

[文章编号] 1004- 0609(2001) 05- 0791- 05

合金元素对 Al-Cu 合金热裂倾向的影响^①

李元元, 郭国文, 张卫文, 罗宗强
(华南理工大学 机电系, 广州 510640)

[摘 要] 为寻求一种低热裂倾向的高强韧铸造铝合金材料, 研究了 Cu, Zr 和 V 3 种元素对 Al-Cu 合金热裂倾向的影响。结果表明, V 明显降低材料的热裂倾向; Zr 含量低时轻微增大合金的热裂倾向, 含量高时强烈增大热裂倾向; 在 4.5%~5.5% 范围内 Cu 增大热裂倾向。Zr 和 V 对合金热裂倾向的不同影响在于 V 主要存在于晶内, 而 Zr 则部分存在于晶界。

[关键词] 热裂; Al-Cu 合金; Zr; V

[中图分类号] TG 146.21

[文献标识码] A

现已工业化生产的高强韧铸造铝合金($\sigma_b \geq 400$ MPa, $\delta_5 \geq 8\%$) 几乎全是 Al-Cu 系合金。Al-Cu 系合金属于固溶型, 其结晶间隔宽, 铸造性能差, 铸造过程中易出现热裂、疏松、偏析等缺陷。Al-Cu 系合金多用于带冷铁的砂型铸造, 较少用于金属型铸造。但是, 砂型铸造存在着严重的缺点, 即凝固时间长、晶粒粗大, 力学性能低。成形性能差严重制约了 Al-Cu 系高强韧铸造合金的应用范围。为了克服这一致命弱点, 人们从提高材料的铸造性能和开发材料新的成形技术两方面进行了大量的研究。对 Al-Cu 系合金热裂的机理和影响因素有较为详尽的研究^[1~5]。多位学者的研究表明^[6~9], 稀土能明显地降低 Al-Cu 系合金的热裂倾向。但是, 稀土在降低热裂倾向的同时也大大地降低合金的塑性。鉴于本课题的宗旨是寻求高强韧的合金, 所以舍弃了稀土作为合金的组成元素。作者研究了合金元素 Cu, Zr, V 对 Al-Cu 合金热裂倾向的影响规律, 以寻求一种适合挤压铸造且热裂倾向较小的高强韧铸造铝合金材料。

1 实验

1.1 基础合金和合金化元素的选择

法国牌号 A-U5GT 是一种 Al-Cu 系高强韧铸造铝合金, 在欧洲和美国得到了广泛的应用。它的组成简单, 强度和韧性都较好, 但铸造性能较差。在工业生产条件下, 它的力学性能可以达到 $\sigma_b = 340 \sim 385$ MPa, $\delta_5 = 5.5\% \sim 11\%$ (T5)^[10]。为了进

一步提高材料的强度和韧性, 改善铸造性能, 我们在 A-U5GT 的基础上开发出一种高强韧铸造铝合金材料, 代号为 HA 合金。HA 铝基合金的合金元素主要有 Cu, Mg, Mn, Zr, V, Ti, B 等。

1.2 试验方法

进行正交试验, 以探讨 Zr, V, Cu 3 种元素不同的含量水平及其交互作用对合金热裂倾向的影响规律, 确定热裂倾向较小的 HA 合金的成分范围。Zr, V, Cu 三因素各占一列, 根据正交试验的要求安排一个空列(误差列), 表 1 是正交试验因素水平表。

表 1 正交试验因素水平表

Table 1 Factors and levels of orthogonal test

Levels	Factors		
	A, $w(\text{Zr})/\%$	B, $w(\text{V})/\%$	C, $w(\text{Cu})/\%$
1	0.13	0	5.0
2	0.20	0.25	4.5
3	0	0.13	5.5

1.2.1 熔炼工艺

合金在石墨坩埚电阻炉中熔炼, 每炉熔炼 5 kg, 浇注热裂环试样两箱, 金属型力学性能试棒 6~7 根。Mg 用纯金属, Cu, Mn, Zr, V, Ti, B 均配成中间合金。Al-Mn, Al-Zr, Al-V 与纯铝同时室温装炉; 720 °C 时加 Al-Cu, 740 °C 时加 Al-Ti-B 后搅拌 3 min。730~740 °C 时精炼除气(精炼剂为商品精炼剂), 静置 8 min, 除渣, 加少量覆盖剂, 加 Mg,

① [基金项目] 国防预研基金资助项目([99] 装计字第 792)

[收稿日期] 2000- 11- 27; [修订日期] 2001- 04- 23

[作者简介] 李元元(1958-), 男, 教授, 博士生导师, 博士。

静置 5 min, 搅拌均匀后在 730 ℃ 浇注热裂环试样一箱, 浇注金属型力学性能试样 3 模(每模 1 根), 再浇注热裂环试样一箱, 余下的浇注力学性能试样。

1.2.2 热裂倾向测试

热裂环的测试方法参照文献[11], 试验所用的试样铸型结构见图 1。在砂箱中造 4 个厚 5 mm、直径 d 108 mm 的圆盘型腔, 并在各自的中心分别安置钢芯, 其尺寸大小及变化决定了热裂环的宽度在 5.0~42.5 mm 间变化, 间隔为 2.5 mm。在对着内浇道的外型中安置冷铁, 以使环在内浇道对面或附近, 即合金最后凝固的这些部位形成热裂。试验时依照合金的性质和成分选取钢芯的适当尺寸, 并逐次增大钢芯尺寸进行浇注, 首先出现热裂纹的环宽度代表热裂倾向, 数值越大, 对热裂越敏感。

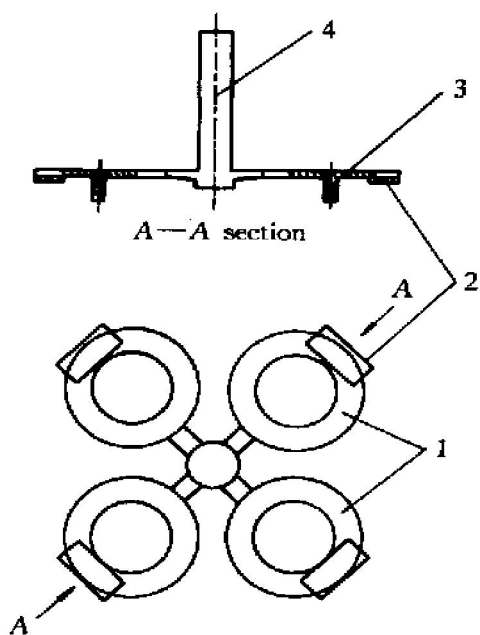


图 1 热裂环测试简图

Fig. 1 Sketch of hot tearing rings test

1—Samples; 2—Chillers; 3—Steel cores; 4—Sprue

2 实验结果

试验结果及数据处理见表 2, 由表 2 可见, 16[#], 12[#] 两组的试验结果较好。三因素对热裂倾向影响作用强弱的次序为: A(Zr) > B(V) > C(Cu), 空列的影响最小。

Zr 增大 Al-Cu 合金的热裂倾向。当 Zr 的含量较低时, 仅轻微增大热裂倾向; 当 Zr 的含量较高(0.20%) 时, 明显增大 Al-Cu 合金的热裂倾向。

V 明显降低 Al-Cu 合金的热裂倾向。V 含量在 0.13% 左右时强烈降低热裂倾向; 含量继续增加, 降低热裂倾向的效果下降。

表 2 正交试验结果表

Table 2 Result of orthogonal test

Experiment No.	A (Zr)	Blank	B (V)	C (Cu)	Width of hot tearing ring/mm
15 [#]	1	1	1	1	22.5
12 [#]	1	2	2	2	18.8
10 [#]	1	3	3	3	20.0
18 [#]	2	1	2	3	25.0
17 [#]	2	2	3	1	22.5
14 [#]	2	3	1	2	23.8
16 [#]	3	1	3	2	17.5
13 [#]	3	2	1	3	21.3
11 [#]	3	3	2	1	20.0
Average: 21.3					
K_{1j}	61.3	65.0	67.5	65.0	
K_{2j}	71.3	62.5	63.8	60.0	
K_{3j}	58.8	63.8	60.0	66.3	
$[K_{1j}]$	20.4	21.7	22.5	21.7	
$[K_{2j}]$	23.8	20.8	21.3	20.0	
$[K_{3j}]$	19.6	21.3	20.0	22.1	
R_j	12.5	2.5	7.5	6.3	
Influencing order	1	4	2	3	
Optimization	A3		B3	C2	

K_{ij} = Sum of results of level i in column j ;

$[K_{ij}] = K_{ij}/s$, s is number of level i in column j ;

$R_j = \max_j \{K_{ij}\} - \min_j \{K_{ij}\}$

Cu 对 Al-Cu 合金热裂倾向的影响规律是, 当 Cu 含量在 4%~5% 时热裂倾向最大, 超过 5% 热裂倾向降低^[11]。但在本试验中 Cu 含量在 5.0% 时热裂倾向并未达到最大, 5.5% 时最大, 4.5% 时最小。不过, 5% 和 5.5% Cu 的热裂倾向相差很小。出现这种结果可能与本试验中引入了 Zr 与 V 有关。

3 分析与讨论

HA 合金铸态下的组织主要有 α 固溶体、 θ (Al_2Cu) 相、 T ($Al_{12}Mn_2Cu$) 相等。图 2 所示是其热裂环试样(铸态)的典型显微组织。

在 Al-Cu 合金中, Zr 与 V 的作用表现为 $ZrAl_3$ 和 VA_7 能作为外来晶核细化晶粒^[11]。文献[12]认为 Al-Cu 合金中加入细化剂能明显地降低合金的热裂倾向。由此可以推论, 同样作为细化剂的 Zr 和 V 应该降低 Al-Cu 合金的热裂倾向。本试验结果表明, V 明显降低热裂倾向而 Zr 却有增大热裂倾向, 尤其是当 Zr 含量较高时, 这种趋势非常显著。

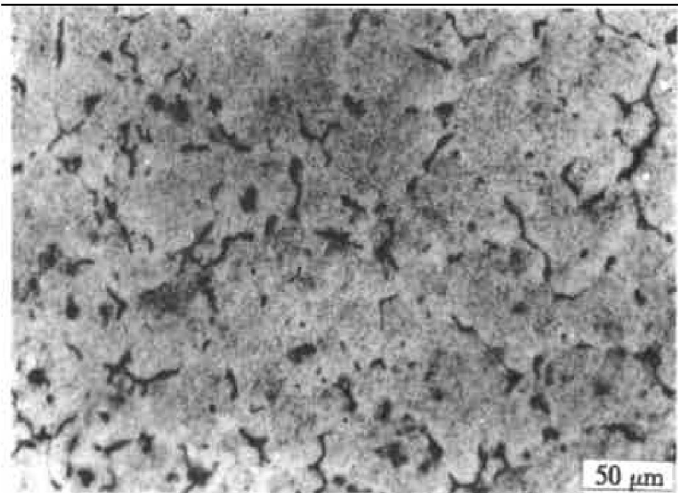


图 2 HA 合金的典型显微组织

Fig. 2 Typical microstructure of HA alloy

图 3~ 5 所示是热裂环断口的 SEM 像。通过能

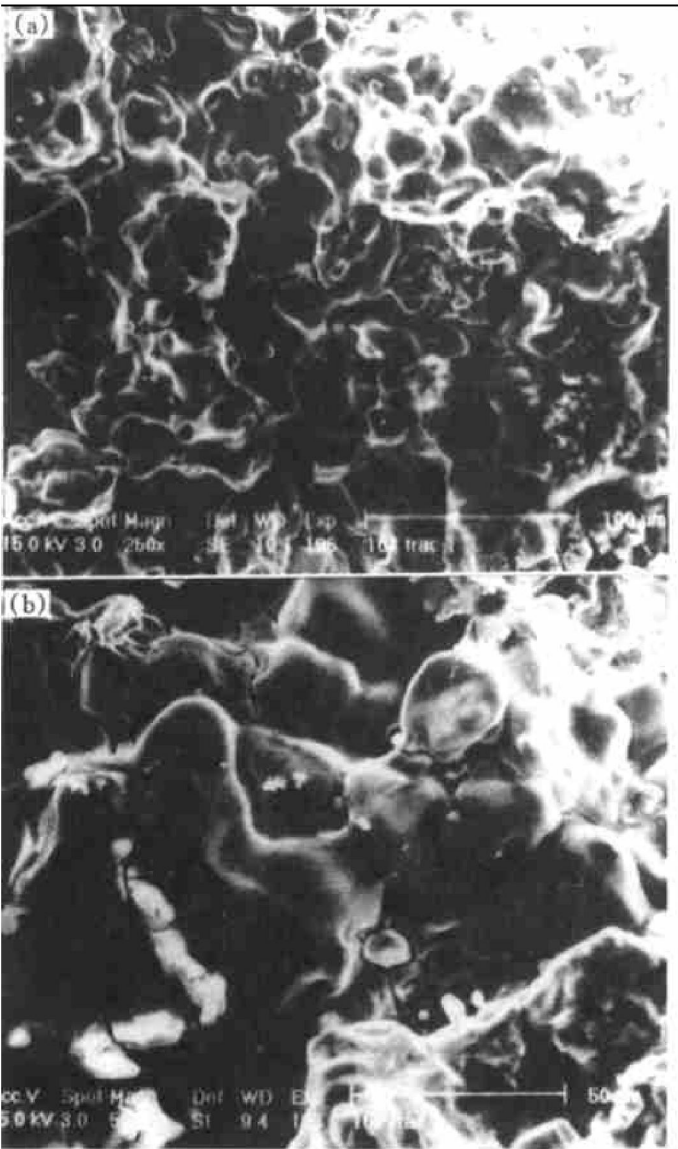


图 3 14[#] 试样的断口 SEM 像

Fig. 3 SEM micrographs of hot fractured surface of sample 14[#]

- (a) —Morphology of hot fractured surface;
(b) —Zoom out of morphology

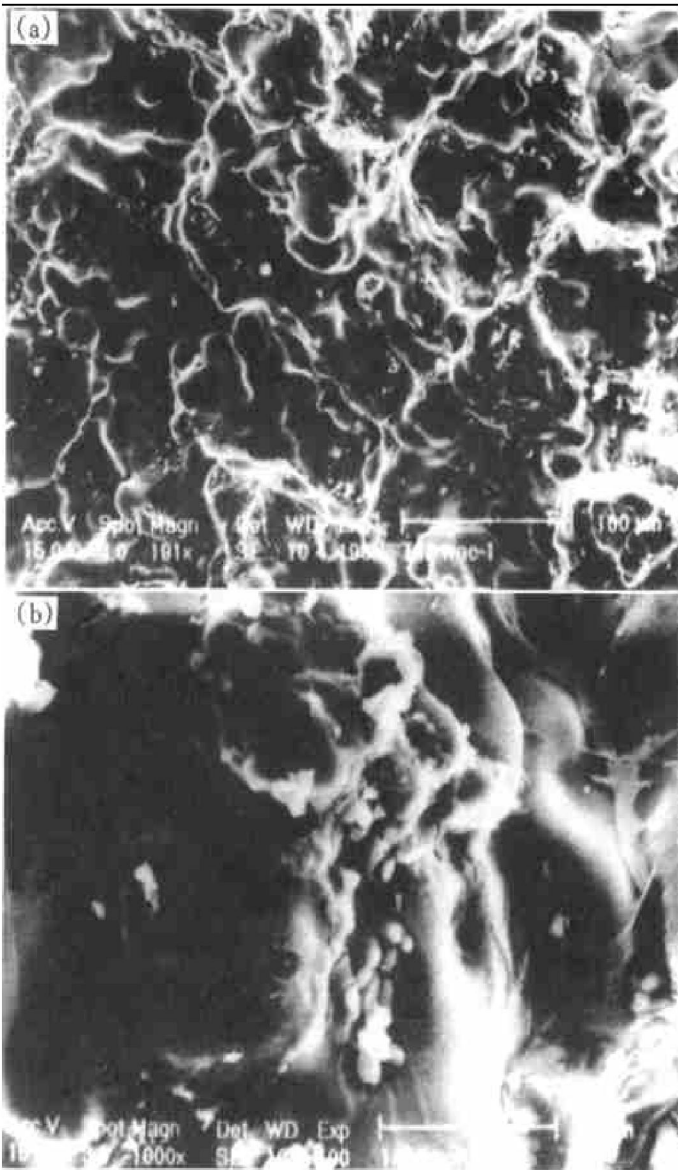


图 4 16[#] 试样的断口 SEM 像

Fig. 4 SEM micrographs of hot fracture surface of sample 16[#]

- (a) —Morphology of hot fractured surface;
(b) —Zoom out of morphology

谱仪对断口作微区成分分析。在 14[#] 试样(0. 2% Zr-0% V-4. 5% Cu) 和 18[#] 试样(0. 2% Zr-0. 25% V-5. 5% Cu) 的热裂断口中检测到了 Zr, 含量均为 0. 5% 左右, 这说明有部分 Zr 存在于晶界。Zr 存在于深色球形或椭球形的相中, 外围是一圈裂缝, 形貌见图 3(a), (b) 和图 5(a), (b)。表 3 列出了典型的含 Zr 点的能谱分析结果。从表 3 可以看出, 除 Zr 外还富集有 O, Mg, Fe, K 等元素, 其中 Zr 与杂质元素 Fe, K, O 的偏聚影响了合金的抗热裂性能。在 16[#] 试样(0% Zr-0. 13% V-4. 5% Cu) 的热裂断口点成分分析中没有检测到 V, 面扫描也检测不到 V; 在 18[#] 试样中检测到了 V, 但含量低于 0. 1%。因此有理由认为, 在本研究的成分范围内, V 主要

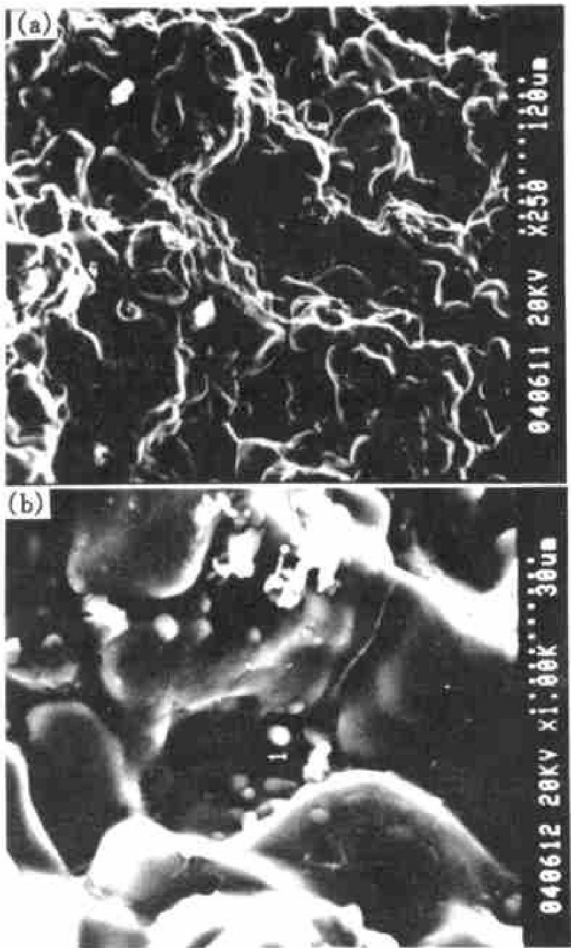


图 5 18# 试样的断口 SEM 图片

Fig. 5 SEM micrographs of hot fractured surface of sample 18#

(a) —Morphology of hot fractured surface;
(b) —Zoom out of morphology

表 3 14# 试样热裂环断口的典型能谱分析结果(%)

Table 3 Typical EDS results on hot tearing surface of sample 14# (%)

Position	O	Cu	Mg	Al	Zr
Point 14-1	30.57	2.51	2.11	61.20	0.42
Point 14-2	32.52	4.12	1.85	55.43	0.62
Surface scan(14#) (90 μm × 70 μm)	3.68	5.70	2.18	85.90	—

Position	Si	K	Mn	Fe
Point 14-1	0.11	0.54	0.53	2.00
Point 14-2	0.17	0.46	1.08	3.70
Surface scan(14#) (90 μm × 70 μm)	—	—	1.13	1.40

是存在于晶内, 作为外来晶核细化晶粒。断口形貌见图 4。表 4 列出部分典型的被裂缝包围的球形微

区的能谱分析结果, 从表 4 可以看出, 裂纹集中发生于一些富集 Fe, Mg, O, Ca 的相或夹杂物附近。

表 4 16# 试样热裂环断口的典型能谱分析结果(%)

Table 4 Typical EDS results on hot tearing surface of sample 16# (%)

Position	O	Cu	Mg	Al	S
Point A	41.23	0.44	5.59	51.72	0.34
Point B	40.80	0.55	3.76	43.00	0.17
Point C	25.66	5.43	6.65	52.63	1.33
Point D	34.18	12.75	2.62	40.16	2.12
Surface scan (170 μm × 140 μm)	9.35	6.60	2.04	79.48	0.14

Position	Ca	Ti	Mn	Fe
Point A	0.69	—	—	—
Point B	0.51	—	0.69	10.52
Point C	—	8.30	—	—
Point D	0.72	—	—	3.45
Surface scan (170 μm × 140 μm)	—	—	0.70	1.70

综上所述, 热裂环断口的裂纹源是一些富集 Fe, Mg, O, K, Ca 的相或夹杂物, 在含 Zr 的合金中还与 Zr 的富集有关。Zr 对合金热裂倾向的影响有两方面: 一方面 Zr 作为晶粒细化剂存在于晶内^[11], 降低热裂倾向; 另一方面 Zr 在晶界富集, 与其他元素组成复杂的相或夹杂物, 形成断裂源, 强烈增大热裂倾向。当 Zr 的含量较低且合金中细化剂含量较低时, 前者起主导作用, 在一定程度上降低或不明显影响合金的热裂倾向; 当 Zr 的含量较高且合金中细化剂含量较高时, 后者起主导作用, 此时强烈增大合金的热裂倾向。在本研究中, 当含量较低(0.13%) 时, V 没有偏聚于晶界, 对热裂没有负面影响; 当含量较高(0.25%) 时, 检测发现有微量 V 偏聚于晶界。在本研究的成分范围内, V 主要存在于晶内细化晶粒, 因此有利于降低热裂倾向。关于 Zr, V 的存在形式及对热裂倾向影响的确切机理待进一步检测和分析后再作论述。

4 结论

- 1) V 明显降低 Al-Cu 合金的热裂倾向。低含量水平(0.13%) 时即表现出明显的降低热裂倾向的效果, 但随着 V 含量提高降低热裂倾向的效果降低。
- 2) Zr 有增大 Al-Cu 合金热裂倾向的趋势。高含量水平(0.20%) 明显增大合金的热裂倾向, 但含量较低(0.13%) 时反应不明显。

3) 在 4.5% ~ 5.5% 范围内 Cu 增大合金的热裂倾向。但 Cu 含量超过 5.0% 后热裂倾向的增幅较小。

[REFERENCES]

- [1] NING Zhiliang (宁志良), XU Zhihui (徐志辉), LIANG Weizhong (梁维中), et al. 脉动磁场对 Al-Cu 合金热裂的影响 [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals (中国有色金属学报), 1997, 7(1): 129-133.
- [2] LI Q C, CHEN K Y, LIU C, et al. Rheological behavior in solid-liquid coexistence zone and simulation of stress-strain and hot cracking of Al-Cu alloy during solidification [J]. AFS Trans, 1991, 99: 245-253.
- [3] DING Hao (丁浩), FU Hengzhi (傅恒志), LUO Shuanzhu (罗栓柱), et al. 化学成分对定向凝固 Al-Cu 合金热裂倾向的影响 [J]. Acta Metallurgica Sinica (金属学报), 1995, 31(8): A376-380.
- [4] LIU Chi (刘驰), LI Qingchun (李庆春). 铝铜合金准固态力学行为和凝固过程应力应变及热裂纹数值模拟 [J]. Foundry (铸造), 1988(9): 28-31.
- [5] WANG Yeshuang (王业双), WANG Qudong (王渠东), DING Wenjiang (丁文江), et al. 合金的热裂机理及其研究进展 [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys (特种铸造及有色合金), 2000(2): 48-50.
- [6] WEI Xiaowei (魏晓伟), ZENG Ming (曾明). 稀土对铸造铝铜合金流动性和热裂倾向性的影响 [J]. Foundry Technology (铸造技术), 1997(3): 46-48.
- [7] WEI Xiaowei (魏晓伟). 稀土对铸造铝铜合金准固态和准液态区的影响 [J]. Nonferrous Metals & Rare Earth Application (有色金属与稀土应用), 1996(2): 34-37.
- [8] CUI Tianzhen (崔天真), WANG Defu (王德福), NING Zhiliang (宁志良). 混合稀土对改善铝铜合金铸造性能的影响 [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals (中国有色金属学报), 1995, 5(4): 124-127.
- [9] CHEN Kuoying (陈魁英), ZENG Songyan (曾松岩), LI Qingchun (李庆春). 稀土对 Al-5% Cu 合金固液共存区蠕变及应力松弛的影响 [J]. Journal of Harbin Institute of Technology (哈尔滨工业大学学报), 1991(2): 120-124.
- [10] LI Decheng (李德成), LIU Yuxian (刘玉贤), DING Jianguo (丁建国), et al. 高强铸造铝合金 A-U5GT 及其应用 [J]. Foundry (铸造), 1998(11): 34-36.
- [11] HUANG Huoyuan (黄恢元). Foundry Handbook Vol. 3 (铸造手册, 第 3 卷) [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1993. 86-113.
- [12] ZENG Songyan (曾松岩), LIU Chi (刘驰), JIANG Lingzu (蒋令祖), et al. 铝铜合金的热裂倾向性 [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys (特种铸造及有色合金), 1989(2): 12-15.

Effects of alloying elements on hot tearing trends of Al-Cu alloy

LI Yuan-yuan, GUO Guo-wen, ZHANG Wei-wen, LUO Zong-qiang
(Department of Mechatronic Engineering, South China University of Technology,
Guangzhou 510640, P. R. China)

[Abstract] In order to search a high strength, high toughness alloy with low hot tearing trend, effects of alloying elements copper, zirconium and vanadium on hot tearing trends of Al-Cu alloy were studied. Results show that vanadium can reduce the hot tearing trend evidently; zirconium increases hot tearing trend slightly in low content and strongly in high content; copper increases hot tearing trend with a medium degree in the range of 4.5% ~ 5.5%. Different effects of zirconium on hot tearing trends lie on that vanadium locates in the inner of crystal cell but part of zirconium locates on the interface of the crystal cell.

[Key words] hot tearing; Al-Cu alloy; zirconium; vanadium

(编辑 黄劲松)