

添加微量 Er、Zr 对 ZL205A 合金组织性能的影响

郭廷彪^{1,2}, 张展飞¹, 丁万武^{1,2}, 袁子洲^{1,2}

(1. 兰州理工大学 省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 甘肃 兰州 730050)

(2. 有色金属合金及加工教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 通过向 ZL205A 合金中分别添加质量分数为 0.05%, 0.15% 和 0.25% 的 Er、Zr 元素, 研究了不同含量稀土元素在热处理前后对合金微观组织和性能的影响。结果表明, 添加微量 Er、Zr 元素可以有效改善液态合金的流动性, 细化晶粒, 并促进 θ 相在晶界交汇处团聚; 当 Er、Zr 添加量为 0.15% 时, 铸态材料的力学性能较原始合金有大幅度降低, 而 T5 处理后强度达到 358 MPa, 维氏硬度达到 1070 MPa, 延伸率 2%, 综合性能相对最好; T5 处理能够促使合金组织和成分均匀, 同时使溶质原子充分扩散, 在变形过程中阻碍位错运动和亚晶界的迁移, 对延伸率造成不利影响。

关键词: ZL205A; 流动性; 微观组织; 力学性能

中图分类号: TG146.2*1

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2016)10-2621-07

ZL205A 合金由北京航空材料研究院于 20 世纪 70 年代研制成功, 是目前我国使用强度最高的铸造铝合金之一。该合金具有强韧性好、加工性能优异、耐腐蚀性能好等优点, 应用于航空航天、兵器、冶金及水电领域^[1]。但因该合金结晶温度范围宽, 呈粥状方式凝固, 在结晶时容易产生分散性疏松、热裂、针孔等铸造缺陷^[2,3]。

研究表明, 向铝合金中加入少量的 Sc、Y、La 等稀土元素^[4-6], 可以细化晶粒, 并与 ZL205A 合金中的其它合金元素形成新相, 提升综合性能; 微量 Er 元素可使部分铝合金体系的强度提高 20% 以上, 热稳定性提高 50 °C 左右^[7,8], 在提高强度和塑性的同时改善其综合性能^[9,10]; 而 Zr 元素不仅对铝铜合金的抗拉强度和延伸率具有积极影响^[11,12], 还能和 Er 生成 $Al_3(Zr_xEr_{1-x})$ 纳米级复合粒子, 优化材料性能^[13]。此外, 加入适量稀土元素可提高铸造铝铜合金的流动性, 并降低其热裂倾向^[14,15]。但是, 迄今为止, 添加 Er、Zr 等元素对 Al-Cu 合金组织和性能的影响, 以及热处理对 Er、Zr 微合金化 Al-Cu 合金的力学性能和断裂性能的影响还缺乏充分的研究。为此, 本研究主要探讨添加微量稀土元素 Er、Zr 对 ZL205A 合金 T5 热处理前后微观组织和性能的影响。

1 实验

选用北京航空材料研究院生产的 ZL205A 为母合

金, 通过添加 Al-Er、Al-Zr 中间合金来实现微合金化; 用石墨坩埚在电炉中进行熔炼, 当铝锭和 Al-Cu 中间合金完全熔化后, 在 730 °C 时用 C_2Cl_6 (质量为熔料质量的 4%) 精炼, 静置保温 10 min 后扒渣, 然后将铝液继续升温至 750 °C, 依炉次加入如表 1 所示的 Al-Er、Al-Zr 中间合金, 并搅拌均匀, 当温度降至 730 °C 时, 将其浇注至螺旋砂型和金属型中, 获得流动性试样和力学性能试样棒。

将每组试样棒分成两批, 其中一批进行 T5 热处理 (540 °C, 12 h 固溶+室温水淬+150 °C, 10 h 人工时效处理), 另一批次为铸态。将每一批次试样棒机械加工成标准试样, 用 AG-10TA 万能材料电子拉伸试验机测试抗拉强度和延伸率, 用维氏硬度计测硬度; 用 99.5% H_2O +0.5% HF 对试样腐蚀 10 s 后采用 MEF-3 显微镜观察材料的光学组织; 采用 JSM-5600Lv 型电镜进行 SEM 分析; 在 GSM-5700F 型扫描电镜下观察试棒的拉伸断口。

表 1 Er、Zr 合金元素加入量

Table 1 Addition amount of Er and Zr elements

Furnace No.	1	2	3	4
Er, $\omega/\%$	0	0.05	0.15	0.25
Zr, $\omega/\%$	0	0.05	0.15	0.25
Al-Er/g	0	14.38	43.14	71.9
Al-Zr/g	0	11.98	36	60
Al-Cu/g	0	2.07	6.21	10.35

收稿日期: 2015-10-22

基金项目: 有色金属先进加工与再利用国家重点实验室开放基金 (SKL1303); 甘肃省科技重大专项计划 (1302GKDA015)

作者简介: 郭廷彪, 男, 1974 年生, 博士, 副教授, 兰州理工大学, 甘肃 兰州 730050, 电话: 0931-2757285, E-mail: gtb777@163.com

2 结果及分析

2.1 不同 Er、Zr 含量对 ZL205A 合金铸态组织的影响

图 1a~1d 分别为未添加 Er、Zr 元素以及依次添加 0.05%Er 和 0.05%Zr、0.15%Er 和 0.15%Zr、0.25%Er 和 0.25%Zr 后 ZL205A 合金的铸态 SEM 照片，图 1e、1f 为相应的 EDS 谱。从图 1 可以看出，合金相主要由 $\alpha(\text{Al})$ 基体相、晶界处白色 $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$ 相和灰色相组成，其中，灰色相与基体相成分接近，由大部分 Al 元素、少量的 Cu 元素，以及 C, O, Ag 等杂质元素组成，杂

质元素主要是在石墨坩埚熔炼和浇注过程中引入的。未添加稀土元素 Er、Zr 时，原始铸态组织近似成等轴状， θ 相沿晶界呈半连续网状分布。

当添加 0.05%Er 和 0.05%Zr 后，根据对图 2a 所示的微区 B 能谱 2c 和元素面分布图 2b 可知，微量的 Er、Zr 元素主要固溶在晶间和晶界附近的基体中，在所选视场内并未检测到 (Al_3Er) 、 (Al_3Zr) 等弥散强化相，观察图 2c，晶界白色相中 Cu 元素的质量分数为 29%，明显高于基体相和灰色相。当添加 0.15%Er 和 0.15%Zr 元素后，晶界组织的宽度减小，变成针状或者条状，且

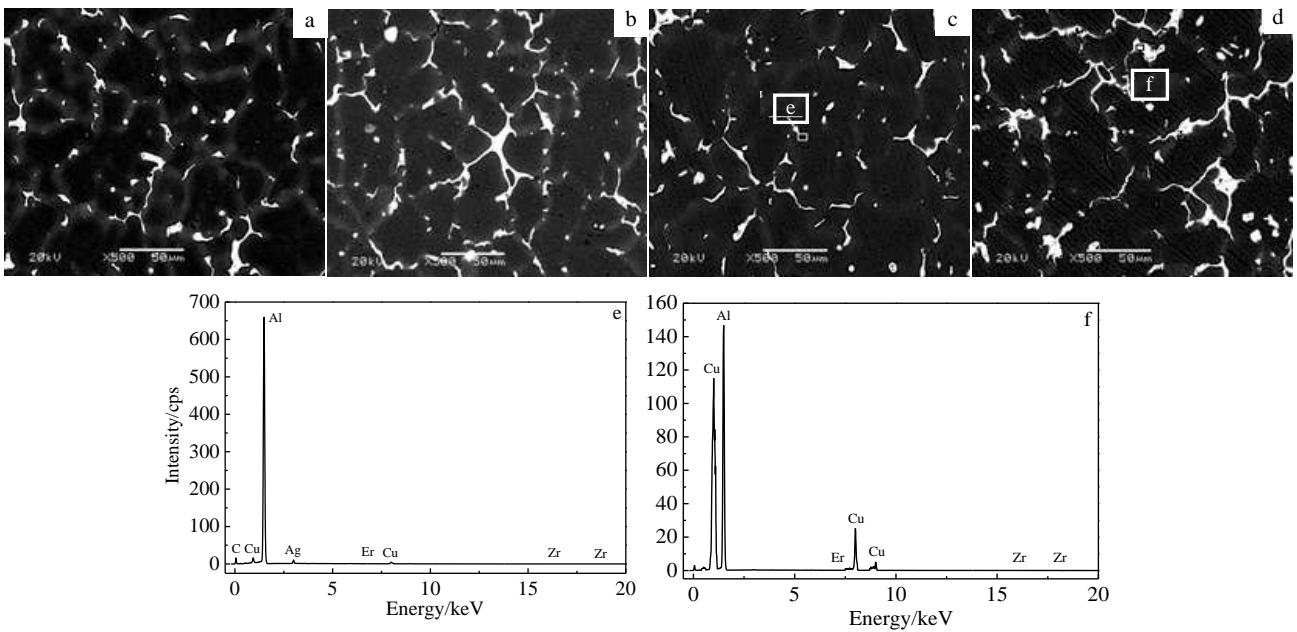


图 1 不同 Er、Zr 含量下 ZL205A 合金的铸态 SEM 照片

Fig.1 SEM images of as-cast ZL205A alloys with different contents of Zr and Er elements: (a) 0%, (b) 0.05%, (c) 0.15% and (d) 0.25%; (e, f) the corresponding EDS results in Fig.1c and 1d

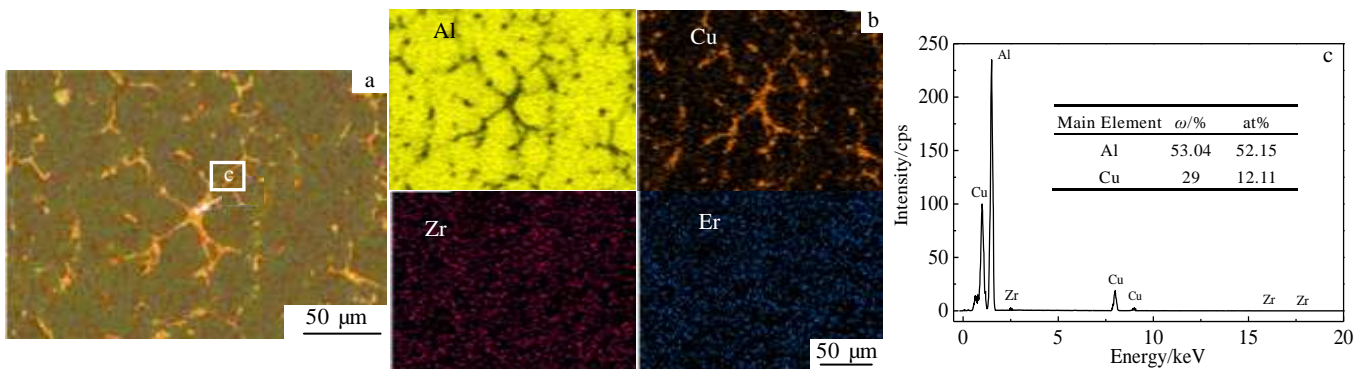


图 2 添加 0.05%Er 和 0.05%Zr 的 ZL205A 铸态合金的 SEM 像及 EDS 元素面分布和晶界白色相的 EDS 能谱

Fig.2 EDS analysis zone in SEM image (a), main elements distribution (b) and EDS spectrum (c) of as-cast ZL205A alloys with addition of 0.05% Zr and Er elements

沿晶界分布的 θ 相分枝变细,甚至在局部区域熔断为颗粒形态,晶界组织的整体连续性和均匀性变差。另外,在基体相中呈弥散状分布的黑色颗粒增多,其成分如图 1e 所示,由大量的 Al 元素 (80.93%, 质量分数) 和少量的杂质元素 (C、Ag) 组成。当添加 0.25%Er 和 0.25%Zr 后,晶界处的白色相出现团聚,在交汇晶界处相互交织成片状存在,对该片状白亮相做 EDS 检测,结果如图 1f 所示,其中 Cu 元素的质量分数高达 42.56%,据此推断为富 Cu 的 θ 相,形成严重的微观偏析,同时在晶界附近出现大量的白色颗粒,该颗粒是由原晶界白色相熔断而成的。

比较发现,随着 Er、Zr 含量的增加,沿晶界分布的 θ 相不连续性加剧,且出现一定程度的偏聚。分析认为,加入微合金化元素 Er、Zr 后,由于其原子半径较大,固溶于基体时造成较大的晶格畸变能,为使能量最低,倾向于沿晶界附近分布,以致增大了晶界处合金的成分过冷度而使分枝现象加剧,并在分枝交汇处产生缩颈、熔断等现象。此外,结合文献[11,12,16],在部分偏聚区内 Er 含量较高,可达到三元共晶成分点,生成 (Al_3Cu_4Er) 低熔点化合物,通常以片状形态存在,不仅其本身强度较低,还消耗了合金中有效的 Cu 原子,降低固溶强化效果。最后,在铸态组织中,由于 Er、Zr 元素来不及完全扩散,极易富集在固液界面前沿,形成微观偏析,同时溶质原子之间交互作用,阻碍晶界处 Cu 原子向基体相的扩散,导致 θ 相出现了团聚现象,表现为在交汇晶界处白色相团聚成片状存在,且随着 Er、Zr 元素含量的增加,其团聚程度越明显。

2.2 T5 热处理对不同 Er、Zr 含量 ZL205A 合金微观组织的影响

图 3a、3b 分别为未添加 Er、Zr 元素以及添加 0.15%Er、0.15%Zr 的 ZL205 合金经过 T5 热处理后的金相组织。从图中可以看出, T5 热处理态的合金组织为近似均匀的等轴晶,结构致密度高,组织成分均匀。说明 T5 热处理能够在较大程度上消除组织的微观偏析,释放铸造应力,提高了合金的综合力学性能;添加 0.15%Er 和 0.15%Zr 元素的合金,晶界宽度减小,晶粒内颗粒相增多。另外,添加 Er、Zr 元素后合金有明显的晶间腐蚀现象,说明合金的抗蚀性能下降。

为了进一步研究影响机制,对图 3b 做 SEM 和选区 EDS 分析,结果如图 4 所示。从图 4a 看出,晶界处白色网状相变细,甚至局部熔断,原先半连续的晶界组织变成微观疏松结构,不过,在交汇晶界处却偏聚富集,但总面积大幅度减小,宏观偏析降低。比较图 4b、4c 发现,晶界附近的白色大颗粒相内未检测到

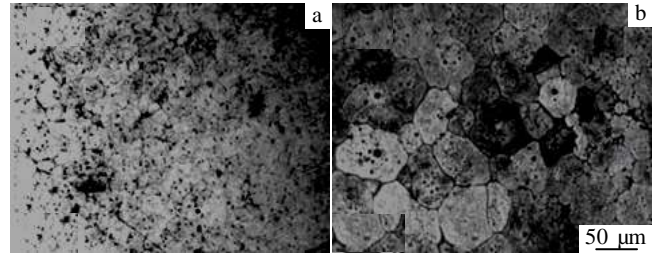


图 3 不同 Er、Zr 含量下 ZL205A-T5 合金的金相组织
Fig.3 Metallographic structures of ZL205A-T5 alloys with different contents of Zr and Er elements: (a) 0% and (b) 0.15%

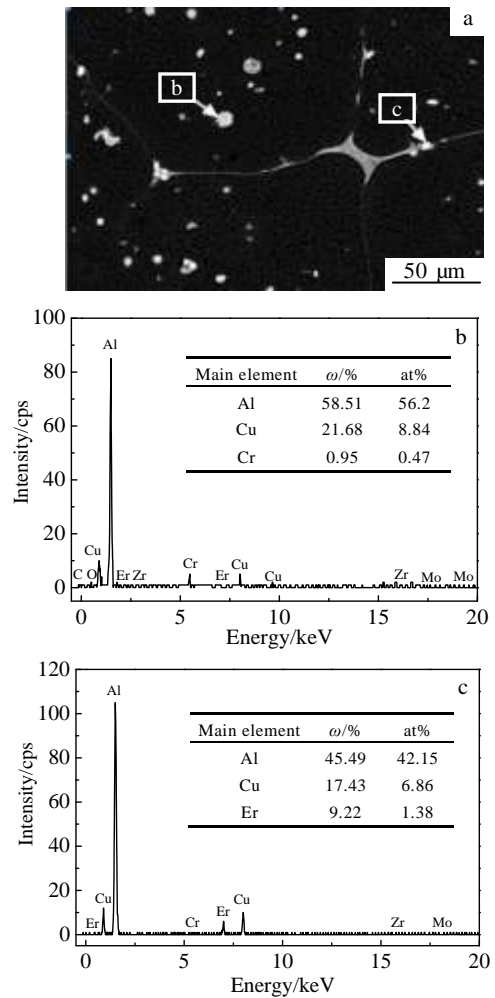


图 4 添加 0.15%Er、Zr 的 ZL205A-T5 合金的 SEM 和 EDS 谱图
Fig.4 SEM (a) and EDS results (b, c) of ZL205A-T5 alloy with addition of 0.15% Zr and 0.15% Er

Er 元素,而在交汇晶界末端处有富 Er 区形成,其中 Er 的质量分数为 9.22%,富 Er 区的存在一方面增加了成分过冷度,从而减小了临界形核功,晶粒数量增加,

但同时因为晶界的移动受扩散控制，富 Er 区塞积钉扎在晶界末端处，阻碍位错的运动和亚晶界的迁移，抑制了晶界的延伸与长大，降低了晶界的连通性和均匀性。

分析认为，在固溶处理过程中，各溶质原子充分扩散，微观偏析在很大程度上得以消除，从白色相、灰色相和基体相的选区能谱分析可知，晶粒各处的 Al、Cu 元素浓度差变小，较铸态组织有很大的改善。稀土元素 Zr、Er 充分扩散至晶界及其附近，元素 Zr 可与 Al 发生包晶反应，生成 (Al_3Zr) 高熔点稳定相，起弥散强化作用。元素 Er 并未形成 (Al_3Er) 强化相，而是生成 (Al_8Cu_4Er) 低熔点共晶相，在凝固冷却过程中使原先半连续的晶界组织熔断为颗粒状，削弱材料的力学性能。

2.3 不同 Er、Zr 含量对 ZL205A 合金流动性的影响

图 5 为不同含量的 Er、Zr 元素微合金化后 ZL205A 合金的流动性试样和长度柱状图。从图 5a~5d 看出，原始 ZL205A 合金的流动性很差，长度仅为 100 mm 左右，且试样表面粗糙，出现了夹杂、气泡、缩孔等铸造缺陷。添加 Er、Zr 元素后，流动性明显增强，同时试样表面的铸造缺陷也大量减少。当 Er、Zr 含量

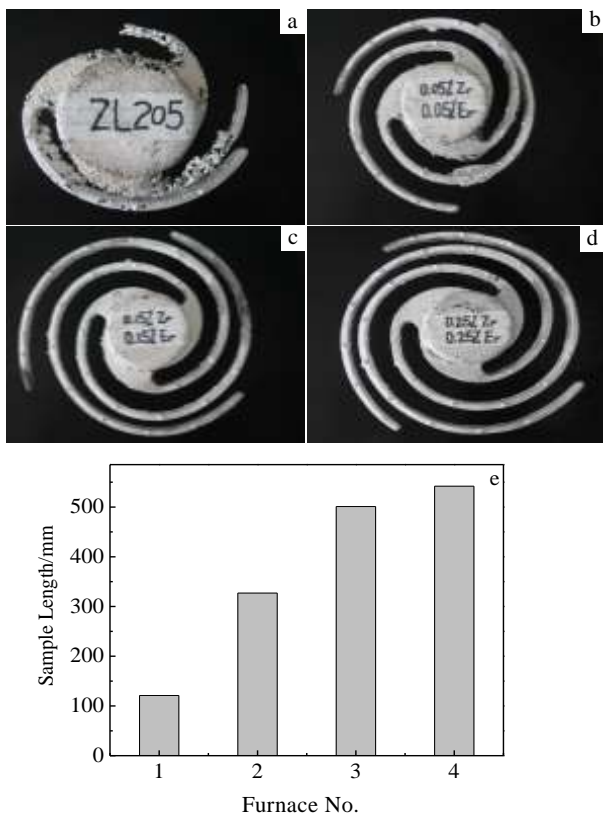


图 5 不同 Er、Zr 含量的 ZL205A 合金流动性试样及柱状图
Fig.5 Fluidity samples (a~d) and columnar section (e) of ZL205A alloys with different contents of Zr and Er elements: (a) 0%, (b) 0.05%, (c) 0.15% and (d) 0.25%

分别从 0 逐渐增大时，试样长度基本呈线性增加，当添加量超过 0.15%后，增加趋势开始变得平缓。

综合相关研究^[14,15]认为，添加的 Er、Zr 元素能够缩短结晶温度区间，减少固液两相停留时间，在凝固后期使铸态组织的晶粒间联生作用增强，同时吸附 C、O 等杂质元素，净化合金，减小表面张力，使合金的微观补缩能力增强，从而有效地改善 ZL205A 合金的流动性。

2.4 T5 热处理对不同 Er、Zr 含量 ZL205A 合金力学性能的影响

图 6a、6b 分别为 ZL205A 合金的抗拉强度和延伸率变化。添加 Er、Zr 元素后，铸态合金的抗拉强度和延伸率均降低，且随着添加量的增加，下降程度越严重。其中，延伸率的下降非常明显，由原始的 8% 左右下降至 2% 左右。经过 T5 热处理后，对于不同 Zr、Er 含量的合金，其抗拉强度均有不同程度的提高，但延伸率继续降低。

比较可知，第 2 组试验（即添加 0.05%Er 和 0.05%Zr）中抗拉强度和延伸率在 T5 热处理前后变化并不明显，从图 7 所示的 SEM 分层图像可以看出，经 T5 热处理后，晶界处白色组织仍为富 Cu(43.35%)的 θ 相，基体中 Cu 原子质量分数仅为 3.07%，而 Er、Zr

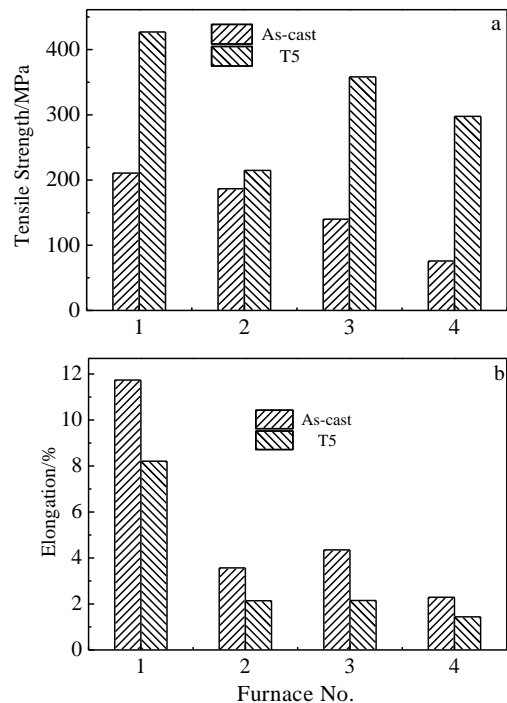


图 6 添加不同 Er、Zr 含量的 ZL205A 合金在铸态和 T5 热处理态的力学性能变化
Fig.6 Mechanical property changes of the as-cast and T5 heat-treated ZL205A alloys with different contents of Er and Zr elements: (a) tensile strength and (b) elongation

元素弥散分布在晶界附近，它们犹如一道屏障，阻碍了 Cu 原子从晶界处的高浓度区向基体中扩散，降低了人工时效过程中 θ 相的弥散强化作用。当添加 0.15%Er 和 0.15%Zr 后，部分 Er、Zr 元素可反应生成 (Al_8Cu_4Er) 低熔点共晶相和 (Al_3Zr) 强化相，使有效抑制 Cu 原子扩散的能力降低，故抗拉强度有了迅速提升，达到了 358 MPa。在第 4 组试验中，因 Er、Zr 含量较高，使 θ 相发生分枝熔断的程度加剧，大部分的 θ 相转变为微观疏松组织，降低了晶界的强化作用，致使抗拉强度降为 300 MPa。观察图 6b，加入微合金化元素后，延伸率仅为原始合金的 17%~37%，这主要与 T5 热处理后位错的滑移和组织内微观缺陷的存在形式有关，其具体变化机制有待进一步的研究。

分析认为，添加 Er、Zr 元素后，铸态组织中微观偏析加重，晶体内的点缺陷、位错等点阵缺陷数量增多，晶格畸变能和内应力未能及时释放，同时由于 θ 相的连续性遭到严重破坏，使得强化作用减弱，最终导致材料的力学性能下降。经 T5 热处理后，Cu、Zr、Er 等合金元素固溶在基体中，经时效处理产生沉淀强化和弥散强化作用，使得抗拉强度提高。而 T5 热处理后延伸率的降低受铸造合金内部缺陷的控制，认为主要有两方面的原因：(1) 根据位错理论，在层错能较高的铝合金中，材料的塑性与位错滑移有关，对于添加 Er、Zr 元素的合金，热处理使得元素原子浓度趋于平衡，同时原子半径较大的稀土元素扩散至晶界附近形成富集区，且随 Er、Zr 元素含量的增加，半连续的 θ 相发生颗粒化的程度加强，它们之间交互作用，对位错产生钉扎作用，或者阻塞在滑移面上，使得塑性形变难以顺利进行；(2) 比较铸态和 T5 热处理态合金的断口形貌，在铸态组织中存在大量的微观缩孔，在塑性变形过程中，这些缩孔可以松弛应力并降低畸变能，有利于位错的运动；经 T5 热处理后，微观缩孔变成了浅凹坑，凹坑附近分布有硬脆相，这种相对

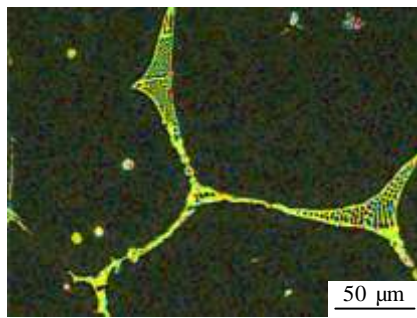


图 7 添加 0.05%Er、Zr 的 ZL205A-T5 合金的 SEM 分层图像
Fig.7 SEM image of ZL205A-T5 alloy with addition of 0.05% Zr and 0.05% Er elements

致密的形态使强度和硬度有了提升，却使应力不能及时释放，造成应力集中而降低塑性变形能力。当然，微观缩孔对塑性的影响还与其存在形态有关。

2.5 T5 热处理对不同 Er、Zr 含量 ZL205A 合金硬度的影响

图 8 是不同 Er、Zr 含量 ZL205A 合金的硬度变化。从图中可以看出，铸态合金的硬度在添加量为 0.05% 时有最大值，其维氏硬度达到 810 MPa，此时硬度值的提升归因于 Er、Zr 元素的弥散强化和晶界处富 Cu 的 θ 硬脆相；T5 热处理后，除第二组合金外，其余组硬度均有明显增加，且当添加量为 0.15% 时维氏硬度达到 1070 MPa。对比图 6a、8，可以看出硬度与抗拉强度有着相似的变化趋势，其变化的机理如前所述。

综上所述，向 ZL205A 合金中加入 0.15%Er 和 0.15%Zr 时，液态金属的流动性相对较好；在铸态下其强度为 140 MPa，维氏硬度为 410 MPa，伸缩率为 4%；T5 热处理后抗拉强度达到 358 MPa，维氏硬度达到 1070 MPa，延伸率为 2%，综合性能相对最好。

2.6 断裂性能分析

图 9 为添加不同 Er、Zr 含量 ZL205A 合金的断口形貌。对比铸态和 T5 热处理态的断口形貌发现，铸态组织中存在大量的缩松、缩孔等铸造缺陷，同时组织内有大量的微观空洞，其尺寸约为 100 μm ，经 T5 热处理后合金组织变得均匀，且在断口表层有很多由原先孔洞演变而来的浅韧窝，在图 9b 中呈蜂窝状，属正交韧窝，其断裂方式为韧性断裂。对于添加 0.15%Er、Zr 的铸态合金 (图 9c、9e)，其断口组织中有长条状缺口，无明显撕裂痕迹，说明第二相与基体没有完全固溶，这是由于该合金结晶间隔宽，在凝固过程中首先形成枝晶网络结构，然后空隙部位被后期低熔点相填充，但由于整个过程受冷却速率和扩散速率的控制，导致晶粒间未形成紧密结合，在拉伸过程中扩展为长条状断口。比

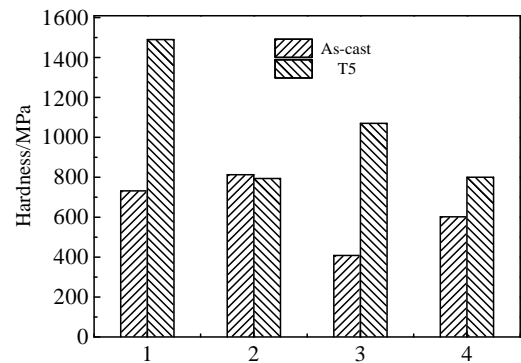


图 8 添加不同 Er、Zr 含量的 ZL205A 合金的硬度变化
Fig.8 Hardness of as-cast and T5 heat-treated ZL205A alloys with different contents of Er and Zr elements

较图 9c、9d 可以看出, 9d 中断裂韧窝数量更多, 更加密集(从 9f 放大图中可以看出), 图 9c 的断面呈撕裂形状, 韧窝属于撕裂韧窝, 断裂部分有大量空隙, 且变形量很大, 说明其延伸率高于图 9d 的, 塑性更好, 从图 9e、9f 两图中可以得到相同的结论。比较图 9d、9b 发现, 图 9d 断口放射区范围小, 韧窝数量多, 晶粒更加细小, 第二相与基体固溶程度高于图 9b。比较发现, 微观疏松组织对材料性能有双重影响, 既可以通过松弛应力来提高塑性, 但当周围有硬脆相存在时, 则会导致界面的分离和破裂, 在外力作用下发展为裂纹源或与主裂纹相连接, 严重影响材料性能。此外, 随着 Er、Zr 含量的增加, 其断裂形式逐渐发生改变, 有从韧性断裂向沿晶脆性断裂转变的趋势。

根据热力学理论可知, 该合金中 Cu 是基本强化元素, 在凝固过程中形成 θ 相起固溶强化作用, 又因 Cu 熔点高且在 Al 液中溶解度较低, 在人工时效中过饱和析出而起弥散强化作用。添加的微量 Er、Zr 元素会影响 Cu 原子的扩散, 并且加剧 θ 相的分枝现象, 它们或是形成 (Al_3Zr) 、 (Al_8Cu_4Er) 等共晶相, 或是弥散分布在晶界附近, 或是偏析团聚而形成富集区。随着 Er、Zr

元素的加入, 晶界处白条状的 θ 相减少, 说明 Er、Zr 元素会促使部分 θ 相溶入基体。

3 结 论

1) 添加微量(0.05%~0.25%)Zr、Er 元素, 可以明显改善 ZL205A 合金的流动性, 同时大量减少铸造缺陷, 但削弱了室温力学性能; T5 热处理可以大幅度提高合金的抗拉强度和硬度, 但延伸率降低至 2% 左右。

2) 向 ZL205A 合金中添加 0.15%Er、0.15%Zr 后, 在铸态下抗拉强度为 140 MPa, 维氏硬度为 410 MPa, 伸缩率为 4%; T5 热处理后强度达到 358 MPa, 维氏硬度达到 1070 MPa, 延伸率为 2%, 综合性能相对最好。

3) 向 ZL205A 合金中添加 Zr、Er 元素后, 使 θ 相分枝现象加重, 且造成一定程度的偏析团聚, 最后导致晶界组织宽度减小, 甚至在部分区域熔断为颗粒状, 而在交汇晶界处扩展为片状存在, 对合金性能造成复杂的影响。

4) 随 Er、Zr 含量的增加, 断裂形式逐渐发生改变, 有从韧性断裂向沿晶脆性断裂转变的趋势。

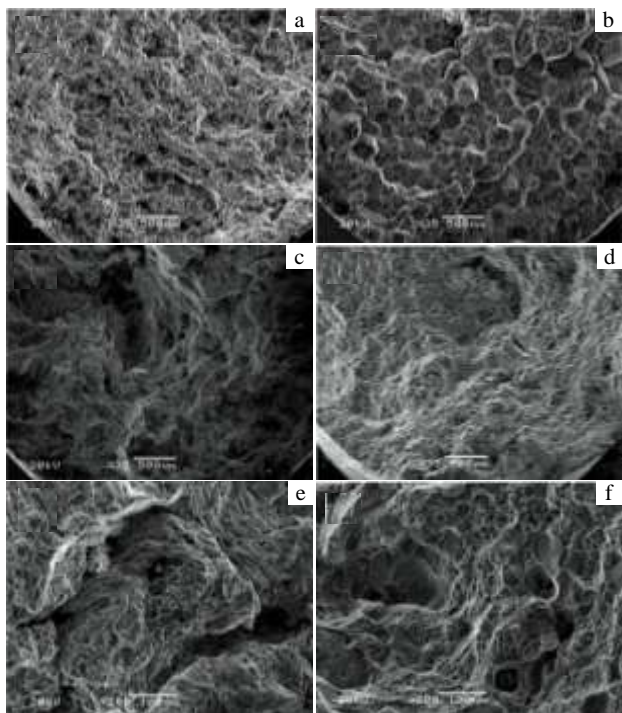


图 9 不同 Er、Zr 含量下 ZL205A 合金的断口形貌

Fig.9 Fracture morphologies of ZL205A alloys with different contents of Er and Zr elements: (a) as-cast 2, (b) T5 heat-treated 2, (c) as-cast 3, (d) T5 heat-treated 3, (e, f) high magnification views of Fig.9c and 9d, respectively

参考文献 References

[1] Yang Guangyu(杨光昱), Jie Wanqi(介万奇), Zhang Runqiang(张润强) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2007, 36(10): 1717

[2] Li B, Shen Y F, Hu W Y. *Mater Design*[J], 2011, 32: 2570

[3] Yu Guilin(于桂林), Zhao Xin(赵昕). *Journal of Materials Engineering*(材料工程)[J], 2000(9): 42

[4] Lathabai S L, Loyd P G. *Acta Mater*[J], 2002, 50: 4275

[5] Li Min(李敏), Wang Hongwei(王宏伟), Zhou Zhaojun(朱兆军) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2010, 39(S1): 5

[6] Yao D M, Zhao W G, Zhao H L *et al. Scripta Mater*[J], 2009, 61: 1153

[7] Nie Zuoren(聂祚仁). *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2009, 19(22): 56

[8] Wen S P, Gao K Y, Huang H *et al. Scripta Mater* [J], 2011, 65: 592

[9] Wen S P, Xing Z B, Huang H *et al. Mater Sci Eng*[J], 2009, 516: 42

[10] Yang Junjun(杨军军), Nie Zuoren(聂祚仁), Jin Tounan(金头男) *et al. Journal of the Chinese Rare Earth Society*(中国稀土学报)[J], 2002, 12: 20

[11] Li Yuanyuan(李元元), Guo Guowen(郭国文), Zhang Weiwen(张卫文) *et al. Special Casting & Nonferrous Alloys*(特种铸造及有色合金)[J], 2002, 22(3): 4

- [12] Liao Lin(廖林), Yang Chenggang(杨成刚), Zhu Jin(朱锦) *et al.* *Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2014, 43(1): 28
- [13] Zhan Chunyao(占春耀), Wang Wei(王为), Liu Yangbang(刘扬邦) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2011, 40(4): 650
- [14] Wei Xiaowei(魏晓伟), Zeng Ming(曾明). *Foundry Technology* (铸造技术)[J], 1997, 18(3): 46
- [15] Cui Tianzhen(崔天真), Wang Defu(王德福). *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 1995, 5(4): 124
- [16] Zhang L G, Patrick J. Massetb, Cao F Y *et al.* *J Alloys Compounds*[J], 2011, 509: 3822

Effect of Trace Er and Zr Addition on Microstructure and Properties of ZL205A Alloy

Guo Tingbiao^{1,2}, Zhang Zhanfei¹, Ding Wanwu^{1,2}, Yuan Zizhou^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Non-ferrous Metals, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

(2. Key Laboratory of Nonferrous Metal Alloys and Processing, Ministry of Education, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Rare earth (RE) elements Er and Zr both of 0.05, 0.15 and 0.25 wt% were added to ZL205A alloy. The effect of trace RE addition on the microstructure and properties of as-cast and T5 heat-treated alloys was investigated. The results show that trace Er and Zr elements can effectively improve the fluidity of the alloy, refine the grains and promote the θ phase to concentrate on the intersection of the grain boundaries. When their addition amount is 0.15 wt%, the mechanical properties of as-cast alloy decline greatly compared with those of the initial alloy; after T5 heat-treatment, the tensile strength, the Vickers hardness and the elongation reach 358 MPa, 1070 MPa and 2%, respectively, when the comprehensive performance is the best. T5 heat-treatment can make the microstructure and composition uniform, and also lead solute atoms to diffuse sufficiently. Therefore, it hinders the dislocation movement and sub-boundary migration during the deformation process, taking an adverse impact on the elongation.

Key words: ZL205A; fluidity; microstructure; mechanical properties

Corresponding author: Guo Tingbiao, Ph. D., Associate Professor, State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Non-ferrous Metals, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, P. R. China, Tel: 0086-931-2757285, E-mail: gtb777@163.com