

行波磁场对 ZL205A 合金薄壁铸件凝固缺陷和力学性能的影响

王 亮¹, 范学焱¹, 骆良顺¹, 许纪刚¹, 陈瑞润¹, 伊洪勇¹, 周国柱²,
王 宁³, 张建兵², 苏彦庆¹

(1. 哈尔滨工业大学 精密热加工国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

(2. 首都航天机械公司, 北京 100076)

(3. 北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

摘 要: 研究了凝固过程中局部加载行波磁场对 ZL205A 合金薄壁铸件缩孔、缩松和力学性能的影响。利用扫描电子显微镜对制备试样的显微组织进行分析, 采用电子万能材料试验机对铸件力学性能进行测试。结果表明: 与相同条件下获得的未施加行波磁场的铸件进行对比, 施加行波磁场的铸件缩孔、缩松缺陷得到大幅改善; 经过 T6 热处理后, 抗拉强度、屈服强度、延伸率分别由 436.61 MPa、390.22 MPa、3.29% 提高到 470.24 MPa、416.97 MPa、4.15%, 抗拉强度和屈服强度分别提高了 33.63 MPa、26.75 MPa, 延伸率提高了 26.14%。

关键词: 行波磁场; ZL205A 合金; 薄壁铸件; 缩孔和缩松

中图分类号: TG249.9

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2016)12-3177-04

ZL205A 合金具有良好的综合性能, 如强度和硬度高, 塑性及韧性好, 耐腐蚀, 易焊接, 机械加工性能优良, 是目前世界上抗拉强度最高的铸造铝合金之一 (T6 热处理后抗拉强度可达 510 MPa), 在以铸代锻的过程中扮演着重要的角色, 已经在航空航天、汽车、轮船等领域得到广泛的应用^[1-5]。但该合金固液相线分别为 544 和 633 °C, 其凝固区域温度范围宽达 89 °C, 属于宽结晶温度范围的合金, 铸造性能极差, 容易产生缩孔缩松、偏析、夹渣、热裂等缺陷, 使其力学性能大大下降, 导致应用范围受到了限制。其中以缩孔缩松缺陷最难于控制, 并且铸件中的缩孔缩松缺陷往往会使铸件发生无预兆的失效, 造成巨大的经济损失, 甚至人员伤亡。因此, 采取措施改善 ZL205A 合金铸件中缩孔缩松缺陷, 提高其力学性能并努力扩大其应用范围具有十分重要的意义。

电磁场技术在材料加工领域得到广泛的研究, 其中关于行波磁场的研究较为突出^[6-9]。行波磁场在 1930 年已经在钢的连铸中得到实际应用^[10], 行波磁场在连铸中可以减小中心偏析、中心缩孔缩松、细化组织, 还可以去除夹杂, 对提高钢坯的质量具有重要的作用^[11,12]。最近的研究发现行波磁场在其他铸造方式中也可以通过搅拌减

小偏析、细化枝晶^[13]、除气除杂^[14,15], 另外还可以通过行波磁场增加金属液的充型动力, 实现行波磁场铸造^[16]。

对于宽结晶温度范围的合金铸件, 采用普通的冒口来试图消除其缩孔缩松缺陷是很困难的。通常的方法是采用增大冒口的补缩压力或增大铸件冷却速度等方法来增加铸件的致密性, 而利用行波磁场产生的强迫对流来改善甚至消除铸件缩孔缩松的尝试, 国内外还很少有这方面的相关报道。出于此目的, 设计了行波磁场发生器, 探讨了行波磁场对宽结晶温度范围合金铸件缩孔缩松和力学性能的影响, 讨论了行波磁场改善铸件缩孔缩松和力学性能的机制。

1 实 验

实验用合金为商业 ZL205A 铝锭, 化学成分如表 1 所示。采用电阻炉对合金进行熔炼, 精炼除气后进行浇注, 浇注温度为 715 °C, 在铸件凝固过程中施加方向向下的行波磁场, 将其定义为下行行波磁场。行波磁场距铸件表面距离 20 mm。行波磁场由六组线圈组成, 每组线圈为 200 匝, 励磁电流为 7 A。为消除外界实验条件等因素的影响, 本实验设计两侧采用完全对称的浇注系统。

收稿日期: 2015-12-05

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(2011CB610406); 黑龙江省自然科学基金(JC201209); 哈尔滨科技局项目(2012DB2BP015)

作者简介: 王 亮, 男, 1981 年生, 博士, 讲师, 哈尔滨工业大学材料科学与工程学院, 精密热加工国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001, 电话: 0451-86413931, E-mail: wliang1227@hit.edu.cn

浇注后得到施加行波磁场和未施加行波磁场的薄板件 2 个，规格均为 300 mm×200 mm×20 mm，编号分别为薄板 Y 和薄板 W。用电火花线切割机制备试样。试样用金相砂纸从 100#打磨到 2000#后进行剖光，抛光液为 Cr₂O₃ 水溶液，之后利用金相显微镜观察试样金相组织。

矩形横截面拉伸试样尺寸图如图 1 所示，采用 T6

表 1 ZL205A 合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of ZL205A alloy (wt%)

Cu	Mn	Ti	V	Zr	Cd	B	Al
4.87	0.40	0.30	0.25	0.15	0.15	0.02	Bal.

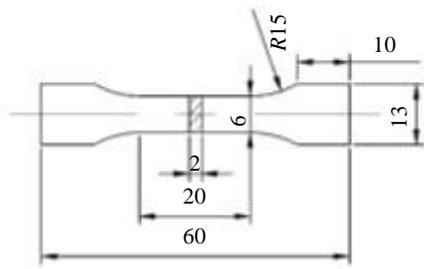


图 1 拉伸试样尺寸图

Fig.1 Dimension of tensile specimen (mm)

热处理工艺，具体参数为：2 h 内将试样加热到 538 °C，并保温 18 h 进行固溶处理，之后取出试样在 40 °C 恒温水浴中进行淬火。然后在 0.5 h 内将试样加热到 175 °C 并保温 4 h 进行时效，之后出炉空冷。拉伸试样经 400#砂纸磨光表面后在电子万能材料试验机上进行室温拉伸试验，其结果取 3 个试样的平均值。

2 结果与分析

2.1 行波磁场对缩孔缩松的影响

在薄板 Y 和薄板 W 的相同高度位置自上而下分别等距离采集 3 个试样进行分析，其扫描电镜照片如图 2 所示。图中黑色区域为缩孔缩松。由图可知，施加行波磁场后铸件的缩孔缩松缺陷得到了明显的改善。由于 ZL205A 合金铸件的凝固区域较宽，液态金属的过冷比较小，容易发展成为树枝比较发达的粗大等轴晶组织。当粗大的等轴晶相互搭接以后，便将尚未凝固的液态金属分割成多个分散的互不沟通的熔池，最后在铸件中形成分散性的缩孔、缩松缺陷，如图 2a, 2b, 2c 所示。施加行波磁场以后，金属熔体在凝固过程中除了受到重力的作用，还受到沿行波磁场作用方向由行波磁场产生的电磁体积力的作用，金属熔体沿行波磁场作用方向受到更大的挤压力，一方面

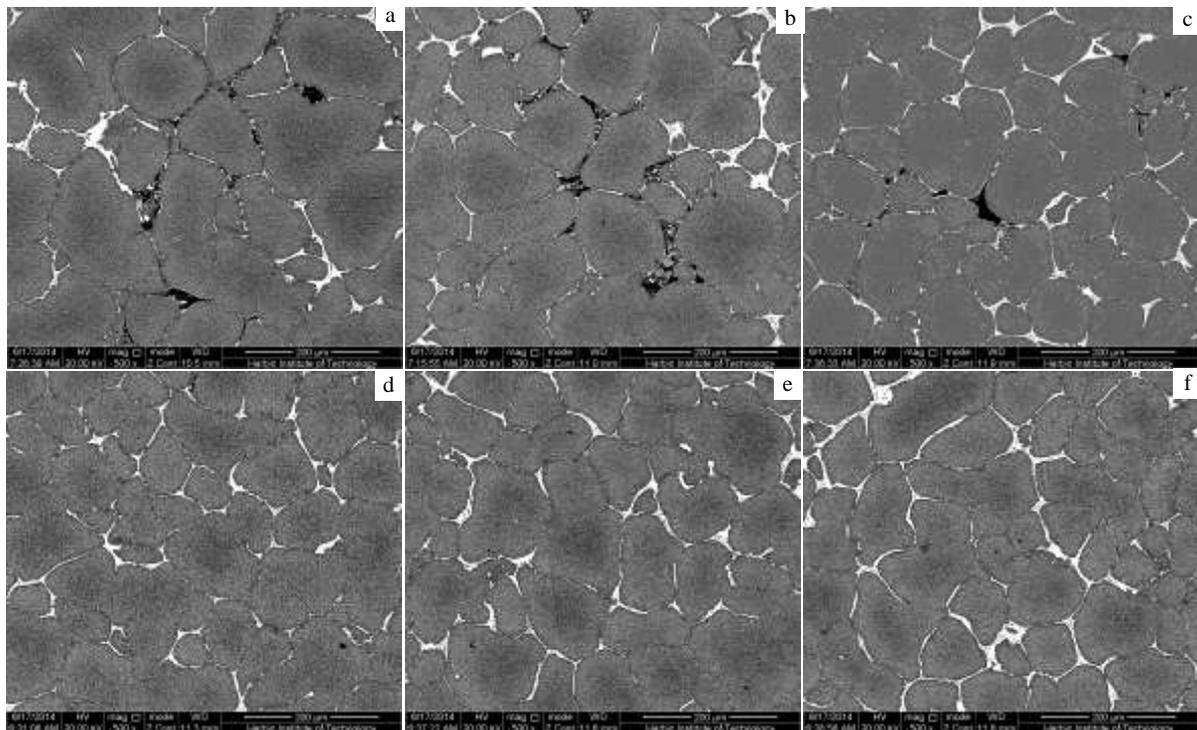


图 2 未施加行波磁场与施加行波磁场薄板件凝固组织

Fig.2 Microstructures of ZL205A solidified without traveling magnetic field (a, b, c) and with traveling magnetic field (d, e, f): (a, d) the upper side on sheet solidified; (b, e) the middle on sheet solidified, and (c, f) the bottom side on sheet solidified

增大了金属熔体凝固过程中穿透枝晶搭接形成骨架的能力;另一方面行波磁场在金属熔体中引起的强制对流搅拌效应有破碎树枝晶的作用,进一步降低了金属液凝固过程中的补缩阻力,进而会产生更好的补缩效果,降低缩孔、缩松出现的几率,使缩孔、缩松缺陷得到明显的改善,如图2d, 2e, 2f所示。

2.2 行波磁场对力学性能的影响

在薄板Y和薄板W的相同高度位置自上而下分别等距离采集5个拉伸试样进行力学性能分析。T6热处理后的力学性能变化如图3所示。由图3可知,施加下行行波磁场以后,铸件的力学性能得到了较大幅度的提高。由于实验数据都比较稳定,故计算以上5个试样的力学性能的算数平均值来表征铸件整体的力学性能。通过分析图3中的实验数据发现,施加下行行波磁场以后,经过T6热处理的试样,抗拉强度、屈服强度、延伸率分别由436.61 MPa、390.22 MPa、3.29%提高到470.24 MPa、416.97 MPa、4.15%,抗拉强度和屈服强度分别提高了33.63 MPa、26.75 MPa,延伸率提高了26.14%。

这是由于施加下行行波磁场以后,在行波磁场产生的对流搅拌作用下,铸件的凝固组织中较大的呈板块状分布的第二相颗粒受到破碎,变得更加细小,分布更加均匀,进而使位错在运动过程中受到更大的阻碍,细小而均匀的第二相颗粒延缓了早期裂纹的萌生,同时使产生的初期裂纹尺寸更小,只有发生更大的变形才能使材料发生断裂,所以铸件的强度和延伸率会得到明显的提高。

图4是施加行波磁场与未施加行波磁场铸件的拉伸断口形貌照片比较。由图可知,施加行波磁场前后,断口表面都比较平整,且断口中存在大量的等轴韧窝,

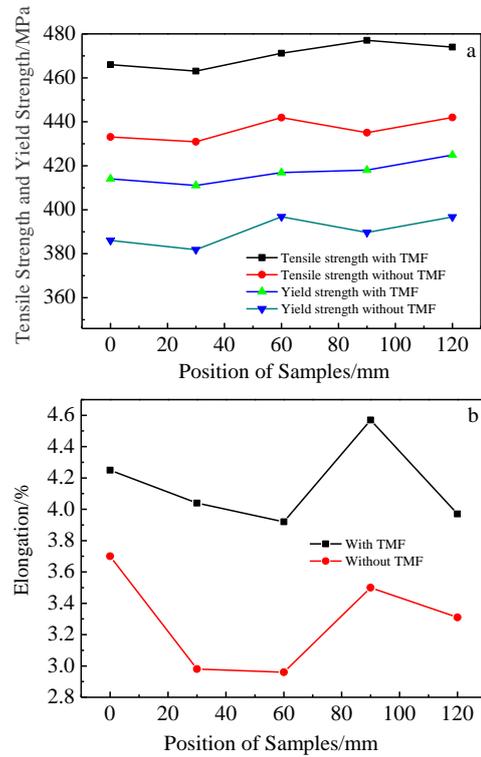


图3 T6热处理后力学性能

Fig.3 Tensile strength and yield strength (a) and elongation (b) of ZL205A solidified with traveling magnetic field and without traveling magnetic field

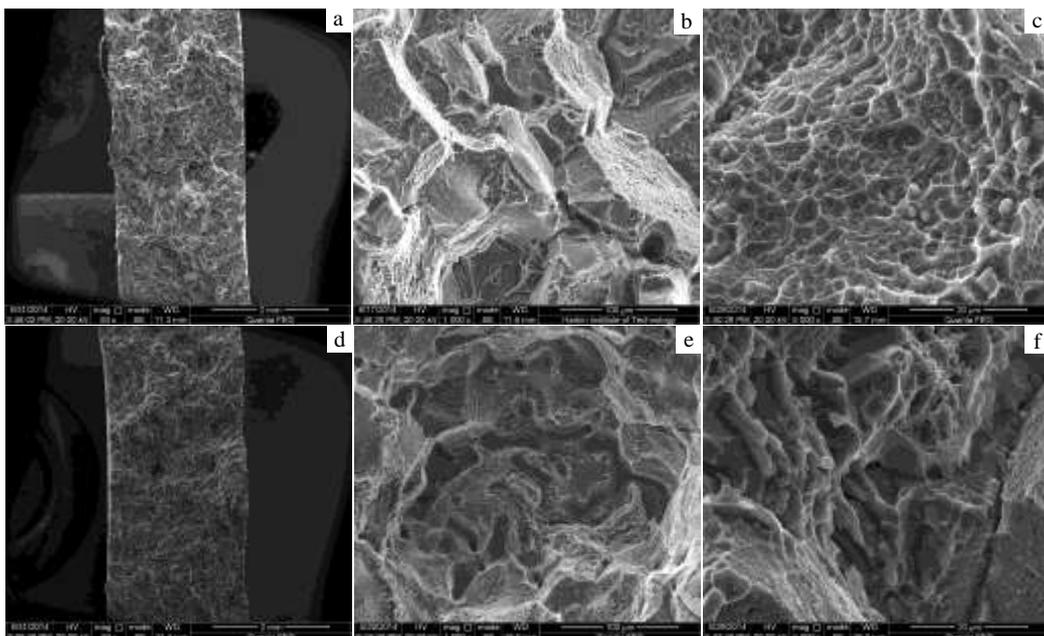


图4 铸件的拉伸断口形貌

Fig.4 Fracture morphologies of ZL205A solidified with traveling magnetic field (a~c) and without traveling magnetic field (d~f)

故 2 种情况均为微孔聚集型穿晶韧性断裂。对比图 4b、4e 可知,施加下行行波磁场后,断口中韧窝数量更多,并且断口处几乎没有由于凝固组织中存在疏松而产生的自由面,说明合金的致密性更好。对比图 4c、4f 可知,施加下行行波磁场以后,断口处韧窝中的第二相颗粒更加细小,且分布更加均匀,这有利于形成分布均匀并且深而多的韧窝花样;未施加行波磁场铸件的韧窝中第二相颗粒尺寸较大,且分布不均匀,容易产生应力集中,这会促进裂纹萌生,对韧性和强度都不利。同时发现铸件中的凝固收缩缺陷基本消失,可以有效降低铸件在服役过程中产生裂纹的倾向性,延缓铸件内部产生早期裂纹的时间,提高铸件使用寿命。

3 结 论

1) 在宽结晶温度区间的 ZL205A 合金凝固过程中施加行波磁场可以有效改善或消除铸件的凝固收缩缺陷。

2) 在行波磁场作用下,合金中第二相粒子分布更加均匀,韧窝更深而且均匀,可以有效提高铸件的强度和韧性。经过 T6 热处理后,铸件的抗拉强度、屈服强度、延伸率分别由 436.61 MPa、390.22 MPa、3.29% 提高到 470.24 MPa、416.97 MPa、4.15%,抗拉强度和屈服强度分别提高了 33.63 MPa、26.75 MPa,延伸率提高了 26.14%。

参考文献 References

- [1] Xu Y J, Su Y Q, Luo L S *et al.* *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2011, 21(9): 1981
 [2] Shi Xiaoping(史晓平), Li Yusheng(李玉胜). *Foundry*(铸造)[J],

- 2011, 60(10): 1022
 [3] Wang Lei(王雷), Shen Jun(沈军), Wang Lingshui(王灵水). *Materials Review* (材料导报)[J], 2011, 25(6): 5
 [4] Xian Fuchao(贤福超), Hao Qitang(郝启堂), Li Xinlei(李新雷) *et al.* *Foundry Technology* (铸造技术)[J], 2012, 33(12): 1391
 [5] Li Zuowei(李作为), Liu Xiaoteng(刘晓腾). *Foundry*(铸造)[J], 2013, 62(6): 549
 [6] Shinmura T *et al.* *Int J Jpn Soc Precis Eng*[J], 1994, 28(1): 29
 [7] Tanaka Y, Sassa K, Iwai K *et al.* *ISIJ International*[J], 1995, 81(12): 1120
 [8] Ono N *et al.* *J Electrochem Soc*[J], 1997, 144: 764
 [9] Tomzig E, Virbulis J, Ammon W V *et al.* *Mat Sci Semicon Proc*[J], 2002, 5(4-5): 347
 [10] Moffatt H K. *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*[J], 1991, 3(5): 1336
 [11] Raihle C M, Sivesson P, Tukiainen M *et al.* *Ironmaking and Steelmaking*[J], 1994, 21(6): 487
 [12] Oh K S, Shin Y K, Chang Y W. *Trans of ISS*[J], 1994 (4): 43
 [13] Zhang Qi(张琦), Wang Tongmin(王同敏), Li Tingju(李廷举) *et al.* *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2007, 43(6): 668
 [14] Zhong Yunbo, Ren Zhongming. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2000, 10(2): 240
 [15] Zhao Chunhui(赵春晖), Li Qiulin(李秋林), Liu Wei(刘伟). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2012, 41(S2): 573
 [16] Fan Xueyi(范学焱), Wang Liang(王亮), Du Zhiqiang(杜志强) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2015, 44(11): 2803

Influence of Traveling Magnetic Field on Solidification Defects and Mechanical Properties of ZL205A Alloy Sheet Casts

Wang Liang¹, Fan Xueyi¹, Luo Liangshun¹, Xu Jigang¹, Chen Ruirun¹, Yi Hongyong¹, Zhou Guozhu², Wang Ning³, Zhang Jianbing², Su Yanqing¹

(1. National Key Laboratory for Precision Hot Processing of Metals, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

(2. China Shoudu Space Machinery Company, Beijing 100076, China)

(3. Beijing Institute of Aerospace System Engineering, Beijing 100076, China)

Abstract: The effect of local loading traveling magnetic field on shrinkage cavity and porosity and mechanical properties of ZL205A sheet casts was studied. The microstructure and mechanical properties were analyzed by scanning electron microscope and electronic universal material testing machine, respectively. Results show that under travelling magnetic field, the shrinkage cavity and porosity decrease greatly. After T6 heat treatment, the tensile strength, yield strength and elongation increase from 436.61 MPa, 390.22 MPa and 3.29% to 470.24 MPa, 416.97 MPa and 4.15%, respectively; the tensile strength and yield strength increase by 33.63 MPa and 26.75 MPa, respectively, and the elongation increases by 26.14%.

Key words: travelling magnetic field; ZL205A alloy; sheet casts; shrinkage cavity and porosity

Corresponding author: Wang Liang, Ph. D., Lecturer, National Key Laboratory for Precision Hot Processing of Metals, School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, P. R. China, Tel: 0086-451-86413931, E-mail: wliang1227@hit.edu.cn