

Al-TCB 对 ZL205A 合金晶粒细化及强韧化行为的影响

阎汐睿¹, 韩梦霞¹, 林 翰², 胡恺琪¹, 刘桂亮^{1, 3}, 刘相法¹

(1. 山东大学材料液固结构演变与加工教育部重点实验室, 山东济南 250061; 2. 贵州航天风华精密设备有限公司铸造工程中心, 贵州贵阳 550000; 3. 山东吕美熔体技术有限公司, 山东济南 250061)

摘要: 采用含B掺杂TiC_x粒子的Al-TiCB晶种合金 (Al-TCB) 对含Zr的ZL205A合金进行了熔体处理, 研究了该晶种合金对ZL205A合金微观组织及性能的影响。利用光学显微境、场发射扫描电镜、场发射电子探针等分别对Al-TCB晶种粒子特点及ZL205A合金的微观组织、流动性及力学性能进行了分析和测试。结果表明: 加入0.5wt.%、1.0wt.%、2.0wt.%的Al-TCB后, ZL205A中 α -Al晶粒得到明显细化, 晶粒尺寸由236.8 μm 分别细化至77.7 μm 、75.5 μm 、69.2 μm , 晶粒细化效果稳定, 抗Zr“中毒”能力强, 且未发生明显的细化衰退现象; 加入量为4.0wt.%左右即达到晶粒细化极限, 此时晶粒尺寸为63.9 μm , 形貌由发达的树枝状转变为近球状。加入质量分数为1.0%的Al-TCB后, ZL205A合金的流动性明显提高, 流动性试样的长度由457 mm增加至644 mm, 流动性试样长度提升了40.9%; 加入质量分数为1.0%的Al-TCB后, 合金的屈服强度、抗拉强度和伸长率分别为430 MPa、493 MPa和9.7%, 分别提高了3.6%、3.1%和70.1%。

关键词: Al-Cu合金; Al-TiCB晶种合金; 晶粒细化; 流动性; 力学性能

作者简介:

阎汐睿 (1997-), 男, 硕士, 研究方向为2XXX铝合金晶粒细化及强韧化。
电话: 18669773818, E-mail: 18669773818@163.com

通讯作者:

刘相法, 男, 教授, 博士。
电话: 0531-88392006,
E-mail: xfliu@sdu.edu.cn

中图分类号: TG292

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977 (2022) 11-1374-08

基金项目:

国家自然科学基金 (52071189)。

收稿日期:

2021-09-06 收到初稿,
2022-02-11 收到修订稿。

Al-Cu系合金具有高比强度、高硬度以及良好的耐高温性能^[1-3], 因此在航天等领域被广泛应用^[4-6]。ZL205A作为该系一种典型的高强铸造铝合金, 其添加的合金元素种类较多, 结晶温度范围宽, 枝晶生长倾向明显, 导致浇注时合金流动性差, 凝固时容易产生热裂、偏析和缩松等缺陷, 不仅废品率高, 而且力学性能不够稳定^[7-10]。

晶粒细化不仅可以改善合金的铸造性能, 减少合金中的热裂、缩松及偏析等缺陷^[10], 还可以提高合金的强度和塑韧性^[11-13]。目前, 工业上应用最广泛、最简便的铝合金晶粒细化方法是添加Al-Ti-B或Al-Ti-C中间合金等细化剂^[14]。然而, 对于细化含Zr的铝合金而言, 使用Al-Ti-B或Al-Ti-C传统细化剂难以达到理想的细化效果, 其根本原因是原本包覆在TiB₂或TiC_x粒子周围起到辅助形核作用的TiAl₃薄层被Zr元素破坏, 形成(Ti, Zr)Al₃相, 从而失去辅助形核的作用, 使TiB₂或TiC_x粒子的形核能力大大下降^[15-19], 即出现Zr致细化“中毒”现象。为了达到理想的细化效果, 提高细化剂的添加量也可达到细化晶粒的目的, 但这不仅会大大削弱Zr元素对合金的强化作用^[20-21], 还会增加熔体中Ti的残留量, 生成粗大板片状TiAlZr相等, 降低合金力学性能和产品合格率, 且不利于回炉料的循环利用。

本课题组研制的Al-TCB是一种含有高稳定性、高弥散化掺杂型TiC_xB_y粒子 (简称TCB粒子) 的晶种合金, 其能在熔体中释放大量的形核质点, 提高形核率, 进而减小晶粒尺寸, 改善晶粒形貌, 提高流动性和成形性能, 而且能够调控热处理过程中析出相的形核率、数量及分布等, 提升合金的力学性能^[22]。作为一种新型铝合金异质形核衬底相, TCB粒子在解决含Zr的Al-Cu合金细化“中毒”问题方面具有发展潜力。因此, 作者以ZL205A合金为研究对象, 探究Al-TCB对ZL205A合金晶粒细化、流动性以及力学性能的影响。

1 材料与方法

试验用原材料包括工业纯铝（纯度为99.9%，无特殊说明，以下均为质量分数，%）、纯铜（纯度为99.95%）、电解锰、海绵钛、海绵锆、Al-10Cd中间合金、Al-5V中间合金以及Al-TCB晶种合金。合金的制备在井式电阻炉（SG2-7.5-12，7.5 kW）中进行，首先按照ZL205A合金的化学成分（如表1）制备合金熔体，于720 ℃进行保温。然后，向熔体中加入Al-TCB晶种合金，用石墨棒充分搅拌后保温，采用 C_2Cl_6 进行精炼处理并静置，再次搅拌后将熔体分别浇注到KBI环模、单螺旋流动性模具以及拉伸试棒铸型中（模具均预热至250 ℃）。力学性能测试前将试样置于箱式热处理炉中（SDX2-4-10，4 kW）进行T6热处理。热处理工艺为：540 ℃固溶24 h后淬火，175 ℃时效8 h后空冷。

表1 试验用ZL205A合金化学成分
Table 1 Chemical composition of ZL205A alloy for testing

Cu	Mn	Ti	Zr	Cd	V	Al
4.90	0.40	0.20	0.13	0.15	0.17	余量

在铝锭的相同位置分别取样，使用光学显微镜（OM，LEICA DM 2700M）对ZL205A合金试样进行微观组织分析；使用场发射扫描电镜（FE-SEM，Hitachi SU-70）及配套能谱仪（EDS，Energy Dispersive Spectroscopy）、场发射电子探针（EPMA，JXA-8530F PLUS）等对Al-TCB和ZL205A合金的物相及微观组织进行分析；采用单螺旋流动性模具对合金熔体的流动性进行测定，如图1a所示，浇注过程中保证熔体不对模具型腔产生冲击，液流平稳，每组合金测定5次并取平均值；根据国标GB/T 228.1—2010将毛坯件加工成标准抗拉试棒，如图1b所示。在万能试验机（WDW-100D）上进行

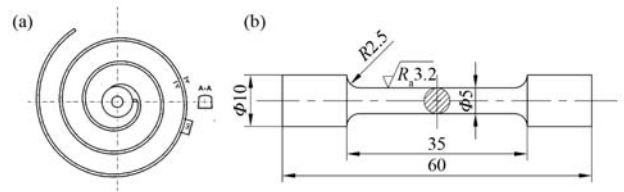


图1 流动性试样 (a) 和拉伸试棒示意图 (b)
Fig. 1 Schematic diagrams of single spiral sample (a) and tensile bar (b)

拉伸试验，拉伸速率设置为2.0 mm/min，且在拉伸时安装电子引伸计（YYU-10/25）测定试样伸长率，每组合金测试5次并取平均值。

2 结果与分析

2.1 Al-TCB 晶种合金的晶种粒子特点

图2为Al-TCB晶种合金的微观组织及能谱分析结果，由图2a低倍微观组织可见，组织中白色细小物相粒子在基体上弥散分布，且具有亚微米及纳米的多尺度特征，呈近球状形貌。图2b为Al-TCB的EPMA面扫描分析结果，可见基体上的物相粒子是由Ti、C、B元素组成，主要为掺杂B的 TiC_x 粒子和少量的 TiB_2 粒子。图2c为单个TCB粒子的能谱分析，进一步证实了在 TiC_x 粒子中B元素掺杂情况。

2.2 Al-TCB 对 ZL205A 合金晶粒尺寸、形貌及第二相的影响

在ZL205A合金中使用Al-TCB进行细化试验，并与添加Al-5Ti-0.25C和Al-5Ti-1B处理的ZL205A合金进行对照，细化试验参数如表2所示。

图3反映了Al-TCB添加量与ZL205A合金的平均晶粒尺寸（AGS）之间的关系，相应的晶粒尺寸列在

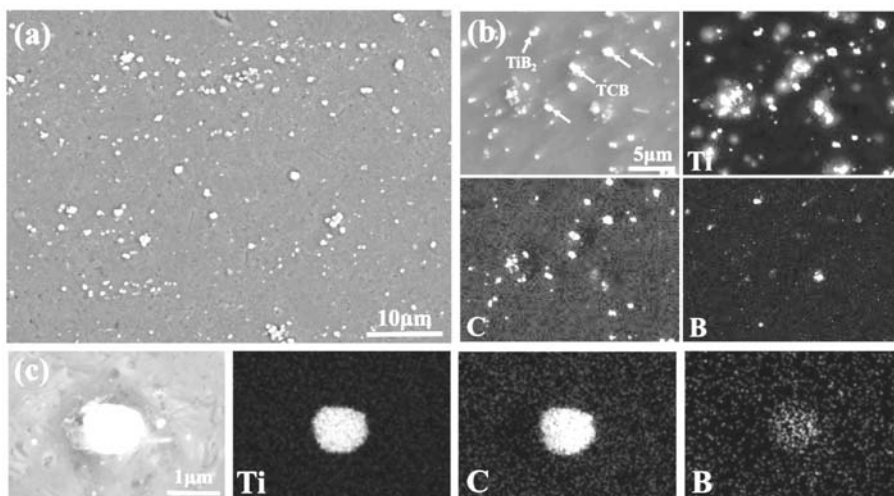
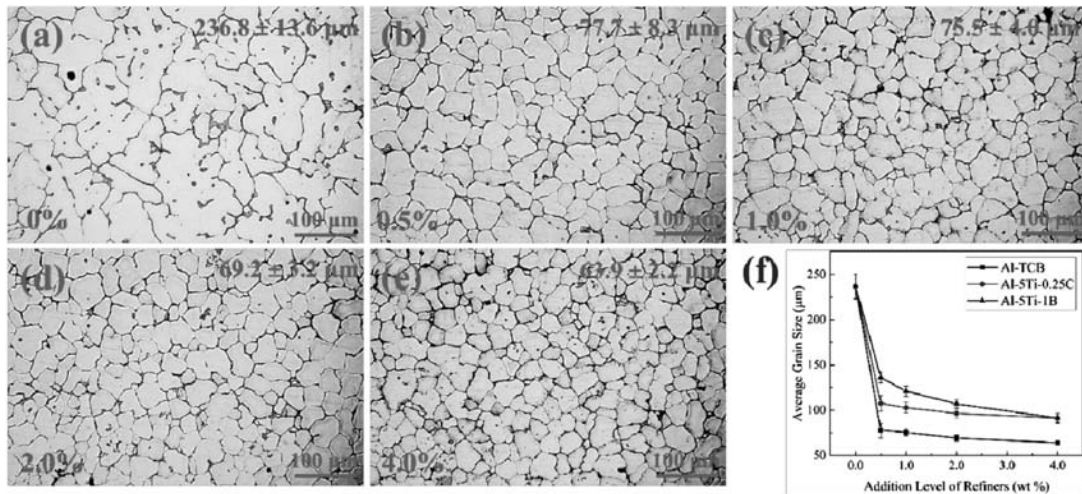


图2 Al-TCB晶种合金的微观组织 (a) 及能谱分析结果 (b, c)
Fig. 2 Microstructure (a) and EPMA and EDS results of Al-TCB master alloy (b, c)



(a) 未添加Al-TCB; (b-e) Al-TCB添加量分别为0.5%、1%、2%、4%; (f) Al-TCB、Al-5Ti-0.25C和Al-5Ti-1B细化ZL205A合金的晶粒尺寸统计结果

图3 Al-TCB添加量对ZL205A合金的细化效果及其与传统细化剂的细化效果对比

Fig. 3 Refinement effect of Al-TCB addition on ZL205A alloy and its comparison with traditional refiner

表2 ZL205A合金细化试验参数

Table 2 Grain refinement parameters of ZL205A alloy

细化剂种类	浇注温度/℃	细化剂添加量/%				保温时间/min
Al-TCB	720	0.5	1.0	2.0	4.0	5, 15, 30, 60, 90
Al-5Ti-0.25C	720	0.5	1.0	2.0	4.0	
Al-5Ti-1B	720	0.5	1.0	2.0	4.0	

表3中。由图3a-e可知,未添加晶种合金时,AGS为236.8 μm;当向合金中加入0.5%的Al-TCB后,AGS减小至77.7 μm,继续增加Al-TCB的添加量,AGS进一步减小并趋于稳定,当合金中Al-TCB的添加量达到4.0%时,AGS减小至63.9 μm,此时接近晶粒细化极限,因为AGS不再随着晶种合金添加量的增加而减小。由图3f可知,当细化剂添加量大于0.5%时,AGS降低的速度逐渐减缓,晶粒尺寸趋于平稳。这是因为采用添加异质形核粒子的方法来细化晶粒时,由于溶质元素扩散能力的限制,熔体中有效形核粒子数量是一定的^[23],同时熔体结晶时非均质形核过程会释放结晶潜热,一定程度上也抑制了晶粒形核^[24]。因此,合金晶粒尺寸并不会随着形核粒子的增加而持续减小,而是逐渐趋于平稳,即存在细化极限。

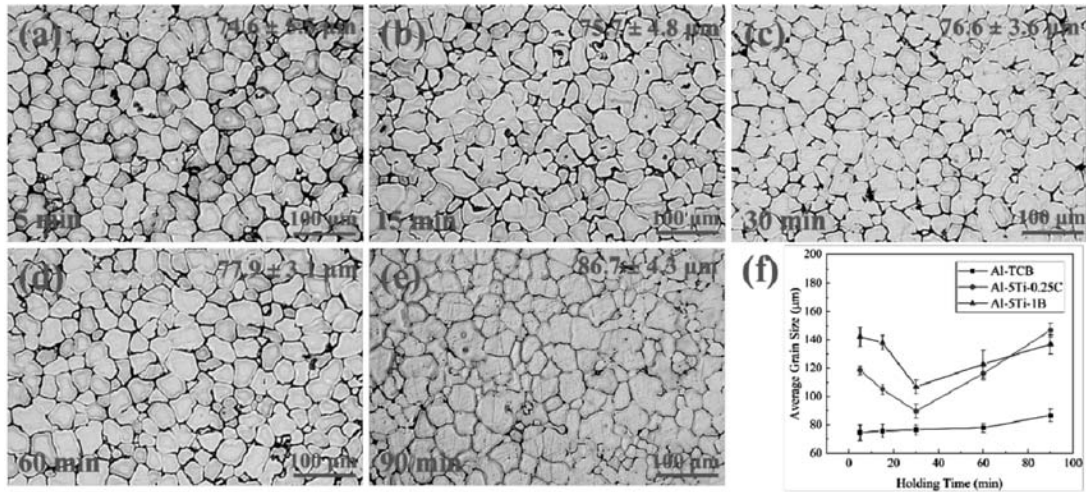
表3 不同细化剂添加量下ZL205A合金的晶粒尺寸

Table 3 Grain sizes of ZL205A alloys with different addition amount of refiners

细化剂种类	细化剂添加量/%					μm
	0	0.5	1.0	2.0	4.0	
Al-TCB	236.8 ± 13.6	77.7 ± 8.3	75.5 ± 4.0	69.2 ± 3.2	63.9 ± 2.2	
Al-5Ti-0.25C	236.8 ± 13.6	107.5 ± 8.8	102.7 ± 5.8	96.4 ± 5.4	91.1 ± 5.2	
Al-5Ti-1B	236.8 ± 13.6	136.1 ± 5.9	121.0 ± 5.8	107.0 ± 4.6	91.1 ± 4.9	

此外,作者系统对比了Al-TCB晶种合金与传统细化剂Al-5Ti-0.25C及Al-5Ti-1B对ZL205A合金中的晶粒细化效果。由图3f可知,向合金中分别添加0.5%的Al-5Ti-0.25C和Al-5Ti-1B两种细化剂后,AGS分别减小至107.5 μm和136.1 μm,当两种细化剂的添加量增至细化极限加入量时,AGS分别减小至91.1 μm和91.2 μm。相较于两种传统细化剂,Al-TCB对ZL205A合金细化效率最高。由于B元素掺杂到TiC的C空位中,使得TCB粒子的稳定性提高^[25],同时通过第一性原理计算发现Zr元素与TCB粒子不发生反应(吉布斯自由能 $\Delta G > 0$),可消除了Zr元素化学反应的偏聚驱动力^[26]。这表明Zr元素对TCB粒子的干扰作用降低,使得TCB粒子发挥良好的形核作用,形成细晶组织,与上述试验结果相佐证。

图4反映了Al-TCB保温时间对ZL205A合金细化效果的影响,具体的晶粒尺寸列在表4中。由图4a-e可知,向合金加入0.5%的Al-TCB后,随着保温时间的增加,晶粒细化效果较稳定,并未出现明显的细化衰退现象。通过图4f对比可知,加入两种传统细化剂后,合金晶粒需保温约30 min才能达到最佳细化效果,而加入Al-TCB后,合金晶粒仅保温5 min后就达到了最佳细化效果,细化效率大大提升。随着保温时间进一步增加,加入两种传统细化剂的ZL205A合金晶粒出现明显的细化衰退现象。当保温时间为90 min时,加入Al-5Ti-0.25C细化剂的ZL205A合金AGS由最佳的89.7 μm增加至146.7 μm;加入Al-5Ti-1B细化剂的ZL205A合金AGS由最佳的107.0 μm增加至136.9 μm。而加入Al-TCB的ZL205A合金AGS仅由最佳的74.6 μm增加至86.7 μm,未出现明显的细化衰退现象。分析认为:一方面,由图4a可知,TCB粒子在基体中弥散分



(a-e) Al-TCB保温时间分别为5 min、15 min、30 min、60 min和90 min；
(f) Al-TCB、Al-5Ti-0.25C和Al-5Ti-1B细化ZL205A合金的晶粒尺寸统计结果
图4 Al-TCB保温时间对ZL205A合金的细化效果及其与传统细化剂的细化效果对比

Fig. 4 Refinement effects of Al-TCB holding times on ZL205A alloys and its comparison with traditional refiners

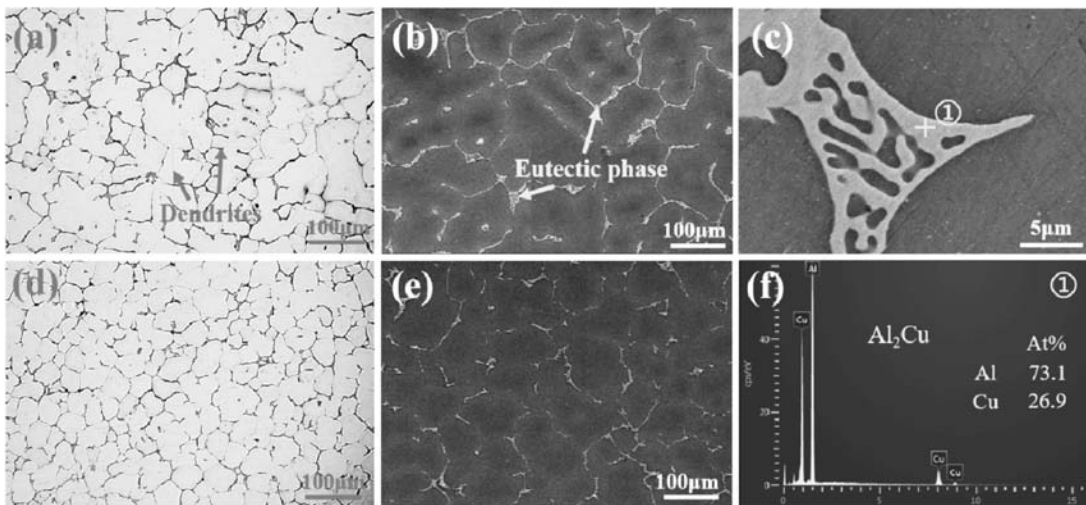
布，表明TCB粒子不易在熔体中团聚沉淀而削弱细化能力；另一方面，由于TiC_x是一种非计量比的化合物（C: Ti=0.48~0.98），B元素可掺杂到TiC_x上的C空位中，提高TCB粒子的结构稳定性^[25]，不易发生转变。因此，长时间在熔体中保温并不会对TCB粒子的形核作用产生显著影响，这使得Al-TCB对ZL205A合金晶粒细化更高效，细化效果更稳定。

此外，合金晶粒获得良好的细化效果，不仅仅表现为晶粒尺寸减小，对晶粒的形貌及共晶相的分布也有明显改善。图5a-c和图5d、e分别为未添加和添加1.0% Al-TCB的ZL205A合金的微观组织。由图5a、b可知，ZL205A合金的α-Al晶粒枝晶发达，合金非平衡凝固造成的晶内及晶界偏析严重，由图5f的EDS点分析可

表4 不同细化剂和保温时间下ZL205A合金的晶粒尺寸
Table 4 Grain sizes of ZL205A alloys under different refiners and holding times μm

细化剂种类	细化剂添加量/%				
	5	15	30	60	90
Al-TCB	74.6 ± 5.5	75.7 ± 4.8	76.6 ± 3.6	77.9 ± 3.1	86.7 ± 4.3
Al-5Ti-0.25C	118.5 ± 3.2	105.1 ± 3.5	89.7 ± 5.0	116.2 ± 4.6	146.7 ± 4.7
Al-5Ti-1B	142.1 ± 6.7	138.0 ± 5.1	106.9 ± 4.6	122.8 ± 9.7	136.9 ± 6.8

知，灰色网状共晶相为Al₂Cu相。向合金中加入Al-TCB后，合金晶粒明显细化，且大小较为均匀，形貌由发达的树枝状转变为近球状，如图5d所示。通过对比图5b、e可以明显发现，组织中析出的共晶相尺寸明



(a-c) 未添加Al-TCB晶种合金；(d, e) 添加1.0%的Al-TCB晶种合金；(f) 图c中点1的EDS点分析

图5 添加Al-TCB前后铸态ZL205A合金微观组织

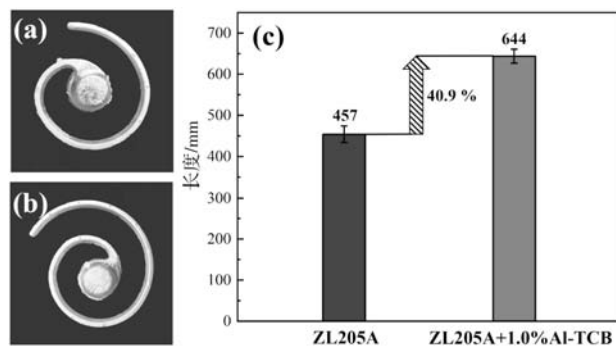
Fig. 5 Microstructures of as-cast ZL205A alloys before and after adding Al-TCB

显减小, 偏析现象得到改善, 这将有利于热处理过程中共晶 Al_2Cu 相的回溶, 加快固溶过程, 缩短固溶时间。

2.3 Al-TCB 对 ZL205A 合金流动性的影响

ZL205A合金的铸造性能较差, 特别是流动性和补缩能力较差, 而补缩能力与熔体流动性紧密相关。如果晶粒细化能有效地改善合金流动性, 那么不仅解决了液态成形问题, 也同时解决了铸件补缩难题, 消除热裂和缩松等铸造缺陷。

由于加入1.0%的Al-TCB即可使ZL205A合金获得均匀、稳定的细晶组织, 为了兼顾工业应用成本和效果, 以下重点考察了加入1.0% Al-TCB后ZL205A合金的流动性能。图6为添加1.0% Al-TCB前后的ZL205A合金流动试样及试样长度图。由图6a、b对比发现, 添加Al-TCB后, ZL205A合金在模具中的流动长度明显增加。通过对流动性试样进行测量, 结果如图6c所示, 未添加Al-TCB的ZL205A合金的流动性试样长度约为457 mm, 而添加1.0% Al-TCB的ZL205A合金的流动性试样长度约为644 mm, 比前者增加了40.9%, 表明添加



(a) 未添加Al-TCB; (b) 添加1.0% Al-TCB; (c) 流动长度统计

图6 添加Al-TCB前后ZL205A合金的流动性试样及流动长度
Fig. 6 Fluidity samples and flow lengths of ZL205A alloys before and after adding Al-TCB

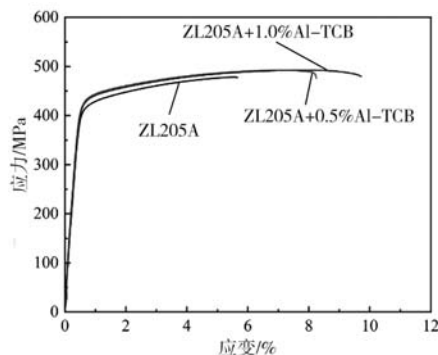
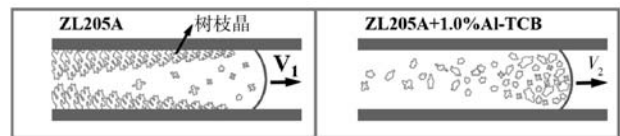


图8 添加Al-TCB前后ZL205A合金的工程应力-应变曲线 (a) 和柱状统计图 (b) (25 °C)

Fig. 8 Engineering stress-strain curves (a) and corresponding histogram (b) of ZL205A alloys before and after adding Al-TCB (25 °C)

Al-TCB后ZL205A合金的流动性有明显的改善。

分析认为, ZL205A合金因结晶温度范围大, 凝固过程中固相和液相共存区大, 使得熔体的粘度增加, 合金流动性变差; 此外, ZL205A合金的晶粒形貌以树枝状晶为主, 由图7a所示, 在凝固的过程中树枝状晶形成以及枝晶臂之间交叉会阻碍熔体的流动, 使得熔体的流动性进一步降低。而加入Al-TCB后, 如图7b所示, 熔体中形核率明显增加, 枝晶的生长受到明显抑制, 避免了因枝晶网络搭接过快而产生对熔体流动的阻碍^[27]; 另一方面, 凝固时高形核率导致大量的结晶潜热释放, 凝固速率减缓, 进一步提高其流动性。综合上述分析可得, 添加Al-TCB能够显著提升ZL205A合金的流动性。



(a) 未添加Al-TCB

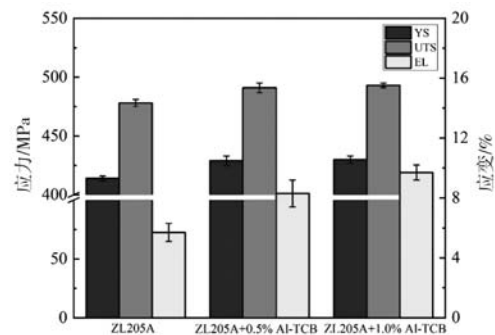
(b) 添加Al-TCB

图7 添加Al-TCB前后ZL205A合金的凝固示意图

Fig. 7 Coagulation schematics of ZL205A alloys before and after adding Al-TCB

2.4 Al-TCB 对 ZL205A 合金力学性能的影响

基于细化试验结果和工业生产的实际条件, 将Al-TCB的添加量控制在1.0%以内。图8反映了添加Al-TCB前后ZL205A合金的力学性能变化, 可见加入Al-TCB后, ZL205A合金的强度和伸长率明显提高。未加入Al-TCB时, ZL205A合金的屈服强度(YS)、抗拉强度(UTS)及伸长率(EL)为415 MPa、478 MPa以及5.7%。当添加0.5%的Al-TCB时, 合金的YS、UTS和EL为429 MPa、491 MPa和8.3%, 分别提升了3.4%、2.9%以及45.6%, 当添加1.0%的Al-TCB, 合金的YS、UTS和EL为430 MPa、493 MPa和9.7%, 伸长率提升了70.1%。



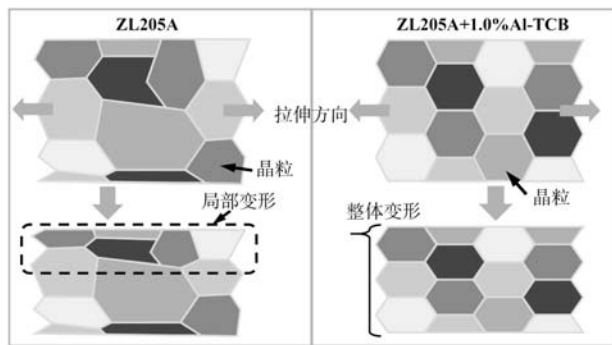
如上所述,添加Al-TCB后ZL205A合金的力学性能得到改善,其原因主要有两方面,即细晶强化和沉淀强化。

ZL205A合金中添加1.0%的Al-TCB后,晶粒的平均尺寸由236.8 μm 降低至75.5 μm 。晶粒细化有助于ZL205A合金强度和伸长率提升,即细晶强化作用,其强化效果可以用Hall-Petch^[28]公式表示:

$$\Delta \sigma_{\text{Hall-Petch}} = K_{\text{Hall-Petch}} (d^{-\frac{1}{2}} - d_0^{-\frac{1}{2}}) \quad (1)$$

式中: $K_{\text{Hall-Petch}}$ 为Hall-Petch系数; d_0 和 d 分别代表细化前后ZL205A合金的平均晶粒尺寸。

根据公式(1)可知,添加Al-TCB后ZL205A合金的平均晶粒尺寸 d 减小,材料的屈服强度将得到提升,与试验结果相符合。图9为添加Al-TCB前后ZL205A合金的变形行为示意图。如图9a所示,由于存在较大的



(a) 未添加Al-TCB

(b) 添加Al-TCB

图9 添加Al-TCB前后ZL205A合金的变形行为示意图

Fig. 9 Schematic diagrams of ZL205A alloy deformation behaviors before and after adding Al-TCB

晶粒以及晶粒之间尺寸的差异, ZL205A合金在变形过程中一部分晶粒先变形,然后其他部分晶粒再发生变形,容易在晶粒中产生应力集中,萌发裂纹。添加Al-TCB之后,如图9b所示, ZL205A合金晶粒尺寸减小且晶粒之间尺寸差异减小,单位体积内参与变形的晶粒增加,变形协调程度增加,进而提高了合金的塑性。

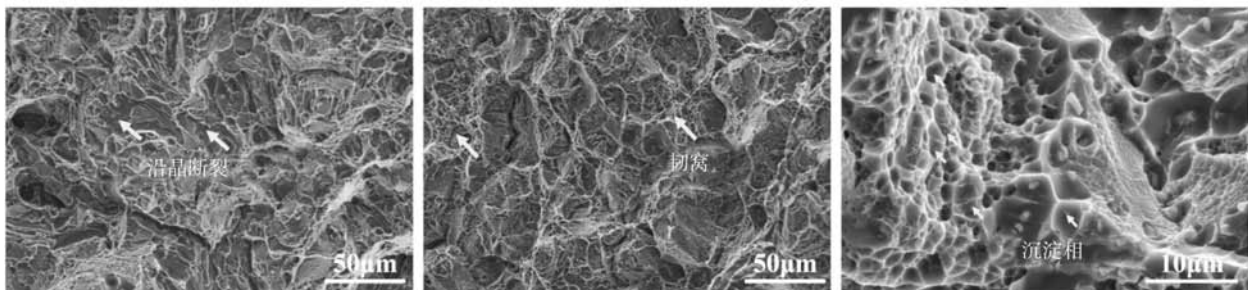
图10为添加1.0% Al-TCB前后ZL205A合金的拉伸断面组织。由图10a、b所示, ZL205A合金断面为混合型断面,包括沿晶断裂区和韧窝区。通过对比发现,添加Al-TCB后断面处的韧窝区域明显增加。韧窝形貌的形成原因是在拉伸过程中基体与第二相颗粒的界面被破坏,相互脱附,正如图10c高倍下断面组织所示,韧窝底部存在细小的沉淀相颗粒。韧窝区域的增加表明合金中沉淀相析出数量增加。这是由于晶粒细化,晶界数量增加,为溶质元素扩散提供更多通道,扩散效率提升,进而促进沉淀相的析出。这些细小的沉淀相在变形的过程中对位错产生阻碍作用,其强化效果可表示为^[29]:

$$\sigma_{\text{OR}} = M \frac{0.4Gb}{\pi\lambda} \frac{\left(\frac{2r}{b}\right)}{\sqrt{1-\nu}} \quad (2)$$

$$r = \sqrt{\frac{1}{6}} d_p \quad (3)$$

式中: M 为Al的取向因子; G 和 b 分别表示铝基体的剪切模量和伯氏矢量; λ 为相邻强化相之间的距离; ν 为Al的泊松比; d_p 为沉淀相的平均尺寸。

ZL205A合金中沉淀相数量的增加,则相邻沉淀相之间的距离减小,使得沉淀强化效果得到提升,进而提高ZL205A合金的强度。



(a) 未添加Al-TCB; (b, c) 添加1.0% Al-TCB

图10 添加1.0% Al-TCB前后ZL205A合金拉伸断面组织

Fig. 10 Fracture surface images of ZL205A alloy before and after adding 1.0% Al-TCB

3 结论

(1) 向ZL205A合金中加入Al-TCB后,合金的铸态晶粒得到明显细化,晶粒形貌由树枝状转变为近球状。当Al-TCB添加量分别为0.5%、1.0%、2.0%和4.0%

时, ZL205A合金的平均晶粒尺寸由236.8 μm 分别细化至77.7 μm 、75.5 μm 、69.2 μm 和63.9 μm ,加入量4.0%时即达到晶粒细化极限。Al-TCB对ZL205A合金的细化能力要明显优于传统细化剂,其抗Zr致细化“中毒”

能力强。

(2) Al-TCB可明显提高ZL205A合金的流动性, 加入1.0% Al-TCB后其流动性试样长度由457 mm增加到644 mm, 提升了40.9%。

(3) Al-TCB可大幅提高ZL205A合金的伸长率, 当

添加0.5%的Al-TCB时, 合金的抗拉强度、屈服强度及伸长率分别为491 MPa、429 MPa和8.3%; 当添加1.0% Al-TCB时, 合金的抗拉强度、屈服强度和伸长率分别达到493 MPa、430 MPa和9.7%, 相较于未添加的ZL205A合金, 分别提高了3.1%、3.6%和70.1%。

参考文献:

- [1] ZHANG M, ZHANG W W, ZHAO H D, et al. Effect of pressure on microstructures and mechanical properties of Al-Cu-based alloy prepared by squeeze casting [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2007, 17 (3): 496-501.
- [2] MANDAL P K, ROBI P S. Influence of micro-alloying with silver on microstructure and mechanical properties of Al-Cu alloy [J]. Materials Science & Engineering A, 2018, 722: 99-111.
- [3] 田宇, 袁晓光, 黄宏军, 等. Mg元素对Al-4.4Cu-0.15Zr合金热裂性能的影响 [J]. 铸造, 2020, 69 (3): 246-253.
- [4] ZHANG H Z, BAI P K, YANG J. Study on casting properties of high performance Al-Cu alloy [J]. Hot Working Technology, 2010, 39 (1): 64-66.
- [5] LI B, SHEN Y F, HU W Y. Casting defects induced fatigue damage in aircraft frames of ZL205A aluminum alloy-A failure analysis [J]. Materials & Design, 2011, 32 (5): 2570-2582.
- [6] 韩静国, 茹振峡, 李世嘉. 变质处理对铸造ZL205合金组织演变及力学性能的影响 [J]. 金属热处理, 2017, 42 (11): 77-83.
- [7] 陶承闯, 黄宏军, 袁晓光, 等. V元素对Al-4.4Cu-1.5Mg-0.15Zr合金热裂性能的影响 [J]. 铸造, 2020, 69 (2): 127-134.
- [8] 贤福超, 郝启堂, 范理. ZL205A合金块状偏析形成机理 [J]. 稀有金属材料与工程, 2014, 43 (4): 941-945.
- [9] 刘闪光, 李国爱, 罗传彪, 等. Sc元素对ZL205A合金组织和力学性能的影响 [J]. 材料工程, 2020, 48 (1): 84-91.
- [10] 邓攀科, 杨智勇, 韩建民, 等. ZL205A真空调压铸造有效应力控制与性能研究 [J]. 铸造, 2019, 68 (12): 1368-1373.
- [11] GUO T B, WANG B, ZHANG Z F, et al. Effect of micro-scale Er on the microstructure and fluidity of ZL205A alloy [J]. Materials, 2019, 12 (10): 1688.
- [12] LIU Y, DING C, LI Y X. Grain refining mechanism of Al-3B master alloy on hypoeutectic Al-Si alloys [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition), 2011, 21 (7): 1435-1440.
- [13] 闫洪, 李和平, 曹瑞珂. Sc和AlTiB在A356.2铝合金中的作用对比研究 [J]. 铸造, 2021, 70 (11): 1286-1289.
- [14] 孙海斌, 左秀荣, 仲志国, 等. 铝合金晶粒细化方法的研究现状及最新动向 [J]. 热加工工艺, 2005 (12): 71-73, 76.
- [15] DING H M, LIU X F, YU L N. Effects of Zr and Mn on Al-Ti-B master alloy [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2007, 27 (5): 390-392.
- [16] WANG Y, FAN C M, ZHOU L, et al. Mechanism for Zr poisoning of Al-Ti-B based grain refiners [J]. Acta Materialia, 2018, 164: 428-439.
- [17] PENG G S, GU Y C, FU X Y, et al. Mechanism of Zr poisoning Al-5Ti-B grain refiners based on the first-principles calculation [J]. International Journal of Cast Metals Research, 2021, 34 (2): 75-82.
- [18] DING H M, LIU X F, YU L N. Influence of zirconium on grain refining efficiency of Al-Ti-C master alloys [J]. Journal of Materials Science, 2007, 42 (23): 9817-9821.
- [19] FAN Z, WANG Y, ZHANG Y, et al. Grain refining mechanism in the Al/Al-Ti-B system [J]. Acta Materialia, 2015, 84: 292-304.
- [20] RAO A A, MURTY B S, CHAKRABORTY M. Role of zirconium and impurities in grain refinement of aluminium with Al-Ti-B [J]. Materials Science and Technology, 1997, 13 (9): 769-777.
- [21] 许杰, 陈康华, 陈送义. 微量Ti、Cr对Al-Zn-Mg-Cu合金组织和性能的影响 [J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2016, 21 (1): 50-58
- [22] ZHAO K, GAO T, YANG H B, et al. Influence of a new AlTiC-B master alloy on the casting and extruding behaviors of 7050 alloys [J]. Journal of Alloys & Compounds, 2020, 820: 153089.
- [23] WANG E Z, GAO T, NIE J F, et al. Grain refinement limit and mechanical properties of 6063 alloy inoculated by Al-Ti-C (B) master alloys [J]. Journal of Alloys & Compounds, 2014, 594: 7-11.
- [24] 库尔兹, 费希尔, 李建国, 等. 凝固原理 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2010: 53-60.
- [25] 聂金凤. 铝合金中TiC生长与演变及硼掺杂改性的研究[D]. 济南: 山东大学, 2013.

- [26] YANG H B, QIAN Z, ZHANG G J, et al. The grain refinement performance of B-doped TiC on Zr-containing Al alloys [J]. Journal of Alloys & Compounds, 2018, 731: 774-783.
- [27] DI S M, ARNBERG L. Castability of aluminium alloys [J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2009, 62: 321-325.
- [28] 路君, 曾小勤, 丁文江. 晶粒度与合金强度关系 [J]. 轻金属, 2008 (8): 59-64.
- [29] DALEN M, DUNAND D C, SEIDMAN D N. Effects of Ti additions on the nanostructure and creep properties of precipitation-strengthened Al-Sc alloys [J]. Acta Materialia, 2005, 53 (15): 4225-4235.

Effect of Al-TCB on Grain Refinement and Mechanical Properties of ZL205A Alloy

YAN Xi-rui¹, HAN Meng-xia¹, LIN Han², HU Kai-qi¹, LIU Gui-liang^{1,3}, LIU Xiang-fa¹

(1. Key Laboratory for Liquid-Solid Structure Evolution and Processing of Materials, Ministry of Education, Shandong University, Jinan 250061, Shandong, China; 2. Guizhou Aerospace Fenghua Precision Equipment, Guiyang 550000, Guizhou, China; 3. Shandong Al&Mg Melt Technology Limited Company, Jinan 250061, Shandong, China)

Abstract:

Al-TiCB master alloy (Al-TCB), containing B doped TiC_x particles, was applied to ZL205A alloy containing Zr melt by casting process, and the effects of the Al-TiCB master alloys on the microstructures and properties of ZL205A alloy were studied. The phases of the Al-TCB master alloy, the microstructure, the fluidity and mechanical properties of ZL205A alloys were analyzed and tested respectively by using of optical microscope, thermal field scanning electron microscopy, electron probe micro-analysis methods. The results show that the α -Al grains in ZL205A are significantly refined, the average grain sizes are refined from 236.8 μm to 77.7 μm , 75.5 μm , 69.2 μm after adding 0.5wt.%, 1.0wt.%, 2.0wt.% Al-TCB, respectively. The grain refining effect is stable, the resistance to 'Zr-poisoning' is strong, and there is no obvious phenomenon of refinement decline. Adding 4.0wt.% Al-TCB can reach the grain refinement limit, at this time the grain size is 63.9 μm . The morphologies of the α -Al grains change from dendrite to nearly spherical. Moreover, the fluidity of ZL205A melt is significantly improved after adding 1.0% of the Al-TCB, the length of the fluidity sample is increased from 457 mm to 644 mm which is increased by 40.9%. The yield strength, tensile strength and elongation of ZL205A are 430 MPa, 493 MPa and 9.7% after adding 1.0% of the Al-TCB, which are increased by 3.6%, 3.1% and 70.1% respectively.

Key words: Al-Cu alloy; Al-TiCB master alloy; grain refinement; fluidity; mechanical properties
