

# 镉对 ZL-205 铸造铝合金时效组织结构和抗拉强度的影响

崔国平 向启尧 李文林 刘伯操

新研制的 ZL-205 高强度铸造铝合金, 其中含有 0.15~0.25% Cd。为探讨镉对合金时效组织结构和抗拉强度的影响, 本文对 ZL-205 和不含镉 ZL-205-1 两种合金不同时效状态的试样, 进行了室温拉伸试验和透射电镜观察。试验结果表明, 合金在 150℃ 以下经 4 小时时效, 镉阻碍 G.P 区的形成和长大, 导致 ZL-205 合金的抗拉强度低于 ZL-205-1 合金的抗拉强度; 合金在 150℃ 以上经 4 小时时效, 镉加速  $\theta''$  和  $\theta'$  相析出, 抑制  $\theta'$  相长大, 使 ZL-205 合金的抗拉强度比 ZL-205-1 合金约高 5~10 公斤/毫米<sup>2</sup>。

## 试验条件

合金(成分见表 1)浇注成  $\phi 12$  和 20 毫米的单铸砂型试棒, 于 540℃ 保温 14 小时水淬, 并经自然时效和 100、120、150、175、190、225、250、300℃ 人工时效 4 小时, 还有一组试样在 155℃ 时效 9 小时。时效后将  $\phi 12$  毫米的试棒, 加工成  $\phi 10$  毫米的标准拉伸试样, 进行室温拉伸试验。将  $\phi 20$  毫米的试棒切成 0.5 毫米厚的薄片, 用砂纸磨到 40~70 微米, 在双喷电解抛光仪上减薄电镜试样。电解抛光液系 10% 高氯酸加 90% 无水乙醇, 电解液的温度为零下 20℃, 电压是 50 伏, 电流 50 毫安。试验使用 JEM-200A 电镜, 在 200 千伏下观察。

表 1 试验用合金的化学成分(%)

合 金	Cu	Mn	Ti	Cd	V	Zr	B	Fe	Si	Al
ZL-205-1	5.0	0.4	0.25	—	0.2	0.11	0.02	<0.1	<0.1	余量
ZL-205	5.0	0.4	0.25	0.2	0.2	0.11	0.02	<0.1	<0.1	余量

## 试验结果

### 1. 抗拉强度试验结果

ZL-205-1 和 ZL-205 合金水淬后经不同温度时效的抗拉强度见图 1。由曲线可看出:

1) 150℃ 以下时效, ZL-205-1 合金的抗拉强度略高于 ZL-205 合金。

2) 150℃ 以上时效, ZL-205-1 合金的抗拉强度比 ZL-205 合金约低 5~10 公斤/毫米<sup>2</sup>。

3) 175℃ 时效 4 小时, ZL-205 合金的抗拉强度出现峰值,  $\sigma_b$  约为 54 公斤/毫米<sup>2</sup>,  $\sigma_{0.2}$  约为 48 公斤/毫米<sup>2</sup>。

4) 190℃ 时效 4 小时, ZL-205-1 合金的抗拉强度出现峰值,  $\sigma_b$  约为 44 公斤/毫米<sup>2</sup>,  $\sigma_{0.2}$  约为 31 公斤/毫米<sup>2</sup>。

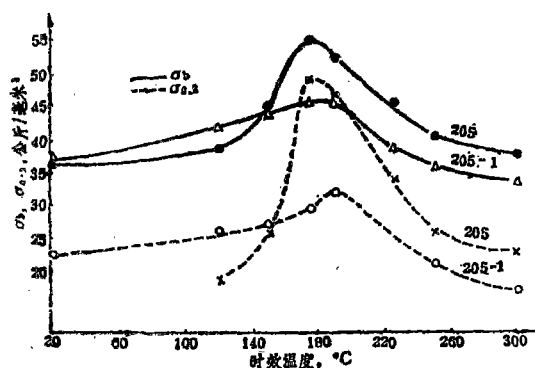


图 1 ZL-205-1 和 ZL-205 合金抗拉强度随时效(4小时)温度的变化

### 2. 时效组织结构电镜观察结果

结果:

1) 150℃ 以下时效试样的组织结构

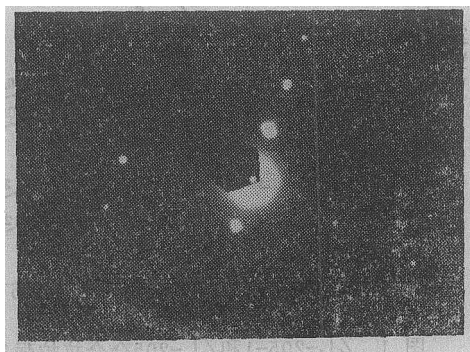
(1) 自然时效和 100℃ 4 小

## 时效

ZL-205-1和ZL-205合金于540℃保温14小时水淬,经自然时效无沉淀物析出,其组织为面心立方的过饱和 $\alpha$ 固溶体及淬火保留下来不参予时效的金属间化合物。经100℃4小时时效,两个合金在形貌上看不出差异,但电子衍射谱却不完全一样。在ZL-205-1合金的衍射谱上,除一套基体衍射斑点外,还出现了通过基体 $\{200\}$ 点沿 $\langle 100 \rangle$ 方向的连续漫散衍射条纹,这种异常的衍射效应,标志着合金中已有G.P区形成。而在ZL-205合金的衍射谱上,只有一套基体 $\alpha$ 相衍射斑点,无G.P区引起的附加漫散衍射条纹,其组织与自然时效试样完全相同。



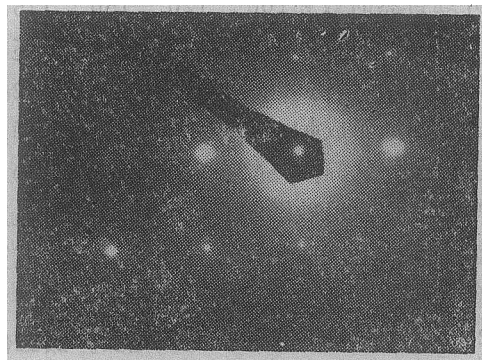
(a) ZL-205-1合金明场照片 30000 $\times$



(b) 图(a)衍射,  $[015]$ 。加过 $(200)$ 沿 $[100]$ 的连续条纹



(c) ZL-205合金明场照片 30000 $\times$



(d) 图(c)衍射,  $[001]$ 。加过 $(200)$ 、 $(020)$ 沿 $[100]$ 和 $[010]$ 的连续条纹

图2 ZL-205-1和ZL-205合金120℃时效4小时

## (2) 120和150℃4小时时效

图2是两个合金经120℃4小时时效的显微照片,在明场照片中两者仍看不出区别,但衍射照片上的漫散衍射条纹的强度却有明显的不同。在ZL-205-1合金的衍射照片图2(b)上,衍射条纹较强;而在ZL-205合金的衍射照片图2(d)中,通过基体 $(200)$ 、 $(020)$ 点沿 $[100]$ 、 $[010]$ 方向的连续漫散衍射条纹极弱,这表明合金中形成的G.P区很小。经150℃4小时时效,两个合金沉淀物的性质与120℃时效的试样相同,仍为G.P区,只是数量和尺寸有些变化。

2) 155℃9小时和175℃4小时时效试样的组织结构

## (1) 155℃9小时时效

图3是两个合金经155℃9小时时效的典型组织。在ZL-205合金明场照片图3(a)上,

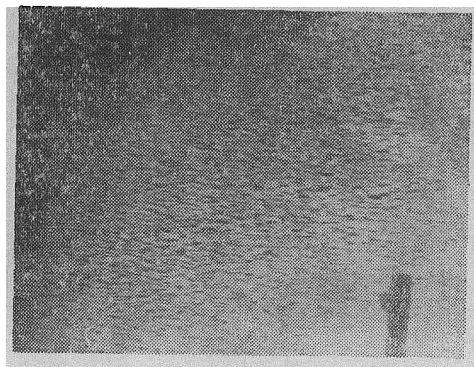
沉淀物清晰可见,图3(b)是其对应的衍射照片,在通过基体 $(200)$ 点沿 $[100]$ 方向的衍射条纹上,出现了三个极大值,这种异常的衍

射现象是由片状的 $\theta''$ 相(四方晶型)引起的,这标志着合金中的G.P区沉淀物已转变成 $\theta''$ 相。图3(c)是ZL-205-1合金的明场照片,沉淀物的尺寸要比图3(a)上小一些,而图3(d)上的衍射条纹强度虽有些不均匀,但尚

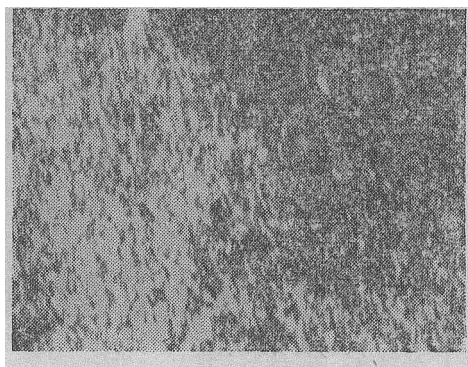
未出现极大值,这可能是G.P区刚开始向 $\theta''$ 相转变引起的。

### (2) 175℃ 4小时时效

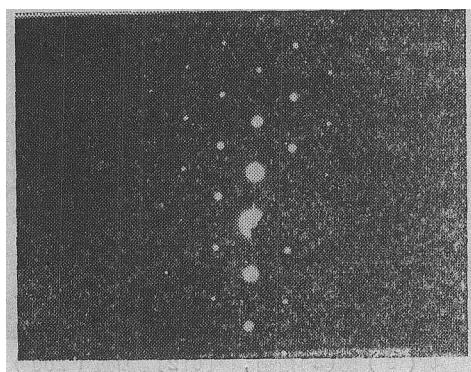
图4示出了ZL-205合金抗拉强度曲线上峰值所对应的显微组织,在明场照片上出现了比



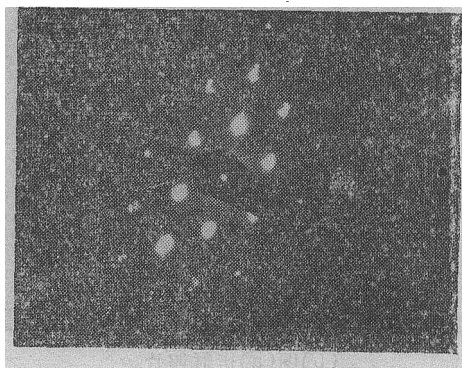
(a) ZL-205合金明场照片 45000×



(c) ZL-205-1合金明场照片 50000×



(b) 图(a)衍射,  $[011]_a$ 加过(200)沿 $[100]$ 具有三个极大值的条纹



(d) 图(c)衍射,  $[011]_a$ 加过(200)沿 $[100]$ 强度不均的连续条纹

图3 ZL-205-1和ZL-205合金155℃时效9小时

$\theta''$ 相粗大的沉淀物,图4(b)是其对应的衍射照片,除一套较强的基体衍射斑点外,还有一套较弱的附加衍射斑点。经计算,这套附加斑点符合 $[111]\theta'$ 晶带,证实了这些粗大的沉淀物为四方晶型的过渡相 $\theta'$ 。所以175℃时效后,ZL-205合金的沉淀物为 $\theta''$ 加部分 $\theta'$ 相;而ZL-205-1合金的沉淀物仍为 $\theta''$ 相,电镜观察未发现 $\theta'$ 相。

### 3) 190℃以上时效试样的组织结构

#### (1) 190和225℃ 4小时时效

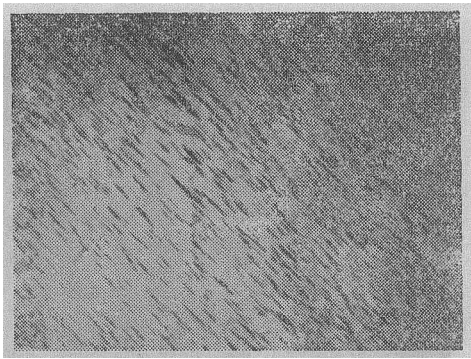
图5是ZL-205-1合金抗拉强度曲线上峰值所对应的显微照片,除图5(a)上 $\theta''$ 相外,在图5(c)上也出现了比 $\theta''$ 相粗大的沉淀物,它与ZL-205合金175℃时效得到的粗大沉淀物相同,也是过渡相 $\theta'$ 。因此190℃经4小时时效后,ZL-205-1合金的沉淀物也是 $\theta''$ 加部分 $\theta'$ 相;而ZL-205合金沉淀物性质与175℃时效相同,只是 $\theta'$ 相数量略多,尺寸稍大。两个合金经225℃时效4小时,其沉淀物均为 $\theta' + \theta''$ 相,只是ZL-205合金中 $\theta'$ 相的尺寸要

小一些。

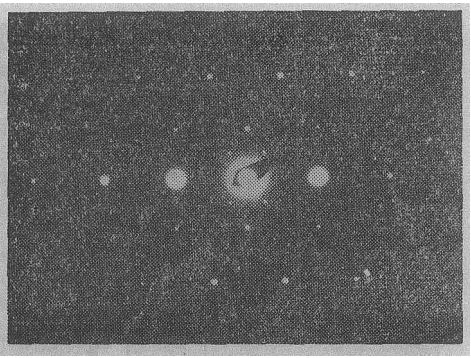
(2) 250和300℃4小时时效

ZL-205-1和ZL-205合金在250和300℃ 经4小时时效，其沉淀物均为单一的 $\theta'$ 相。在同

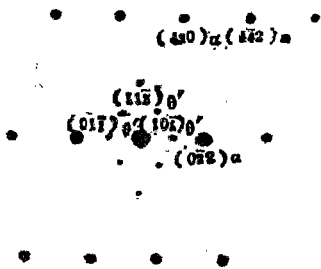
一种时效状态下，前者 $\theta'$ 相尺寸较后者要大得多。图6是两个合金经250℃时效的典型照片，图6(a)上 $\theta'$ 相比图6(b)上 $\theta'$ 相明显的大。



(a)明场照片 45000×

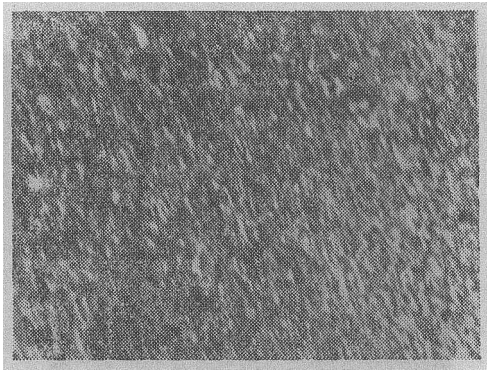


(b)图(a)衍射照片



(c)图(b)标定  $[122]_{\alpha} // [111] \theta'$

图 4 ZL-205合金175℃时效4小时



(a)明场照片 50000×



(b)图(a)衍射， $[012]_{\alpha}$ 加过(200)  
沿 $[100]$ 具有三个极大值的条纹



(c)明场照片 50000×

图 5 ZL-205-1合金190℃时效4小时



(a) ZL-205-1合金明场照片 50000×



(b) ZL-205合金明场照片 50000×

图 6 ZL-205-1和ZL-205合金250℃时效4小时

## 讨 论

### 1. 150℃以下时效镉对时效组织结构和抗拉强度的影响

上述结果表明, ZL-205-1和ZL-205合金自然时效后, 其组织结构相同, 抗拉强度接近, 看不出镉的影响。经100℃4小时时效, 不含镉的ZL 205-1合金中已有G. P区沉淀, 这些区与基体完全共格, 引起晶格歪扭, 使合金的流变抗力比自然时效明显的提高。在ZL-205-1合金中添加0.2% Cd (ZL-205合金) 后, 由于镉在铝中的溶解度很低, 在450°K只溶0.002%, 它与空位亲和力较大, 游离的镉占据空位, 降低了空位浓度和铜的扩散系数, 致使在100℃时效ZL-205合金中的空位浓度, 低于与铜原子交互作用形成G. P区的临界浓度, 无G. P区形成, 其组织结构与自然时效状态相同, 合金的流变抗力也几乎没有增加。由此可见, 在100℃时效镉阻碍G. P区的形成, 导致ZL 205合金的抗拉强度低于ZL-205-1合金的抗拉强度。

两个合金经120℃4小时时效, 虽然沉淀物均为G. P区, 但从衍射照片图2(b)和图2(c)上可看出, ZL-205-1合金的漫散衍射条纹较强, 而ZL-205合金的漫散衍射条纹较弱。在电镜观察中还发现, 前一个合金中G. P区引起的衍射条纹出现的几率多、强度高; 后一个

合金中G. P区引起的衍射条纹出现的几率少、强度很弱。由于衍射条纹出现的几率与G. P区数量有关, 其强度与G. P区的大小成正比, 所以在该种时效制度下, ZL-205 1合金中的G. P区数量多一些, 尺寸略大一些。而ZL 205合金中含有0.2% Cd, 它在铜中的溶解度比在铝中高, 优先分布在G. P区内。同时镉与铝的原子半径差比铜与铝的原子半径差小, 形成含镉的G. P区造成的晶格歪扭程度比不含镉的小, G. P区更加稳定, 从而延缓时效过程, 镉对G. P区的成长起抑制作用, 使G. P区的数量少、尺寸小, 因此ZL-205合金的强化效果小于ZL-205-1合金。

时效温度提高到150℃, 两个合金中G. P区的数量和尺寸已看不出明显的区别, 镉的影响也难以判断。但由于ZL 205 1合金在120℃已有大量G. P区沉淀, 温度提高到150℃时, 其数量和尺寸变化不大, 使得图1中抗拉强度曲线上升得很慢; 而ZL-205合金在120℃时效G. P区数量较少、尺寸较小, 提高温度后, 数量和尺寸都有增加, 导致图1中抗拉强度曲线上升得较快。因而两个合金的强度水平接近, 两条强度曲线相交。

### 2. 150℃以上时效镉对时效组织结构和抗拉强度的影响

由图3可明显地看出, 155℃9小时时效, ZL-205合金的沉淀物为 $\theta''$ 相; 而ZL 205 1合金处于G. P区 $\rightarrow\theta''$ 相转变开始阶段。可见,

添加0.2% Cd促进了ZL-205合金中 $\theta''$ 相的沉淀。文献指出,在150~160℃时效,Al-Cu合金中添加镉,加速 $\theta''$ 相的沉淀。由于 $\theta''$ 相的结构、比容均与基体 $\alpha$ 相不同,尺寸比G、P区大,共格畸变和弹性应力场也较形成G、P区引起的大,所以ZL-205合金强化效果显著。

由175℃时效的结果可知,添加镉的ZL-205合金的沉淀物为 $\theta''$ +部分 $\theta'$ 相,强化效果最好;不含镉的ZL-205-1合金的沉淀物仍为 $\theta''$ 相,无 $\theta'$ 相沉淀,这表明镉加速了 $\theta'$ 相的沉淀。许多作者研究了镉对Al-Cu二元合金时效过程的影响,一致认为镉可作为 $\theta'$ 相的核心,促进 $\theta'$ 相析出。Al-Cu二元合金时效硬化过程表明,当时效沉淀物为 $\theta''$ +部分 $\theta'$ 相时,硬度出现峰值,我们的试验结果与此相符。

190℃以上时效,虽然两个合金沉淀物的性质相同,但 $\theta'$ 相的大小不同,ZL 205合金中 $\theta'$ 相小些,这可能是镉作为 $\theta'$ 相的核心,生核率较高,弥散度大, $\theta'$ 相生长较慢,尺寸必然较小。有的研究者认为,Al-4%Cu合金中加入0.1% Cd,使 $\theta'$ 相的生长速度约为原来的1/5。

(上接第33页)

径为 $r_{0.5}$ ,键槽倒角 $r_{0.5}$ ,四级涡轮盘榫槽倒角半径 $r_{0.6}$ 及 $r_{0.1}$ ,一级、二级压气机盘键槽倒角为 $r_{0.3}$ ,三级压气机盘(高温)倒角为 $r_{0.3}$ ,可见发动机高温零件倒角为 $r_{0.1}$ ~ $r_{0.5}$ 。从飞机、发动机设计中经常碰到的应力集中系数为2~4,当 $K_t$ 值超过4则可修改设计来改善,如圆形孔改为椭圆形孔,增加或加大倒角R等措施来降低应力集中系数。

## 五、结 论

1. 以诺谟图解计算值为真值,则用 $K=\sqrt{d/r}$ 公式计算,结果偏高37~55%,用Timoshenko公式计算,结果偏高8~14%。

由图1可知,虽然190℃时效ZL-205合金的抗拉强度已下降,但仍比ZL-205-1合金的峰值强度高。造成这种现象的原因,除了两个合金中 $\theta''$ 和 $\theta'$ 相数量和大小不同而外,由于镉在铜中溶解度比铝中高,使含镉的ZL-205合金中 $\theta''$ 和 $\theta'$ 相的化学成分复杂。也可能是抗拉强度普遍高的因素之一。

## 结 论

1. 低于150℃4小时时效,镉对G、P区的形成和长大起抑制作用,使添加镉的ZL-205合金比不含镉的ZL-205-1合金的抗拉强度略低。

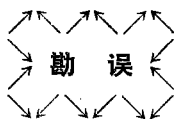
2. 高于150℃4小时时效,镉加速 $\theta''$ 和 $\theta'$ 相沉淀,并降低 $\theta'$ 相长大速度,导致ZL-205合金的抗拉强度比ZL-205-1合金高5~10公斤/毫米<sup>2</sup>。

3. 175℃4小时时效,ZL-205合金的抗拉强度达到峰值,对应的时效沉淀物为 $\theta''$ +部分 $\theta'$ 相。

4. 190℃4小时时效,ZL-205-1合金的抗拉强度出现峰值,对应的时效沉淀物也是 $\theta''$ +部分 $\theta'$ 相。(参考文献略)

2. 从GH37 700℃、800℃试验结果和GH49 700℃与760℃对比试验结果均可看出, $K_t$ 值为3.83缺口试样对缺口敏感性的反映比 $K_t$ 值为2.3的明显。

3. 根据试验结果,我们认为在金属高温缺口持久试验中 $K_t$ 值选为3.83为宜。其缺口试样具体尺寸为:缺口试样直径为 $\phi 7$ ,缺口底部试样直径为 $\phi 5$ ,缺口角度为60°,缺口底部半径(即通过试样轴线剖面上缺口底部的半径)为 $r_{0.14}$ 。



1981年第3期第34页倒数21行应更正为:

“可改用无水乙醇 石油醚(或橡胶溶剂油)混合液(按1:1体积比)”。