

热等静压处理对 ZL205A 合金组织的影响

冯广召, 李少楠, 程运超, 柳 森, 周耀忠

(北京星航机电装备有限公司, 北京 100074)

摘要: 对经过与未经过热等静压处理的ZL205A合金的组织 and 性能进行了对比研究。结果表明, ZL205A合金力学性能与显微组织之间存在一定关系。经热等静压处理后, 合金中 Al_2Cu 强化相在晶界的偏聚量减少, T相在组织中的弥散程度加强, 合金显微组织中出现了二次枝晶的熔断与消失, 提高了合金的力学性能。其原因一方面是由于显微孔洞等缺陷在高温蠕变作用下形成闭合, 另一方面是在高温、高压作用下, 合金组织中的空位扩散与位错扩散作用增强, 显微孔洞闭合界面发生融合, 枝晶组织减少, 强化相弥散程度增加, 从而使合金的力学性能提高, 且力学性能值的分散程度降低。

关键词: 热等静压; 蠕变; 扩散; 晶界强化; ZL205A合金

作为一种材料处理工艺, 热等静压 (Hot Isostatic Pressing, HIP) 技术在航空、航天等领域得到了广泛深入的研究和应用。HIP处理一方面可以消除合金内部的缩松和缩孔等缺陷, 提高组织致密性^[1-3], 另一方面可以提高合金内部空位浓度, 从而提高HIP处理过程中元素的扩散能力, 进而提高强化相在组织中的均匀分布, 改变合金的组织形态, 从而提高合金力学性能的均匀性^[4-5]。虽然HIP技术在高温合金、钛合金和粉末冶金等方面研究较为成熟, 但在铝、镁等合金方面的研究, 特别是关于热等静压处理与铝、镁合金组织关系方面的研究仍较少。因此, 有必要对铝、镁等合金的热等静压处理前后组织变化及其对力学性能的影响进行研究, 以得到组织和性能更好的铸件, 从而可以提高铸件使用过程中的安全裕度。ZL205A合金是当前世界上抗拉强度最高的一种铸造铝合金, 广泛应用于航空、航天等重要领域。但由于其成分复杂, 且具有较宽的凝固区间 (544 ~ 633 °C), 所以在凝固过程中容易出现二次枝晶的长大和枝晶间元素的偏聚, 形成显微疏松、偏析等缺陷。ZL205A合金在热处理过程中会产生 θ 相 (Al_2Cu) 和T相 ($Al_{12}CuMn_2$) 等强化相, 其数量、尺寸、形态及在基体中的分布是影响合金性能的重要因素, 而热等静压处理工艺可以改变强化相在基体中的分布状态^[6-8]。在此背景下, 本文对航空、航天领域常用的ZL205A合金试样在经热等静压处理与未经热等静压处理的力学性能及金相组织变化情况进行研究, 并对热等静压处理过程中合金凝固组织的变化机理进行分析。

作者简介:

冯广召 (1983-), 男, 工程师, 硕士, 主要研究方向为铝、镁等有色合金铸造。E-mail: firefox2010@126.com

中图分类号: TG146.2⁺¹

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977 (2021)

09-1043-04

收稿日期:

2021-02-28 收到初稿,

2021-05-05 收到修订稿。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

试验所用材料为ZL205A合金, 其成分如表1所示。

1.2 试验方法

试验材料经中频感应炉熔化、精炼后在真空条件下浇注成形, 获得 $\Phi 12\text{ mm} \times 120\text{ mm}$ 的圆柱形试棒。浇注好的试棒分为两组, 一组不做热等静压处理, 另一组做热等静压处理, 其HIP处理工艺参数为: 在130 MPa、525 °C温度下保温3 h。然后将两组试棒同炉进行538 °C、12 h的固溶处理和155 °C、9 h的时效处理后分别进行拉伸试验。

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

| 基本组元 | | | | | | | | 杂质 < | | | | $w_B / \%$ |
|---------|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|----|------|------|------|------|------------|
| Cu | Mn | Ti | Cd | Zr | V | B | Al | Mg | Fe | Si | 其他单个 | |
| 4.6~5.3 | 0.3~0.5 | 0.15~0.35 | 0.15~0.25 | 0.05~0.30 | 0.05~0.30 | 0.005~0.06 | 余量 | 0.05 | 0.15 | 0.06 | 0.05 | 0.30 |

拉伸试验后，在两组试棒距同一端20 mm位置处分别取样并进行组织分析。

2 试验结果

2.1 显微组织

试样经打磨、抛光和腐蚀处理后进行了电子显微分析，其显微组织如图1所示。

图1a和c中，白色网状组织为偏聚于晶界附近的 θ 相(Al_2Cu)，晶粒内部弥散分布的质点为T相($Al_{12}CuMn_2$)，T相可以阻碍位错运动，提高合金的室温和高温强度。在晶粒内部还存在大量颜色较深的棒状和枝状组织，其长度最小约20 μm ，最长约50 μm ，这些组织很可能由元素偏聚引起。热等静压处理后，由图1b和d可以看出，一方面晶界变得不再明显，另一方面晶粒内部T相($Al_{12}CuMn_2$)弥散程度加强，深色棒状组织尺寸变短，甚至变为斑状，棒状组织最大长

度不超过30 μm ，斑状组织直径约10 μm 。其原因是在热等静压作用下合金元素的扩散能力增强，合金元素在扩散驱动力作用下扩散速度加快，减少了合金元素的晶界偏聚和晶内偏聚，而且随着扩散作用的进一步增强，出现了枝晶“熔断”，组织形态则由长棒状或枝状变为短棒状或斑状。

2.2 力学性能

对经HIP处理+热处理后试样的力学性能进行了测试，结果如表2所示。

由表2可知，经热等静压处理后试样的抗拉强度主要集中在500~518 MPa之间，变化范围为18 MPa，最大抗拉强度为529 MPa，平均抗拉强度达到511.6 MPa，超过ZL205A合金440 MPa的单铸试棒强度要求。试样的伸长率则集中在7%~8.5%之间，变化范围为1.5%，最大伸长率为9.5%，平均伸长率为7.8%，超过ZL205A

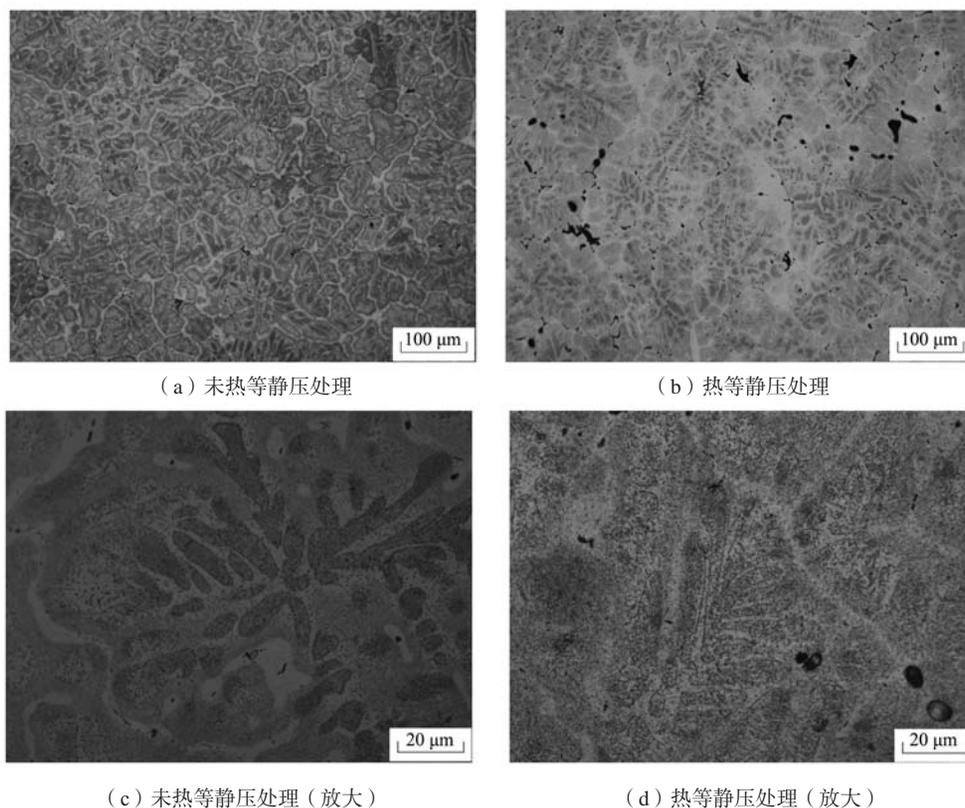


图1 热等静压处理与未热等静压处理合金的显微组织对比

Fig. 1 Comparison of microstructure before and after HIP

合金7%的单铸试棒伸长率要求。而未经热等静压处理试样的抗拉强度主要集中在478~514 MPa之间,变化范围为36 MPa,最大抗拉强度为520 MPa,平均抗拉强度达到501.2 MPa。伸长率则集中在5.5%~8.0%之间,变化范围为2.5%,最大伸长率为9.0%,平均伸长率为6.85%,并出现部分试样的伸长率不符合标准要求的情况。这是因为未经热等静压处理的试样组织中存在显微孔洞和粗大枝晶组织,拉伸过程中这些显微孔洞或枝晶组织会成为应力源,又因为这些显微缺陷或粗大枝晶组织的分布没有规律性,所以未经热等静压处理试样的抗拉强度值较低且其值的分散度较大。热等静压处理后,影响力学性能的气孔、疏松等显微缺陷闭合,同时高温、高压环境下,晶界处偏聚元素的扩散能力增强,提高了基体内强化相分布的均匀性,故在提高力学性能的同时其分散程度也得到一定改善^[4, 9]。

3 分析与讨论

热等静压过程中,合金在高温、高压环境下发生蠕变变形,其凝固组织中的未与外界连通的显微孔洞首先在压力作用下发生闭合,并随后发生闭合面两侧元素间的互扩散^[8],而界面处元素之间的互扩散受界面处空位浓度影响,Nabarro-Herring等人研究认为,闭合界面处空位浓度差变化符合如下规律^[5]:

$$\Delta C = \frac{\sigma\Omega}{KT} C_0 \quad (1)$$

式中: Ω 为原子体积; C_0 为温度 T 时的平衡空位浓度; K 为常数; σ 为作用于晶界上的应力。

可见,随应力 σ 增大,界面处空位浓度差 ΔC 增大,空位浓度梯度增大,界面处空位扩散作用加强,

表2 热等静压处理与未热等静压处理合金的力学性能对比
Table 2 Comparison of mechanical properties of ZL205A alloy before and after HIP

| 试样 编号 | 热等静压处理 | | 未热等静压处理 | |
|----------|----------|-------|----------|-------|
| | 抗拉强度/MPa | 伸长率/% | 抗拉强度/MPa | 伸长率/% |
| 1 | 510 | 7.0 | 508 | 8.0 |
| 2 | 518 | 7.0 | 512 | 7.0 |
| 3 | 502 | 8.5 | 514 | 5.5 |
| 4 | 514 | 9.0 | 478 | 5.0 |
| 5 | 518 | 7.0 | 495 | 8.0 |
| 6 | 481 | 8.5 | 505 | 9.0 |
| 7 | 510 | 7.5 | 505 | 6.5 |
| 8 | 526 | 6.0 | 490 | 6.5 |
| 9 | 529 | 9.5 | 520 | 7.0 |
| 10 | 508 | 8.0 | 485 | 6.0 |
| 平均值 | 511.6 | 7.8 | 501.2 | 6.85 |

显微孔洞闭合界面两侧元素互扩散作用加强,最终形成闭合界面的融合,有效消除了界面机械结合所形成的应力源,从而提高了力学性能。

热等静压工艺除能消除机械结合界面外,还能改变组织形态。影响合金力学性能的因素主要包括强化相的形态、大小以及在组织中分布的弥散程度等因素。细小、均匀的强化相有利于提高合金的室温力学性能,工艺上一般通过细化晶粒或调整热处理制度等方法来提高合金的力学性能,亦可以利用热等静压工艺提高合金的力学性能。龚怡^[8]等用热等静压对ZL111合金组织和性能影响的研究中认为,凝固组织中疏松缺陷周围的枝晶组织会形成疲劳断裂源,经热等静压处理的试样疲劳断口附近无枝晶组织而是沿滑移面扩展。可见,凝固组织中应力集中源除受显微疏松、气孔等缺陷数量影响外,还受枝晶组织形态和分布的影响,枝晶组织形态的变化和数量的减少可进一步降低应力集中源,从而提高合金的力学性能。所以,任何改变强化相形态和强化相在组织中分布的方法都可以改变合金的力学性能。合金元素在组织中的分布受扩散作用影响很大,并遵循如下规律:

$$x \propto \sqrt{4Dt} \quad (2)$$

$$D = D_0 \exp(-Q/RT) \quad (3)$$

式中: x 为扩散距离; D 为扩散系数; D_0 为扩散常数; Q 为扩散激活能; R 为气体常数; T 为绝对温度。

扩散系数的大小受扩散激活能 Q 和温度 T 影响,扩散激活能 Q 越低,温度 T 越高,扩散系数越大,从而相同时间内溶质元素的扩散距离也越大。由于热等静压处理过程中,发生了材料的蠕变变形和位错增殖,则公式(2)可写为^[5]:

$$D_{\text{eff}} = D_v + 5D_c \left(\frac{\sigma/\sqrt{3} - 0.75\alpha 10^{-3}G}{\alpha G} \right) \quad (4)$$

式中: D_{eff} 为有效扩散系数; D_v 为晶格上的扩散系数; D_c 为位错管道扩散系数; α 为常数; G 为自由能。

在热等静压条件下,合金基体中的位错数量有了明显增加,与正常热处理制度相比,位错数量有了数量级的提高,所以,有效扩散系数 D_{eff} 较扩散系数 D 有很大提高。在空位扩散和位错扩散共同作用下,除增强了组织中强化相的均匀程度外,合金组织中还出现了二次枝晶和一次枝晶分离的“熔断”现象,如图1b所示。“熔断”现象的发生,主要是合金非平衡凝固过程中一次枝晶或者二次枝晶根部与周围液相存在较大浓度梯度,引起液相中的低熔点元素向晶内扩散,发生一次枝晶或二次枝晶与枝晶干分离的现象,所以熔断过程受Gibbs-Thomson效应的影响,并首先发生在枝晶根部。多元合金在非平衡凝固过程中枝晶根部偏聚的低熔点元素在热等静压作用下,扩散作用大大增

强, 由于凝固过程中枝晶根部聚集的元素浓度较端部大, 所以扩散在枝晶根部优先进行, 而随着扩散的进行, 一次或二次枝晶根部与枝晶间的成分变得均匀, 并出现了一次枝晶或二次枝晶的熔断或消失, 从而增加了组织的均匀性, 因此提高了材料的力学性能和力学性能的稳定性和均匀性。

4 结束语

经过热等静压处理后, ZL205A合金力学性能的离

散程度降低, 力学性能有所提高。主要是在高温蠕变作用下凝固组织中的显微孔洞闭合, 并在闭合界面处发生了元素的扩散, 消除了机械闭合界面, 减少了应力集中源。空位和位错扩散增强, 引起了一次枝晶和二次枝晶的熔断, 使枝晶组织减少, 有利于降低晶界处的应力集中, 从而提高材料的力学性能。另外, 合金元素扩散作用的增强, 也提高了强化相在凝固组织中的弥散程度, 从而提高了合金力学性能的均匀性。

参考文献:

- [1] 隋泳恩, 谭朝鑫, 张会国. 热等静压及后续处理对铝合金叶片及力学性能的影响 [J]. 铸造, 2000, 49 (4): 194-197.
- [2] 杨勋烈. 热等静压 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1983: 151-159.
- [3] LEI C S C, FRAZIER W E, LEE E W. The effect of hot isostatic pressing on cast aluminum [J]. The Journal of The Minerals, Metals & Materials society, 1997, 49 (11): 38-39.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 王晓林, 赵志龙, 张廷生, 等. TC10合金铸造缺陷在热等静压条件下的弥合机理初探 [J]. 铸造, 2011, 20 (7): 731-734.
- [7] 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.
- [8] 龚怡, 朱守星, 张少宗. 热等静压对ZL111-T6铝合金叶轮组织和性能的影响 [J]. 理化检验 (物理分册), 2011, 47 (6): 333-336.
- [9] 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.

Effect of Hot Isostatic Pressing Treatment on Micro-Structure of ZL205A Alloy

FENG Guang-zhao, LI Shao-nan, CHENG Yun-chao, LIU Sen, ZHOU Yao-zhong
(Beijing Xinghang Electro-mechanical Equipment Co., Ltd., Beijing 100074, China)

Abstract:

The microstructure and performance of ZL205A alloy with & without hot isostatic pressing (HIP) treatment were comparatively studied. The results indicate that there is a certain relationship between the microstructure and performance of ZL205A alloy. After HIP treatment, the segregation of Al_2Cu phase on the crystal boundary decreases and the distribution of T phase in the microstructure is more uniform. It is also found that the first dendrites in the microstructure are broken and disappeared. Thus the mechanical properties of the alloy are improved. The reason of performance improvement is that on one hand, the micro-porosity in the microstructure is closed under the action of creep at high temperature, and on the other hand, under the action of high temperature and high pressure, the diffusion of vacancy and dislocation is reinforced in the microstructure of the alloy, and the interface between the boundaries of the closed pores and the micro-porosity is merged, then the dendrites in the microstructure of the alloy are decreased and the distribution of the strengthening phases is more uniform, thus improving the performance of the alloy and reducing the dispersibility of the performance values.

Key words:

hot isostatic pressing; creep; diffusion; grain boundary strengthening; ZL205A alloy