

热等静压在铝合金铸件中的应用

丁 剑, 李亚辉

(中国航空工业集团公司金城南京机电液压工程研究中心, 江苏南京 210000)

摘要: 研究了热等静压对ZL114A耐高压壳体铸件显微缩松缺陷、铸件力学性能及金相组织的影响。结果表明, 经热等静压处理后, 铸件内部的显微缩松缺陷能够完全改善, 铸件厚大部位剖切面荧光检验合格, 金相组织正常, 铸件本体切取抗拉强度基本维持不变, 伸长率提高, 铸件疲劳性能及使用可靠性显著提高。

关键词: 热等静压; 铝合金铸件; 显微缩松; 缺陷消除

ZL114A是一种典型的高强度高韧铸造Al-Si合金, 国外与之相似的合金牌号为A357, 主要用于制造航空航天飞行器复杂零部件以及汽车等承受高负荷的零部件^[1-2]。随着我国航空、航天工业的发展, 对部分重要铝合金铸件的性能及可靠性提出了更高的要求, 但铸件内部显微缩松、针孔通过铸造工艺无法完全消除, 铸件使用可靠性存在一定不确定性。对高性能要求的铸件, 通过热等静压工艺处理, 可以消除铸件内部隐患, 提高铸件使用的可靠性。国际上对航空航天用重要铸件进行热等静压处理已成为一种通用做法。

热等静压(Hot Isostatic Pressing, 简称HIP)是一种以氮气、氩气等惰性气体为传压介质, 在密闭容器中对工件施加各向同等的压力, 并在高温高压下保持一定时间, 用以实现扩散连接、烧结或致密化等作用的工艺手段^[3]。关于热等静压处理对铸件产品疏松等缺陷闭合效果及对合金的综合力学性能的影响方面已经得到广泛研究, 具体合金的热等静压处理工艺也相当成熟, 对各种不同的合金材料铸件进行热等静压处理, 可以闭合铸件内部的显微疏松和均匀合金组织, 使铸件的综合力学性能, 尤其是疲劳性能及力学性能的稳定性显著提高, 大大提高了铸件使用的安全性和可靠性^[4-5]。

目前国内对热等静压工艺消除铸件内部缺陷的相关机理、工艺参数等研究多集中于钛合金、高温合金铸件, 针对铝合金铸件的热等静压工艺应用研究较少。制件材料不同, 热等静压工艺选用的温度、压力、保温保压时间参数有很大的差异, 工艺参数的选择主要是依据材料固态相变温度, 以及处理温度下该材料的蠕变强度, 对铝合金铸件, 热等静压处理温度应低于其固溶温度, 压力参数需大于材料在该温度下的蠕变强度。

本试验对存在显微缩松的ZL114铸件进行热等静压处理(工艺参数为520 ℃, 90 MPa, 3 h), 通过比较热等静压前后铸件性能、组织与显微疏松情况以及铸件高压脉冲试验结果, 成功将热等静压工艺应用于I类铸件批生产工艺中, 显著提高了铸件质量, 为高性能、高要求铝合金铸件进行热等静压处理提供工程应用参考。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

该铸件材料为ZL114A, 采用金属型重力铸造, 其最大轮廓尺寸为 $\Phi 216$ mm, 高度230 mm左右, 壳体铸件上端面为高压腔, 厚度约为65 mm左右, 铸件上端厚大

作者简介:

丁 剑(1986-), 男, 工程师, 从事铸造铝镁合金技术研究工作。电话: 15651715317, E-mail: 262858836@qq.com

中图分类号: TG27
文献标识码: A
文章编号: 1001-4977(2021)07-0850-05

收稿日期:

2021-02-24 收到初稿,
2021-04-29 收到修订稿。

部位为力学性能切取指定部位，铸件加工完成后高压区域需在42 MPa油压下进行密封性试验。试验选取上端厚大部位出现细小密集型荧光亮点批次的铸件，见图1。并对缺陷部位进行体视显微镜观察及扫描电镜分析，分析结果为铸件厚大部位的显微疏松，每平方米15个缺陷左右，缺陷尺寸80~180 μm大小不等，金相及电镜分析结果见图2、图3。

由于该产品定型已久，采用低压铸造、差压铸造等先进工艺需彻底更改铸件浇注系统、工装模具，且工艺定型及产品验证周期较长，成本较高，在保持产品工艺一致性的前提下，对铸件进行热等静压处理提高铸件质量是最为便捷有效的措施。

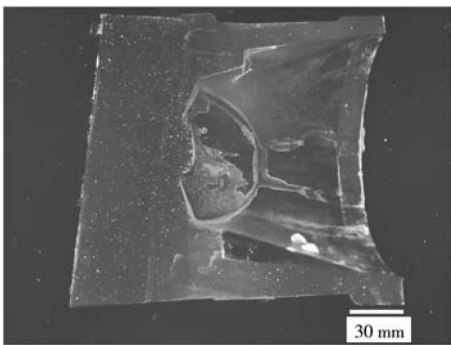


图1 铸件剖切面荧光检验

Fig. 1 Fluorescent penetrant inspection of casting section

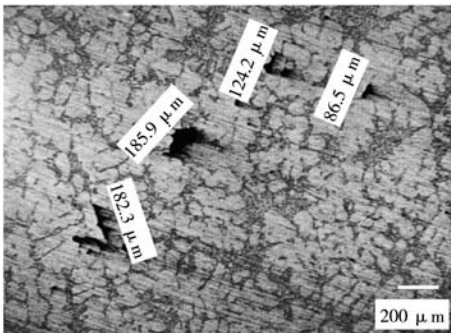


图2 金相组织观察

Fig. 2 Metallographic structure

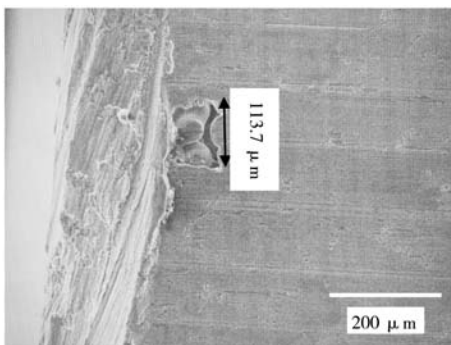


图3 缺陷形貌分析

Fig. 3 SEM morphology of defects

1.2 试验方法

选取存在显微疏松问题的不同炉次8个铸件，随机留下2个，其余6个铸件均进行热等静压处理，工艺参数为520 °C，90 MPa，3 h。热等静压结束后所有铸件一同进行T6热处理。热处理工艺按表1参数进行。

热处理结束后，进行以下试验：

①对比经热等静压处理前后荧光检验的差异，荧光检验按HB963 I类铸件验收。

②检查热等静压后铸件组织是否存在孔洞类缺陷，及其他组织异常。

③对比热等静压处理后铸件本体指定部位力学性能差异，拉伸性能要求：平均 $R_m \geq 205$ MPa， $A_5 \geq 1.5\%$ ，最低 $R_m \geq 192.5$ MPa， $A_5 \geq 1.2\%$ 。

④对比热等静压处理后产品0~42 MPa交变脉冲试验性能差异，封堵壳体铸件通回油的油路，仅对高压腔供压，交变脉冲波形见图4，额定工作压力 $P_{OPER} = (28 \pm 0.5)$ MPa；峰值压力 $P_{max} = (42 \pm 0.5)$ MPa；试验温度为环境温度，脉冲循环频率为1~5 Hz，对产品进行交变脉冲试验，试验按GJB 3849进行至壳体破坏泄压为止，记录脉冲循环次数。

2 试验结果及分析

2.1 荧光检验

热等静压后的壳体铸件，在铸件毛坯外表面随机出现直径1 mm左右小孔洞，对铸件厚大部位剖切面进行荧光检验，荧光检验结果无任何显现，经热等静压处理后铸件更为致密，显微疏松完全消除，符合铸件标准要求，其荧光检验结果见图5。

表1 铸件热处理工艺参数

Table 1 Heat treatment process parameters of castings

固溶温度/°C	固溶时间/h	淬火水温/°C	时效温度/°C	时效时间/h
540	15	80	170	8

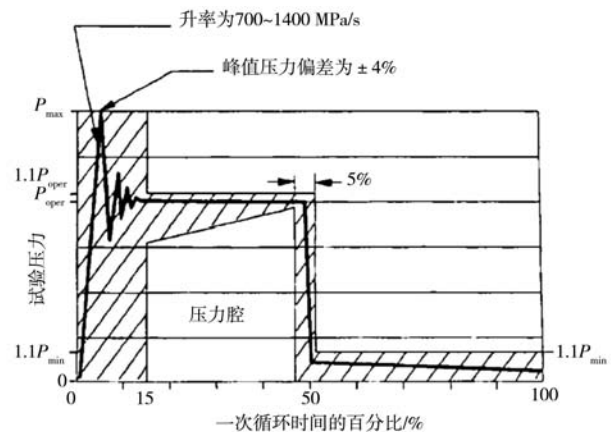


图4 交变脉冲波形

Fig. 4 Waveform of alternating pulse

2.2 金相检验

对铸件进行热等静压及T6热处理后，分别在壳体铸件上端厚大部位与下端法兰部位取金相试样，对铸件进行金相组织观察，观察结果如图6所示，试样中显微疏松完全闭合，组织致密。

有相关研究表明，在热等静压致密化过程中，当铸件内部存在孔洞缺陷时，在较大的应力作用下会发生塑性屈服，然后通过扩散蠕变，沿位错管道扩散到晶界，通过刃型位错攀移而消失。扩散蠕变作用机制比较缓慢，是一个较长的时间过程；另外在高压力和内部存在孔洞条件下，位错将移向内部孔洞的内表面，由于位错逸出而造成原子空缺，空缺两侧的原子所受到的力不能保持平衡，微孔将逐渐压缩减小。孔洞的消除依赖于位错蠕变和扩散蠕变这两种机制同时或者交替进行，当孔隙表面相互接触时，发生扩散结合，形成铸件内部的冶金结合而不是单纯的机械闭合^[6]。

2.3 铸件本体切取拉伸性能对比

对T6热处理后铸件指定部位进行力学性能本体取样，每件铸件取2根拉伸试样，尺寸按GB/T 228.1中 $\Phi 5$ 试样加工，在200 kN试验机上进行室温拉伸性能试验，试验结果见表2。

经以上数据对比分析可以看出，经热等静压及T6热处理后，排除试样缺陷数据其抗拉强度平均值为280 MPa，伸长率为2.6%，铸件本体切取试样的抗拉强度变化不大，伸长率平均提高30%左右。这是由于在热等静压过程中，疏松缺陷被消除，材料在拉伸过程中单位受载面积增大，使试样的伸长率大幅提高^[7]。

试样的抗拉强度较未热等静压处理前出现了略微降低，但总体处于同一水平，经分析未发现组织过烧现象，热等静压过程原始记录也未见异常，也有相关分析认为可能是热等静压过程中，在高温高压下铸件中位错发生运动，缠结中的位错重新组合，使得铸件的位错密度下降，内应力得到释放，因此在热等静压

后的抗拉强度有所下降^[8]，具体原因及相关机理仍需进一步研究探讨。

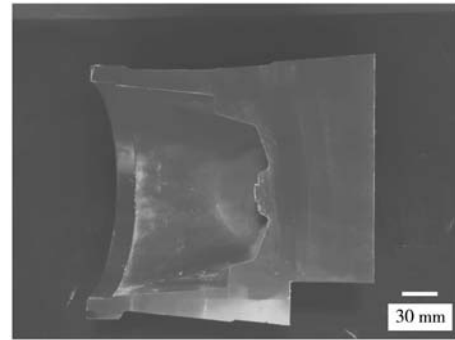
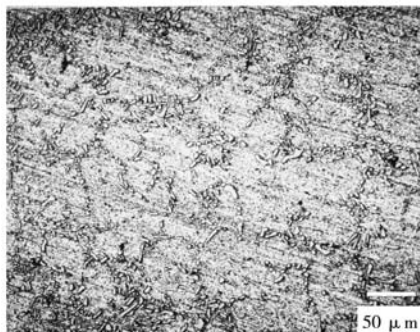


图5 热等静压后铸件截面荧光检验结果

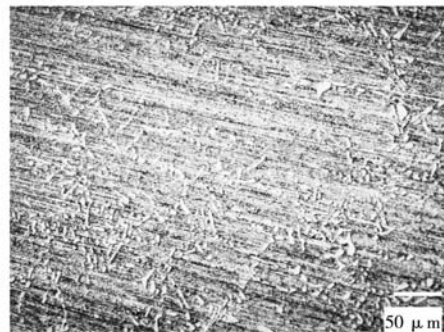
Fig. 5 Fluorescent penetrant inspection of casting section after HIP

表2 拉伸性能对比
Table 2 Comparison of tensile properties

类型	编号	R_m /MPa	A_5 /%
未热等静压处理	1#	298	1.8
		292	2.0
	2#	291	1.7
		300	2.3
热等静压处理后	3#	301	2.3
		289	2.3
	4#	295	2.0
		282	2.7
	5#	278	2.3
		266	3.0
	6#	278	3.0
		265	2.6
7#	237	1.3 (试样缺陷)	
	280	3.3	
8#	271	2.2	
	265	2.7	



(a) 法兰边



(b) 厚大部位

图6 热等静压后铸件金相组织

Fig. 6 Metallographic structure of casting after HIP

2.4 交变脉冲试验

未热等静压处理前,壳体铸件在交变载荷作用下完成压力冲击100 371次后,发现壳体液压油泄露,无法建立试验压力。分解检测壳体高压腔出口,发现裂纹;荧光检验发现裂纹由高压腔内表面贯穿至壳体外。经分析该处裂纹为疲劳裂纹,裂纹起始源是高压腔内的疏松孔,见图7、8,在高压脉冲的冲击下,在高压腔内表面缺陷处形成裂纹并向壳体外侧扩展。

经热等静压处理后,壳体铸件在高压脉冲试验压力冲击216 815次后,发现壳体液压油泄漏,无法建立

试验压力。分解检测壳体高压腔出口,在高压排油腔底部发现贯穿壳体的裂纹,断口见图9,对该处断口进行扫描电镜分析,见图10,未发现铸造缺陷,该处裂纹为疲劳断裂,疲劳源为排油腔底部边缘轮廓,由于热等静压处理消除了铸件内部的疏松、气孔等缺陷,减少了疲劳源,疲劳断裂从壳体铸件结构薄弱处萌生。

壳体铸件经热等静压处理后,高压脉冲循环次数提升了120%左右,这是由于铸件经热等静压处理后,铸件中的显微疏松、气孔等缺陷完全消除,减少了铸件内部疲劳源,在交变载荷的循环作用下,疲劳源出现的概率降低甚至消除,因此提高了铸件使用的可靠性。

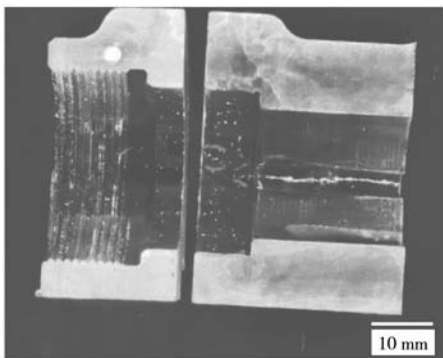


图7 失效部位荧光检验结果

Fig. 7 Fluorescent penetrant inspection of failure site

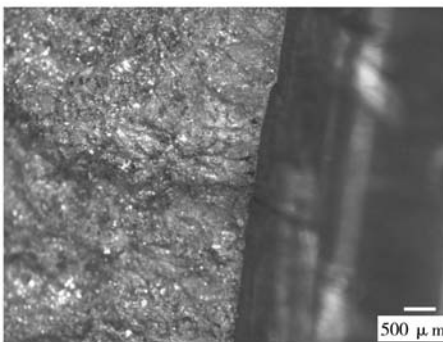


图8 裂纹断口形貌

Fig. 8 Fracture morphology of crack

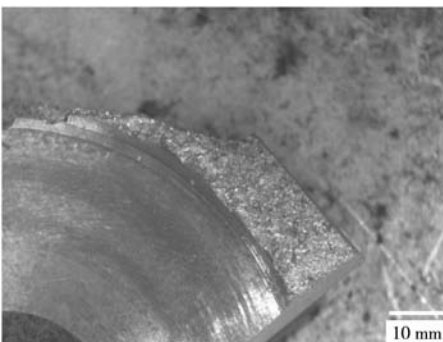


图9 断口位置

Fig. 9 Fracture position

2.5 小批生产情况

在小批量生产过程中,铸件经热等静压处理后仍有少数铸件存在缺陷导致报废的情况,通过X射线或荧光渗透检验能够检查出。对该类铸件进行分析,报废原因有两种情况。一是铸件存在开放性缺陷,从铸件内部延伸至外表面,在热等静压过程中,由于缺陷部位与外界气体介质相通,内外压力一致导致无法消除缺陷;另一种是在X射线底片存在低密度阴影(图11),对该缺陷

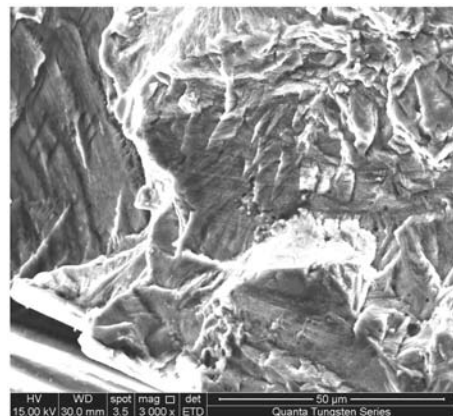


图10 断口形貌

Fig. 10 SEM morphology of fracture

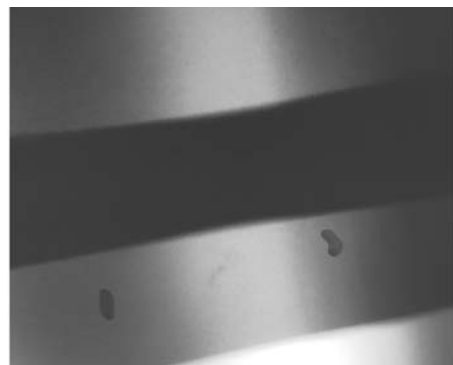


图11 铸件X射线检验底片

Fig. 11 X-ray negative film of casting

部位进行解剖分析, 缺陷类型为夹杂物 (图12)。

3 结论

(1) 该ZL114A铸件经热等静压处理 (520 °C, 90 MPa, 3 h) 可以完全消除铸件内部的显微缩松, 提高铸件内部质量与致密性。

(2) 铸件经热等静压处理后, 铸件抗拉强度基本维持不变, 伸长率显著提高。

(3) 铸件经热等静压处理后, 大幅提高了其交变脉冲试验循环次数, 提高了铸件疲劳性能和使用可靠性。

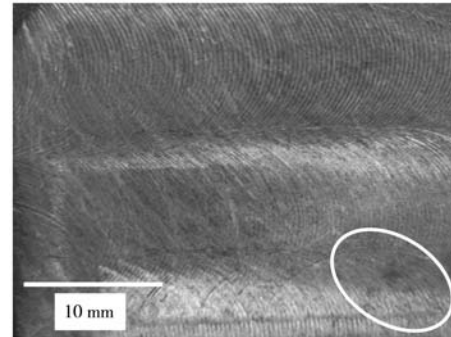


图12 缺陷部位解剖

Fig. 12 Anatomy of defect site

参考文献:

- [1] BOUAZARAM, BOUAICHA A, RAGAB K H A. Fatigue characteristics and quality index of A357 type semi-solid aluminum castings used for automotive application [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2015, 24 (8) : 3084.
- [2] TIRYAKIOGLU M, ALEXOPOULOS N D. The effect of artificial aging on tensile work hardening characteristics of a cast Al-7Si-0.55Mg (A357) alloy [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2008, 39 (11) : 2772.
- [3] 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, 41 (23) : 34-35
- [4] RAO G A, PRASAD K S, KUMAR M, et al. Characterisation of hot isostatically pressed nickel base superalloy Inconel 718 [J]. Materials Science & Technology, 2003, 19 (3) : 313-321.
- [5] LAMBERIGTS M, DIDERRICH E, COUTSOURADIS D, et al. HIP' ing various precision cast engine components in nickel-base superalloys [C]// Superalloys 1980, 1980, 9: 285-289.
- [6] 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.
- [7] 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研究 [J]. 轻合金加工技术, 2016, 44 (6) : 55-59.

Application of HIP to Aluminum Alloy Casting

DING Jian, LI Ya-hui

(AVIC Jincheng Nanjing Engineering Institute of Aircraft System, Nanjing 210000, Jiangsu, China)

Abstract:

The effects of hot isostatic pressing (HIP) on the micro shrinkage defects, microstructure and mechanical properties of ZL114A high pressure shell castings were studied. The results show that the hot isostatic pressing can eliminate completely the micro shrinkage defects in the castings, and the fluorescence examination for the heavy sections of the castings is qualified. The microstructure and the tensile strength of the casting body remain basically unchanged, but the elongation rate is increased, and the fatigue performance and the service reliability of the castings are significantly improved after HIP.

Key words:

hot isostatic pressing; aluminum alloy casting; micro shrinkage; elimination of defects