

文章编号: 1004 - 0609(2005)12 - 1960 - 08

添加 Mn、Ni 对 ZA27 合金组织与性能的影响^①

逯允海, 赵 品, 沈焕祥
(燕山大学 材料工程学院, 秦皇岛 066004)

摘 要: 研究了添加 Mn、Ni 对 ZA27 合金组织和性能的影响。结果表明: 适量 Mn、Ni 的添加在不明显降低室温强度的条件下, 显著提高了合金的高温性能; 同时添加质量分数为 0.5% Mn 和 0.5% Ni 使铸态 ZA27 合金非平衡网状三相共晶中出现大量富镍相粒子, 在 250 °C、拉伸机横梁移动速率为 100 mm/min 条件下的瞬时抗拉强度 27.2 MPa 比未加 Mn、Ni 的合金提高 46%; Mn、Ni 的添加使 280 °C、初始应变速率 $6.67 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 条件下的超塑性拉伸的稳态流变应力由 12.4 MPa 提高到 24.6 MPa, 比未加 Mn、Ni 的合金提高 98%。扫描电镜观察与 X 射线能谱分析表明, Mn、Ni 显著提高超塑性拉伸的稳态流变应力的主要原因与“离位析出”富含 Cu、Ni、Mn 的粒子有关。

关键词: ZA27 合金; Mn-Ni 合金化; 超塑性; 力学性能

中图分类号: TG 113.25; TG 319

文献标识码: A

Effect of Mn and Ni alloying on microstructures and mechanical properties of ZA27 alloy

LU Yun-hai, ZHAO Pin, SHEN Huan-xiang
(College of Materials Science and Technology,
Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: The effect of Mn and Ni additive on the microstructure and mechanical property of ZA27 alloy was studied. The appropriate additive of Mn and Ni can remarkably raise the strength in high-temperature, under condition that room temperature strength only decreases slightly. When the additives of Mn and Ni are all 0.5% in the mean time, great quantities of Ni-enriched particles appear in reticulate unbalanced three-phase eutectic of the as-cast ZA27 alloy, which made the instantaneous tensile strength of the alloy lift to 27.2 MPa that is 46% higher than that of not undergone Mn-Ni alloying under the condition of 250 °C and 100 mm/min. In the super plastic tensile testing with 280 °C, the initial strain speed of $6.67 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$, Mn-Ni additive made the stable flowing stress rise from 12.4 MPa to 24.6 MPa that is 98% higher than that of without Mn-Ni additives. Concluded from the results of TEM and DES analyses, the cardinal reason of the remarkable enhancement of stable flowing stress in super plastic tensile testing is directly related to the precipitation of particles enriched Cu, Ni and Mn.

Key words: ZA27 alloy; Mn-Ni alloying; super plasticity; mechanical property

ZA27 合金是近些年发展起来的具有优良铸造性能的锌基铸造材料。该合金具有较高强度、优良的耐磨性和减震性, 正在逐步取代铸铁、青铜和黄铜^[1-3]。但作为综合力学性能要求较高的结构件应用时, 其塑性指标过低, 作为较高温度下工作的耐

磨零件其耐热性不足, 使之应用受到限制。所以近年来, 人们一直致力于提高 ZA27 合金的塑性和耐热性。采用 Mn 合金化方法可显著提高其高温强度, 但随 Mn 加入量增多, 将强烈降低室温铸态合金的延伸率^[4-7], 兼顾室温与高温力学性能, Mn 的

① 基金项目: 河北省自然科学基金资助项目(599236)

收稿日期: 2005 - 03 - 28; 修订日期: 2005 - 08 - 08

作者简介: 逯允海(1948 -), 男, 副教授

通讯作者: 赵 品, 教授; 电话: 0335 - 8054473; E-mail: zhaopin1947@163.com

加入量以0.5%为宜^[4-6]。当Mn的加入量为0.5%时,在非平衡三相共晶中仍无富Mn相粒子生成,故不能有效强化铸态组织中的高温强度低的非平衡三相共晶^[6]。考虑到Ni在Al中几乎完全不溶解^[8],而ZA27结晶时首先析出以铝为基的含锌固溶体,在添加0.5%Mn基础上,再添加Ni进行合金化,Ni有可能富集于非平衡三相共晶中,强化高温强度低的非平衡三相共晶,因此本文作者采用联合加入Mn和Ni,旨在获得更高的高温强度。此外,为进一步改善ZA27合金塑性和获得超塑性,本文还研究了固溶处理+时效的热处理方法对其综合力学性能的影响。

1 实验

采用井式电阻炉,用石墨坩埚熔炼ZA27合金,熔铸工艺:700℃熔化Al及Al-Cu合金,熔化后加入Zn,全部熔化后压入Mg,升温至700℃,加入B-Ti变质剂^[9],保持10min,再加入六氯乙烷除气,静止,扒渣,浇注到预热300℃的 $d 5\text{ mm} \times 25\text{ mm}$ 标准拉伸试样钢模中。所得合金的化学成分为(质量分数):Al 27.0%,Cu 2.7%,Mg 0.03%,Fe < 0.1%。同时熔炼了3组Mn、Ni合金化的ZA27合金,其中包括分别添加0.5%Mn、0.5%Mn和0.5%Ni及0.5%Mn和1.0%Ni的合金。合金元素Mn、Ni均以中间合金形式与Al及Al-Cu合金最先熔化,其它与ZA27合金熔铸工艺相同。

室温及高温瞬时拉伸实验在WD-2材料电子拉伸机上进行,拉伸机横梁移动速度为100 mm/min。超塑性拉伸预处理工艺为:350℃保温8h,水冷+250℃保温1h时效,超塑性拉伸试验在WD-2材料电子拉伸机上进行,加热装置是电阻加热炉,用PID控温,控温精度 $\pm 1\text{ }^\circ\text{C}$,采用的拉伸机横梁移动速度为:1~100 mm/min,拉伸温度采用200~300℃。

金相组织观察、拉伸断口分析及能谱分析在KYKY2800扫描电镜上进行。采用D/MAX-RB型X射线衍射仪对部分试样进行了物相分析。

2 结果与分析

2.1 添加Mn、Ni对ZA27合金铸态组织的影响

Mn、Ni对合金铸态组织中的非平衡三相共晶的影响如图1所示。未加Mn、Ni的ZA27合金的

非平衡三相共晶数量最少,如图1(a)所示,随Mn、Ni加入量的增加,非平衡三相共晶数量逐渐增多,非平衡共晶中的化合物粒子明显粗化,如图1(b)、图1(c)和图1(d)所示。其中图1(d)所示为添加0.5%Mn和1.0%Ni的ZA27合金,由于镍加入量最多,故非平衡三相共晶量也最多,其中的化合物粒子也最粗大,使室温抗拉强度降到198 MPa。

对添加0.5%Mn和0.5%Ni的ZA27合金的铸态试样图1(c)进行了X射线能谱分析。Ni与Mn的面分布及线分布如图2所示。由图2(a)可知,Ni主要分布在网状非平衡三相共晶中,这是因为Ni在Al中的溶解度极低,640℃仅能溶解0.05%^[8]。ZA27合金结晶时,富铝的 α 固溶体首先析出,液固界面附近Ni原子必然富集。非平衡结晶时,含镍多的液相最终要发生三相共晶反应,所以Ni主要分布于网状非平衡三相共晶中。图1(c)中的非平衡三相共晶中的化合物粒子的能谱分析表明,除有 ϵCuZn_5 外,颗粒稍大的白色粒子为富镍相粒子,各元素质量分数为13.60%Ni,1.18%Mn,2.56%Fe,5.73%Cu,32.08%Zn,44.85%Al,但X射线衍射分析未发现富镍新相,其原因是Ni加入量过少,衍射峰强度太弱所致。

Mn在Al中的固溶度大于Ni,在658.5℃时,能溶解1.82%Mn^[8],所以Mn的偏析不如Ni严重,如图3(b)所示。但由图1(c)中非平衡三相共晶中白色粒子的能谱分析结果可知,白色富镍相粒子中含1.18%Mn,这会引入Mn的偏析。

Mn、Ni的添加对ZA27合金铸态组织中的先共晶 α 相的影响如图3所示。图3(a)所示为未添加Mn、Ni,也未变质的ZA27合金,先共晶 α 相为粗大发达的树枝晶;添加0.5%Mn使 α 相枝晶变短,并明显细化,如图3(b)所示;0.5%Mn+0.5%Ni的添加使 α 相形态发生更大变化,枝晶生长方式受到抑制, α 相进一步细化如图3(c)所示。故Mn、Ni的加入,细化了先共晶 α 相,有利于提高合金的强度与塑性,抵消了脆性大的非平衡三相共晶数量增多的不利作用。由表1可知,添加0.5%Mn+0.5%Ni的ZA27合金与添加0.5%Mn的ZA27合金室温抗拉强度均约为470 MPa,与未合金化ZA27相比下降不到5%。

2.2 添加Mn、Ni对铸态ZA27合金高温性能的影响

添加Mn、Ni对铸态ZA27合金瞬时抗拉强度的影响见图4。在250℃,拉伸机横梁移动速率 v

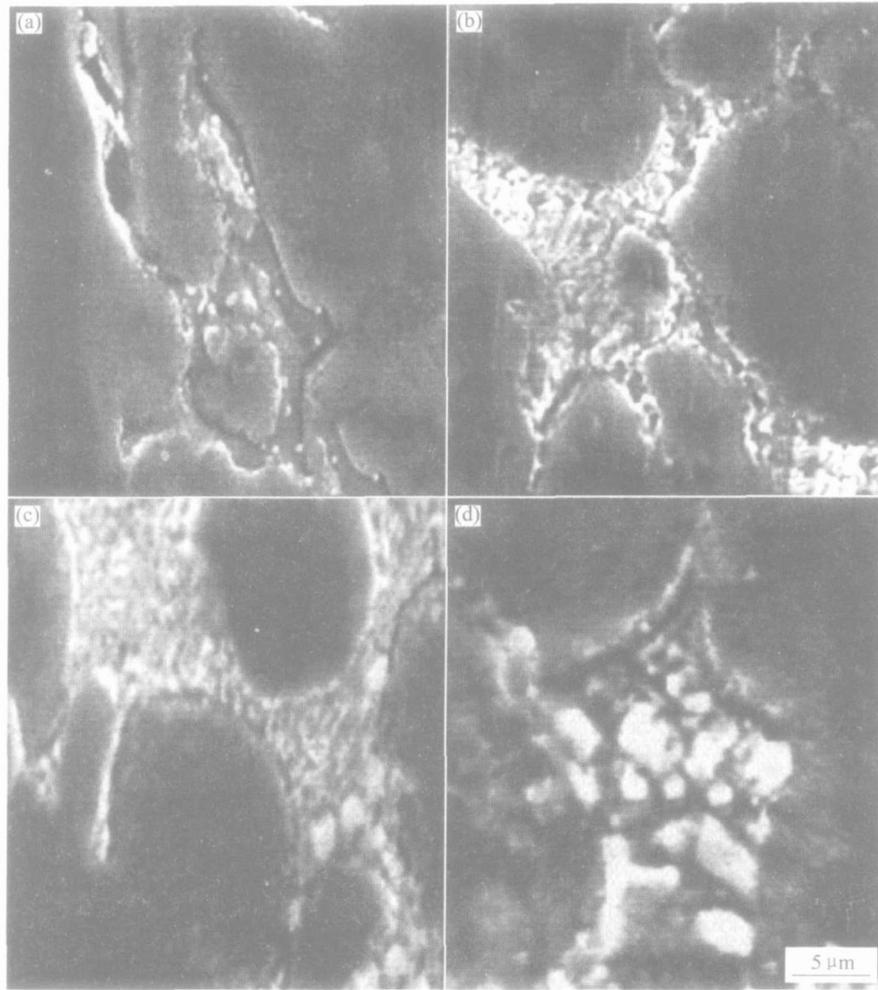


图 1 铸态 ZA27 合金中的非平衡三相共晶组织

Fig. 1 Unbalanced three-phase eutectic structures of ZA27 alloys in as-cast

(a) —Upr alloying; (b) —With 0.5% Mn; (c) —With 0.5% Mn and 0.5% Ni; (d) —With 0.5% Mn and 1.0% Ni

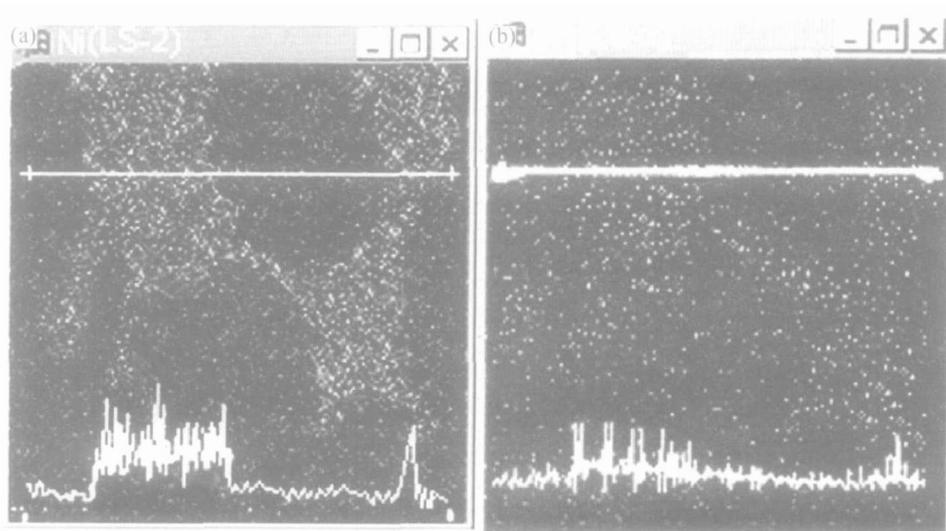


图 2 添加 0.5% Mn 和 0.5% Ni 的 ZA27 合金试样的 X 射线能谱分析结果

Fig. 2 X-ray energy spectrum analysis results of ZA27 alloy specimen with 0.5% Mn and 0.5% Ni

(a) —Ni element; (b) —Mn element

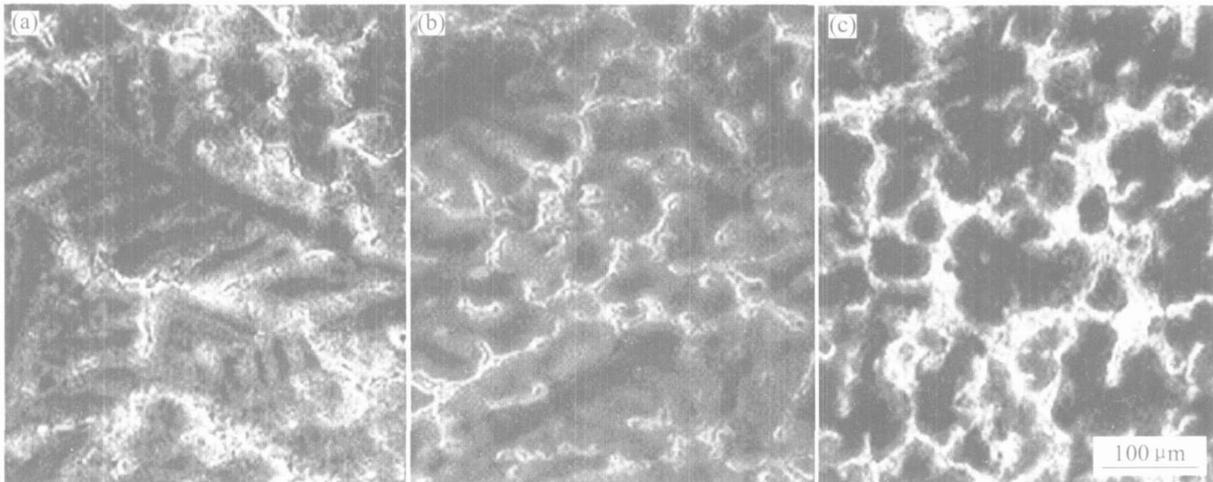


图 3 Mn、Ni 的添加对 ZA27 合金先共晶 α 相的影响

Fig. 3 Effects of Mn, Ni addition on α phase of ZA27 alloys in as cast

(a) —Un alloying; (b) —With 0.5% Mn; (c) —With 0.5% Mn+ 0.5% Ni

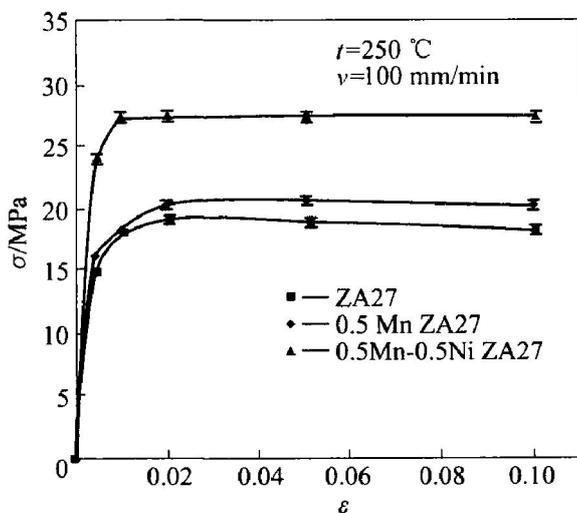


图 4 铸态 ZA27 合金的高温拉伸曲线

Fig. 4 σ—ε curves of as-cast ZA27 alloys

(250 °C, v = 100 mm/min)

为 100 mm/min 条件下, 未加 Mn、Ni 的合金的抗拉强度 σ_b 为 18.6 MPa, 添加 0.5% Mn 的合金的 σ_b 为 20.3 MPa, 同时添加 0.5% Mn 和 0.5% Ni 的合金的 σ_b 为 27.2 MPa。单独加入 Mn 对铸态 ZA27 高温强度的提高有限, 但 Mn、Ni 联合加入可显著提高铸态合金高温强度, 使瞬时抗拉强度提高 46%。Mn、Ni 联合加入提高高温强度的主要原因是合金的非平衡三相共晶中有大量较粗化的富镍相粒子 (如图 1(c) 所示), 可有效提高高温强度低的非平衡三相共晶的高温形变抗力。单独添加 0.5% Mn, 在铸态 ZA27 合金的非平衡三相共晶中, 无富锰新相粒子生成^[5, 6], 故不能有效强化高温强度低的非平衡三相共晶。

2.3 热处理及 Mn、Ni 合金化对 ZA27 合金组织与性能的影响

2.3.1 添加 Mn、Ni 对 ZA27 合金超塑性的影响

根据文献[10], 本文对 B-Ti 变质的未加 Mn、Ni 的 ZA27 合金进行 350 °C 保温 8 h, 水冷+ 250 °C 保温 1 h 时效处理, 在 220~ 280 °C 温度范围内, 以不同初始应变速率等速拉伸, 得到超塑性拉伸的延伸率与拉伸温度关系 (图 5(a))。由图 5(a) 可知, 在初始应变速率为 $6.7 \times 10^{-4} \sim 6.7 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 条件下, ZA27 合金均具有超塑性, 其中在温度为 280 °C, v 为 100 mm/min 最佳条件下, 延伸率可达 740%。

超塑性拉伸稳态流变阶段, 无缩颈发生, 因此可由工程应力—工程应变曲线, 利用公式 $S = \sigma(1 + \epsilon)$ 及 $e = \ln(1 + \epsilon)$ (式中 S 为真应力; e 为真应变; σ 为工程应力; ϵ 为工程应变)^[11] 算出一组真应力与真应变数据, 作出真应力—真应变曲线。添加 Mn、Ni 对超塑性拉伸的真应力—真应变曲线的影响如图 5(b) 所示。在最佳超塑性变形条件下, 未添加 Mn、Ni 的 ZA27 合金的稳态流变应力为 12.4 MPa, 添加 0.5% Mn 使稳态流变应力提高到 16.5 MPa, 同时添加 0.5% Mn 和 0.5% Ni 可使 ZA27 合金的稳态流变应力进一步提高到 24.6 MPa, 比未添加 Mn、Ni 合金提高 98%, 但 Mn、Ni 的添加使超塑性拉伸的最大真实线伸长由 2.13 降至 1.69, 即最大延伸率由 740% 降至 440%, 但仍具有优良的超塑性。

2.3.2 热处理及 Mn、Ni 合金化对 ZA27 合金组织与性能的影响

Zn-Al 合金有丰富的固态相变, 通过适当热处理可显著改善其塑性^[12-14]。添加 0.5% Mn 的 ZA27 合金经 350 °C, 8 h 保温, 可消除非平衡网状三相共晶, 得到成分均匀的 β 固溶体^[6], 随后的冷却方式不同, 得到的组织也不同。空冷得到极细片状的(α

+ η) 伪共析组织, 如图 6(a) 所示。350 °C, 8 h 保温后水冷, 然后在不同温度时效, 均得到粒状 α + η 组织, 颗粒的平均直径随时效温度升高而增大。其中自然时效与 250 °C 人工时效的显微组织, 如图 6(b)、图 6(c) 所示。图 6(c) 所示的 α + η 双相细晶组

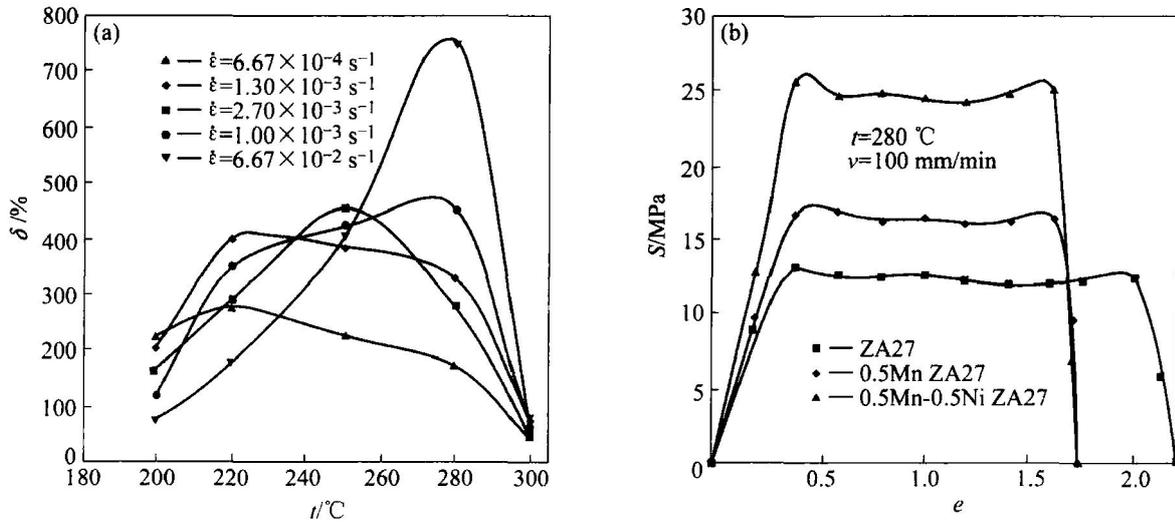


图 5 Mn、Ni 对 ZA27 合金超塑性的影响

Fig. 5 Effects of Mn and Ni on superplasticity of ZA27 alloys

(a) — δ — t curves of ZA27 alloy; (b) — S — e curves

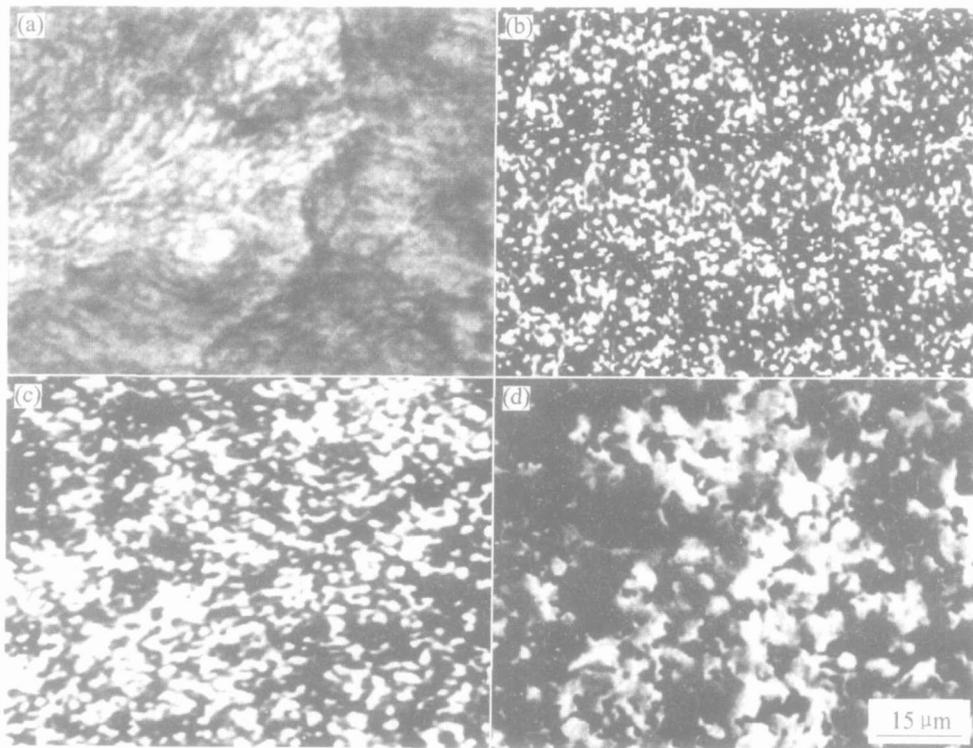


图 6 不同冷却方式后 Zn-27Al-2.7Cu-0.03Mg-0.5Mn 合金的显微组织

Fig. 6 Microstructures of Zn-27Al-2.7Cu-0.03Mg-0.5Mn alloy under different cooling conditions

(a) —Homogenizing+ air cooling; (b) —Solution treatment + 20 °C, 120 h ageing;
(c) —Solution treatment + 250 °C, 1 h ageing; (d) —After super plasticity deformation

织具有超塑性。图 6(d) 所示为 280 °C, v 为 100 mm/min 条件下超塑性拉伸后的纵向断面的显微组织, 与图 6(c) 相比晶粒明显粗化, 该组织也具有优良的综合力学性能^[10]。相同热处理条件下, 同时添加 0.5% Mn 和 0.5% Ni 的 ZA27 合金的显微组织与添加 0.5% Mn 的 ZA27 合金极为相似。

热处理对 ZA27 合金室温力学性能影响见表 1。均匀化后空冷热处理使 ZA27 合金具有最高的抗拉强度, 为 556 MPa, 与铸态相比提高 17% 左右, 而延伸率与铸态相比相差不大; 时效处理使合金具有优良的综合力学性能, 其中时效合金的强度随时效温度的升高呈明显下降趋势, 而延伸率则明显升高。如 100 °C, 5 h 人工时效合金的抗拉强度稍高于铸态抗拉强度(483 MPa), 而延伸率 δ_5 为 10.5%, 比铸态提高一倍以上; 250 °C, 1 h 人工时效合金的延伸率 δ_5 为 14.2%, 抗拉强度仍可达到 433 MPa。

Mn、Ni 对不同处理后的 ZA27 合金的室温力学性能的影响也见表 1。Mn、Ni 的添加对铸态、均匀化后空冷、自然时效、100 °C 人工时效合金室温力学性能影响不大, 但对 250 °C 人工时效合金室温抗拉强度影响显著。Mn、Ni 联合加入使 250 °C, 1 h 人工时效合金的室温抗拉强度比未加 Mn、Ni 合金提高 11.5%, 这除了与 Mn 可抑制时效后期富铜相的粗化有关外^[15], 显然也与 Ni 的加入有关。首先均匀化处理后, 非平衡三相共晶中的富镍相粒子消失, Ni 固溶于 β 固溶体中, 水冷获得过冷 α 相。在时效热处理的升温过程中, 过冷 β 相要分解成极细的 $\alpha + \eta$ 粒状组织, 在随后的 250 °C, 1 h 保温过程中会发生双相细粒状组织的粗化和富铜相的脱溶^[6], 而 Mn、Ni 将参与脱溶过程, 这可由拉伸断口中的白色粒子的能谱分析结果得到证实。

添加 0.5% Mn 和 0.5% Ni 的 ZA27 合金室温拉伸断口如图 7 所示。铸态试样的拉伸断口主要为脆性的沿晶断裂, 尚有一些撕裂棱, 如图 7(a) 所

示。350 °C, 8 h 保温消除了脆性大且强度低的网状非平衡三相共晶, 故不同温度时效合金的拉伸断口均为韧窝状断口。其中 20 °C, 保温 120 h 自然时效试样的拉伸断口已变为典型的韧窝状断口, 如图 7(b) 所示。250 °C, 保温 1 h 时效试样的断口为典型的杯锥状断口, 有明显的剪切唇, 其低倍扫描电镜照片如图 7(d) 所示, 其高倍拉伸断口也属于韧窝状断口, 韧窝中尚有较粗化的白色粒子, 如图 7(c) 所示, 白色粒子的能谱分析表明各元素质量分数为 6.07% Cu, 5.00% Ni, 2.08% Mn, 14.84% Al, 69.39% Zn, 与该合金铸态非平衡三相共晶中的白色粒子相比铜和锰量增加, 且不含铁, 铝与镍含量明显下降, 而含锌量大幅度增加, 故可判断该粒子是“离位析出”, 故 Mn、Ni 提高高温时效合金强度的原因也与锰、镍参与了富铜相的脱溶过程有关。由图 5(b) 可知, 0.5% Mn 和 0.5% Ni 的添加使超塑性变形的稳态流变应力提高 98%, 这也与“离位析出”的较粗化的白色粒子阻碍超塑性变形过程中的晶界滑动有关。

3 结论

1) 单独添加 0.5% Mn, 在铸态 ZA27 合金的非平衡三相共晶中无富锰相粒子, 故不能有效强化高温强度低的非平衡三相共晶, 对铸态合金 250 °C 的瞬时抗拉强度影响不大; 在添加 0.5% Mn 基础上, 再添加 Ni 合金化, 在非平衡三相共晶中, 生可成大量富镍相粒子, 有效强化了高温强度低的非平衡三相共晶, 但 Ni 加入量不宜过多, 否则会使非平衡三相共晶量过多, 并引起富镍相粒子明显粗化, 使室温抗拉强度强烈降低。Mn、Ni 的适宜加入量均为 0.5%, 可使铸态合金 250 °C 的瞬时抗拉强度比未加 Mn、Ni 的合金提高 46%, $\sigma_0.2$ 为 27.2 MPa。

表 1 ZA27 合金的室温力学性能

Table 1 Mechanical properties of ZA27 alloys at room temperature

Heat treatment	ZA27		0.5Mn ZA27		0.5Mn+0.5Ni ZA27	
	σ_b /MPa	δ_5 /%	σ_b /MPa	δ_5 /%	σ_b /MPa	δ_5 /%
As-cast	476	5.1	472	4.9	469	3.9
Homogenizing+ air cooling	556	6.1	549	5.5	552	3.2
Solution treatment+ 20 °C, 120 h ageing	525	8.5	524	8.7	520	7.9
Solution treatment+ 100 °C, 5 h ageing	483	10.5	487	10.8	491	10.3
Solution treatment+ 250 °C, 1 h ageing	433	14.2	474	14.2	483	11.2

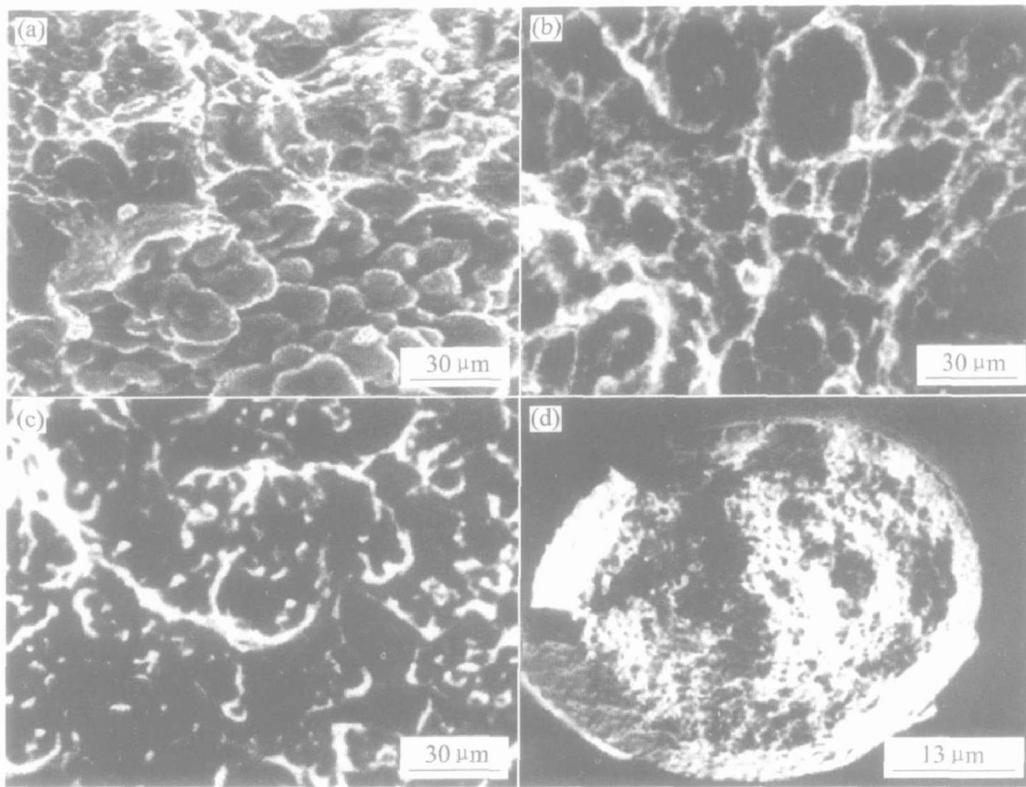


图 7 0.5Mn-0.5Ni ZA27 合金拉伸试样的断口形貌

Fig. 7 Fracture micrographs of tensile testing samples of 0.5Mn-0.5Ni ZA27 alloy

(a) —As-cast; (b) —Solution treatment, 20 °C, 120 h ageing;

(c) —Solution treatment, 250 °C, 1 h ageing; (d) —Full view of fracture of tensile testing samples of Fig. 5(c)

2) ZA27 合金及添加 Mn、Ni 的 ZA27 合金, 经 350 °C, 8 h 均匀化后水冷, 在不同温度下时效均可获得 α+ η 双相细粒状组织, 且随时效温度的升高, 粒状组织粗化, 强度呈明显下降趋势, 而延伸率则明显升高。添加 0.5% Mn 和 0.5% Ni 对铸态、均匀化后空冷、自然时效、100 °C 人工时效合金室温力学性能影响不大, 但使 250 °C 人工时效合金的室温抗拉强度提高到 483 MPa, 比未加 Mn、Ni 的 ZA27 合金提高 11.5%。

3) 同时添加 0.5% Mn 和 0.5% Ni 的 ZA27 合金在 280 °C, 初始应变速率为 $6.67 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 条件下的超塑性拉伸的稳态流变应力为 24.6 MPa, 比未加 Mn、Ni 的合金提高 98%, 但延伸率由 740% 下降到 440%。超塑性拉伸的稳态流变应力升高与延伸率的下降均与“离位析出”的富镍相粒子有关。

REFERENCES

[1] Gervais E. The development of a family of zinc-based foundry alloy[J]. AFS Transaction, 1980, 88: 183 - 194.

[2] Lyon R. High strength zinc alloy for engineering application in motor car[J]. Metal and Materials, 1985 (1): 55 - 57.

[3] Lambengts M. Friction and ductility behaviors of high strength zinc foundry alloys [J]. AFS Transaction, 1985, 93: 566 - 578.

[4] 苏德煌. 添加铁或锰对 ZA27 合金高温拉伸性能的影响[J]. 材料科学与工艺, 1998, 6(3): 52 - 55.
SU De-huang. Effect of Fe and Mn added on high temperature tensile properties of ZA27 alloy[J]. Material Science and Technology, 1998, 6(3): 52 - 55.

[5] 陈燕. 锰对 ZA27 合金的组织性能的影响[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2001.
CEN Yan. Effect of Mn on Microstructures and Mechanical Properties of ZA27 Alloy[D]. Qihuangdao: Yanshan University, 2001.

[6] 赵品, 沈焕祥, 赵恩生. Zr-27Al-2.7Cu-0.03Mg-0.5Mn 合金过冷 β 相分解产物及性能[J]. 有色金属, 2004, 56(2): 1 - 7.
ZHAO Pin, SHEN Huang-xiang, ZHAO En-sheng. Overcooling phase decomposed structure and mechanical properties of ZA27 alloy[J]. Nonferrous Metals, 2004, 56(2): 1 - 7.

- [7] 周明, 赵玉涛, 周伯仪. Mn对ZA27合金组织与性能的影响[J]. 江苏理工大学学报, 1998, 19(1): 60-64.
ZHOU Min, ZHAO Yutao, ZHOU Boyi. Effect of Mn on microstructures and mechanical properties of ZA27 alloys[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology, 1998, 19(1): 60-64.
- [8] 第一机械工业部材料研究所. 金相图谱(有色金属部分)[M]. 北京: 机械工业出版社, 1959. 10-24.
Materials Research Institute of First Machine Building Ministry. Metallograph Atlas(Nonferrous Metal Section)[M]. Beijing: China Machine Industry Press, 1959. 10-24.
- [9] 赵品, 沈焕祥. B-Ti-Ce复合变质对ZA27合金组织与性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2002, 12(S1): 232-235.
ZHAO Pin, SHEN Huangxiang. Effect of B-Ti-Ce compound modification on microstructures and mechanical properties of ZA27 alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2002, 12(S1): 232-235.
- [10] 沈焕祥, 赵品. 超塑性变形对ZA27合金性能的影响[J]. 热加工工艺, 2003(5): 10-12.
SHEN Huangxiang, ZHAO Pin. Effect of superplastic deformation on mechanical properties[J]. Hot Working Technology, 2003(5): 10-12.
- [11] 束德林. 金属力学性能[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987. 27.
SU DeLin. Mechanical Properties of Metals[M]. Beijing: China Machine Industry Press, 1987. 27.
- [12] Savashai T, Murphy S. Decomposition of Zr-Al alloys on quench ageing[J]. Material Science and Technology, 1990(6): 695-703.
- [13] 王狂飞. ZA27合金淬火时效特性[J]. 金属热处理, 1998(5): 34-36.
WANG Kuangfei. Characteristics of quench ageing of ZA27 alloy[J]. Heat Treatment of Metals, 1998(5): 34-36.
- [14] Savashai T, Murphy S. Decomposition of dendritic and non-dendritic (stir cast) Zr-Al alloy (ZA27)[J]. Materials Science, 1981(1): 559-568.
- [15] 林肇琦, 孙贵经, 胡为平, 等. 微量Mn对Al-Zr-Mg合金沉淀过程和显微组织参数的影响[J]. 金属学报, 1985, 21(2): 119-125.
LIN Zhaorqi, SUN Gujing, HU Weiping, et al. Effect of Mn on precipitation and microstructures of Al-Zr-Mg alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 1985, 21(2): 119-125.

(编辑 陈爱华)