

ZL205A 铝合金铸件偏析缺陷的断口形貌和化学成分

Fracture Surface and Chemical Composition of Segregation
Defect of ZL205A Casting Aluminum Alloy

陈邦峰, 贾洋江

(北京航空材料研究院, 北京 100095)

CHEN Bang-feng, JIA Yang-jiang

(Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

摘要: 以实际生产过程中铝铜系 ZL205A 铸件的偏析缺陷为研究对象, 研究了偏析缺陷对铸件本体力学性能和断口形貌的影响, 同时研究了偏析面积与试样性能的关系。结果表明: 偏析缺陷对试样抗拉强度和伸长率影响较大, 对试样屈服强度影响较小, 且偏析缺陷试样伸长率均值为 3.7%, 略低于 I 级指标 4% 要求, 而抗拉强度和屈服强度均值分别为 391.3MPa 和 343.5MPa, 均高于 I 级指标 360MPa 和 280MPa 要求; 无缺陷试样断裂为韧性断裂, 偏析缺陷试样断裂为沿晶脆性断裂, 偏析相呈网络状并连成片均布在晶界上, 其主要成分为 Al_2Cu 低熔点共晶相; 试样抗拉强度 σ_b 值与其偏析面积能较好地满足线性关系。

关键词: 偏析; ZL205A; 铸造; 断口形貌; 化学成分

中图分类号: TG292 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2010)09-0001-06

Abstract: Segregation defect of Al-Cu alloy ZL205A casting during production was researched as an object. The effect of segregation defect on the mechanical properties of the casting and the macro/microstructure of the fracture surface, and the relationship of the mechanical properties and the segregation area were studied. The results show that segregation defect has obvious effect on the tensile strength and the elongation, and no effect on the yield strength. The average value of the elongation is 3.7% lower than that of I grade 4%, while the tensile strength and the yield strength is 391.3MPa and 343.5MPa more than that of I grade 360MPa and 280MPa, respectively. It is ductile fracture for defect-free samples, and while intercrystalline brittle fracture for the segregation defect samples. The segregation defect accumulates along the grain boundaries with the continuous networks, and its main composition is low-melting point eutectic phase Al_2Cu . There is a linear logarithmic relationship between the tensile strength and the segregation area of the samples.

Key words: segregation; ZL205A; casting; fracture surface; chemical composition

ZL205A 属 Al-Cu-Mn 系高强度铸造铝合金, 其中 Cu 含量为 4.6% (质量分数, 下同) ~ 5.3%, 并添加 Ti, Zr, V, Cd, B 等多种元素, 合金施以严格的热处理工艺, 其抗拉强度(T6 状态) 可达 510MPa, 为目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、船舶和武器装备等方面^[1-3]。由于 ZL205A 合金固液相线温差较大, 合金凝固速率和合金元素扩散速率不一致, 因此在铸件中, 尤其是大型厚壁铸件中, 不可避免地存在偏析^[4]。有资料指出^[3,5]: ZL205A 合金偏析的产生主要与熔炼操作有关而与铸造工艺无关, 要防止铸件偏析应从控制合金液质量、熔炼温度、浇注温度、保温静置时间和加强搅拌等方面来考虑。

ZL205A 铸造合金基体组织为 $\alpha(\text{Al})$, 并含有 θ 相和 T 相, 而偏析相主要富集在晶界上, 其组织成分比较复杂, 主要有 Al, Ti, Zr 和 Cu 等重金属元素, 这些晶界相的存在严重割裂了基体组织, 因而显著降低合金的性能^[6]。

随着高强度 ZL205A 合金铸件在航空航天受力构件中的广泛应用, 大尺寸铸件毛坯件在精加工后经 X 光检验发现的偏析问题逐渐暴露出来。铸件毛坯状态的内部质量和力学性能数据已不能完全真实反映加工后铸件产品的各项性能指标, 这为产品设计部门带来设计风险。而目前国内外对 Al-Cu 系铸件偏析的研究报道较少, 且还未有可参照的关于铝合金偏析缺

陷的验收标准。

该问题已成为影响产品合格率及铸件交付使用的重要因素,各生产厂家和设计部门对于减少偏析问题,提高铸件质量及确定专用偏析验收技术要求的愿望十分迫切。合理科学地制订出偏析缺陷存在所允许的程度、数量、形貌等是产品使用方、设计部门迫切需要掌握的使用依据,也是 ZL205A 合金市场进一步推广的需要。本工作从产品实际出发,研究 ZL205A 合金铸件偏析缺陷对铸件本体性能、断口形貌及组织成分的影响。

1 实验方法

基于生产过程中所发现的铝铜系 ZL205A 铸件 T5 态所存在的偏析缺陷进行研究,其实验步骤如下: (1) 收集存有偏析缺陷的铸件毛坯,用 A A 400 底片和 LPX160 的 X 射线探伤机照射铸件缺陷部位并切取,实验用底片本底黑度值为 2.0 ± 0.20 ,X 射线探伤机照射焦距 1.75m,管电压 (50 ± 2) kV,管电流 5mA,曝光时间 4min; (2) 将缺陷部位按要求切取若干根试棒,并进行编号。试棒加工成图 1 所示的室温拉伸试样,将加工好的室温拉伸试样再次进行 X 射线照射,仅选取无缺陷试样和偏析缺陷试样进行性能测试,其他缺陷试样排除; (3) 选用 Instron1196 拉伸机测试试样力学性能,并根据试样性能测试数据和 X 射线探伤结果,按照表 1 的要求将偏析缺陷试样按 0 级、I 级、II 级、III 级进行划分,其中 0 级为无缺陷、I 级为轻微偏

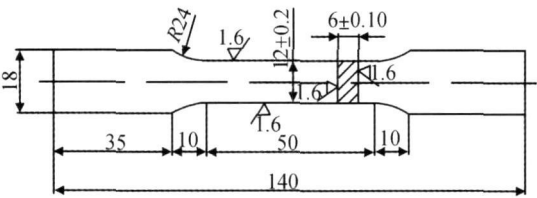


图 1 试样加工示意图
Fig. 1 Scheme of tensile sample

表 1 不同偏析级别试样的力学性能指标

Table 1 The mechanical properties index of the different segregation grades samples

Grade	σ_b / MPa	$\sigma_{0.2}$ / MPa	δ_5 / %
	\geq		
0	360	280	4
I	360	280	4
II	340	260	3
III	320	240	1

析、II 级为稍重偏析、III 级为重偏析; (4) 选用 FEI Quanta600 型电子扫描显微镜对断口形貌进行二次电子像和背散射电子像观察,用 Oxford IE350 型能谱分析仪测定合金成分的含量,用 AUTOCAD 软件分析偏析缺陷所占断口面积的比例,以及与性能之间的关系。

2 实验结果及分析

2.1 力学性能

无缺陷试样和偏析缺陷试样力学性能测试统计结果如表 2 所示,其正态分布比较图见图 2,其中无缺陷试样测试样本数 25 个,偏析缺陷试样测试样本数 48 个。可以看出,无缺陷试样抗拉强度、屈服强度和伸长率均值分别为 443.2、346.8MPa 和 8.5%,而偏析缺陷试样均值分别为 391.3、343.5MPa 和 3.7%。由此可见,除屈服强度值较为接近外,无缺陷试样抗拉强度和伸长率均值要高于偏析缺陷试样,且偏析缺陷试样抗拉强度和屈服强度均值均高于表 1 中 I 级指标 360MPa 和 280MPa 要求,而伸长率均值则略低于 I 级指标 4% 要求,从性能分散程度来看,偏析缺陷对试样抗拉强度和伸长率影响较大,而对试样屈服强度影响较小,主要由于合金屈服是位错的增值和运动的结果,合金的屈服强度取决于位错在晶体中运动所受到的阻力,因此,无缺陷试样和偏析试样的屈服强度均值表现相近。

表 2 力学性能统计结果

Table 2 Statistical analysis of the mechanical properties

Item		σ_b / MPa	$\sigma_{0.2}$ / MPa	δ_5 / %
Minimum	Segregation defect	320	310	1.0
	Defect-free	420	320	6.0
Maximum	Segregation defect	465	395	11.5
	Defect-free	470	390	13.5
Average	Segregation defect	391.3	343.5	3.7
	Defect-free	443.2	346.8	8.5
Standard deviation	Segregation defect	33.1	24.6	2.1
	Defect-free	15.7	22.4	2.3

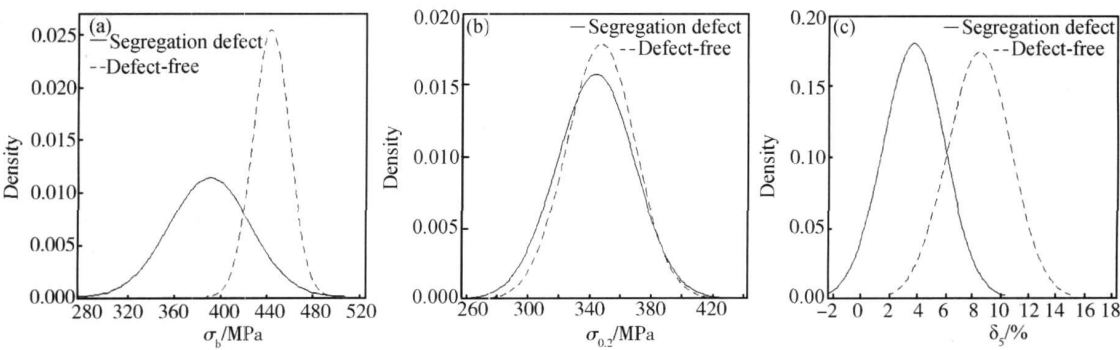


图 2 试样力学性能正态分布图

(a) 抗拉强度; (b) 屈服强度; (c) 伸长率

Fig. 2 Normal distribution graphs of mechanical properties of the samples

(a) tensile strength; (b) yield strength; (c) elongation

2.2 断口分析

图 3~ 6 分别为无缺陷试样、I 级偏析试样、II 级偏析试样和 III 级偏析试样的断口宏观与微观的二次电子像(SEI), 及其相应试样断口的宏观与微观背散射电子像(BEI)。由宏观照片可观察到, 无缺陷试样断口存在极少的白亮色相, 随着偏析级别的提高, 试样断口的白亮色相所占断口的面积增大, 即偏析相增多, I 级偏析缺陷面积占断口面积 10% ~ 20% 左右, II 级偏析占断口面积 20% ~ 30% 左右, III 级偏析占断口面积 30% 以上。结合断口微观照片, 无缺陷试样和偏

析试样断口由一些细小密集的窝坑构成, 该窝坑即为韧窝, 但同时可观察到, 部分断面上有冰糖状堆积形貌, 为多面晶体形貌, 该部分呈现沿晶断裂, 表现为脆性断裂, 但总体而言, 无缺陷试样断裂主要表现为韧性断裂。除此之外, 无缺陷试样断面处未发现大面积白亮色相, 而偏析试样的断口有白亮色相呈网络状并连成片地均布在晶界上, 随着偏析级别的提高, 在晶界处白亮色相也逐渐增多, 结合试样力学性能测试结果, 试样断口的白亮色相, 即偏析相对试样伸长率的影响尤为突出。

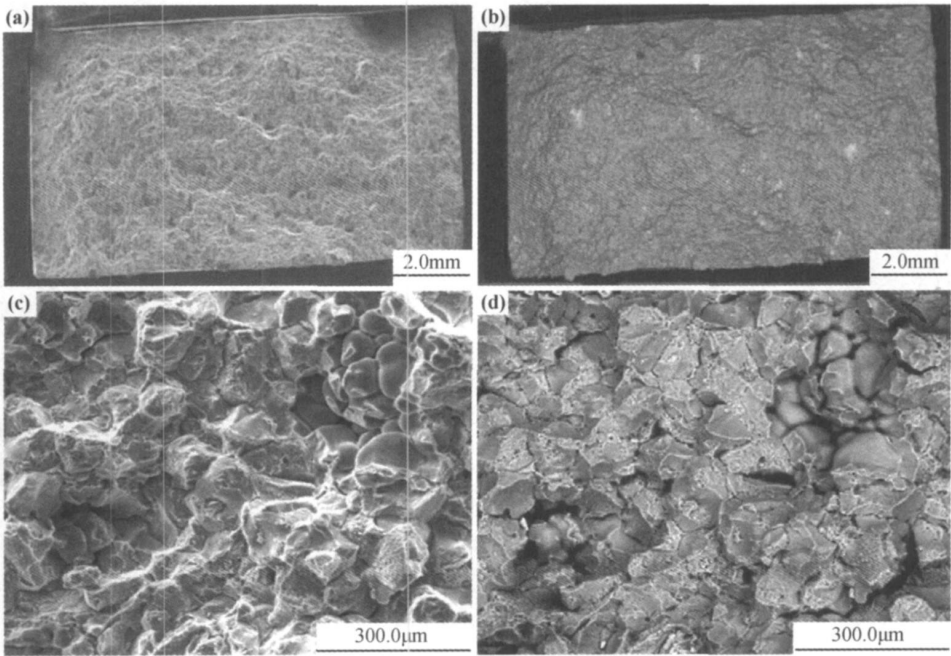


图 3 无缺陷试样断口宏观和微观形貌

(a), (c) SEI; (b), (d) BEI

Fig. 3 Macrostructure and microstructure of the fracture surface of the defect free samples (a), (c) SEI; (b), (d) BEI

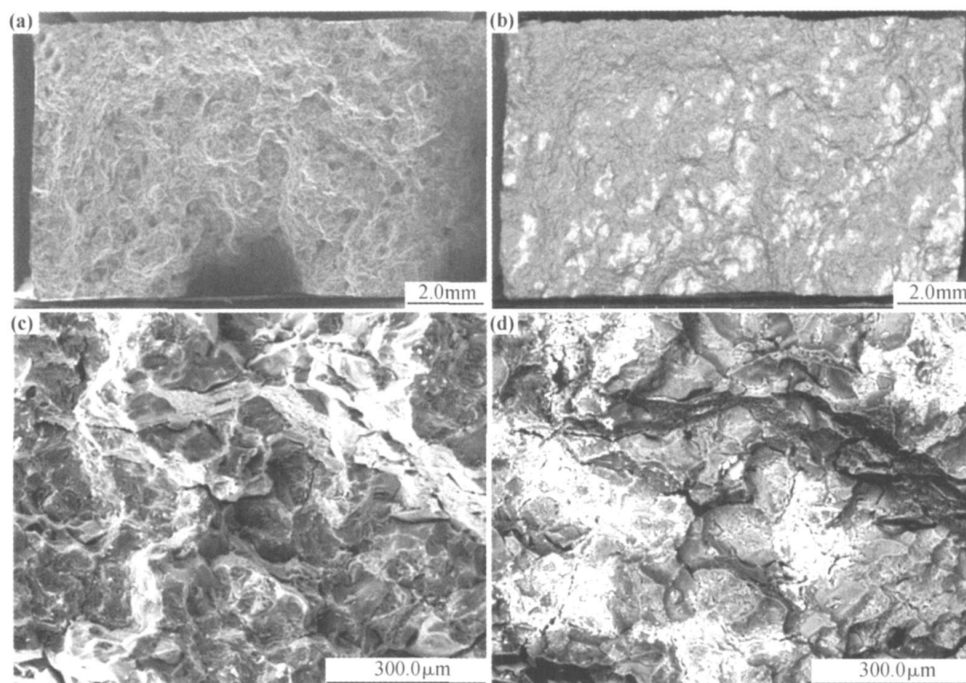


图 4 I 级偏析试样断口宏观和微观形貌 (a),(c) SEI;(b),(d) BEI

Fig. 4 Macrostructure and microstructure of the fracture surface of the I grade segregation samples (a),(c) SEI;(b),(d) BEI

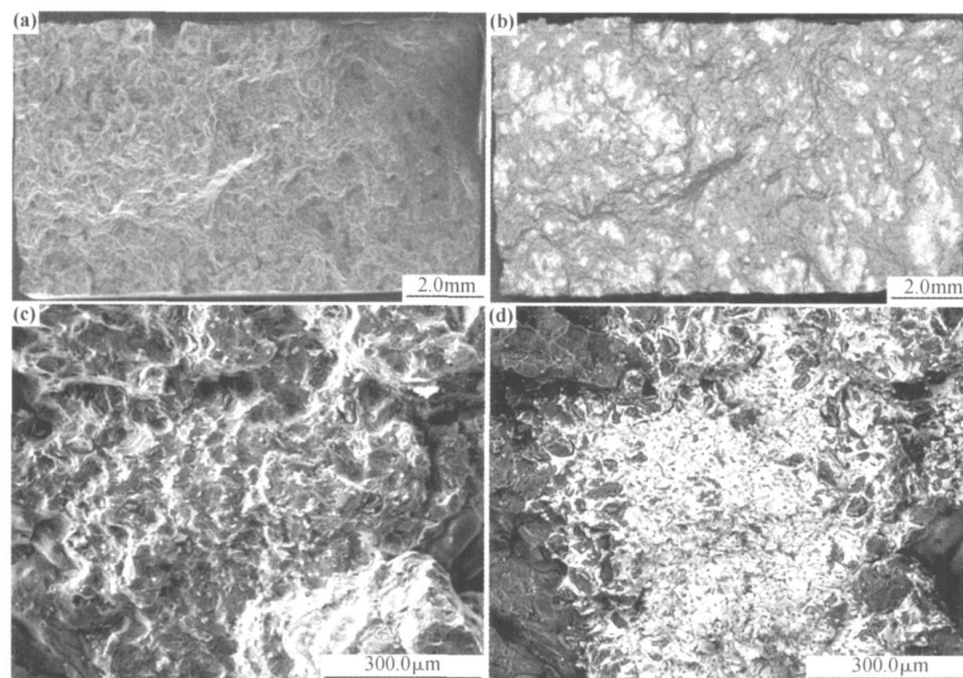


图 5 II 级偏析试样断口宏观和微观形貌 (a),(c) SEI;(b),(d) BEI

Fig. 5 Macrostructure and microstructure of the fracture surface of the II grade segregation samples (a),(c) SEI;(b),(d) BEI

2.3 能谱分析

无缺陷试样和偏析试样断口能谱分析结果见图 7 和表 3 所示。可以看出, 白亮色相点 A 主要为 Al, Mn, Cu 元素, 其中 Cu 含量较高, 可达 52.22%, Cu 原

子数与 Al 原子数之比近似为 1:2。无缺陷试样断口点 C 的主要成分为 Al, Mn, Fe 和 Cu, 其中 Cu 含量为 4.94%, 符合 ZL205A 合金 Cu 含量标准要求^[7]。由此可见, 白亮色相属高 Cu 组织。

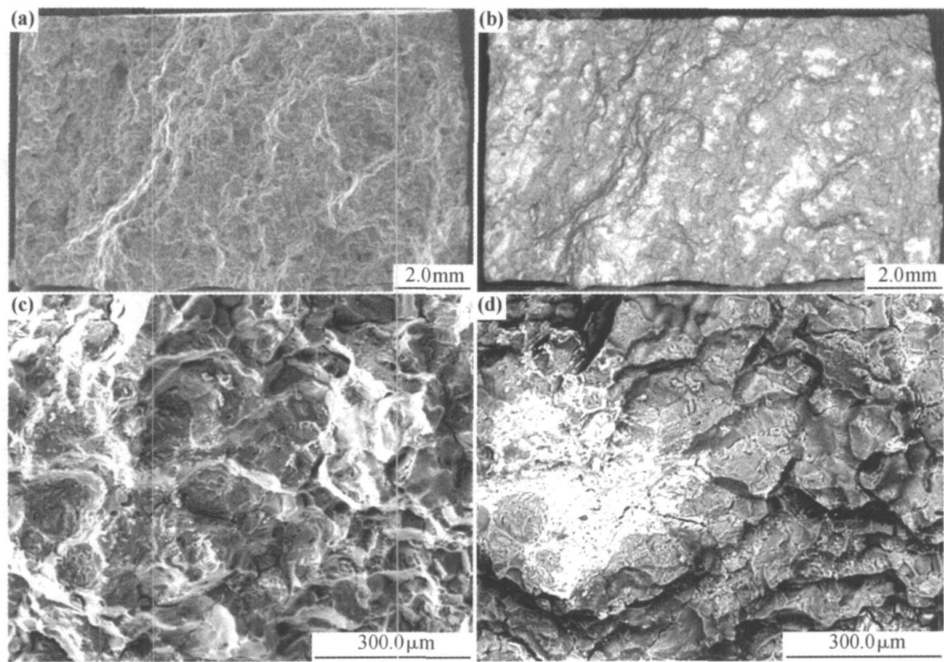


图 6 III 级偏析试样断口宏观和微观形貌 (a),(c) SEI;(b),(d) BEI
Fig. 6 Macrostructure and microstructure of the fracture surface of the III grade segregation samples (a),(c) SEI;(b),(d) BEI

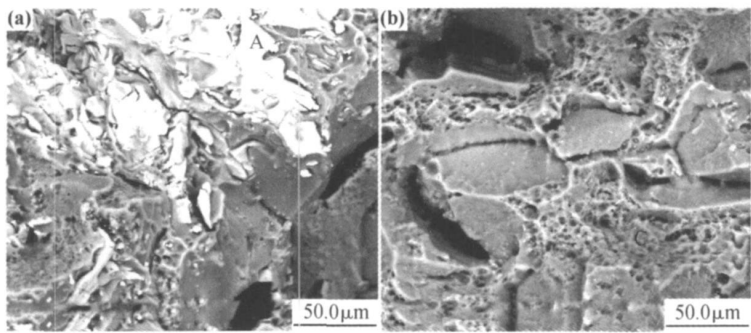


图 7 试样能谱分析 (a) 偏析试样;(b) 无缺陷试样
Fig. 7 EDS analysis of samples (a) segregation sample;(b) defect-free sample

表 3 偏析试样和无缺陷试样的化学成分

Table 3 Chemical compositions of segregation samples and defect free samples

Element	Compound A		Compound C	
	Mass fraction/ %	Atom fraction/ %	Mass fraction/ %	Atom fraction/ %
Al	47.44	67.98	93.66	97.11
Mn	0.34	0.24	1.10	0.56
Cu	52.22	31.78	4.94	2.18
Fe	—	—	0.30	0.15

由于在 Al-Cu 系合金中, Cu 是基本强化元素, 与 Al 形成 Al₂Cu 相; 在固溶处理时溶入 α 基体, 起固溶强化作用, 在人工时效过程中则析出, 起弥散强化作用。而 ZL205A 属 铝-铜-锰系高强度铸造铝合金, 该合金的凝固结晶间隔较宽, 属固溶强化型合金, 在铸造生产过程中, 冷却速率的不一致性导致合金液未能实

现顺利凝固, 在铸件型腔中的局部部位, 由于冷却过冷度较大, 共晶点偏左下移, 使合金成分变为亚共晶型, 在结晶过程后期则析出共晶相。在正常情况下, 这种共晶相铸态时分布在晶界上, 在热处理固溶阶段时, 可以被固溶体固溶。而局部区域成分不均 Cu 含量较多, α 固溶体处于过饱和状态、Al₂Cu 相无法被固溶而

存在晶界,少量的晶界共晶相对性能影响不大,也是不可避免的。其二,合金在冷却结晶过程中由于结晶间隔较宽,属粥状凝固,凝固过程中先形成枝晶网络骨架,其中网络骨架的孔隙部位,被后期剩余低溶点的共晶液填充,分布不均,冷却后的共晶组织属共晶偏析,由于该共晶组织 Cu 含量较高属高密度共晶相,因此在 X 射线底片和背散色照片中显现出白亮色,该白亮色点即为 Al_2Cu 低熔点共晶相。同时,由于 Al_2Cu 属脆性相,随着亮点程度的加深即偏析程度的加深,合金力学性能减弱,尤其是伸长率下降最为明显。由此可见,偏析试样断裂属沿晶脆性断裂^[8]。

2.4 偏析所占断口面积比例

利用 AUTOCAD 软件,采用网格法计算偏析缺陷所占断口面积比例的百分数,见图8,并根据散点图

作出趋势线,以分析缺陷面积百分数与性能间的关系,见图9。

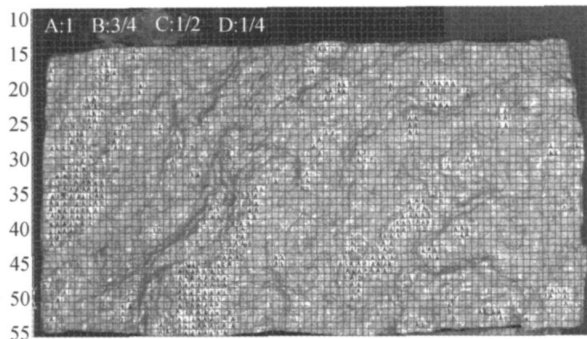


图8 网格法计算偏析面积

Fig. 8 The segregation area counted by gridding

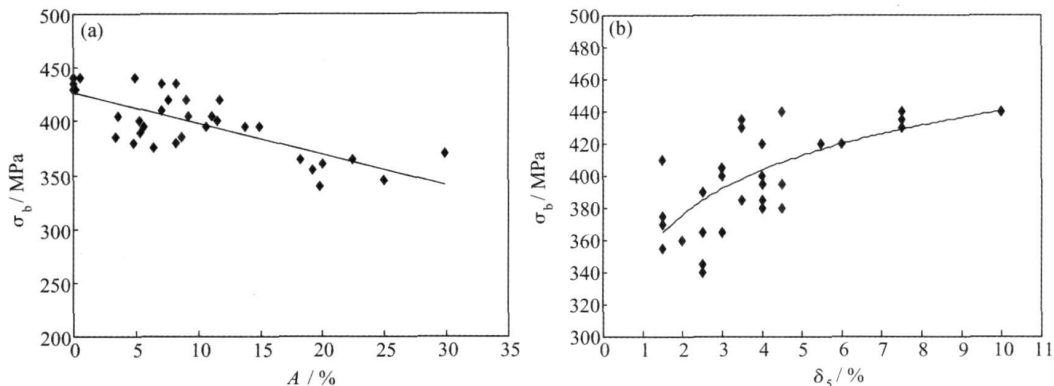


图9 抗拉强度与 A (a) 和伸长率(b) 的关系

Fig. 9 The relation of tensile strength with A (a) and elongation (b)

可以看出,抗拉强度与偏析缺陷所占断口面积比例的百分数 A 存在一定的线性关系,而抗拉强度与伸长率近似存在一定的对数关系,具体趋势线方程如下:

$$P = -3A + 428 \quad (1)$$

$$P = 40 \ln(L) + 340 \quad (2)$$

式中: P 表示抗拉强度 σ_b ; L 表示伸长率 δ_5 ; $A = \frac{S_P}{S_D} \times 100$ (S_P : 偏析面积; S_D : 断口面积)。

由上述分析可知,偏析缺陷对试样的伸长率影响较大,因此,对 I 类铸件而言,其伸长率需满足 $L \geq 4\%$,既而由方程式(2)可得到试样抗拉强度 P 需满足如下要求:

$$P = 40 \ln(L) + 340 \geq 40 \ln(4) + 340 = 395 \text{ MPa} \quad (3)$$

据此,由方程式(1)则可推出偏析面积所占断口面积比例百分数 A 需满足如下要求:

$$P = -3A + 428 \geq 395 \Rightarrow A \leq 11 \quad (4)$$

由此可知,当偏析缺陷占断口面积比例小于 11% 时,试样满足 I 类指标本体切取性能要求。

3 结论

(1) 与无缺陷试样比较,偏析缺陷对试样抗拉强度和伸长率影响较大,对试样屈服强度影响较小,且偏析缺陷试样伸长率均值为 3.7%,略低于 I 级指标 4% 要求;而抗拉强度和屈服强度均值分别为 391.3 MPa 和 343.5 MPa,均高于 I 级指标 360 MPa 和 280 MPa 要求。

(2) 无缺陷试样断裂为韧性断裂,偏析缺陷试样断裂为沿晶脆性断裂;偏析相为白亮色呈网络状并连成片均布在晶界上,其主要成分为 Al_2Cu 低熔点共晶相。

(3) 偏析缺陷试样抗拉强度 σ_b 值与其所占断口面积的比例呈一定线性关系,且当偏析缺陷占断口面积比例小于 11% 时,试样满足 I 类指标本体切取性能要求。

(下转第 24 页)

措施, 制备出氧含量较低的预合金粉末。

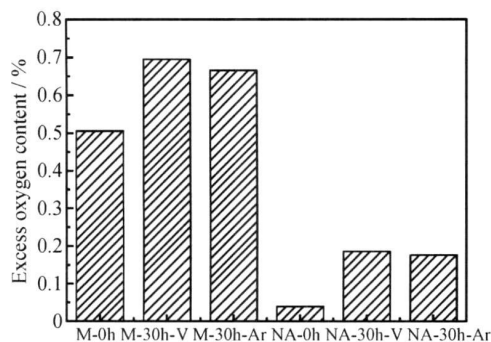


图 6 M 和 NA 合金不同球磨气氛下的过量氧含量

Fig. 6 Excess oxygen content in M and NA powders mechanically alloyed at different atmosphere

3 结论

(1) 使用雾化合金粉作为初始原料, 球磨后合金元素的分布非常均匀, 只有单一相, 而以纯金属作原料, 球磨后合金粉末中存在明显的长条状的 Cr(深灰色相) 和颗粒状的 W(白色相)。

(2) 采用不同的初始原料, 合金化粉末中的过量氧含量有很大差异。球磨前后, 雾化合金粉末中的过量氧含量均远远低于纯金属合金粉末。

(3) 球磨过程中使用高纯 Ar 作为保护气氛, 能够有效降低球磨后合金粉末中引入的氧, 但颗粒及晶粒平均粒径明显大于真空条件, 这表明通入 Ar 气会在一定程度上降低球磨效率。

参考文献

- [1] KAITO T, UKAIS, OHTSUKA S, et al. Development of ODS Ferritic Steel Cladding for the Advanced Fast Reactor Fuels[C]. Tsukuba: Proceedings of GLOBAL 2005, 2005. 196.
- [2] MUKHOPADHYAY D K, FROES F H, GELLES D S. Development of oxide dispersion strengthened ferritic steels for fusion[J]. Journal of Nuclear Materials, 1998, 258 - 263 (Part 2): 1209- 1215.

(上接第 6 页)

参考文献

- [1] 张瑛杰, 冯志军, 李巨文, 等. 大型 ZL205A 铸件的成分偏析和过烧组织研究[J]. 铸造, 2003, 52(8): 545- 546.
- [2] 龚磊清, 金长庚, 刘发信, 等. 铸造铝合金金相图谱[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1987.
- [3] 李玉胜, 霍虎, 马宝民, 等. 高强度 ZL205A 合金大型铸件“白点”偏析研究[J]. 铸造, 2007, 56(2): 185- 187.
- [4] 董晟全, 周敬恩, 严文, 等. 高强度铸造铝合金凝固过程中的元素偏析[J]. 铸造技术, 2003, 23(1): 50- 52.
- [5] 张建兵. 高强度 ZL205A 铸件气孔缺陷研究[J]. 制造技术研究, 2007, (1): 4- 8.

- [3] CHO H S, KIMURA A, UKAIS, et al. Corrosion properties of oxide dispersion strengthened steels in super critical water environment[J]. Journal of Nuclear Materials, 2004, 329- 333 (Part 1): 387- 391.
- [4] CHO H S, KIMURA A. Corrosion resistance of high Cr oxide dispersion strengthened ferritic steels in super critical pressurized water[J]. Journal of Nuclear Materials, 2007, 367- 370 (Part 2): 1180- 1184.
- [5] OHTSUKA S, UKAI S, FUJIWARA M, et al. Nanostructure control in ODS martensitic steels by means of selecting titanium and oxygen contents[J]. Journal of Physics and Chemistry of Solids, 2005, 66(2- 4): 571- 575.
- [6] RAMAR A, OKSIUTA Z, BALUC N, et al. Effect of mechanical alloying on the mechanical and microstructural properties of ODS EUROFER 97[J]. Fusion Engineering and Design, 2007, 82(15- 24): 2543- 2549.
- [7] IWATA N Y, KIMURA A, FUJIWARA M, et al. Effect of milling on morphological and microstructural properties of powder particles for high Cr oxide dispersion strengthened ferritic steels[J]. Journal of Nuclear Materials, 2007, 367- 370 (Part 1): 191- 195.
- [8] 汤春峰, 曲选辉, 周霆, 等. 机械合金化 ODS 钴基合金粉末的放电等离子烧结[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(8): 1461- 1464.
- [9] 关璐, 曲选辉, 贾成厂, 等. 用机械合金化法制备含氮不锈钢粉末[J]. 北京科技大学学报, 2005, (6): 692- 694.
- [10] KLIMIANKOU M, LINDAU R, MOESLANG A. Energy filtered TEM imaging and EELS study of ODS particles and argon filled cavities in ferritic martensitic steels[J]. Micron, 2005, 36(1): 1- 8.

基金项目: 973 国家重点基础研究发展计划资助项目 (2007CB209800, 2008CB717802)

收稿日期: 2009-03-20; 修订日期: 2009-11-29

作者简介: 何培(1983—), 女, 硕士研究生, 从事氧化物弥散强化铁素体钢的研究, E-mail: hepei0310@163.com

通讯作者: 周张健(1972—), 男, 副教授, 联系地址: 北京市海淀区学院路 30 号北京科技大学特陶中心(100083), E-mail: zhouzhj@mater.ustb.edu.cn

[6] 龚海军, 米国发, 王狂飞, 等. ZL205 合金的组织与性能研究[J]. 热加工工艺, 2007, 36(5): 5- 8.

[7] 袁成祺. 铸造铝合金镁合金标准手册[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1994.

[8] 贾洋江, 陈邦峰. 显微共晶偏析对 ZL205A 合金力学性能的影响[J]. 材料工程, 2008, (2): 1- 4.

收稿日期: 2009-11-16; 修订日期: 2010-07-13

作者简介: 陈邦峰(1977—), 男, 硕士, 主要致力于高强度优质铸造铝合金材料及其铸件产品研制, 联系地址: 北京市 81 信箱 2 分箱(100095), E-mail: cbfustb3311@sina.com