

气滑半连铸 6061 铝合金铸锭热裂产生原因分析

王依山¹ 何生平² 王昕平² 叶 强² 李永富² 张 卓¹ 姜凯曦¹ 单长智³ 郝 海^{1,3}

(1.大连理工大学材料科学与工程学院,凝固控制与数字化制备技术辽宁省重点实验室;
2.国电投宁夏青铜峡新材料有限公司;3.大连理工大学宁波研究院)

摘 要 采用气滑半连铸方法制备了 $\phi 254$ mm 的 6061 铝合金圆铸锭。利用光学显微镜、扫描电镜、万能试验机等手段研究了铸锭的合金成分、微观结构与力学性能等,并结合相图计算,分析了铸锭中心热裂产生的原因。结果表明,较高的 Si 含量使得铸锭中心晶粒粗大的同时聚集大量针状 β -Al₃FeSi 相,这会降低铸锭中心区域伸长率并造成局部应力集中,从而引起铸锭中心热裂。综合分析,建议在该规格 6061 铸锭气滑半连铸时,控制过剩的 Si 含量,以减少铸锭热裂的发生。

关键词 6061 铝合金;气滑半连铸;热裂;过剩 Si

中图分类号 TG146.21;TG249.7 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.08.009

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Hot Crack Analysis of 6061 Aluminum Alloy Ingot by Air-slip Semi-continuous Casting

Wang Yishan¹, He Shengping², Wang Xinping², Ye Qiang², Li Yongfu², Zhang Zhuo¹, Jiang Kaixi¹,
Shan Changzhi³, Hao Hai^{1,3}

[1. Key Laboratory of Solidification Control and Digital Preparation Technology(Liaoning Province),
School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology;
2. Qingtongxia New Materials Limited(Ningxia Province), State Power Investment Co., Ltd.;
3.Ningbo Institute of Dalian University of Technology]

Abstract: 6061 aluminum alloy ingots with the diameter of $\phi 254$ mm were fabricated by air-slip semi-continuous casting. The composition, microstructure and mechanical properties of ingots were characterized by optical microscopy(OM), scanning electron microscopy(SEM), universal stretching machine, and the origination of hot crack was analyzed combined with phase diagram calculation software. The results indicate that the higher Si content contributes to coarser grain and aggregation of large amounts of β -Al₃FeSi phases in the center of the ingot, resulting in the poor elongation and local stress concentration, leading to hot crack. In conclusion, it is recommended that excess Si amount should be controlled during the semi-continuous casting to reduce the occurrence of hot crack.

Key Words: 6061 Aluminum Alloy, Air-slip Semi-continuous Casting, Hot Crack, Excessive Si

6061 铝合金属于 Al-Mg-Si 系变形铝合金,具有比强度高、耐腐蚀性好、导电导热性好、易于回收、焊接以及加工性能好等特点,广泛应用于航空航天、交通运输等领域。采用气滑半连铸结晶器制备的 6061 铝合金铸锭产品表面光滑,部分铸锭甚至达到表面无缺陷,铸锭内部晶粒均匀细小。气滑半连铸的核心工艺是利用专门设计的结晶器系统将空气-润滑油混合物引入结晶器内壁并形成工作面。由于空气-油混合物的绝热效果较

好,从而减少了铸锭经由结晶器内壁散失的热量,减小了铸锭的一次冷却强度。同时,结晶器的二次冷却加强,增大了铸锭的轴向冷却强度,减小了铸锭内部的液穴深度,提高了铸造速度^[1-4]。

使用气滑半连铸技术生产铝合金圆铸锭时,在铸锭凝固末期,由于高应力和补缩困难,中心部分会出现热裂。尤其是在生产直径较大的铸锭时,中心部分的冷却速度比表面慢,收缩受到已凝固区域的限制,更易产生

收稿日期:2022-09-21;修改稿收到日期:2022-11-30
基金项目:国电投宁夏青铜峡新材料有限公司资助项目(GDTXCL-QYGL-kjcx-2022-001)
第一作者简介:王依山,男,1993 年出生,硕士研究生,辽宁大连(116024),E-mail: cenfaith@163.com
通信作者:郝海,男,1969 年出生,教授,辽宁大连(116024),E-mail: haohai@dlut.edu.cn
引用格式:王依山,何生平,王昕平,等. 气滑半连铸 6061 铝合金铸锭热裂产生原因分析[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(8):1 060-1 065.
WANG Y S, HE S P, WANG X P, et al. Hot crack analysis of 6061 aluminum alloy ingot by air-slip semi-continuous casting[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(8):1 060-1 065.

热裂,这是制约大规格铸锭半连续铸造的生产瓶颈之一。对于热裂缺陷,先后提出了液膜理论^[5-6]、强度理论^[7]、晶间搭桥理论^[8]和凝固收缩补偿理论^[9]等来分析其形成原因。

在实际工业生产中,热裂的形成是由多种因素造成的,如浇注速度、浇注温度、冷却水量、熔液中夹杂物和合金成分等^[10-11]。合金成分对热裂的形成有非常重要的影响。程鹏飞等^[12]研究发现,随着 Si 含量增加,6061 合金中的 AlFeMnSi 相增多,使得合金在凝固过程中的固相线温度降低,从而增加液体的流动性,降低了合金的热裂趋势。同时随着 Si 含量增加,铸态合金的抗拉强度提高而伸长率降低。EASTON M A 等^[13]发现,当 Mg 含量为 0.15%、Si 含量为 0.2%时,合金具有最大的热裂倾向。

基于以上讨论,对气滑半连铸 6061 合金铸锭展开研究,分析合金铸锭产生裂纹的原因,以期减少铸锭裂纹提供参考。

1 试验方法

试验原材料采用电解铝液、99.7% (质量分数,下同)的工业纯铝、工业高纯镁、Al-12Si、Al-10Cr、Al-50Cu、Al-20Mn、Al-20Fe 和 Al-15Ti 中间合金。

采用固定式熔炼炉熔炼,熔体温度控制在 740~750 ℃,使用电磁搅拌 20 min,精炼、扒渣后,取样化验,进行成分调整,化学成分合格后转至倾转炉,在倾转炉内再次精炼、扒渣,最后在炉内静置 40 min,静置温度为 720~730 ℃。为使熔体中的氢含量、夹杂物含量降到最低,采用在线转子除气装置进行除氢、除杂处理,除气机转子转速为 400~550 r/min,工作时氩气流量为 40~60 L/min,采用双级过滤箱进行除渣,陶瓷过滤板采用为(30+50) ppi 双级过滤。

浇注速度为 410 kg/min,冷却水流量为 230 m³/h,稳定阶段铸造速度为 84 mm/min,铸造气压为 0.4~0.6 MPa,1 号铸锭铸造温度为 700 ℃,2 号铸锭铸造温度为 703 ℃。

对铸锭切片、取样,采用 XRF-1800 型 X 射线荧光光谱仪进行成分检测,铸态微观组织分析在 Leica MEF-3 金相显微镜和装配有能谱仪(EDX)的 Zeiss Supra55 场发射扫描电镜上进行。

根据 GB/T 228-2002 将铸态试样加工成矩形截面的标准拉伸试样,试样尺寸和取样位置见图 1。在万能拉伸试验机上对试样进行拉伸试验,拉伸速率为 2 mm/min。

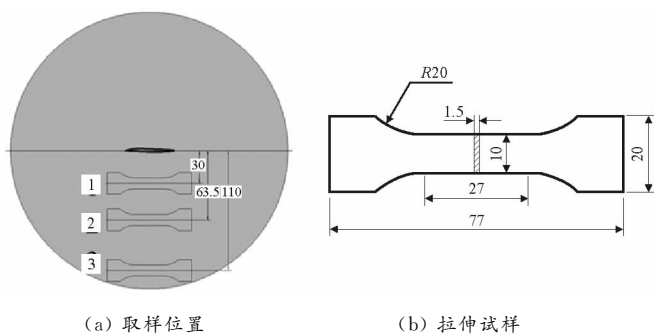


图 1 拉伸试样取样位置及尺寸图

Fig.1 Dimension and sampling position of tensile specimen

2 试验结果与分析

2.1 试验结果

不同工艺条件生产了两批次 6061 合金 $\phi 254$ mm 铸锭,发现 1 号铸锭出现中心裂纹而 2 号铸锭无缺陷,见图 2。1 号铸锭中心的裂纹长度约为 40 mm,该裂纹在轴向上贯穿整个铸锭。图 2c 可观察到裂纹形态曲折,沿晶界分布在基体上,有可能是热裂引起的中心裂纹。这可能是由合金成分造成的,后续对合金的微观组织进行一系列的检测并分析裂纹产生的原因。

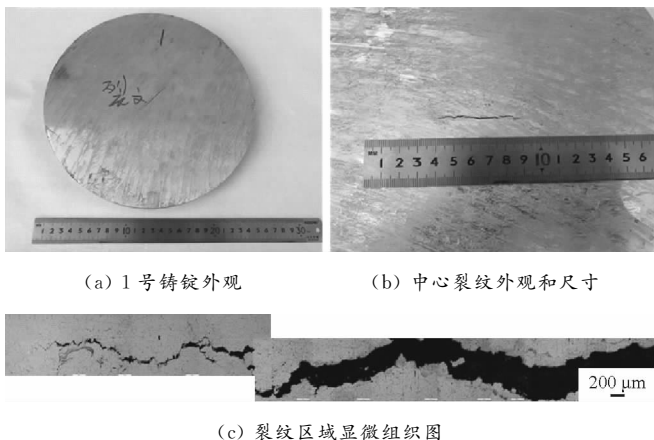


图 2 1 号铸锭宏观和微观图像

Fig.2 Macro and micro images of ingot 1

2.2 试样分析

2.2.1 晶粒尺寸分析

图 3 分别为 1 号铸锭和 2 号铸锭从铸锭中心到边缘不同位置的金相组织。可以看出,铸锭晶粒尺寸呈明显的铸锭组织分布特征,即中心处较粗大,边缘较细小。两个铸锭在金相显微镜下没有观察到明显的夹杂、缩孔等缺陷。对每个区域的晶粒尺寸进行统计、计算后得到两个铸锭的平均晶粒尺寸分布图(见图 4)。可以看出,两个铸锭从心部至边部晶粒尺寸逐渐减小,1 号铸锭中心区平均晶粒尺寸为 127.2 μm ,近边缘处晶粒尺寸约为 87.0 μm ,而 2 号铸锭平均晶粒尺寸分别为

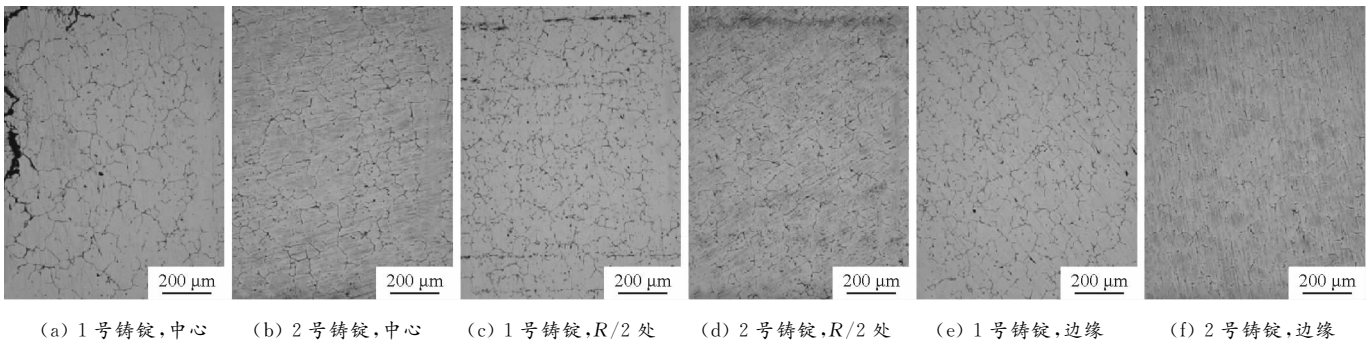


图 3 1 号铸锭和 2 号铸锭不同位置的金相图像

Fig.3 Metallographic images of ingots 1 and 2 at different locations

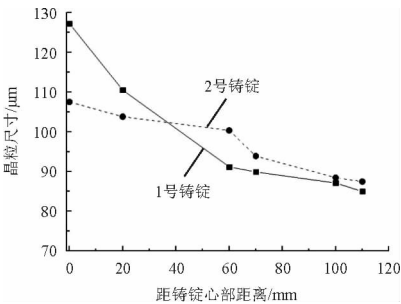


图 4 1 号铸锭和 2 号铸锭从中心到边缘的晶粒尺寸分布

Fig.4 Grain size distribution of ingot 1 and 2 from center to edge

107.5、88.6 μm 。二者的差异最大处出现在铸锭中心,1 号铸锭心部的平均晶粒尺寸比 2 号铸锭大 20 μm 。这是因为 Si 含量的不同会导致凝固过程中固液界面前沿成分过冷的变化,从而导致晶粒尺寸的变化。粗大晶粒会增加铝合金的热裂倾向,因为粗大晶粒有更大的线收缩系数,更低的半固态抗拉强度和塑性,以及更高的糊状区渗透性。这些现象的复杂相互作用会增加合金的热裂倾向^[14-16]。

2.2.2 铸锭成分分析

6061 合金热裂倾向与其合金化元素、相含量及彼此间的交互作用有很大关系。通过 XRF 对铸锭中心部位进行检测,结果见表 1。可见 1 号铸锭中心处 Si 含量超出国标上限,与 2 号铸锭相比,1 号铸锭中心区域的

Mg、Cr、Mn 和 Cu 含量更高。Si 是 6061 合金的主要元素之一,随着 Si 含量的增加,铝合金的相变温度升高,共晶 AlFeMnSi 相含量增多,导致合金流动性增加,会使热裂倾向性降低^[12]。Mn 能够中和再生铝合金中多余的 Fe,减少 Fe 对合金组织的影响^[17-18]。理论上 1 号铸锭应该具有更好的充型能力,但实际生产却出现裂纹,故还需对铸锭实际的相组成进行检测分析。

表 1 6061 铝合金实际成分检测结果与标准成分对比

Tab.1 Comparison of actual and standard composition of

6061 aluminum alloy									%
试样	w_B								
	Mg	Si	Ti	Cr	Mn	Fe	Cu	Zn	Al
1 号铸锭中心	0.96	0.98	0.03	0.23	0.11	0.23	0.30	0.01	余量
1 号铸锭 R/2 处	0.99	0.67	0.04	0.23	0.11	0.23	0.31	0.01	余量
1 号铸锭边缘	1.03	0.77	0.03	0.24	0.11	0.24	0.31	0.01	余量
2 号铸锭中心	0.81	0.55	0.03	0.10	0.01	0.19	0.20	0.01	余量
2 号铸锭 R/2 处	0.83	0.74	0.03	0.10	0.01	0.17	0.20	0.01	余量
2 号铸锭边缘	0.88	0.65	0.04	0.10	0.01	0.16	0.20	0.01	余量
国标	0.8~	0.4~	$\leq$	0.04~	$\leq$	$\leq$	0.15~	$\leq$	余量
	1.2	0.8	0.15	0.35	0.15	0.7	0.40	0.25	

2.2.3 铸锭物相分析

为了进一步分析元素在合金中的作用,对两个铸锭中心区域进行 SEM 观察,见图 5。从图 5a 可以看到,铝基体上沿晶界分布着暗色衬度棒状和亮色衬度的针状相,结合 EDX 图像和 EDS 分析,基本可以判断暗色衬度的为 Mg_2Si ,即主要强化相。亮色衬度的为

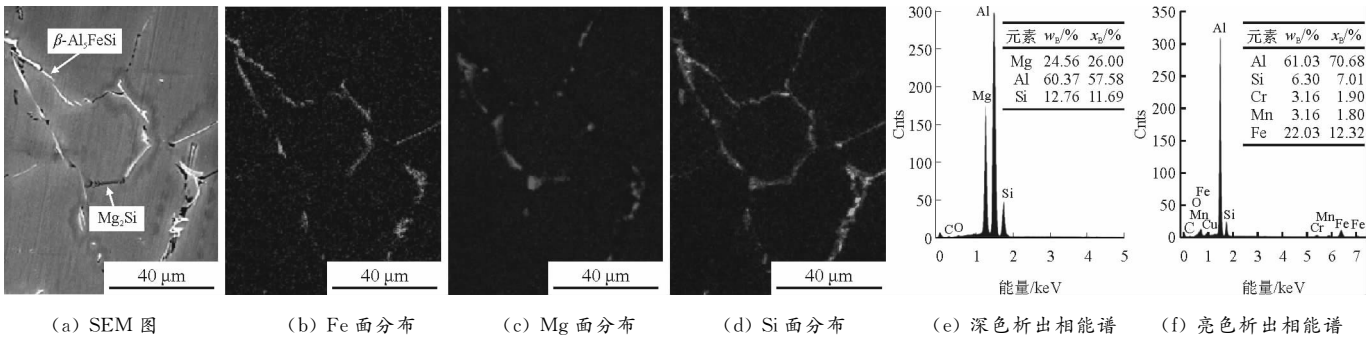


图 5 1 号铸锭裂纹附近的 SEM 和 EDX 图像

Fig.5 SEM and EDX images of ingot 1 near the crack

β - Al_5FeSi 相,呈针状分布在晶界处, β - Al_5FeSi 相为硬脆相,受力易破碎,而且在铸锭最后凝固阶段会阻碍液相扩散流动^[19]、降低糊状区渗透性,造成应力集中^[20]。

使用 JMatPro 软件计算了两种成分铸锭中的各相含量。调用 JMatPro 中 Step Temperature 模块,依托 JMatPro 铝合金数据库,将 Step Temperature 模块起

始温度设置为 700 ℃,终止温度设置为 100 ℃,计算相组成。可以看出,1 号铸锭和 2 号铸锭的主要组成相均为 Mg_2Si 和 β - Al_5FeSi 相,但 2 号铸锭的含量更低。由图 6c 和图 6d 可见,1 号铸锭中的 β - Al_5FeSi 相占比为 1.88%,2 号铸锭中的 β - Al_5FeSi 相占比为 1.09%,验证了计算结果。

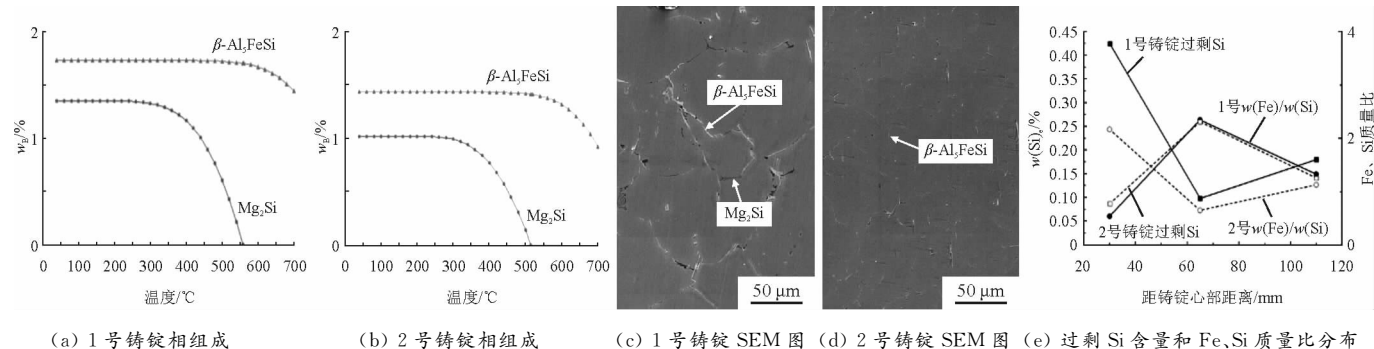


图 6 两种成分铸锭的相组成和过剩 Si 含量
Fig.6 Phase composition and excess Si content of both ingots

从目前的成分进一步分析,可以发现两种合金中 Si 含量过剩,这在工业生产中是正常现象。但是 Si 的过剩量需要得到有效的控制,否则会对合金起到不良影响。由于 Mg_2Si 中的 $w(\text{Mg}) : w(\text{Si})_e = 1.73$,可以通过下式计算过剩 Si 含量^[21]:

$$w(\text{Si})_e = w(\text{Si}) - \frac{w(\text{Mg})}{1.73} \quad (1)$$

再计算 Fe 与过剩 Si 比值 $[\frac{w(\text{Fe})}{w(\text{Si})_e}]$ 。

合金中的过剩 Si 较多时,会减少 TiAl_3 质点数量,降低形核率从而造成材料铸态组织粗大,而且过剩 Si 会在合金中与 Al、杂质 Fe 形成 AlFeSi 相,而 AlFeSi 相因 Fe、Si 质量比的不同也有几种形式,当 Fe 与过剩 Si 比值在 1.5~2.0 时,结晶产物一般为针状、脆性的 β - Al_5FeSi 相^[22-25]。

统计两个铸锭的过剩 Si 含量和 Fe 与过剩 Si 比值(图 6e),可以观察到 1 号铸锭距中心 30 mm 处,即裂纹尖端处,含有更高的过剩 Si,即 1 号铸锭这一区域生成 AlFeSi 相的绝对含量越多,同时 Fe 与过剩 Si 比值偏小,说明该区域 AlFeSi 相偏向于生成针状相 β - Al_5FeSi 相,这与 SEM 的图像相符。

综上,在半连铸的快速冷却条件下,1 号铸锭具有较高的 Si 含量,造成过剩 Si 在铸锭中心的聚集,导致中心区域晶粒粗大,同时产生大量 β - Al_5FeSi 相,从而引发铸锭热裂。

2.2.4 铸锭力学性能分析

将 1 号、2 号铸锭距中心 30、63.5 和 110 mm 处的 3 个试样分别命名为 A_1 、 A_2 、 A_3 和 B_1 、 B_2 、 B_3 (取样位置见图 1)。不同试样的应力-应变曲线见图 7。可以看

到,1 号铸锭各位置抗拉强度均高于 2 号铸锭,但是伸长率明显小于 2 号铸锭的。

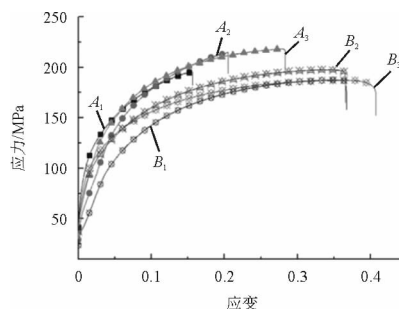


图 7 不同试样的应力-应变曲线
Fig.7 Stress-strain curves of different specimens

由于越靠近铸锭边缘,铸锭晶粒越细小,1 号铸锭和 2 号铸锭抗拉强度随着距铸锭中心的距离增加而增大。同时 Mg_2Si 在晶界处以短棒状和长条状分布在晶界,可以起到一定强化作用^[26]。从图 5 和图 6 的相组成分析,可以认为是 1 号铸锭较高的 Mg_2Si 和 β - Al_5FeSi 相含量导致其具有较高的抗拉强度和较低的伸长率。

2.2.5 拉伸断口形貌分析

不同位置的拉伸断口形貌见图 8。可以看出,6061 铝合金断口分布有大量韧窝、撕裂棱、微孔,而相同区域中的 2 号铸锭断口中的韧窝分布均匀、细密,而且更具有深度,在铸锭 $R/2$ 处,1 号铸锭断口处韧窝相对较小、撕裂棱与解理面台阶混合分布明显。

韧窝是由合金变形时,位错的堆积形成的微小孔洞造成的,1 号铸锭中较高的 Si、Fe 含量组成的 AlFeSi 可以促进这种微小孔洞形核,易造成界面开裂。从宏观变

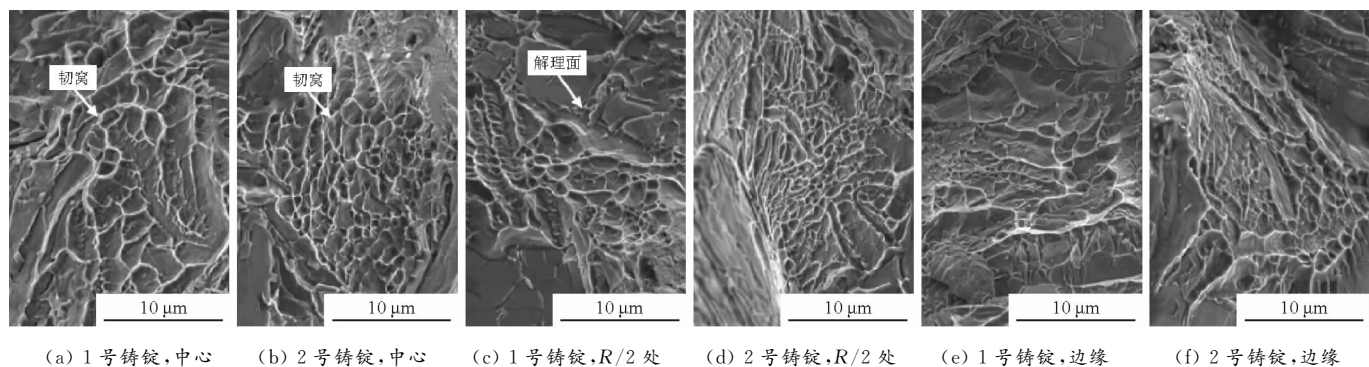


图 8 1 号铸锭和 2 号铸锭拉伸试样断口扫描图像

Fig.8 Fracture morphologies of tensile specimens of ingot 1 and 2

形来讲,这些元素对颈缩影响不大,但对合金的断裂特性影响很大^[27-28]。

综上所述,1 号铸锭断口相对 2 号铸锭韧窝较浅,解理面相对较多,撕裂棱相对粗大。因此 1 号铸锭实际塑性弱于 2 号铸锭,是由于更高的 Si、Fe 含量造成的。

3 结 论

(1)6061 铝合金气滑半连铸 $\phi 254$ mm 铸锭中心裂纹判断为受热应力造成的热裂纹。

(2)在半连续铸造时,过剩 Si 含量更高的 1 号铸锭中 Si 易在铸锭中心处聚集,造成铸锭中心部晶粒粗大。同时其形成的针状 β -Al₅FeSi 相是硬脆相,易造成应力集中并阻碍最后凝固阶段液相流动,在最后凝固阶段增加铸锭的热裂倾向。

(3)6061 合金中更高的 Si 和 Mg 含量会形成 Mg₂Si 和 β -Al₅FeSi 相,提升了铸态抗拉强度,但高的过剩 Si 含量降低了其伸长率。

参 考 文 献

- [1] 曹广畴. 现代板坯连铸[M]. 北京:冶金工业出版社, 1994.
- [2] 蔡开科. 连续铸钢[M]. 北京:科学出版社, 1990.
- [3] 李志猛, 左玉波, 朱庆丰, 等. 半连续铸造铝合金表面缺陷的形成机理及影响因素[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(1): 108-113.
- [4] 韦修勋, 陈愿情, 贾桂龙, 等. 半连铸 7055 铝合金扁锭偏析瘤缺陷分析及工艺优化[J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40(11): 1 290-1 293.
- [5] CAMERON D, DAVID V, LU L, et al. Observation of crack initiation during hot tearing[J]. International Journal Cast Metals Research, 2006, 19(1): 59-65.
- [6] D'ELIA F, RAVINDRAN C, SEDIKO D, et al. Hot tearing mechanisms of B206 aluminum-copper alloy[J]. Materials & Design, 2014, 64: 44-55.
- [7] PELLINI W S. Strain theory of hot tearing[J]. Foundry, 1952, 80(11): 125-199.
- [8] 丁浩, 傅恒志. 晶界状态对定向凝固 Al-Cu 和 Renel25 合金热裂倾向的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2000, 29(4): 228-230.

- [9] LI S, APELIAN D. Hot tearing of aluminum alloys[J]. International Journal of Metalcasting, 2011, 5(1): 23-40.
- [10] COMMET B, DELAIRE P, RABENBERG J, et al. Measurement of the onset of hot cracking in DC cast billets[A]. 132nd TMS Annual Meeting; Light Metals[C]. 2003: 711-717.
- [11] 白清领, 李宏祥, 张济山, 等. 7050 铝合金半连铸过程应力场及开裂倾向[J]. 北京科技大学学报, 2014(11): 1 527-1 533.
- [12] 程鹏飞, 徐永新. Si 变质对汽车用铸造铝合金热裂性能的影响[J]. 铸造技术, 2014, 35(5): 1 009-1 012.
- [13] EASTON M A, WANG H, GRANDFIELD J. Observation and prediction of the hot tear susceptibility of ternary Al-Si-Mg alloys[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2012, A43(9): 3 227-3 238.
- [14] NADELLA R, ESKIN D, KATGERMAN L. Role of grain refining in hot cracking and macrosegregation in direct chill cast AA7075 billets[J]. Metal Science Journal, 2007, 23(11): 1 327-1 335.
- [15] WARRINGTON D, MCCARTNEY D G. Hot-cracking in aluminium alloys 7050 and 7010-A comparative study[J]. Cast Metals, 1990, 3(4): 202-208.
- [16] EASTON M, WANG H, GRANDFIELD J, et al. An analysis of the effect of grain refinement on the hot tearing of aluminium alloys[J]. Meta Gene, 2004, 6(3): 96-104.
- [17] HWANG J Y, DOTY H W, KAUFMAN M J. The effects of Mn additions on the microstructure and mechanical properties of Al-Si-Cu casting alloys[J]. Materials Science & Engineering, 2008, A488(1/2): 496-504.
- [18] 李晶. 合金元素对 Al-Mg-Si 系铝合金组织及性能影响的研究[D]. 上海:上海大学, 2006.
- [19] LISA S, JOHN A T, MALCOLM J C. Hot tearing in Al-Mg-Si alloys with minor additions of Cu or Mn[J]. Materials Science Forum, 2011, 693: 217-223.
- [20] LISA S, MARK A E, JOHN A T. Hot tear susceptibility of Al-Mg-Si-Fe alloys with varying iron contents[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2013, A44(12): 5 396-5 407.
- [21] 张建新, 高爱华. 过剩 Si 对 6063 铝合金组织与性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2008, 28(2): 148-149.
- [22] 王祝堂. 铝合金及其加工手册[M]. 长沙:中南工业大学出版社, 2000.
- [23] 刘宏, 刘艳华, 赵刚, 等. Mn 对 Al-Mg-Si-Cu 铝合金结晶相的影响[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(11): 1 906-1 911.

电子束选区熔化制备 TC4 合金热处理后组织性能研究

李洪全¹ 孙宝福¹ 徐博翰² 莫力林³

(1.桂林理工大学机械与控制工程学院; 2.佛山桃园先进制造研究院; 3.桂林狮达技术股份有限公司)

摘 要 利用 Arcam A2X 型真空 3D 打印机,通过电子束选区熔化技术(EBSM),采用去内部应力退火、再结晶完全退火、固溶、时效 4 种热处理工艺对 EBSM 成形件进行热处理,研究不同热处理工艺对其成形性能与显微组织的影响。结果表明,经过 4 种热处理工艺的 EBSM 打印试件力学性能都得到了不同程度的提升,其中再结晶退火处理后,试样的抗拉强度提升最大,时效处理提升材料的塑性最明显;4 种热处理工艺处理试样的断口均呈韧性断裂。

关键词 电子束选区熔化;Ti-6Al-4V;热处理;力学性能

中图分类号 TG166.5;TG146.23

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.08.010

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Microstructure and Properties of TC4 Alloy Prepared by Electron Beam Selective Melting after Heat Treatment

Li Hongquan¹, Sun Baofu¹, Xu Bohan², Mo Lilin³

(1.College of Mechanical and Control Engineering, Guilin University of Technology;

2.Foshan Taoyuan Advanced Manufacturing Research Institute; 3.Guilin Shida Technology Co., Ltd.)

Abstract: The TC4 alloy samples were prepared by using Arcam A2X vacuum 3D printer and electron beam selective melting technology, and different heat treatment processes including stress relief annealing, recrystallization annealing, solution and aging, were conducted on EBSM molded parts, and the effects of different heat treatment processes on molding properties and microstructure were observed. The results reveal that after different heat treatment processes, the mechanical properties of EBSM printed specimens are improved obviously, among which recrystallization annealing treatment can improve the tensile strength greatly, and aging treatment can improve the plasticity greatly. The fracture morphology of specimens by different heat treatment processes presents ductile fracture.

Key Words: Electron Beam Slective Melting, Ti-6Al-4V, Heat Treatment, Mechanical Property

电子束选区熔化增材制造技术(Electron Beam Selective Melting,EBSM)具有电子束热量密度高、能量利用率高、加工速度快、成形过程无污染的特点^[1],与快速成形技术结合起来,在人体植入物、航空航天小批量

零件、医疗器械等快速制造方面具有独特的优势。EBSM 技术制备 TC4 合金时,由于其冷却速率过快导致 TC4 成形试样的内部存在残余应力且组织结构细小,但是由于逐层打印且粉末床温度较高,试样在打印过程

收稿日期:2022-11-26;修改稿收到日期:2022-12-27

基金项目:广西创新驱动发展专项资金资助项目(桂科 AA18242046)

第一作者简介:李洪全,男,1997 年出生,硕士研究生,广西桂林(541004),E-mail: 15133851249@qq.com

通信作者:孙宝福,男,1970 年出生,副教授,广西桂林(541004),E-mail: 1204605467@qq.com

引用格式:李洪全,孙宝福,徐博翰,等. 电子束选区熔化制备 TC4 合金热处理后组织性能研究[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(8):1 065-1 070.

LI H Q, SUN B F, XU B H, et al. Microstructure and properties of TC4 alloy prepared by electron beam selective melting after heat treatment[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(8):1 065-1 070.

[24] CLAVES S R, ELIAS D L, MISIOLEK W Z. Analysis of the intermetallic phase transformation occurring during homogenization of 6xxx aluminum alloys[J]. Materials Science Forum, 2002, 396-402(2): 667-674.

[25] ALLEN C M, KUMAR S, CARROLL L, et al. Electron beam surface melting of model 1200 Al alloys[J]. Materials Science & Engineering, 2001, A(304-306): 604-607.

[26] 刘辉丽,丁幸宇,徐龙辉. Mg₂Si 含量对 6061 铝合金组织和力学性

能的影响[J]. 南方金属, 2019(4):1-4.

[27] GOODS S H, BROWN L M. The nucleation of cavities by plastic deformation[J]. Acta Metall., 1979, 27(1): 1-15.

[28] WESTERMANN I, PEDERSEN K O, FURU T, et al. Effects of particles and solutes on strength, work-hardening and ductile fracture of aluminium alloys[J]. Mechanics of Materials, 2014, 79: 58-72.

(编辑:栗万仲)