

Mg-Nd-Zr 系 ZM6 合金热强性能的改进

赵志远 陈深传 乔冬福

一、前言

钕对镁合金具有较好的强化效果而引起国内外研究者的重视,并进行了大量研究工作。

我国于六十年代研制成镁-钕-锆系 ZM6 铸造镁合金,并在航空工业中得到了应用。

苏联在发展了镁-钕-锆三元合金后,又进一步研究了镁-钕-锆-锌系四元合金的性能,证明锌能提高镁-钕-锆系合金的高温抗蠕变性能和拉伸性能,并将含锌的合金列入标准。

本工作是在原 ZM6 (Mg-2.5% Nd-0.6% Zr) 合金的基础上,研究锌对该合金各种性能的影响,拟进一步改进其高温性能,以满足新机设计选材要求。

二、试验条件

熔炼是在 15~120 公斤电阻坩埚炉中进行的。原材料采用 Mg2 镁锭和 Zn2 锌锭;含 25~40% Nd 的镁-钕中间合金,其中钕/稀土总量不小于 85%;含锆量不少于 25% 的镁-锆中间合金。熔炼时采用 RJ-2 和不含氯化镁的 RJ-6 熔剂。为减少合金液氧化,加入 0.5% 钨氟酸钠。

试验用试棒均采用砂型单铸,室温拉伸试样带铸皮进行试验,高温及其它性能则经加工后试验。

三、试验结果及讨论

1. 锌含量对合金性能的影响

为研究锌对镁-钕-锆系合金性能的影响,

在 2.5% Nd、0.5% Zr、余为镁的合金中,添加 0~1.0% 锌,然后测定各种不同含锌量合金的室温和 250°C 的拉伸性能以及 250°C、3.8 公斤/毫米² 应力下、100 小时的蠕变性能。试验结果见图 1、2。所有试样均经 T6 热处理,固溶处理除 0.96% Zn 成分为 510°C/12 小时外,其余均为 525°C/12 小时;时效均为 200°C/16 小时。

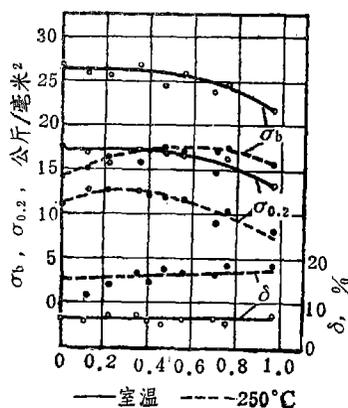


图 1 不同锌含量对合金常温、250°C 拉伸性能的影响

由图 1 可见,锌的含量在 0.6% 以下,合金的室温拉伸性能无明显变化,0.6% 以上开始下降,而 0.7% 后则明显下降。在试验范围内延伸率大致不随锌含量而变化。

合金的 250°C 拉伸强度随锌含量的增加而提高,但锌含量达到 0.7% 之后,如继续增加锌量则性能稍有下降。屈服极限开始随锌量增加而提高,随后又下降。延伸率则随锌量的增加而稍有提高。

由图 2 可见,当锌含量在 0.2~0.7% 范围内,合金具有较好的 250°C 抗蠕变性能。在该温度下,3.8 公斤/毫米²、100 小时的蠕变残余变形

量在0.15%左右,比不含锌的合金具有更高的抗蠕变性能。锌含量超过0.7%后,合金的残余变形量增加。1%锌含量的合金,大体与无锌合金相同。

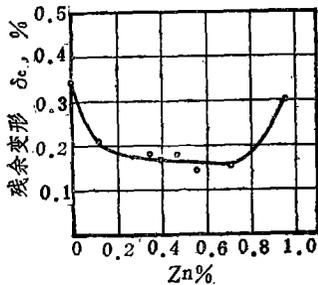


图2 不同锌含量对合金250°C抗蠕变性能(3.8公斤/毫米²、100小时的残余变形量)的影响

综上所述,在镁-2.5%钕-0.5%锆合金中,添加0.2~0.7%锌可明显提高其250°C抗蠕变性能和拉伸强度,而实际上并不影响合金的其它性能。

2. 钕含量对合金性能的影响

为了研究钕含量对机械性能的影响,在0.4%和0.7%锌量的情况下,分别添加了不同钕量,并测定各种合金在T6状态下的性能,详见图3。

由图可见,合金中钕含量在试验范围内变化时,0.45%、0.7%两种锌含量的合金室温屈服极限均随钕含量的增加而有提高,拉伸强度则变化不明显。0.45%锌的合金,其延伸率大致不变,而0.7%锌则随钕量增加而稍有降低。

由图可见,含锌0.7%的合金,250°C拉伸强度、屈服极限均随钕量的增加而提高,延伸率则下降。含锌0.45%的合金则除屈服极限稍有提高外,拉伸强度和延伸率均无明显影响。就室温和250°C拉伸性能而言,0.7%含锌量的合金大致较含锌0.45%的稍低。

另外,合金在2.0~3.1%钕含量范围内,在给定的蠕变试验条件下两种不同含锌量的合金均有较低的残余变形量;但大体上随钕量增加而稍有增加。0.7%锌量的合金的残余变形量看来较0.45%者稍低。

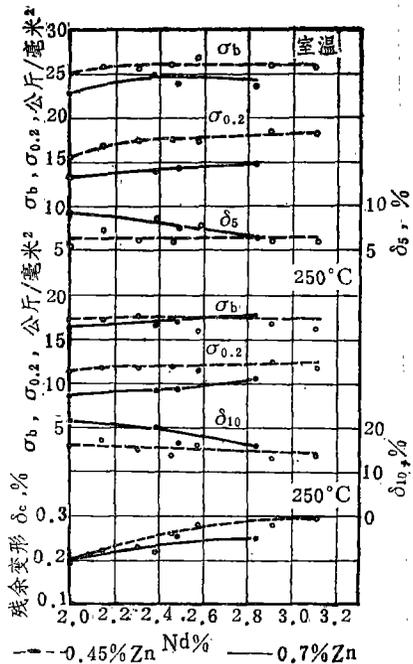


图3 不同钕含量对室温、250°C拉伸性能和蠕变性能(3.8公斤/毫米²、100小时的残余变形量)的影响

3. 热处理制度的研究

合金中主要元素钕和添加的锌在镁中均有较大的沉淀硬化作用,因此,可通过适当的固溶处理后接人工时效来获得最佳的机械性能。

为确定合适的热处理制度,试验了不同固溶温度、保温时间以及不同时效温度和时间对合金室温拉伸性能的影响。试验是采用同炉合金(成分为2.46%Nd、0.40%Zn、0.59%Zr)的试样进行的。

将试样分别于515、525、535和545°C四种温度下固溶处理,空冷后取部分试样于200°C时效16小时,分别测定性能,结果见图4。由图可见,T6状态535、545°C处理的性能稍高,但545°C处理已使晶粒明显长大。因此,可以认为525~535°C处理是适宜的。525°C固溶处理8、12、16小时三种不同试验结果表明,8小时尚嫌不足,12~16小时是可取的。

曾对合金在200、210、220°C分别时效8~24小时的拉伸性能进行了测定。结果表明,除

220℃时效超过12小时后性能明显下降外,其它各种时效制度的差别不大。其中200℃、16小时是可取的。

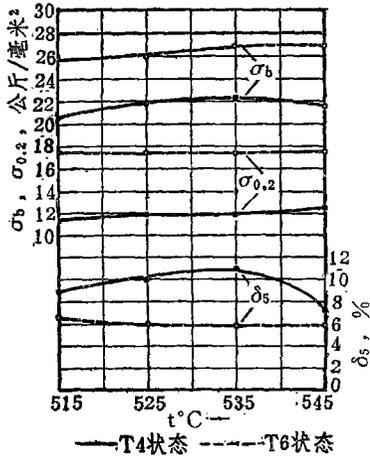


图 4 不同固溶温度对合金T4、T6状态室温拉伸性能的影响
时效: 200℃/16小时

4. 合金的显微组织

钕是ZM6合金的主要合金元素。在平衡状态下,共晶温度552℃时钕在镁中最大固溶度达3.6%,而室温时固溶度很小,故ZM6合金可通过热处理提高其机械性能。

图5为ZM6的显微组织。由图5a可见,合金铸态组织为 α Mg和沿晶界分布的块状化合物所组成。经固溶处理后,晶界上的块状化合物大部分溶入 α Mg中,仅有少量残留于晶界上,同时晶内可见密集点状沉淀相,经时效后除析出相稍有增多外,组织无明显差异,见图5b。

当固溶温度过高时,会出现过烧现象,其特征见图5c,由图可见,三角形复熔区,同时晶粒明显长大,晶界变粗。

为确定ZM6合金晶间化合物和晶内析出相的成分,进行了电子探针成分分析。根据分析结果,在铸态含锌合金中,晶间化合物为 $Mg_{12}(Nd,Zn)$,无锌合金中则为 $Mg_{12}Nd$ 。铸态 α Mg晶粒内部钕含量较高,而钕和锌的含量均很小。固溶时效处理后,晶间化合物大部分消失,残留部分的成分与铸态时大致相同。

在固溶处理时进入 α Mg内的钕和锌,在时效处理后,部分以富钕、锌的质点析出。在晶内析出相中除发现 $Mg_{12}(Nd,Zn)$ 或 $Mg_{12}Nd$ 外,还有 ZrH_2 、 α Zr,含锌0.75%合金中尚有少量 Mg_2Zn_3 相。

研究表明,合金中加入少量锌后降低了合金基体和化合物的晶格常数。使原子间的键合力增加,晶格处于更稳定状态,从而提高了合金的高温抗蠕变性能。

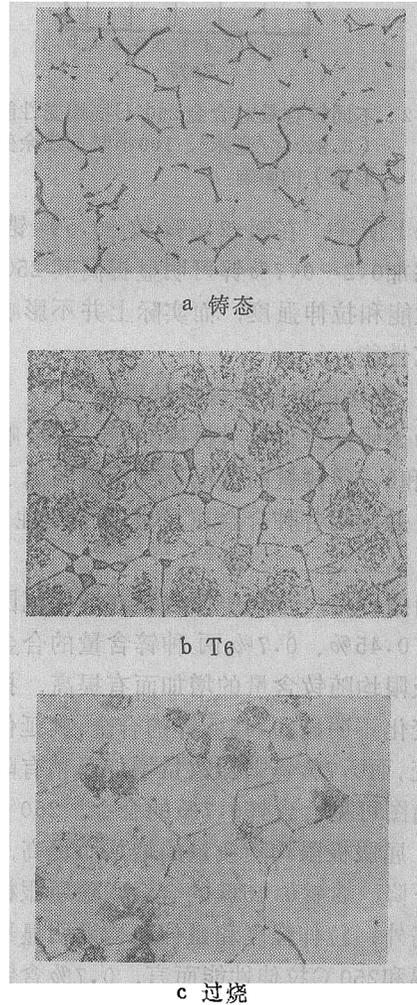


图 5 ZM6合金的显微组织 200×

5. 合金的物理、机械性能

(1) 室温机械性能

合金的室温机械性能见表1。

表 1 ZM6 合金的室温机械性能

E	σ_p	$\sigma_{0.2}$	σ_b	δ_{10}	E_s	$\sigma_{a0.2}$	σ_{-1}^*	σ_{-1k}^*	HB	G	τ_p	$\tau_{0.3}$	τ_b	a_k
公斤/毫米 ²				%	公斤/毫米 ²					公斤·米/厘米 ³				
4420	8.3	14.5	25.6	7.4	4460	14.2	8	5	70	1620	7.0	10.1	19.5	0.50

* 周期为 2×10^7

(2) 高温机械性能

合金的高温瞬时拉伸和蠕变、持久等性能见表2。

表 2 试验温度对ZM6合金机械性能的影响

温度 °C	E	σ_b	σ_p	$\sigma_{0.2}$	δ_{10}	σ_{100}	$\sigma_{0.2/100}$
	公斤/毫米 ²			%	公斤/毫米 ²		
100	4110	20.7	7.7	13.3	10.6	—	—
150	3990	20.0	7.1	13.2	9.4	—	—
200	3910	19.7	7.0	12.8	16.7	14	9.8
250	3750	16.5	6.6	12.3	13.3	8	3.8
300	3490	11.1	3.4	8.1	22.2	3	—

(3) 物理性能

合金的膨胀系数、导热系数、比重、比热等物理性能见表3。

6. 其他性能

ZM6的抗腐蚀性能采用喷雾腐蚀和交替腐蚀两种方法与ZM5作了对比试验，结果表明，

表 3 ZM6合金的物理性能

比 重	1.77 克/厘米 ³	
线膨胀系数 $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	室温~100°C	23.2
	室温~200°C	25.4
	室温~300°C	26.0
比 热 卡/克·°C	室温~100°C	0.216
	室温~200°C	0.234
	室温~300°C	0.247
导热系数 卡/厘米·秒·°C	100°C	0.31
	200°C	0.34
	300°C	0.35

ZM6合金的抗腐蚀性能优于ZM5，详见表4。

ZM6合金有良好的铸造工艺性，测定结果为：流动性按棒长260毫米；热裂倾向环宽20毫米；线收缩1.3~1.5%；壁厚敏感性不大。

ZM6合金能用氩弧焊焊接，焊接工艺性能良好。

表 4 ZM6和ZM5 合金腐蚀试验后的强度损失

合 金	热处理 状态	未经腐蚀试验 的性能		100小时喷雾腐蚀后的性能			100小时交替腐蚀后的性能		
		σ_b 公斤/毫米 ²	δ_{10} %	σ_b 公斤/毫米 ²	δ_{10} %	强度损失 %	σ_b 公斤/毫米 ²	δ_{10} %	强度损失
ZM6	T6	25.6	7.4	24.4	5.2	4.7	24.7	5.7	3.5
ZM6 (无锌)	T6	25.2	7.6	24.9	6.6	1.2	24.8	5.3	1.6
ZM5	T4	28.1	13.7	25.4	9.6	9.6	24.9	8.9	11.4

四、结 论

1. 在原ZM6合金中添加0.2~0.7%锌可进一步提高合金250°C的抗蠕变性能和拉伸性能；由于锌的加入还可适当降低铈含量的上限，因此，将原ZM6的化学成分(2.0~3.0%Nd, 0.4~1.0%Zr)修改为2.0~2.8%Nd, 0.2~0.7%Zn, 0.4~1.0%Zr。该合金推荐用于250°C以下长期工作及更高温度下短时使用的零件。

2. 合金在T6状态下使用。合适的热处理规范为：525~535°C/12~16小时空冷，后接200°C/16~20小时。

3. 合金铸态组织为 α Mg固溶体基体与晶间块状化合物 $\text{Mg}_{12}(\text{Nd}, \text{Zn})$ 所组成；T6处理后，晶界仅有少量块状化合物残存，晶内有 α Zr、 $\text{Mg}_{12}(\text{Nd}, \text{Zn})$ 点状弥散析出相。

4. 该合金综合机械性能较好，抗腐蚀性能优于ZM5，焊接、铸造等工艺性能良好。

(参考文献从略)