

铝锭品位对 Al-6.8Zn-2.5Mg-2.5Cu 铝合金产品的影响

Effect of Different Grades of Primary Aluminum Ingots on Al-6.8Zn-2.5Mg-2.5Cu Aluminum Alloy Products

供稿|马月¹, 李欣斌², 王强³, 宋阳², 李棠旭² / MA Yue¹, LI Xinbin², WANG Qiang³, Song Yang², LI Tangxu²

内容导读

为了选择最优原材料,精准管控产品质量和生产成本,本文对比分析了不同品位铝锭对铸锭 Fe、Si 含量、显微组织中相种类和形貌、成品板材拉伸力学性能和断裂韧性等方面的影响,并通过理化检测结果表征了不同品位铝锭下产品技术指标值的变化。试验结果表明,铝锭品位变化后,并未对铸锭、板材的技术指标产生明显影响,采用低品位铝锭投产能够获得满足产品指标要求的板材。因此,将该工艺进行了固化,应用于工业化生产中。

在铝中加入适量的其他元素配制成的铝合金,具有强度高、塑性好、比强度大等特性,可与优质合金钢媲美,成为优秀的轻型结构材料,有“会飞的金属”之称。飞机结构中铝材占 50% 以上^[1]。铝合金 Al-6.8Zn-2.5Mg-2.5Cu 即是一种常用的适用于飞机材料的铝材。

铝锭的品位分为多个等级,等级越高,杂质元素的含量越低。根据 Al-6.8Zn-2.5Mg-2.5Cu 铝合金产品中杂质元素 Fe、Si 含量的上限指标,Al 质量分数 99.99% 和 99.95% 这 2 种品位的铝锭(编号分别为 1 和 2)均能够满足要求,将这 2 种品位铝锭对产品的影响进行对比分析,选取满足产品质量且成本最低的原材料,提升产品的市场竞争力。

试验过程

以铝锭品位为变量,将废料配比、铸锭规格、板材厚度、热处理等工艺参数保持不变,开展生产试验,获得 2 种铝品位的铸锭和板材(编号与采用的铝锭对应,即采用 1 号铝锭制造的铸锭和板材分别成为 1 号铸锭和 1 号板材),对铸锭进行化学成分、显微组织及拉伸力学性能分析,对板材进行拉伸力学性能、断裂韧性等分析。

试验结果分析

铸锭化学成分对比分析

对 2 种铸锭不同位置进行化学成分取样分析,取样位置如图 1 所示,取样位置为铸锭宽度的中心

作者单位: 1. 重庆国创轻合金研究院有限公司, 重庆 400039; 2. 东北轻合金有限责任公司, 黑龙江 哈尔滨 150060; 3. 中国铝业集团高端制造股份有限公司, 重庆 400039

(1[#]、2[#]、3[#])、1/4 处 (4[#]、5[#]、6[#]) 以及边部 (7[#]、8[#]、9[#])，化学成分分析结果如表 1 所示。本文试样编号规则为“采用铝锭号-采样位置”。

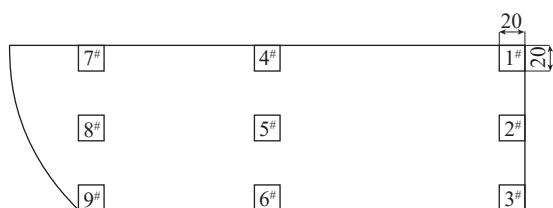


图 1 化学成分取样位置示意图 (单位: mm)

表 1 2 种铸锭化学成分对比分析 (质量分数) %

试样编号	Si	Fe	Cu	Mg	Zn	Zr
1-1 [#]	0.012	0.028	1.72	1.97	5.83	0.12
1-2 [#]	0.013	0.035	2.13	2.30	6.56	0.11
1-3 [#]	0.015	0.033	2.05	2.22	6.28	0.11
1-4 [#]	0.010	0.028	1.79	2.00	5.88	0.12
1-5 [#]	0.012	0.035	2.16	2.31	6.52	0.11
1-6 [#]	0.012	0.034	2.09	2.21	6.39	0.11
1-7 [#]	0.013	0.034	2.09	2.25	6.44	0.11
1-8 [#]	0.016	0.036	2.14	2.29	6.60	0.11
1-9 [#]	0.012	0.034	2.08	2.24	6.42	0.11
平均值	0.013	0.033	2.03	2.20	6.32	0.11
极差	0.006	0.008	0.44	0.34	0.77	0.01
2-1 [#]	0.013	0.031	1.73	1.98	5.78	0.11
2-2 [#]	0.010	0.044	2.22	2.28	6.51	0.10
2-3 [#]	0.013	0.047	2.14	2.26	6.40	0.10
2-4 [#]	0.012	0.037	1.85	2.02	5.84	0.11
2-5 [#]	0.010	0.045	2.22	2.20	6.44	0.10
2-6 [#]	0.007	0.043	2.12	2.22	6.37	0.10
2-7 [#]	0.009	0.046	2.24	2.20	6.51	0.10
2-8 [#]	0.011	0.046	2.17	2.24	6.38	0.10
2-9 [#]	0.013	0.042	2.09	2.21	6.29	0.10
平均值	0.011	0.042	2.09	2.18	6.28	0.10
极差	0.006	0.016	0.51	0.30	0.73	0.01

由表 1 可知，2 种铸锭的 Si 元素含量基本相当，平均值数值差为 0.002%；Fe 元素含量相差较 Si 元素大，平均值数值差为 0.009%，采用 99.95% 铝锭的铸锭 Fe 元素含量相对高些。铝锭品位的变化带来了杂质元素含量的变化，后续将进一步分析这些差异对铸锭和成品板材的影响。

铸锭显微组织对比分析

选取图 1 中 1[#]、2[#]、3[#]、4[#]、7[#]号位置试样，对 2

种铸锭的显微组织进行了对比分析，结果如图 2 所示。

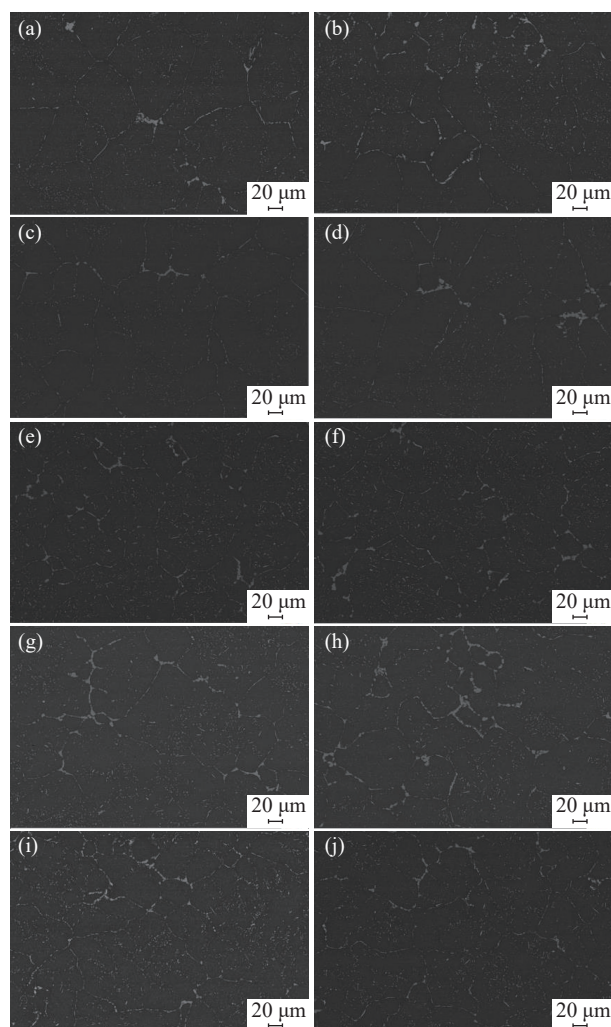


图 2 2 种铸锭扫描电镜显微组织对比: (a) 1-1[#]; (b) 2-1[#]; (c) 1-4[#]; (d) 2-4[#]; (e) 1-7[#]; (f) 2-7[#]; (g) 1-2[#]; (h) 2-2[#]; (i) 1-3[#]; (j) 2-3[#]

由图 2 可知，铝锭品位优化为 99.95% 后，铸锭的显微组织变化不大，未见富 Fe 相数量的显著增加，晶粒尺寸相差不大。从中心到边部 (1[#]→4[#]→7[#]、1[#]→2[#]→3[#]) 枝晶网络逐渐变厚，符合铸锭结晶规律。

铸锭显微组织中富 Fe 相对比分析

铝锭品位的改变，带来了成品铸锭中 Fe 元素含量的变化，在 2 种品位铸锭的心部 (1[#]) 和宽度 1/4 位置 (4[#]) 处观察到了富 Fe 相，如图 3 所示。

由图 3 可知，2 种铸锭心部和宽度 1/4 处富 Fe 相的形貌均为针片状，尺寸与数量均相差不大，且通过图 4 能谱分析结果可知，2 种铸锭的富 Fe 相

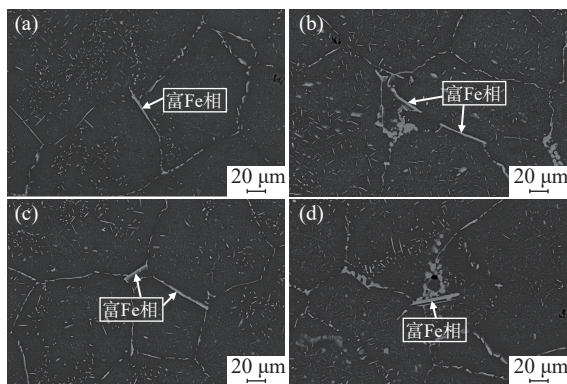


图3 2种铸锭富Fe相的对比: (a) 1-1#; (b) 2-1#; (c) 1-4#; (d) 2-4#

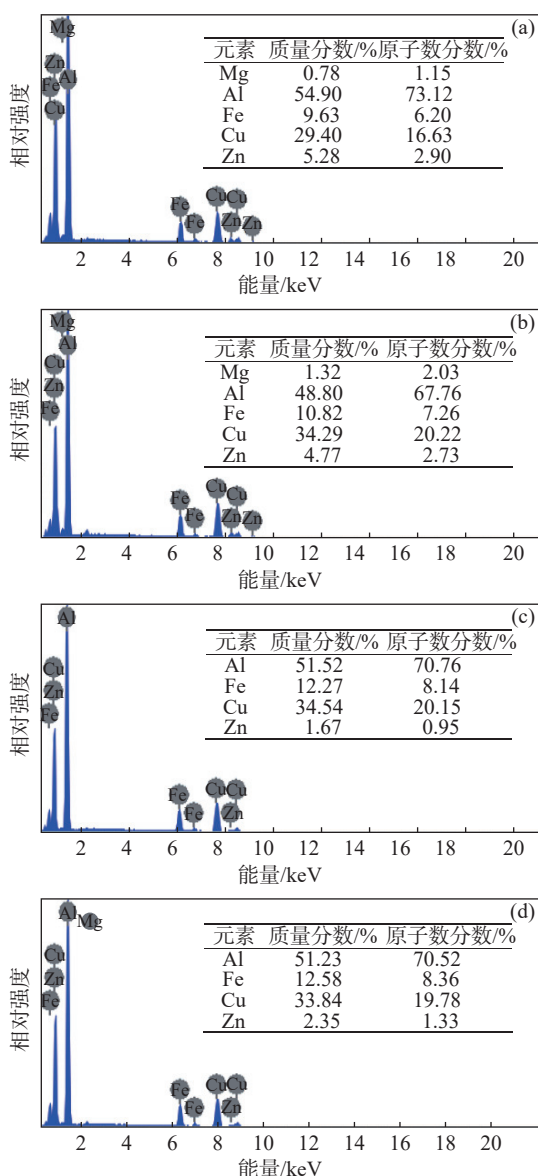


图4 2种铸锭富Fe相的能谱分析结果: (a) 1-1#; (b) 2-1#; (c) 1-4#; (d) 2-4#

均为 $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$ 相。含 Cu 量较高的合金中, 主要形成 $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$ 相^[2], 能谱分析结果与其一致。

铸锭力学性能对比分析

对 2 种铸锭进行了拉伸力学性能对比分析, 取样位置如图 5 所示, 分别在铸锭宽度的中心 (11#、12#、13#)、1/4 位置 (14#、15#、16#) 选取试样, 力学性能分析结果见图 6。

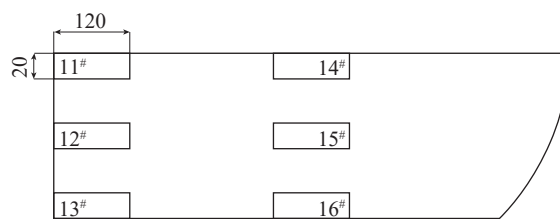


图5 铸锭力学性能取样位置图 (单位: mm)

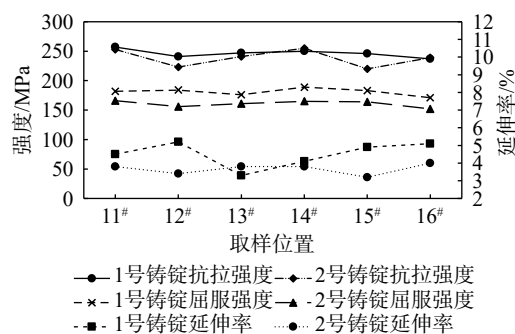


图6 2种铸锭力学性能对比

由图 6 可知, 1 号 2 号铸锭的抗拉强度平均值分别为 246.3 和 238.5 MPa; 屈服强度平均值分别为 180.8 和 160.7 MPa; 延伸率平均值分别为 4.52% 和 3.67%。2 号铸锭的抗拉强度与 1 号铸锭基本一致, 屈服强度比 1 号铸锭低 10 MPa, 延伸率低 0.8%, 铸锭整体性能略有降低。

板材力学性能对比分析

由于板材的力学性能指标以厚度 50 mm 为分界线, 因此本文分别对比分析了厚度 51~80 mm 板材和 50 mm 及以下规格的板材力学性能, 对比分析结果分别如图 7 和图 8 所示。

由图 7 可知, 厚度 51~80 mm 的板材 2 号工艺下板材的纵向抗拉强度、延伸率与 1 号工艺下板材相当, 屈服强度处于 1 号工艺下板材的中下水平, 两工艺的抗拉和屈服强度指标与订货标准值相比余

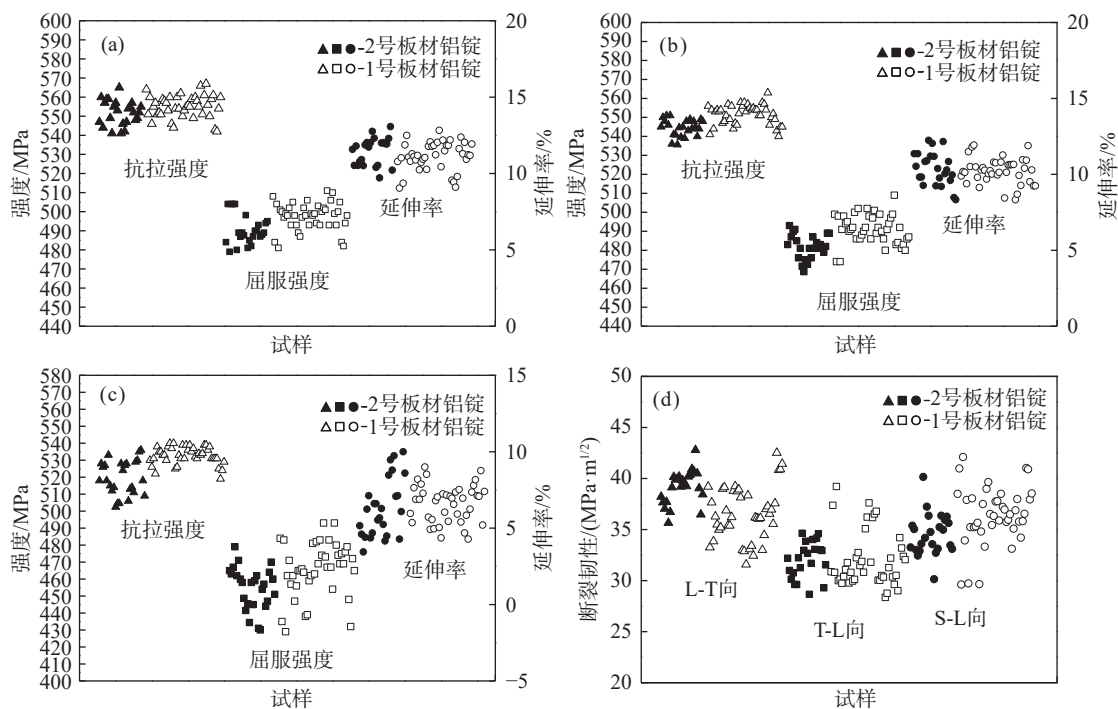


图7 51~80 mm 2种工艺板材力学性能对比: (a) 纵向; (b) 横向; (c) 高向; (d) 断裂韧性 (L-T 表示纵向, T-L 表示横向, S-L 表示高向)

量较大, 延伸率指标与订货标准值相比的余量不大; 两工艺横向拉伸性能指标的趋势与纵向一致; 2号工艺下板材的高向抗拉、屈服强度、延伸率指标均与1号工艺下板材相差不大, 且余量充足; 2号工

艺下板材3个方向的断裂韧性均处于1号工艺下板材的中上水平, 余量充足。

由图8可知, 厚度 ≤ 50 mm的板材, 2号工艺下板材的纵向和横向抗拉、屈服强度及延伸率指标与

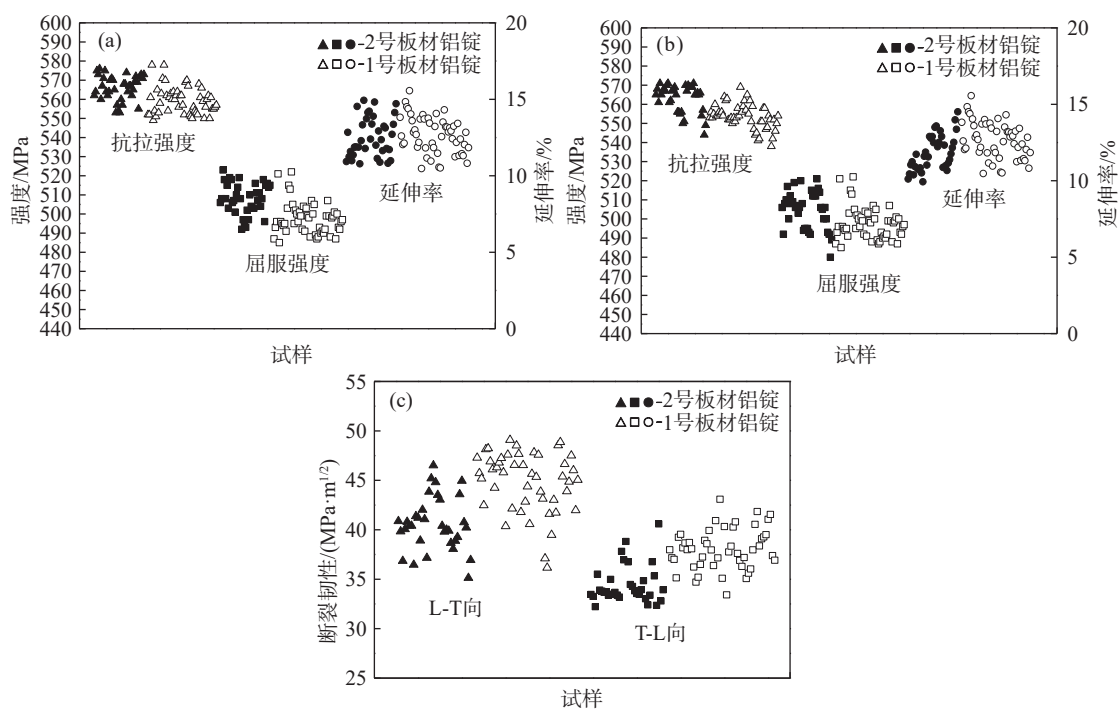


图8 50 mm 及以下2种工艺板材力学性能对比: (a) 纵向; (b) 横向; (c) 断裂韧性 (L-T 表示纵向, T-L 表示横向)

1号工艺下板材相当,且余量较大;L-T和T-L方向的断裂韧性处于1号工艺下板材的中下水平,余量仍然满足两个单位。

根据上述分析结果可知,铝锭品位的降低导致厚度51~80mm的板材屈服强度有所降低,厚度≤50mm的板材断裂韧性有所降低,但两工艺的各项力学性能指标仍有余量,能够满足标准要求。

分析与讨论

铝锭品位变化对铸锭Fe、Si含量的影响

1号铝锭的Fe质量分数实测值为0.001%~0.002%,Si质量分数实测值为0.001%~0.003%,1号铝锭的Fe质量分数实测值为0.0072%~0.0198%,Si质量分数实测值为0.0073%~0.0199%之间。两品位铝锭的Fe、Si含量值相差较大,但铸造成为成品铸锭后,Fe、Si含量之间的差异远比铝锭之间的差异小(见表1),这是由于在熔铸过程中,会加入大量的中间合金、其他合金的废料等原材料,这些原材料的加入,会冲淡铝锭品位不同带来的Fe、Si含量差异,使最终成品铸锭Fe、Si含量相差不大。同时,在熔铸过程中,搅拌、扒渣、精炼等工具均为铁制品,这些制品的使用,也会对成品铸锭的Fe含量产生一定的影响,造成成品铸锭的Fe含量远高于铝锭。因此,在选择铝锭品位时,无须一味追求高品位,应根据投料结构、工具的使用情况等多方位进行考量。

Fe含量的提高对铸锭显微组织的影响

Fe是铝合金中最常见的杂质元素之一。Fe原子在铝合金中可以形成各种形状的Fe相,其中以针片状铁相最易形成、最为常见。Fe质量分数不大于0.2%时,富Fe相的形态一般为汉字状 α 相;Fe质量分数不大于0.25%时,Fe相的形态一般为细小片状;Fe质量分数大于0.3%时,Fe相的形态为粗大针片状 β 相^[3]。随着Fe含量的增加,富Fe相的形态发生变化。2种铝锭工艺下成品铸锭的Fe质量分数

均大于0.3%,在铸锭中均以针片状 $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$ 的形式存在,是其富Fe相形貌、尺寸相差不大的主要原因。

Fe含量的提高对铸锭冶金质量的影响

Fe含量增多时,大量针片状富Fe相在凝固过程中会影响枝晶间的金属液的流动,阻塞枝晶间的收缩通道能,从而增加铸锭的缩孔和疏松等缺陷^[4]。

Fe含量的提高对板材力学性能的影响

针片状富Fe相粗大且脆,会割裂铝合金基体,使其产生局部应力集中而脆性增加,致使铝合金制品塑性、韧性等明显下降^[5],因此,对成品板材的各项性能要求较高的产品,需要对铝合金中的Fe元素含量进行控制。本文中的产品,现有2种品位铝锭工艺下产品的Fe含量均能够满足最终成品板材的各项性能指标要求,且存在余量,满足使用要求。

结论

质量分数99.99%和99.95%的铝锭生产的产品显微组织、力学性能差异不大,均能够满足产品技术指标的要求和用户的使用需求。而采用99.95%铝锭作为原材料,在保证产品质量的前提下,可降低原材料的投入成本,提升公司产品在市场的竞争力,带来可观的经济效益。

参考文献

- [1] 窦光宇. 铝: 与人类融合不寻常. 金属世界, 2008(6): 65
- [2] 余欢, 疏达, 储威, 等. Fe和Si杂质对7XXX系高强航空铝合金组织及性能的影响. 材料工程, 2013(6): 92
- [3] 王远, 张若凡. 浅议铁元素对铝合金的影响. 中国高新技术企业, 2015(5): 72
- [4] 罗旭东, 汤昌廷, 马军创, 等. 铝及铝合金中Fe、Si杂质元素的冶金与熔铸过程控制. 铸造, 2015(5): 440
- [5] 孙德勤, 朱苏, 吴培君. 改善铝合金中富Fe相析出形态的技术进展. 铸造, 2018(1): 20

作者简介: 马月(1987—), 女, 重庆国创轻合金研究院有限公司, 高级工程师, 研究方向为铝合金压力加工及热处理。通信地址: 重庆市九龙坡区科城路108号, 邮编: 400039; E-mail: mayue1363@126.com。