

化学成分和浇注温度对 7A04 合金铸造性能的影响

胡增武, 宗福春

(河北新立中有色金属集团有限公司, 河北保定 071000)

摘要: 采用水平直棒流动性金属型模具、临界长度法热裂模具、Tatur Test锥形模具分析研究了Mg、Zn、Cu、Ti合金元素和浇注温度对7A04合金铸造性能影响。结果表明: Mg含量提高后, 合金流动指数降低、收缩率变大, Mg含量增加到1.01%时, 热裂倾向增加, Mg含量继续增加到2.64%, 热裂倾向变小; Zn含量提高后, 流动性指数增加, 收缩率变小, 热裂倾向减小; Cu含量提高后, 流动指数大幅提高, 收缩率增加, 热裂倾向减小; Ti含量提高后, 流动指数和收缩率均有所提高, 热裂倾向明显减小, 当Ti含量由0.131%增加到0.20%时, 铸造性能变化幅度减小。温度为720℃时, 是热裂指数变化转折点。

关键词: 化学成分; 浇注温度; 7A04铝合金; 铸造性能

7A04 铝合金是 Al-Zn-Mg-Cu 系合金中应用最广泛的热处理强化变形铝合金, 合金强度高于硬铝, 具有强度高、加工性能及工艺性能良好等特点, 在航空航天、军工、交通等领域广泛应用, 尤其在飞机、火箭、导弹上, 常规炮弹兵器上, 可以满足减轻结构重量、提高承载能力及战斗力的要求^[1-3]。

由于7A04具有较宽的凝固范围、铸造性能较差、热裂倾向较严重^[4], 如果不准确掌握, 会影响后续半连续铸造、挤压、锻造、焊接等成形工艺参数的制定。不仅增加产品缺陷率, 降低成品性能, 不能满足现代航空、航天及军事工业应用中复杂而苛刻的工作条件, 同时也不能满足航空设备不断向大型、高速、多载、长寿命和确保飞行安全的发展方向^[5]。为有效避免因该合金铸造性能特点而可能造成的产品缺陷, 本文试验研究了Mg、Zn、Cu、Ti元素和温度对7A04合金铸造性能影响, 对7A04合金的生产有着非常重要的指导意义。

1 试样制备与试验方法

1.1 试样制备

试验原材料主要为电解铝锭(99.7%)、电解铜(99.99%)、高纯Mg锭和Zn锭、AlTi5B1细化剂。按照表1成分设计, 依次调整Mg、Zn、Cu、Ti合金元素, 分别在680℃、700℃、720℃、740℃浇注测试样品。

1.2 试验方法

使用GR260电阻坩埚炉进行熔炼试验, 熔炼温度760℃, 炉料熔化后, 除气、除渣净化。按照表1设计顺序进行成分调整试验。每次调整后, 保温10 min, 取样采用ARL3460直读光谱仪检测合金的化学成分, 流动性和热裂模具温度为150℃, 收缩率模具为室温, 采用水平直棒流动性金属型模具、临界长度法热裂模具、Tatur Test锥形模具制取样品。每个状态的合金制取3个有效试样, 取平均值作为检测结果。

作者简介:

胡增武(1986-), 男, 工程师, 主要研究方向为铝合金及铝基复合材料设计和制备。E-mail: huzengwu@lizhong.com.cn

通讯作者:

宗福春, 男, 高级工程师。电话: 18330289286, E-mail: zongfuchun@lizhong.com.cn

中图分类号: TG146.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2023)03-0270-05

收稿日期:

2022-08-12 收到初稿,
2022-12-04 收到修订稿。

表1 化学成分
Table 1 Chemical composition

序号	牌号	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	$w_B/\%$
1	AlCu1.4Mn0.2Mg0.2Cr0.14Zn5.7	0.27	0.14	1.45	0.21	0.23	0.14	5.71	0.011	
2	AlCu1.4Mn0.2Mg1.0Cr0.14Zn5.7	0.28	0.14	1.41	0.21	1.01	0.14	5.76	0.011	
3	AlCu1.4Mn0.2Mg2.6Cr0.14Zn5.7	0.27	0.15	1.41	0.21	2.64	0.14	5.74	0.011	
4	AlCu1.4Mn0.2Mg2.6Cr0.14Zn6.4	0.27	0.15	1.43	0.21	2.63	0.14	6.43	0.011	
5	AlCu1.4Mn0.2Mg2.6Cr0.14Zn7.0	0.28	0.15	1.42	0.21	2.61	0.13	7.04	0.011	
6	AlCu2.0Mn0.2Mg2.6Cr0.14Zn7.0	0.28	0.15	1.96	0.21	2.61	0.13	7.04	0.011	
7	AlCu2.5Mn0.2Mg2.6Cr0.14Zn7.0	0.28	0.15	2.47	0.21	2.61	0.13	6.99	0.011	
8	AlCu2.5Mn0.2Mg2.6Cr0.14Zn7.0Ti0.13	0.28	0.15	2.47	0.21	2.58	0.13	6.99	0.131	
9	AlCu2.5Mn0.2Mg2.6Cr0.14Zn7.0Ti0.20	0.26	0.15	2.47	0.21	2.59	0.13	7.01	0.201	

流动性样品由5个长度相同，截面积不同的分支组成，结合截面积越小，流动长度越短的原理，为了更准确的表征流动性指数，我们按照试样分支横截面积的比例给出了权重。横截面积由小到大的分支长度依次为 $L_1、L_2、L_3、L_4、L_5$ ，相应权重分别为3.5、2.5、1.5、1.2、1.0，流动指数 $\Sigma=3.5L_1+2.5L_2+1.5L_3+1.2L_4+1.0L_5$ 。

热裂样品由5个截面积相同，长度不同的分支组成，根据分支长度不同的特点，各分支热裂部位、热裂程度不同，通过热裂分支、热裂位置、热裂程度综

合表征热裂指数。各因素权重，断裂分支权重，各分枝长度从大到小权重为 $(L_1、L_2、L_3、L_4、L_5)$ 10、12、15、20、30；断裂程度权重 $(C_1、C_2、C_3、C_4)$ ：断裂4，半断裂3、裂纹2，半裂纹为1；断裂位置权重 $(D_1、D_2、D_3、D_4、D_5)$ ：分支根部圆角1，分支球端2，分支中间部位3，分支根部变径处4，分支根部5。试样所有热裂点对应热裂分支、热裂程度、热裂位置对应的权重乘积的和来表征热裂指数。公式： $HTS=\Sigma L_m \times C_m \times D_m$ 。

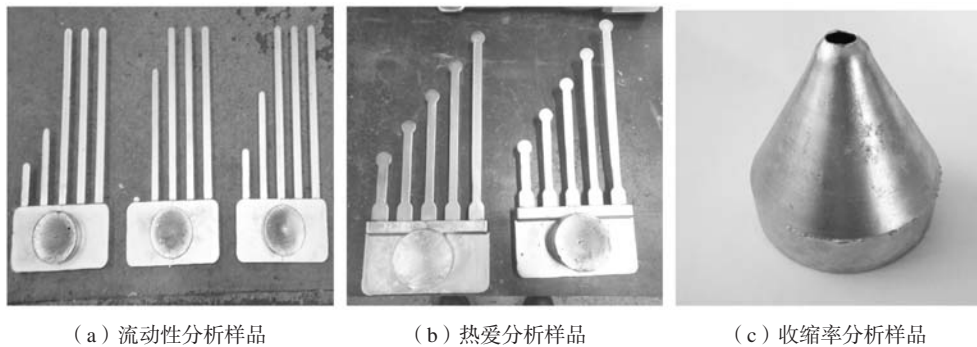


图1 流动性、热裂、收缩率分析样品
Fig. 1 Samples of Fluidity, hot cracking and shrinkage

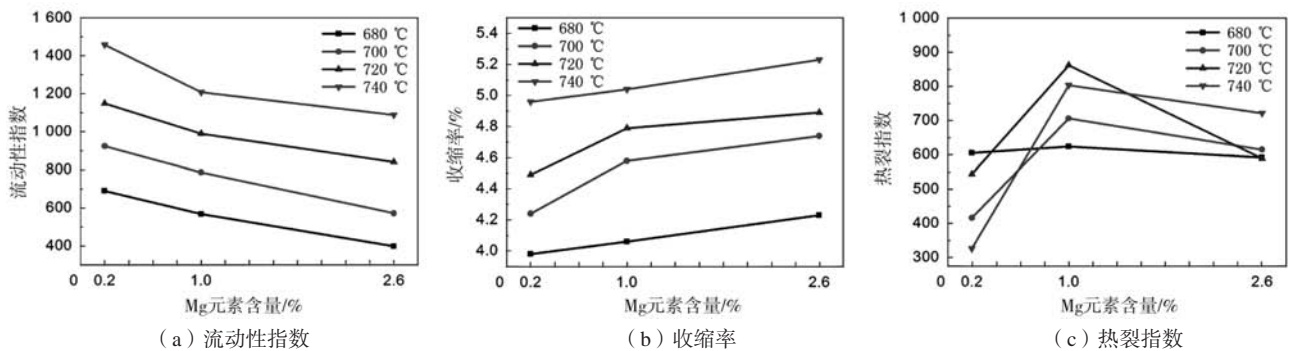


图2 Mg元素对7A04合金铸造性能的影响
Fig. 2 Effect of Mg on casting properties of 7A04 alloy

2 试验结果与讨论

2.1 Mg 元素对 7A04 合金铸造性能的影响

合金元素Mg由0.23%逐步提高到2.64%时,不同浇注温度下铸造性能数据如图2所示。从图2数据可看出,Mg含量提高后,合金流动指数降低、合金收缩率变大,尤其是截面积较小的分支长度逐渐明显减小,甚至消失,表明Mg元素对流动性影响明显。当Mg含量由0.23%增加到1.01%时,热裂倾向增加,然而Mg含量继续增加至2.64%时,热裂倾向变小。当Mg含量增加到1.01%时,使收缩率变大,导致收缩应力变大,同时减少合金共晶平台范围,降低晶间液膜表面张力,最终导致热裂倾向增加。继续将Mg含量逐渐增加到2.64%,经对合金液进行热分析,发现在460~470℃温度区间内产生大量的结晶潜热,暂缓合金收缩的趋势,进而减少凝固收缩的连续性,热裂倾向变小。

2.2 Zn 元素对 7A04 合金铸造性能的影响

在3号合金基础上,以3号合金为基准,调整Zn含量,试验Zn含量对铸造性能的影响。合金元素Zn由5.74%逐步提高到7.04%,熔体的流动性指数增加,各个分支长度增加比较均匀,收缩率可能呈变小趋势。分析认为Zn元素热导率低于Al,使得熔体在液相区时间延长,流动性变好,收缩率变小。当Zn提高到7.04%时,热裂倾向变小,热分析表明整个凝固区间熔体的瞬时冷却速率呈现减小的趋势,使收缩应力变小,同时Zn元素增加,会使合金强度提高,流动性增加,补缩能力增强,导致热裂倾向减小。具体数据详见图3。

2.3 Cu 元素对 7A04 合金铸造性能的影响

在5号合金基础上,以5号合金为基准,调整Cu含量,试验Cu含量对铸造性能的影响。合金元素Cu由

1.42%逐步提高到2.47%,流动指数大幅提高约20%,收缩率增加。由于Cu原子和Al原子同为面心立方结构,会形成强化相 Al_2Cu ,消除掉了部分Al原子,固相线降低,液相量增加,同时 Al_2Cu 结晶潜热比基体Al的结晶潜热大,故使得流动性提高,收缩率增大。当Cu含量由1.40%增加到2.47%时,热裂倾向降低,经对合金液进行热分析,发现固液相线降低,高温结晶潜热增多,同时流动性大幅提高,凝固最后阶段剩余液相分数越高,液膜分布越连续,则越有利于枝晶间液相的补缩^[6],合金的补缩性能明显,导致热裂倾向变小。具体数据详见图4。

2.4 Ti 元素对 7A04 合金体铸造性能的影响

在7号合金基础上,以7号合金为基准,调整Ti含量,试验Ti含量对铸造性能的影响。合金元素Ti由0.01%提高到0.131%,流动指数和收缩率均提高,热裂倾向变小。当Ti含量继续增加到0.2%时,流动指数和收缩率提高幅度变小。当Ti含量增加到0.131%时,能起到细化晶粒的作用,细化初生 $\alpha-Al$ 相,改善枝状晶形貌,这样减小流动阻力,同时降低固相线温度,使得合金流动性变好,收缩率增加。由于晶粒细化,晶界结合力增强,使得合金抗应力撕裂能力增强,导致热裂倾向减小。当Ti含量由0.131%增加到0.20%时,晶粒尺寸细化幅度变小,铸造性能变化幅度减小。具体数据详见图5。

2.5 浇注温度变化对 7A04 合金铸造性能的影响

从上述数据来看,随着浇注温度的提高,合金的流动性指数增加,收缩率增大。在温度为720℃时,热裂指数变化存在转折点。3[#]、4[#]合金,温度超过720℃热裂倾向增大;温度提高至740℃时,收缩应力提高,更多的 Al_2CuMg 相会偏聚在晶界上,导致晶核形成速度减慢,使得偏聚在晶界上的相有足够的时间去生长、游离,进而使晶粒变粗, Mg_2Zn 相析出增多,可能会阻

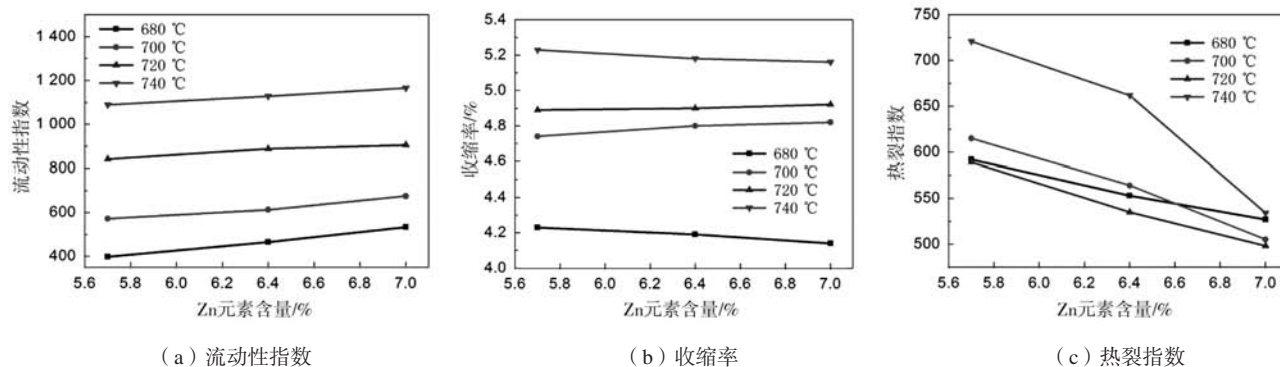


图3 Zn元素对7A04合金铸造性能的影响
Fig. 3 Effect of Zn on casting properties of 7A04 alloy

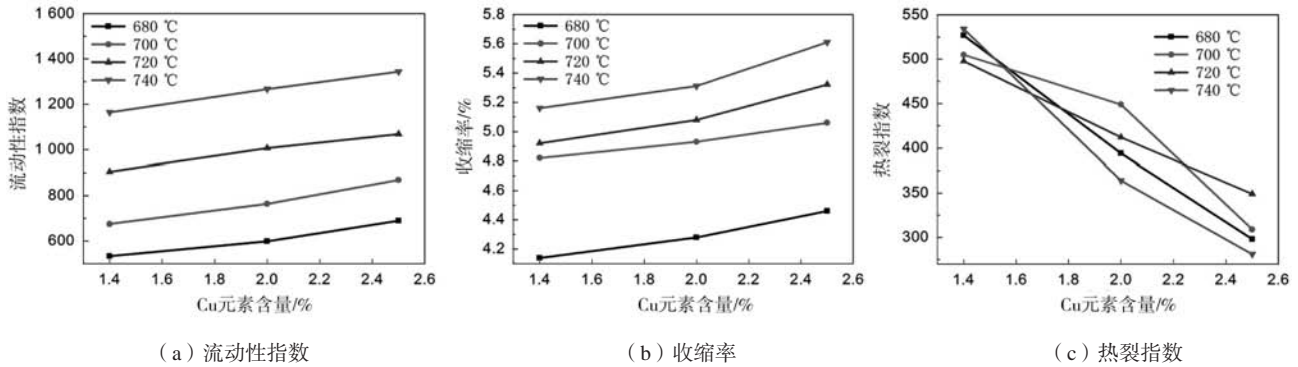


图4 Cu元素对7A04合金铸造性能的影响
Fig. 4 Effect of Cu on casting properties of 7A04 alloy

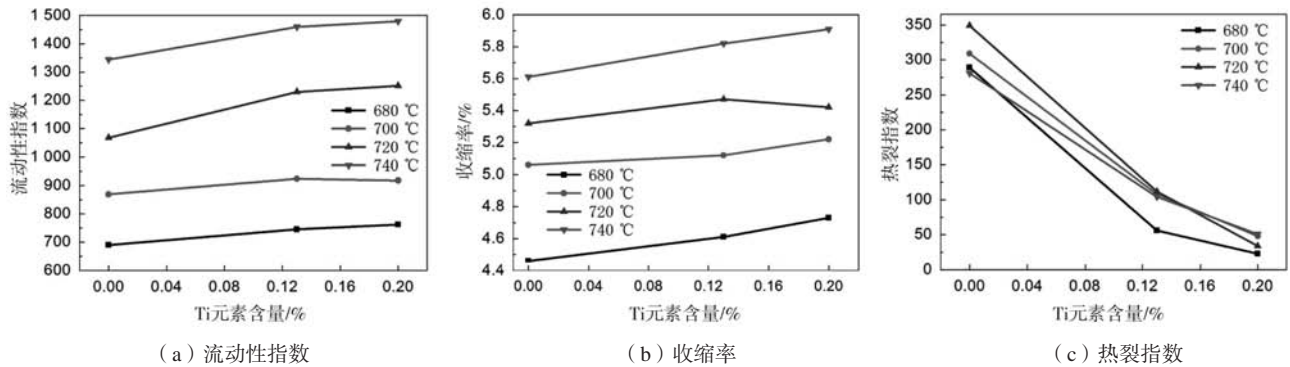


图5 Ti元素对7A04合金铸造性能的影响
Fig. 5 Effect of Ti on casting properties of 7A04 alloy

碍补缩，导致热裂敏感性增加，并引起少量连接晶粒之间的液膜也随之开裂^[7-9]。同时，温度提高，降低了合金的凝固速度，增大热裂倾向^[10]。5[#]、6[#]固相线降低，温度升高，当温度提高至740 °C可能在凝固后期，有足够液流数量补缩，对已经产生裂纹的区域进行补缩，阻碍了热裂纹扩展，降低了合金热裂倾向。

3 结论

(1) Mg含量提高后，合金流动指数降低、收缩率变大；Mg含量增加到1.01%时，热裂倾向增加，继续增加到2.64%，热裂倾向变小。

(2) Zn含量提高后，流动性指数增加，收缩率变小，热裂倾向减小。

(3) Cu含量提高后，流动指数大幅提高，收缩率增加，热裂倾向减小。

(4) Ti含量提高后，当Ti含量增加到0.131%时，流动指数和收缩率均提高，热裂倾向明显减小。当Ti含量由0.131%增加到0.20%时，铸造性能变化幅度减小。

(5) 温度为720 °C时是转折点，3[#]、4[#]合金在温度超过720 °C时热裂倾向增大，5[#]、6[#]在温度超过720 °C时热裂倾向降低。

参考文献:

- [1] 燕云程, 黄蓓, 李维俊, 等. Al-Zn-Mg-Cu系超高强度铝合金的研究进展 [J]. 材料导报, 2018, 32 (S2): 367-373.
- [2] 刘懿芳, 田伟, 孙玥. Al-Zn-Mg-Cu系铝合金微合金化的研究进展 [J]. 有色金属材料与工程, 2018, 39 (1): 38-41.
- [3] 董志修, 姜春茂, 赵广军, 等. 7A04超高强铝合金热处理工艺研究 [J]. 国防制造技术, 2019, 06 (2): 22-24.
- [4] 陈晓, 黄胜. 晶粒细化对铸造Al-7Zn-2.5Mg-Cu合金性能的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2012, 32 (11): 991-995.
- [5] 张美丽, 张磊军, 刘壮壮, 等. 混合稀土 (La, Ce) 对7A04铝合金耐蚀性能的影响 [J]. 材料热处理学报, 2022, 43 (5): 40-48.
- [6] 黄张洪, 张燕, 陈荣石, 等. Mg-Zn-Y-Zr合金热裂敏感性的研究 [J]. 铸造, 2009, 58 (8): 788-792.

- [7] 侯金楠. Mg对Al-Cu 合金金属间化合物形成及热裂倾向的影响研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2021.
- [8] 冯艳飞, 麻永林, 杨路, 等. 不同Zn/Mg对7A04铝合金析出相的热力学数值计算 [J]. 有色金属加工, 2021, 50 (4): 12-17.
- [9] 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.
- [10] 胡悦高, 邵光杰, 杨弋涛. 浇注与铸型温度对6082铝合金热裂倾向的影响 [J]. 铸造, 2008, 57 (1): 45-48.

Effect of Composition and Pouring Temperature on Casting Properties of 7A04 Aluminum Alloy

HU Zeng-wu, ZONG Fu-Chun

(Nonferrous Metallic of He Bei Li Zhong Group Co., Ltd., Baoding 071000, Hebei, China)

Abstract:

The effects of Mg, Zn, Cu, Ti alloy elements and pouring temperature on casting properties of 7A04 alloy were studied by using metal type fluidity mold, critical length hot cracking mold and tatur test conical mold. The results showed that the fluidity decreases and shrinkage increases with the content of Mg increase, when the Mg content increases to 1.01%, the hot cracking tendency increases, but the Mg content continues to increase to 2.64%, the hot cracking tendency decreases. With the increase of Zn content, the fluidity increase, the shrinkage rate decreases, and the hot cracking tendency decreased. With the increase of Cu, the fluidity and shrinkage increases, the hot cracking tendency decreases. With the increase of Ti content, fluidity and shrinkage increases, and hot cracking tendency decreased significantly, but the Ti content continues to increase to 0.20%, the change range of casting property is reduced. When the temperature is 720 °C, there is a turning point in the change of thermal cracking index.

Key words:

chemical composition; pouring temperature; 7A04 aluminum alloy; casting properties
