到提高，抗拉强度提高了15%、伸长率提高了100%，硬度提高了16%。

(2) 通过分析铸件热等静压前后的X射线底片、金相组织图和扫描断口可知，热等静压可有效修复铸件中的孔洞及显微缩松等缺陷，对于严重的海绵状疏松，热等静压工艺无法使其愈合。

参考文献:

- [1] 张明军, 张雷雷, 胡颖涛, 等. 热等静压处理对K439B高温合金显微组织的影响 [J]. 金属热处理, 2020, 45 (11): 177-181.
- [2] 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]. 粉末冶金工业, 2016, 26 (2): 63-67.
- [3] MARULCUOGLUHANDE, KARA FERHAT. Microstructure and mechanical properties of dense Si_3N_4 ceramics prepared by direct coagulation casting and cold isostatic pressing [J]. Materials Science & Engineering A, 2022, 854 (9) 143782-143782.
- [4] 韩凤奎, 薛鑫, 刘蓓蕾, 等. 热等静压对In718C高温合金组织和性能的影响 [J]. 铸造, 2022, 71 (1): 39-43.
- [5] XUQIAN, LI WEN, YIN YAJUN, 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): 1598-1598.
- [6] 李寒松, 孙士江, 刁爱民, 等. 热等静压对DD419单晶高温合金组织与持久性能的影响 [J]. 铸造, 2021, 70 (5): 554-559.
- [7] 许文勇, 张利冲, 郑少辉, 等. 热等静压气氛对铸造高温合金K4169微观组织的影响 [J]. 稀有金属, 2020, 44 (4): 363-369.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.

Effects of HIP on Microstructure and Mechanical Properties of ZL116 Alloy Casting

MENG Xiao-dong, CUI Jing-yu, JI Xiao-lei, LI Yuan-yuan, XING Chang-yong, WAN Li
(Hebei Steel Research Dekai Technology Co., Ltd., Baoding 072750, Hebei, China)

Abstract:

The effect of hot isostatic pressing (HIP) on the microstructure and properties of ZL116 alloy casting was studied by comparing the tensile properties and structural defects of the alloys before and after HIP. The results showed that the HIP could significantly improve the mechanical properties of the castings (tensile strength increased by 15%, elongation increased by 100%, hardness increased by 16%). After HIP, shrinkage, porosity and other defects in the castings could be effectively repaired.

Key words:

HIP; ZL116 alloy; castings; casting defect; mechanical properties
