

痕迹量混合稀土对 2618 合金组织 和性能的影响^①

黎文献 吴向平 曹 标 陈家应 林学丰

(中南工业大学)

(西南铝加工厂)

摘 要

对于含混合稀土(MM)0.046 wt.-%以下的不同含量的三个2618铝合金,进行了物理、力学性能检测和显微组织分析,结果表明:痕迹量混合稀土对该合金物理性能没有明显影响,而对合金的塑性和韧性有明显改善,耐热性能亦有所提高。稀土元素存在于呈弥散分布的耐热强化相中。

关键词: 混合稀土 2618铝合金 物理力学性能 塑性 韧性

耐热锻造铝合金 2618,是制造航空发动机压气机及涡轮机叶片和其它耐热件的重要材料;还有可能成为在 120 ℃下长期工作的超音速喷气飞机的蒙皮薄板材料^[1]。

稀土元素能提高航空用镁合金的耐热性能已为国内外所公认,并在生产中得到应用。稀土对 2618 合金耐热性能和其它性能是否有良好影响,也为材料科学工作者所关注。同时,由于稀土在民用铝合金中的推广应用,不少电解铝厂在生产稀土铝锭,以致从原生铝锭中和生产过程中将痕迹量稀土带入 2618 合金,已很难避免。痕迹量稀土对 2618 合金组织和性能有何影响?特别是有无坏影响?已成为铝加工厂和飞机制造厂十分关注的问题。

因此,本课题的研究有着重要的实用价值和理论意义。

1 实验过程及结果

1.1 试样

试样化学成分如表 1。

表 1 试样化学成分(wt.-%)

试样号	MM*	Cu	Mg	Fe	Ni	其它杂质	Al
C1	0.004	2.27	1.58	1.10	1.00	<0.05	余量
C2	0.019	1.98	1.65	1.19	1.05	<0.05	余量
C3	0.046	1.98	1.71	1.19	1.05	<0.05	余量

* MM 为以 Ce(45 wt.-%)和 La(30 wt.-%)为主的混合稀土

C1 为取自生产车间的铸锭, C2、C3 为按生产工艺熔炼、半连续铸造的 $d 172 \text{ mm}$ 铸锭。

三种样品的加工和热处理条件相同,即: $500 \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 10 h, 均匀化; $450 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 挤压成 $d 25 \text{ mm}$ 棒材; $530 \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 90 min, 盐浴加热, 水淬; $185 \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 8 h 时效。

试样一般按国家标准加工,无国家标准者则按部颁标准或参照国外资料确定。

1.2 典型物理性能测试

熔化温度及热膨胀系数用日本制造的理光 Thermal Analysis Station 测量,温度误差为 $\pm 0.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 导热系数采用 JR-2 型激光导热仪测量,误差 $\pm 0.5 \%$; 导电率采用涡流电导仪测量,误差 $\pm 1 \%$ 。测试结果列入表 2。

①于 1992 年 3 月 2 日收到

表2 典型物理性能

试样号	熔化温度范围 /℃	热膨胀系数 /10 ⁻⁶ K ⁻¹	导热系数(25℃) /W·(m·K) ⁻¹	导电率(20℃) %IACS
C1	604.8~630.5	21.7	134	33.0
C2	559.5~634.1	22.1	133	32.8
C3	604.3~631.4	22.4	137	31.8

* 20~200℃的平均热膨胀系数

1.3 主要力学性能测试

采用WD-10A型万能电子拉伸机测量常规力学性能。结果列入表3。负荷最大量程为100 kN, 测量精度为±1%。

表3 室温常规力学性能

试样号	σ_b / MPa	$\sigma_{0.2}$ / MPa	δ / %	HB / S10 / 500	E / GPa
C1	419	324	14.6	172	64
C2	395	267	22.6	165	64
C3	401	269	22.2	168	64

剪切强度 σ_r 、冲击韧性 a_{kv} 、断裂韧性 K_{Ic} 均列入表4, 其中 k_{Ic} 采用环形缺口试样测得^[2]。

表4 σ_r , a_{kv} , K_{Ic} 测试结果

试样号	σ_r / MPa	a_{kv} / J·cm ⁻²	K_{Ic} / MPa·m ^{1/2}
C1	229.3	26.5	24.6
C2	231.6	28.3	25.0
C3	241.3	30.6	25.1

根据HB5152-80标准, 采用对比试验法, 分别测定了旋转疲劳寿命和拉压疲劳寿命。

试验条件均为室温大气下, 循环特征均为 $R=-1$ 。

旋转疲劳试验机转速为3000 r/Min, 各组试样的应力水平均为180 MPa。

拉压疲劳试验轴向加载频率为120 N/min, 应力水平分别为各组试样的 $\sigma_{0.2}$ 值(见表3)。

由试验测得的中值疲劳寿命均在 10^6 循环以内, 其对数疲劳寿命遵循正态分布^[3], 母体平均值 μ 相当于50%存活率的对数疲劳寿命, 即 $\mu = \lg N_{50} = X_{50}$ 。

$$\text{疲劳寿命的子样平均值} \bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lg N_i$$

将 $\bar{X}$ 作为 μ 的估计量则有

$$\lg N_{50} = \bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lg N_i \quad N_{50} = \lg^{-1} \bar{X}$$

试样测试结果列于表5。

表5 疲劳寿命检测性试验结果

试样号	旋转疲劳寿命		拉压疲劳寿命	
	N_f	N_{50}	N_r	N_{50}
C1	8.79×10^5	3.19×10^5	34539	34002
C2	9.17×10^5	9.00×10^5		
C3	1.06×10^6	1.05×10^6	40371	37391

高温瞬时抗拉性能测试结果列于表6。

表6 高温瞬时抗拉性能

试样号	150℃			200℃			250℃		
	σ_b	$\sigma_{0.2}$	δ	σ_b	$\sigma_{0.2}$	δ	σ_b	$\sigma_{0.2}$	δ
	MPa	MPa	%	MPa	MPa	%	MPa	MPa	%
C1	358.7	260.7	18.1	324.3	241.3	17.4	252.3	218.3	10.7
C2	360.7	235.0	26.3	317.3	218.7	21.7	251.3	221.7	14.5
C3	351.7	220.3	25.2	314.7	213.3	23.7	251.7	219.0	14.1

测定的C2合金在200℃(温度波动为±3℃)、100 h下的高温蠕变性能经回归法处理的结果为 $\sigma_{0.2}^{200/100} = 166.5$ MPa, 采用双对数作图处理的结果为 $\sigma_{0.2}^{200/100} = 167.0$ MPa。故该合金的高温蠕变极限位于166~167 MPa范围内。

同样, 采用回归法处理的高温持久性能为 $\sigma_{100}^{200} = 199$ MPa, 采用双对数作图处理的为 $\sigma_{100}^{200} = 190 \sim 195$ MPa。因此C2合金高温持久强度应在190~195 MPa范围内。

还用日本产H-800分析电镜及能谱仪, 对含稀土的化合物形貌和成分进行了观察和分析, 表7为其能谱定量分析结果。图1为C3合金的TEM照片, 由图可见, 合金晶界弥散分布着细小均匀的第二相, 晶内化合物较粗, 但对位错有明显的钉扎作用。

2 讨论

2.1 对典型物理性能的影响

从表2看出, 含痕迹量混合稀土的C2、C3试样与C1试样相比, 其熔化温度范围相差在5℃以内, 热膨胀系数稍有增大, 导热率相当, 导电率有所下降。

在所测的四种物理性能中, 因测试熔化温度的样品小(10 g), 难以避免成分偏差, 故熔化温度有微小波动。热膨胀系数虽然稍有增大,

但根据文献[4], 其相应数据为 $23.2 \times 10^{-6} / \text{K}$, C2、C3 试样的热膨胀系数均小于上述值。导电率下降, 其原因是痕迹量稀土使耐热强化相 Al_9FeNi 更加弥散分布所致, 但从总体看, 痕迹稀土对上述物理性能影响甚微。

表 7 含稀土化合物的化学成分 (at.-%)

元素	Mg	Al	Si	Ca	La	Ce	Fe	Ni	Cu
相 I	1.29	76.86	0.14	0.72	0.07	0.03	8.35	9.38	3.16
相 II	0.47	87.91	--	--	--	0.27	1.70	2.01	7.57

2.2 对合金塑性和韧性的影响

在生产中, 含稀土 0.005 wt.-% 以下的合金视为不含稀土, 因此 C1 可认为是不含稀土元素的合金。从表 3 可以看出, 加入稀土后的 C2 和 C3 合金, 其室温常规力学性能中的 σ_b 、 $\sigma_{0.2}$ 和 HB 下降, δ 明显提高。特别值得指出的是, 由表 4 可以看出, 随着稀土含量的增加, 合金的剪切强度 σ_t , 冲击韧性 a_{KV} 和断裂韧性 K_{IC} 随之提高。同时, 从表 3 和表 6 中还可看出, 随着稀土含量的增加, 合金在室温、150℃ 和 200℃ 时的屈强比 ($\sigma_{0.2} / \sigma_b$) 降低, 上述实验数据说明, 痕迹量混合稀土能改善 2618 合金的塑性韧性, 这对该合金的加工和使用都是有利的。

从表 5 还可以看出, 痕迹量稀土提高了 2618 合金的室温疲劳性能, 这与合金韧性的改善有着密切关系。疲劳性能的改善, 对于航

空材料有着更为重要的意义。

2.3 对高温性能的影响

痕迹量稀土虽使合金的室温强度稍有降低, 但对高温强度却略有改善作用(表 6)。当试验温度提高到 250℃ 时, 含稀土的 C2 和 C3 合金, 其 σ_b 和 $\sigma_{0.2}$ 逐渐与 C1 的相应值接近, 甚至超过 C1 的 σ_b 和 $\sigma_{0.2}$, 而 δ 仍保持较高水平。

含有痕迹量混合稀土的 C2 合金, 其高温蠕变极限和高温持久强度仍能保持 $\sigma_{0.2/100}^{200} = 165 \text{ MPa}$ 和 $\sigma_{100}^{200} = 195 \text{ MPa}$ 的国际公认标准^[4], 说明痕量稀土对该合金的高温持久性能无害。

2.4 对耐热强化相的影响

2618 合金主要相组成物为 $\alpha + \text{S} + \text{FeNiAl}_9$, 当 $\text{Fe} > \text{Ni}$ 时可出现 Cu_2FeAl_7 相。该合金的耐热性主要靠 S 相的时效硬化和 FeNiAl_9 的弥散硬化^[5], Cu_2FeAl_7 亦为耐热强化相。

从表 7 的分析结果看, 相 I 的 Fe、Ni 含量接近于 1:1, 可认为是 FeNiAl_9 相, 过量的 Al 和其它元素可以视为基体成分的反映。相 II 可能是 Cu_2FeAl_7 (因 C3 合金中 Fe 稍大于 Ni), 其中 Ni 代替了部分 Fe, 这在铝合金相中是常见的^[6]。相 I 和相 II, 都含有稀土, 证明痕迹量稀土可溶入 2618 合金的耐热强化相中, 且沿晶界均匀弥散分布, 显然对合金的

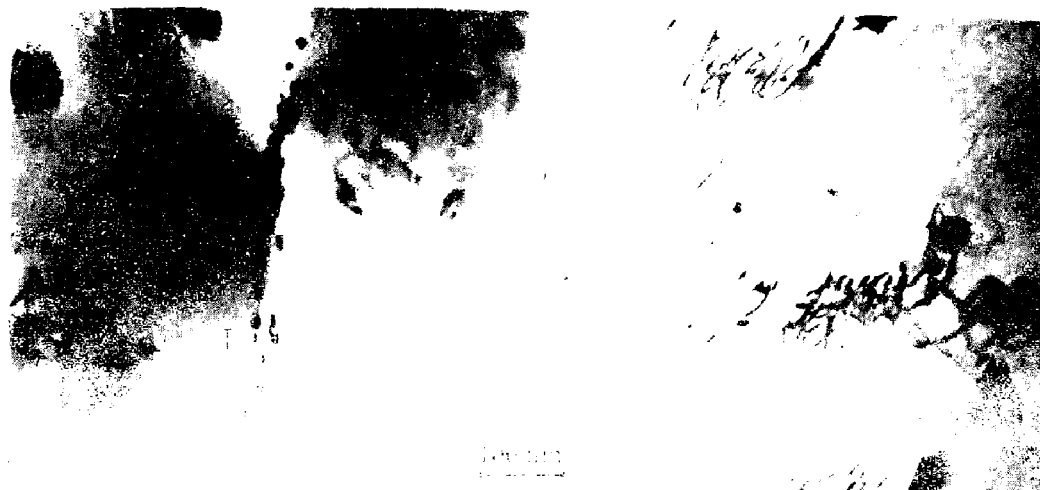


图 1 分布在晶界(a)和晶内(b)含稀土化合物相的 TEM 照片

耐热性能是有利的。

相 I 的 Cu 含量较高,超过了 C3 合金的含 Cu 量,在分析 C3 合金铸态组织的相组成物时也发现这一现象。因此,痕迹量稀土的加入有可能使 Cu 溶入 FeNiAl₉ 中,或者生成一种含 Cu 和 MM 的新相(FeNiCuAl)弥散分布于晶界,使合金的高温(>150℃)耐热性能提高,由于 Cu 进入新相中,使 S 相相对减少,该合金的室温强度稍有降低,但塑性和韧性相对提高。

综合上述分析可知,加入 0.046wt.-% 以下的痕量稀土的 2618 合金,除室温强度(σ_b 和 $\sigma_{0.2}$)稍有降低外,对合金的物理性能和高温力学性能均无坏的影响,而且对某些动态性能却有明显的改善作用。提高稀土含量对该合金的性能有何影响,是值得进一步研究的十分有意义的课题。

3 结论

添加 0.046 wt.-% 以下的痕迹量混合稀土元素于 2618 合金中,使该合金的性能发生如下变化:

(1) 熔化温度范围和室温导热系数无明显

影响; 20~200℃ 平均热膨胀系数稍有增大; 室温导电率略有降低;

(2) 室温强度有所降低,延伸率明显提高,剪切强度、冲击韧性、断裂韧性、疲劳寿命均有所提高,因而相对地改善了合金的塑性和韧性;

(3) 稀土元素能溶入该合金的耐热强化相,且呈弥散分布,有利于合金耐热性能的改善。

参考文献

- 1 Polmear I J. Light Alloy. Melbourne, Edward Arnold Ltd, 1981.
- 2 The Iron and Steel Institute. Fracture Toughness. London, 1968.
- 3 高镇同主编. 疲劳性能测试. 北京: 国防工业出版社, 1980, 87~89.
- 4 Abraham J K. Metals Handbook, Ninth Edition, Vol 2. Ohio: ASM. 1979, 89.
- 5 林肇琦编著. 有色金属材料学. 沈阳: 东北工学院出版社, 1986, 45.
- 6 王祝堂, 田荣璋主编. 铝合金及其加工手册. 长沙: 中南工业大学出版社, 1989, 45.