

# V元素对 Al-4.4Cu-1.5Mg-0.15Zr 合金热裂性能的影响

陶承闯, 黄宏军, 袁晓光, 左晓姣

(沈阳工业大学材料科学与工程学院, 辽宁沈阳 110870)

**摘要:** Al-Cu合金结晶范围宽, 树枝晶发达, 热裂倾向严重。通过添加不同含量的V元素, 研究了Al-4.4Cu-1.5Mg-0.15Zr-xV ( $x=0, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25$ )合金热裂倾向及组织特征。结果显示, 未添加V元素时, 合金晶粒形态主要是粗大树枝晶; 随着V元素加入, 合金的晶粒逐渐变得细小; 当V元素添加量为0.2%时, 合金组织变得均匀, 晶粒呈近等轴晶形态; 继续添加V元素合金组织出现粗化现象。对于Al-4.4Cu-1.5Mg-0.15Zr-xV合金, 其热裂敏感系数HSC与合金晶粒尺寸变化规律一致。未添加V元素时, 晶间低熔点相数量少, 不能形成足够多的液膜, 合金的热裂倾向最高, 热裂敏感系数为1.64; 当V元素加入量为0.2%时, 合金晶粒间的低熔点相明显增多, 在晶间形成大量液膜, 合金的热裂倾向最低, 热裂敏感系数为1.05。对于Al-4.4Cu-1.5Mg-0.15Zr-xV合金的热裂抗性, 最优的V元素加入量为0.2%。添加V元素对合金的影响主要有两方面: 一是细化晶粒; 二是促进晶间低熔点相形成, 形成液膜, 提高合金抗热裂性。

**关键词:** Al-Cu-Mg系合金; 热裂敏感系数; V元素; 微观组织

## 作者简介:

陶承闯(1994-), 男, 满族, 硕士研究生, 主要研究方向为铸造合金及新材料。  
E-mail: 15840011506@126.com

## 通讯作者:

黄宏军, 男, 教授, 博士, 博士生导师。电话: 024-25496300, E-mail: huanghong1977@163.com

中图分类号: TG146.2<sup>+</sup>1

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2020)02-0127-08

## 基金项目:

国家自然科学基金(51875365)。

## 收稿日期:

2019-09-03 收到初稿,  
2019-11-19 收到修订稿。

Al-Cu系合金强度高、韧性好, 抗疲劳性能、加工性能以及焊接性能优良, 在汽车领域、轨道运输及兵器工业等领域具有广泛的应用<sup>[1-2]</sup>。但Al-Cu系合金的抗热裂性能差, 其应用在一定程度上受到限制, 主要是因为Al-Cu合金结晶范围宽、树枝晶发达、呈糊状凝固的特征, 使其热裂倾向严重<sup>[3-4]</sup>。刘友良<sup>[5]</sup>等研究发现, 在Al-Cu合金中加入V, V与Al形成Al<sub>11</sub>V相; 随着V含量的增加, 合金的枝晶偏析加重。武荣召<sup>[6]</sup>等人的研究表明, 随着V加入量的增加, 铸造Al-Zn-Mg-Cu合金的二次枝晶间距呈先减小后增大的趋势。V的加入可增加合金的共晶相数量, V和Al主要形成Al<sub>11</sub>V相, 分布于 $\alpha$ (Al)晶内; 加入过量V时, 合金 $\alpha$ (Al)基体中出现不规则块状Al<sub>11</sub>V相。赵志升<sup>[7]</sup>等人研究了在6008合金中加入V, 发现当V含量大于0.1%时, 形成VAI<sub>10</sub>相, 在细化铸锭晶粒的同时, 还可提高再结晶温度, 抑制再结晶过程, 使合金再结晶组织细化且分布均匀。孟凡生<sup>[8]</sup>等研究了在重力铸造中随着V元素含量的增加, 铸态Al-5.0Cu-0.4Mn合金中的抗拉强度和屈服强度曲线呈现抛物线状变化趋势。四川大学刘颖等<sup>[9]</sup>研究开发了多种含钒细化剂, 并已申请专利, 充分表明钒对铝合金具有良好的细化作用。宋鸿武<sup>[10]</sup>研究显示, 加入适量V能够明显提高Al-Cu合金的流动性, 有助于降低合金的热裂倾向性; 加入0.15%V的合金流动性比未添加V的合金流动性提高30%, 但继续加入V, 合金流动性开始降低。

上述研究工作虽然明确了V元素对合金组织的作用规律, 但对合金热裂影响及机制尚不明确。为此, 本试验系统研究了V元素加入量对Al-4.4Cu-1.5Mg-0.15Zr合金热裂倾向的影响, 并确定了合适的V元素加入量。

## 1 试验材料及过程

在合金熔炼过程中先向坩埚中加入纯Al和Al-5Zr、Al-50Cu、Al-5V中间合金,

再加入工业纯镁，待合金完全熔化后，加入覆盖剂。在精炼、除气后，将730℃的合金液浇入已预热300℃的热裂金属型模具中。合金的设计成分和实际成分如表1所示。

本试验采用临界尺寸法和热裂敏感系数（HSC）来表征合金的热裂倾向，这一方法操作简便，并且可以比较直观地观测到热裂纹并通过定量计算反映合金的热裂倾向。图1为热裂金属模剖面图。

合金热裂敏感系数使用下面公式<sup>[1]</sup>计算：

$$HSC = \frac{25^2 + D_{crit}^2}{25^2} \quad (1)$$

式中：HSC为热敏感系数，用来表示合金的热裂倾

向； $D_{crit}$ 为合金浇注试棒在模具临界断裂的直径，试棒固定端的直径为25 mm。

试样经磨抛后，使用Dix-Kener试剂（1%HF+1.5%HCl+2.5%HNO<sub>3</sub>+95%H<sub>2</sub>O）进行腐蚀。利用蔡司显微镜观察合金显微组织并使用Micro-image Analysis & Process软件多次测量合金晶粒的平均尺寸（检验标准GB3216—2000），得到添加不同含量的V元素对合金晶粒尺寸的影响；在日立S-3400N型扫描电镜（SEM）和JEM-2100型透射电子显微镜上进行组织及形貌观察和能谱分析；在岛津7000型X射线衍射仪上进行物相分析；在EPMA-1720型电子探针上进行面扫描分析。试样取样位置如图2所示。

表1 合金的化学成分  
Table 1 Chemical composition of alloy

序号	设计成分	实际测量成分					$w_B / \%$
		Cu	Mg	Zr	V	Al	
1 <sup>#</sup>	Al-4.4Cu-1.5Mg-0.15Zr	4.29	2.15	0.159	0	余量	
2 <sup>#</sup>	Al-4.4Cu-1.5Mg-0.15Zr-0.05V	4.36	2.06	0.162	0.048	余量	
3 <sup>#</sup>	Al-4.4Cu-1.5Mg-0.15Zr-0.1V	4.46	1.75	0.144	0.112	余量	
4 <sup>#</sup>	Al-4.4Cu-1.5Mg-0.15Zr-0.15V	4.51	1.81	0.171	0.153	余量	
5 <sup>#</sup>	Al-4.4Cu-1.5Mg-0.15Zr-0.2V	4.28	1.78	0.172	0.198	余量	
6 <sup>#</sup>	Al-4.4Cu-1.5Mg-0.15Zr-0.25V	4.42	1.66	0.161	0.251	余量	

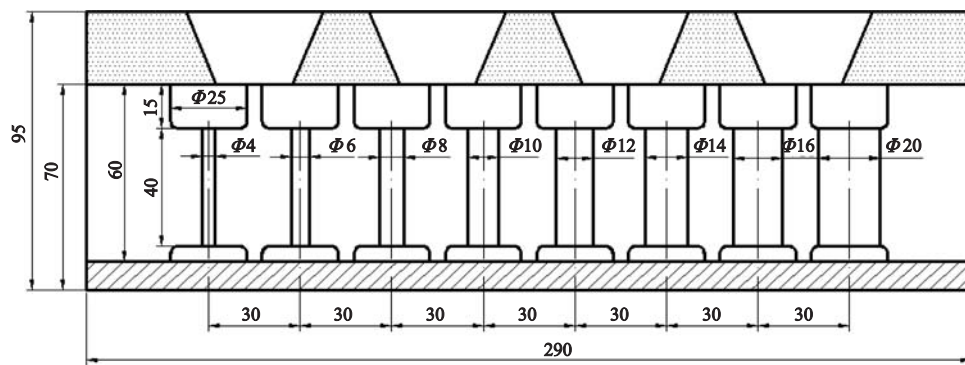


图1 等长度金属模具剖面图

Fig. 1 Sectional view of equal length metal mold

## 2 试验结果及分析

### 2.1 V元素对微观组织的影响

Al-4.4Cu-1.5Mg-0.15Zr- $x$ V ( $x=0\sim 0.25$ )合金在铸态下的金相组织如图3所示。当未添加V元素时，晶粒主要为粗大的树枝晶，见图3a；当添加V元素为0.05%~0.10%时，合金晶粒尺寸逐渐变小，且合金组织发生了枝晶熔断，其组织见图3b、c；当V元素含量达到0.15%~0.20%时，合金晶粒的组织形态由树枝晶向等轴晶转变，见图3d、e。继续添加V元素达到0.25%时，合金组织有粗化现象，见图3f。

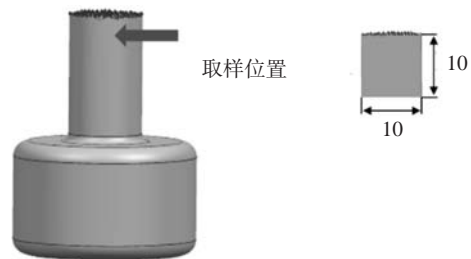


图2 取样位置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of sampling position

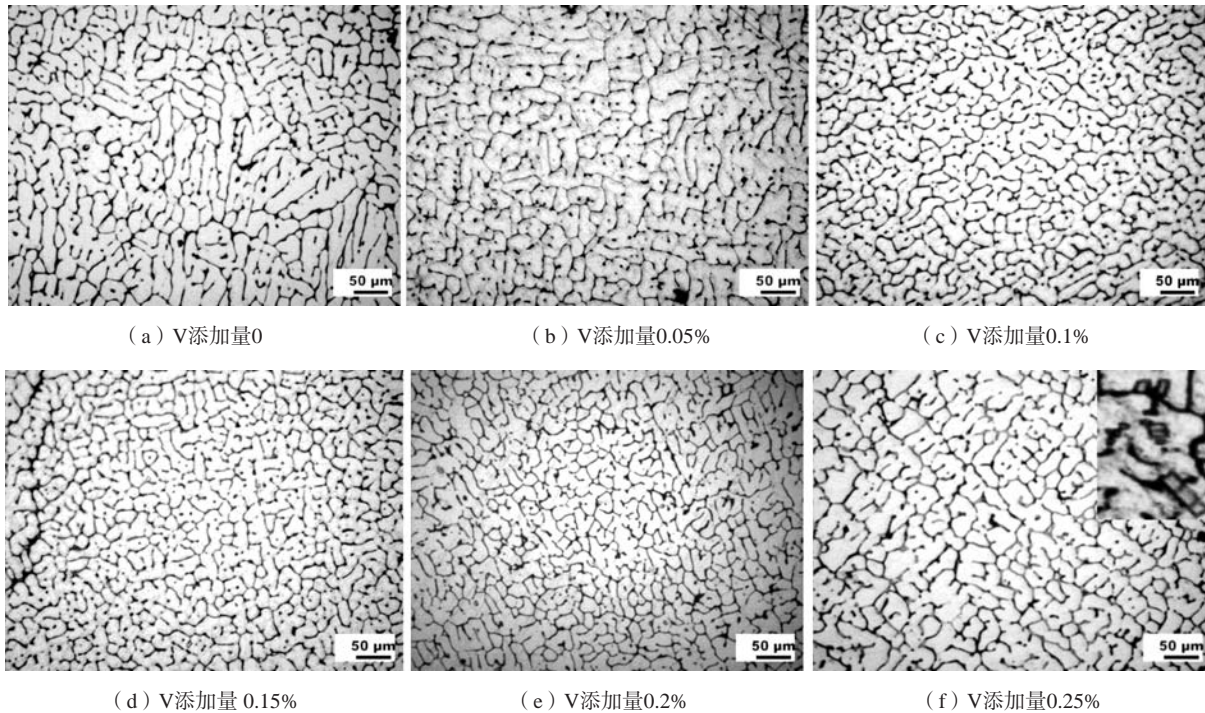


图3 Al-4.4Cu-1.5Mg-0.15Zr-xV合金相组织

Fig. 3 Metallographic structure of Al-4.4Cu-1.5Mg-0.15Zr-xV alloy

图4为随V元素的加入合金晶粒尺寸的变化。根据包晶理论<sup>[12-13]</sup>和Al-V二元合金相图， $Al_{11}V$ 相与铝熔体发生包晶反应生成的 $\alpha$  (Al)为合金结晶提供晶核，增加单位体积液相中晶核数量，提高了形核率，单位体积中晶核数量增多，细化了枝晶。由于V元素的加入，在合金中形成了 $Al_{11}V$ 相<sup>[6]</sup>，该相的晶格类型为Fd-3m ( $Cell_{Al_{11}V}=14.568 \times 14.568 \times 14.568$ ,  $<90 \times 90 \times 90>$ )与 $\alpha$  (Al)相晶格类型Fm-3m ( $Cell_{Al}=4.049 \times 4.049 \times 4.049$ ,  $<90 \times 90 \times 90>$ )为同一晶系，能够满足点阵匹配原则，在一定程度上能够作为稳定的非均匀形核核心，起到细化晶粒作用。V元素添加过量时，导致 $Al_{11}V$ 相形成数量增多，易发生集聚削弱结晶核心的作用。Cu和Mg两元素在 $Al_{11}V$ 相(图5)的固溶，促进了 $Al_{11}V$ 相的长大，从而增加了 $Al_{11}V$ 相的析出量，减少了异质形核核心；形核功降低，晶粒生长速率大幅增加，从而促进晶粒粗化，见图3f。

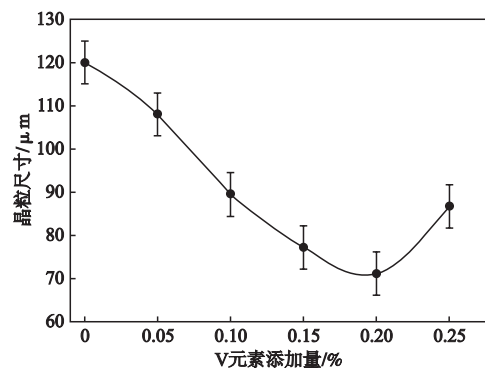
从图3和图4可以得出，Al-4.4Cu-1.5Mg-0.15Zr合金添加V为0.2%时，晶粒细化效果最好。

## 2.2 V元素对合金析出相的影响

图5为Al-4.4Cu-1.5Mg-0.15Zr-0.2V合金的电子探针微区面扫描分析。在图5b中可以看到，V元素主要分布在晶内，V元素在Al中溶解度较大，但也存在少量V元素在晶界处偏析。由于Al-Cu系合金为固溶体型合金，常温下Cu元素在Al中的溶解度较小，所以在图5c也可

以观察到，Cu元素主要偏聚于晶界处。图5d为Mg元素的分布，从图中可以看出，Mg元素大部分在晶界处聚集，也有少量分布在晶内。由此可以得出，在晶界主要存在Mg元素、Cu元素以及少量V元素。

图6为合金Al-4.4Cu-1.5Mg-0.15Zr-0.25V在扫描电镜下的晶界处第二相组织与能谱分析。点1是对裂纹处出现的白亮相进行的能谱分析，可以看出，此处有Al、V、Mg、Cu元素，分析可能是Al、V组成的化合物与Al、Mg、Cu组成的化合物叠加而成。点2为合金晶界处大部分网格状分布的析出相，经过能谱分析，这些网格状第二相大部分为由Al、Cu、Mg元素组成。

图4 Al-4.4Cu-1.5Mg-0.15Zr-xV合金的晶粒尺寸  
Fig. 4 Grain sizes of Al-4.4Cu-1.5Mg-0.15Zr-xV alloy

对Al-4.4Cu-1.5Mg-0.15Zr- $x$ V ( $x=0\sim 0.25$ )合金进行X射线衍射分析,扫描速率为 $8^\circ/\text{min}$ ,测试结果如图7所示。通过分析添加不同含量V元素的XRD曲线,发现合金主要存在Al、 $\text{Al}_2\text{CuMg}$ 和 $\text{Al}_2\text{Cu}$ 相。随着V元素的添加, $\text{Al}_2\text{CuMg}$ 强化相和 $\text{Al}_2\text{Cu}$ 相无明显变化。

图7b为Al-4.4Cu-1.5Mg-0.15Zr-0.2V和Al-4.4Cu-1.5Mg-0.15Zr的对比,由图可以看出,在V元素添加量为0.2%时已经形成了 $\text{Al}_{11}\text{V}$ 相。结合能谱分析可以得出,形成的白亮相为 $\text{Al}_{11}\text{V}$ 相(见图6点1处)与文献[6]研究的结果一致。

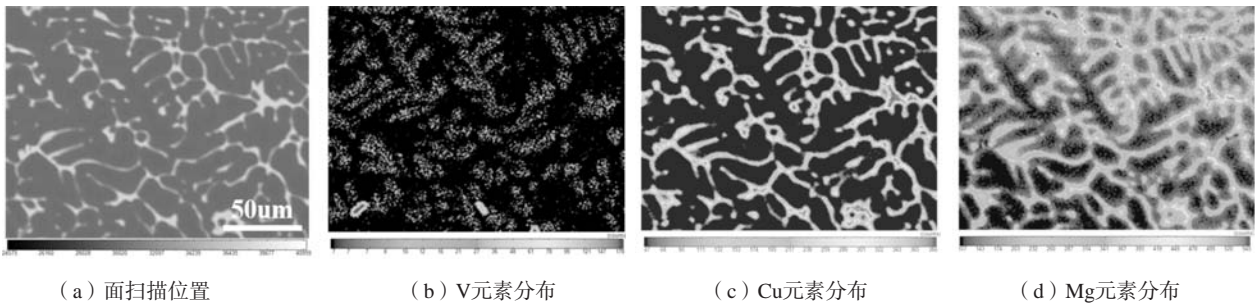


图5 Al-4.4Cu-1.5Mg-0.15Zr-0.2V合金中V、Cu、Mg元素分布  
Fig. 5 Distribution of elements V, Cu, Mg in Al-4.4Cu-1.5Mg-0.15Zr-0.2V alloy

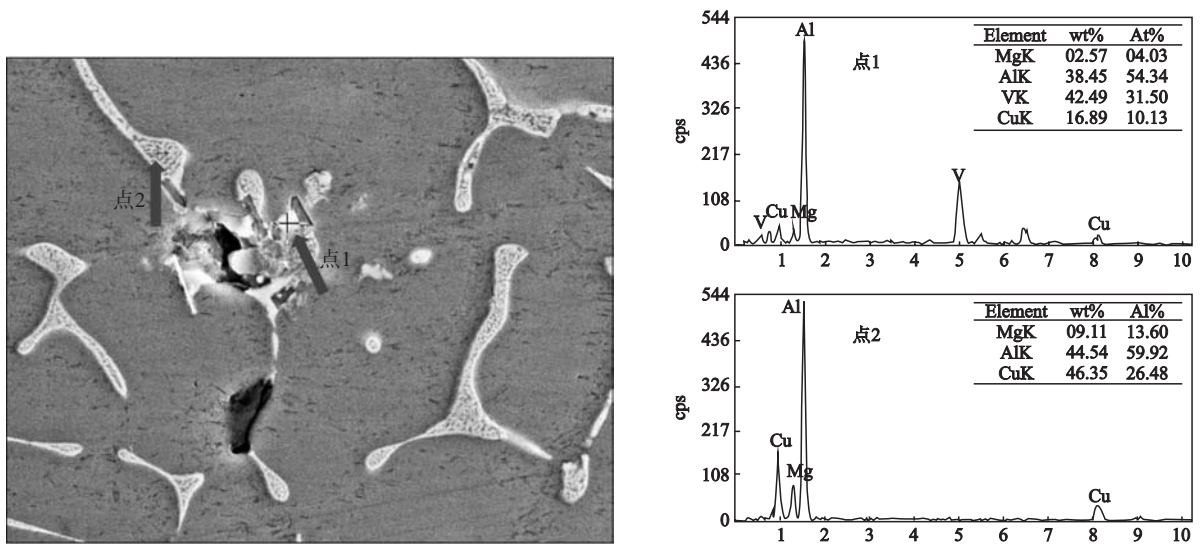


图6 Al-4.4Cu-1.5Mg-0.15Zr-0.25V合金能谱分析  
Fig. 6 Energy spectra analysis of Al-4.4Cu-1.5Mg-0.15Zr-0.25V alloy

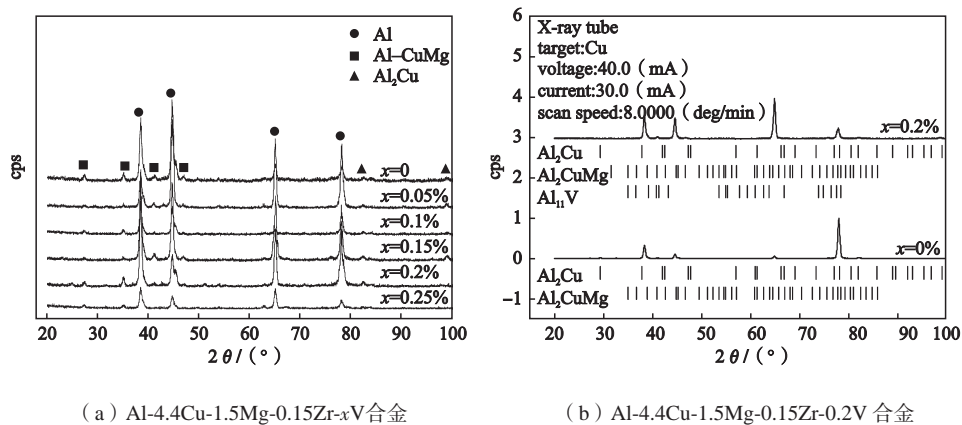


图7 Al-4.4Cu-1.5Mg-0.15Zr- $x$ V合金和Al-4.4Cu-1.5Mg-0.15Zr-0.2V合金的XRD分析  
Fig. 7 XRD patterns of Al-4.4Cu-1.5Mg-0.15Zr- $x$ V ( $x=0\sim 0.25$ ) and Al-4.4Cu-1.5Mg-0.15Zr-0.2V alloys

图8是Al-4.4Cu-1.5Mg-0.15Zr-0.2V合金不同位置的透射电镜组织。可以看出，在晶内分布的一些针状、棒状的析出相为 $Al_2CuMg$ 相<sup>[14]</sup>和块状 $Al_{11}V$ 相（图8a、b）。从图8c中可以看出在晶界附近存在大部分 $Al_2CuMg$ 相。

### 2.3 V元素对合金热裂性的影响

图9为不同V元素加入量对合金宏观裂纹影响，表2为不同成分合金热裂试棒的裂纹数目。未添加V元素时，产生热裂纹的试棒数量为8根，热裂临界尺寸直径为20 mm；随着V元素的加入，裂纹数量逐渐减少；当



(a) 显微组织A (b) 显微组织B (c) 晶界处组织

图8 Al-4.4Cu-1.5Mg-0.15Zr-0.2V合金透射电镜显微组织和晶界处组织

Fig. 8 TEM microstructure (a, b) of Al-4.4Cu-1.5Mg-0.15Zr-0.2V alloy and its structure (c) at grain boundary

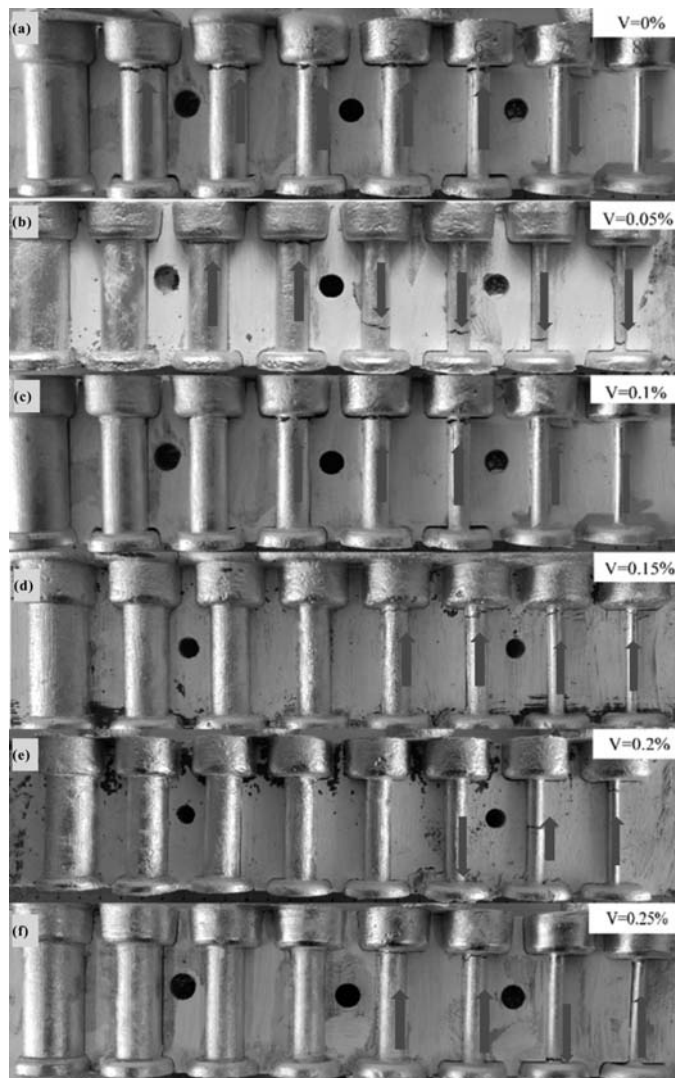


图9 Al-4.4Cu-1.5Mg-0.15Zr-xV合金的宏观裂纹图片

Fig. 9 Macro cracks of Al-4.4Cu-1.5Mg-0.15Zr-xV alloys

添加V元素含量为0.2%时,合金热裂倾向最小,产生裂纹的试棒临界直径减小到8 mm,而且裂纹宽度变窄。当其含量达到0.25%时,试棒的裂纹增多,开裂程度增大,临界直径尺寸达到10 mm。

在研究V元素对合金的热裂倾向影响的试验中,探究了热裂纹经常产生的位置。热裂纹经常出现在图1中相等长度金属型模具中粗细型腔汇合处,也就是在铸件的热节处经常出现热裂纹。主要是因为合金凝固后期,型腔中的金属液的温度急速降低,合金溶液的流动性降低,造成金属液对合金热节处生成的裂纹的补缩效果不理想。试验采用热裂敏感系数HSC来表示Al-4.4Cu-1.5Mg-0.15Zr-xV合金的热裂倾向,如图10所示。合金的热裂敏感系数随V元素增加先减小后增大。

在未添加V元素时,HSC为1.64,当添加V元素为0.2%时,HSC减小为1.10,此时合金的热裂抗性达到最佳。图11为Al-4.4Cu-1.5Mg-0.15Zr合金未添加V元素的热裂纹形貌。从图11a可以看出,未添加V元素时,晶间缺少低熔点液相,既不能对收缩进行补缩,也不能形成足够多的晶间液膜,只有少量的液相起到晶间搭桥作用<sup>[15-17]</sup>。合金在准固相区晶间分离的过程中,在没有液相补缩作用的情况下,仅靠少量枝晶搭桥的结合力不足以抵消凝固末期的晶间分离应力,使合金的热裂倾向十分严重,裂纹体积较大。图11b中黑色箭头处为沿晶界扩展的热裂纹,白色箭头处为枝晶间的搭桥作用。可以看出,热裂基本是在尺寸较大晶粒的晶界处产生,见图11b黑色箭头所指,这些区域由于晶粒尺寸较大,收缩严重,再加上晶间低熔点相数量少,导致热裂倾向严重。

图12为Al-4.4Cu-1.5Mg-0.15Zr-0.2V合金的热裂纹形貌。可以看出,当合金中加入0.2%的V元素后,合金晶粒间的低熔点相明显增多,在晶间形成大量液膜见图12a。由液膜理论<sup>[18-22]</sup>分析可知,合金在凝固后期时,当液膜数量足够多且补缩通道没被堵塞情况下,

液膜会沿着补缩通道对热裂纹进行补缩,减小合金的热裂倾向。从图12b可以看出大部分区域的低熔点相已形成连续的网状,热裂仅发生在缺乏低熔点相的晶界处。由于液膜补缩作用使热裂纹不能在晶界处连续扩展,减小合金的热裂倾向。随着V加入量的增加,合金中第二相数量增加<sup>[6, 8, 23]</sup>。当合金中低熔点共晶相数量增多,晶间液膜的数量较多,补缩能力强,能够有效补偿晶间分离及愈合已产生热裂纹,大量液膜的存在能够降低合金的热裂倾向性。

表2 不同成分热裂试棒的裂纹数目  
Table 2 Number of cracks in hot tearing test bars

合金	热裂试棒							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Al-4.4Cu-1.5Mg-0.15Zr	√	√	√	√	√	√	√	√
Al-4.4Cu-1.5Mg-0.15Zr-0.05V	-	-	√	√	√	√	√	√
Al-4.4Cu-1.5Mg-0.15Zr-0.1V	-	-	-	√	√	√	√	√
Al-4.4Cu-1.5Mg-0.15Zr-0.15V	-	-	-	-	√	√	√	√
Al-4.4Cu-1.5Mg-0.15Zr-0.2V	-	-	-	-	-	√	√	√
Al-4.4Cu-1.5Mg-0.15Zr-0.25V	-	-	-	-	√	√	√	√

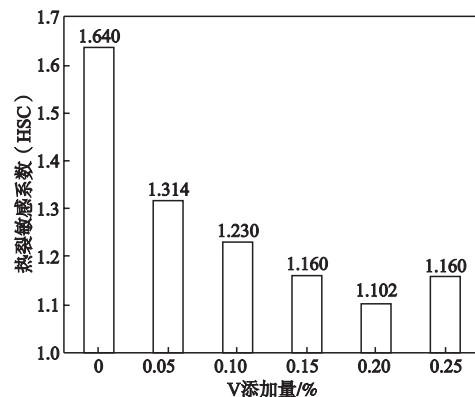
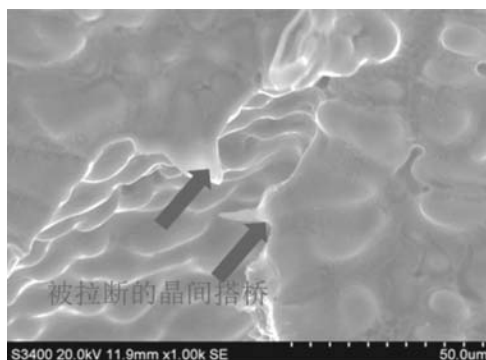
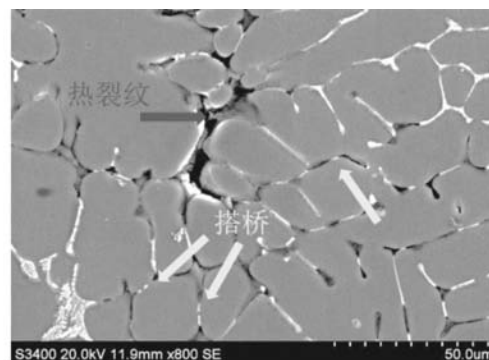


图10 Al-4.4Cu-1.5Mg-0.15Zr-xV合金的热裂敏感系数  
Fig. 10 Hot tearing sensitivity coefficients of Al-4.4Cu-1.5Mg-0.15Zr-xV



(a) 热裂纹形貌



(b) 显微组织

图11 Al-4.4Cu-1.5Mg-0.15Zr合金的热裂纹形貌和显微组织

Fig. 11 Hot tearing morphology and microstructure of Al-4.4Cu-1.5Mg-0.15Zr alloy

图13为合金Al-4.4Cu-1.5Mg-0.15Zr-0.25V的热裂断口形貌。由图13a可以看出,随着V元素的继续添加,部分晶粒表面已被液膜覆盖,但断裂的液膜呈现脆断特征,加大了合金的热裂倾向。图13b中黑色箭头所指的为晶界处偏聚的 $Al_{11}V$ 脆性相,除此之外,还可以看到热裂纹周围有许多颗粒状析出物。因为随着V元素的

增加,不仅在晶界内生成了 $Al_{11}V$ ,过量的V元素还会富集在晶界处与Al形成 $Al_{11}V$ 相,其偏聚在晶界处,会堵塞液膜的补缩通道,使液膜不能对热裂纹位置进行补缩;同时, $Al_{11}V$ 相本身为脆性相,当其聚集到一定程度后可能会发生开裂现象。

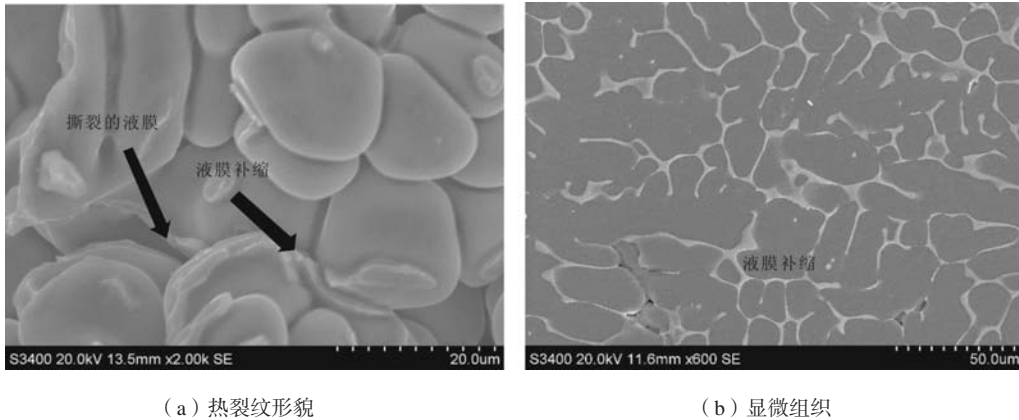


图12 Al-4.4Cu-1.5Mg-0.15Zr-0.2V合金的热裂纹形貌和显微组织  
Fig. 12 Hot tearing morphology and microstructure of Al-4.4Cu-1.5Mg-0.15Zr-0.2V alloy

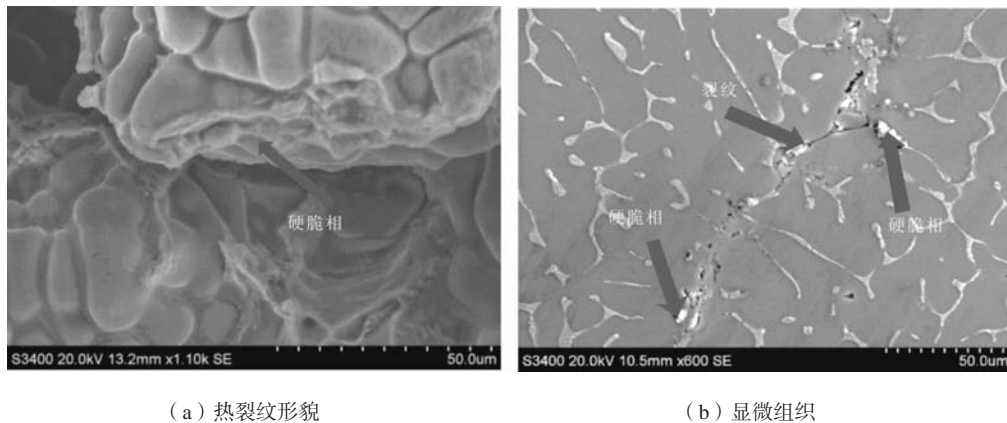


图13 Al-4.4Cu-1.5Mg-0.15Zr-0.25V合金的热裂纹形貌与显微组织  
Fig. 13 Hot tearing morphology and microstructure of Al-4.4Cu-1.5Mg-0.15Zr-0.25V alloy

### 3 结论

(1) 随着V元素添加量的增加,Al-4.4Cu-1.5Mg-0.15Zr合金晶粒尺寸逐渐减小;当添加量达到0.2%时,晶粒趋于均匀化,且晶粒达到最细,此时合金的抗热裂性最好;随后继续添加V元素,晶粒出现粗化趋势,合金抗热裂性下降。

(2) Al-4.4Cu-1.5Mg-0.15Zr合金中加入V元素,

促进共晶相形成,使晶间液膜的数量增多,增强合金的补缩能力,能够有效补偿晶间分离及愈合已产生的热裂纹。

(3) 随着V元素的增加,合金抗热裂性呈先增加后减小的趋势;当V元素添加量为0.2%时合金抗热裂性最好,此时合金的热裂敏感系数为1.102;继续添加V元素,合金晶界处析出 $Al_{11}V$ 硬脆相,增大合金热裂倾向。

#### 参考文献:

- [1] 钟奇,施毅,刘博.铝合金在汽车轻量化中的应用[J].新材料产业,2015(2):23-27.
- [2] 刘静安.铝合金材料的应用与技术开发[M].北京:冶金工业出版社,2004:1-7.
- [3] AIGBODION V S, HASSAN S B. Experimental correlations between wear rate and wear parameter of Al-Cu-Mg bagasse ash particulate composite[J]. Materials & Design, 2010, 31(4): 2177-2180.
- [4] VIANO D, STJOHN D, GRANDFIELD J, et al. Hot tearing in aluminium-copper alloys [C]//Springer International Publishing. Essential

Readings in Light Metals, 2013: 895-899

- [5] 刘友良. V含量对高铜Al-Cu合金组织和性能的影响 [D]. 长沙: 中南大学, 2006.
- [6] 武荣召. 稀土和钒对铸造Al-Zn-Mg-Cu合金组织和性能的影响 [D]. 福州: 福州大学, 2013.
- [7] 赵志升, 祝伟忠, 董长佳, 等. 6008合金车体型材的研究 [J]. 世界有色金属, 2009 (6): 34-37.
- [8] 孟凡生. Zr、V对挤压铸造Al-5.0Cu-0.4Mn合金微观组织与力学性能影响的研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- [9] 刘颖, 唐正华, 叶金文, 等. 用于铝及铝合金的含钒细化剂及其制备方法: 中国, CN101618454A [P]. 2010-01-06.
- [10] 宋鸿武. 高强韧铝合金压铸成形技术的研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2006.
- [11] 张光, 邱克强, 孙治国, 等. Ca对Mg-5Al合金热裂敏感性的影响 [J]. 铸造, 2017, 66 (2): 186-191
- [12] 孙建俊, 田学雷, 王旭波, 等. 二元包晶合金研究进展 [J]. 铸造, 2004, 53 (10): 765-769
- [13] BU Bin, HUA Zhiqiang, LIU Baicheng. Cellular automaton simulation of peritectic solidification of a C-Mn steel [J]. China Foundry, 2012, 9 (3): 221-225.
- [14] 刘建. La对Al-Cu-Mg合金组织性能及热裂影响 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2017.
- [15] 郑卫东, 阮磊, 厉沙沙, 等. 晶粒细化工艺对ZL205A合金偏析缺陷的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2017, 37 (7): 792-795.
- [16] ROSENBERG R A, FLEMINGS M C, TAYLOR H F. Nonferrous binary alloys hot tearing [J]. FAS Trans, 1960, 68: 518-528.
- [17] MCQUEEN H J, RYAN N D. Constitutive analysis in hot working [J]. Materials Science and Engineering: A, 2002, 322 (1-2): 43-63.
- [18] 许荣福. 亚共晶Al-Si合金热裂形成过程的研究 [D]. 济南: 山东大学, 2014.
- [19] 贾东瑞. 高Zn/Y比Mg-Zn-Y合金热裂敏感性的研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2018
- [20] ZHANG J, JIA P, XU S, et al. Effect of cooling rates and Zr addition on the microstructure and corrosion behaviors of the Mg-Zn-Gd alloys [J]. Materials Research Express, 2017.
- [21] 王志, 周野, 周乐, 等. Ca和Y对Mg-1.5Zn合金热裂行为的影响 [J]. 材料研究学报, 2017 (8): 3-10.
- [22] TAO C, YUAN X, LIU J, et al. Effect of La on hot cracking susceptibility of Al-Cu-Mg alloy [J]. Materials Research Express, 2019, 6 (10): 105802.
- [23] CASARI D, LUDWIG T H, MERLIN M, et al. The effect of Ni and V trace elements on the mechanical properties of A356 aluminium foundry alloy in as-cast and T6 heat treated conditions [J]. Materials Science and Engineering: A, 2014, 610: 414-426.

## Effect of V Element on Hot Tearing Properties of Al-4.4Cu-1.5Mg-0.15Zr Alloy

TAO Cheng-chuang, HUANG Hong-jun, YUAN Xiao-guang, ZUO Xiao-jiao

( School of Materials Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 100870, Liaoning, China)

### Abstract:

Al-Cu alloy is very susceptible to hot tearing due to its wide crystallization temperature range and developed dendrites. In this work, an attempt has been made to investigate the effects of V element on the hot tearing tendency and microstructure of Al-4.4Cu-1.5Mg-0.15Zr- $x$ V ( $x=0, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25$ ) alloy. The results show that Al-4.4Cu-1.5Mg-0.15Zr alloy with no V addition has coarse dendrites in the microstructure; with increasing V element, the crystal grains of the alloy gradually become fine; when the addition amount of V element is 0.2%, the microstructure is uniform and the crystal grains are nearly equiaxed; when the V element was further added, the grain coarsening phenomenon appears. For Al-4.4Cu-1.5Mg-0.15Zr- $x$ V alloy, the hot tearing sensitivity coefficient HSC is consistent with the grain size change of the alloy. As the alloy did not contain V element, there only is small amount of intergranular low melting point phase in the microstructure, which can not form enough liquid film, and thereby the alloy has the highest hot tearing tendency and the hot tearing sensitivity coefficient is 1.64. As the alloy contained 0.2% V element, the low melting point phase between grains of the alloy obviously increases, and a large amount of liquid film is formed between grains. Therefore, the alloy has the lowest hot tearing tendency and the hot tearing sensitivity coefficient is 1.05. It is implied that the optimum addition amount of V element is 0.2%. The effect of V element on Al-4.4Cu-1.5Mg-0.15Zr alloy has mainly two aspects: one is to refine grains; the other is to promote the formation of intergranular low melting point phase and a large amount of liquid film. As a result, the hot tearing resistance of alloy is significantly improved.

### Key words:

Al-Cu-Mg alloy; hot tearing sensitivity coefficient; V element; microstructure