

含二十面体准晶相 Mg-Zn-Y 合金的组织 and 性能

杨 玲 赵宇宏 侯 华
(中北大学材料科学与工程学院)

摘 要 采用常规凝固技术制备了 $MgZn_{6x}Y_x$ ($x=0.7, 1.0, 1.5, 2.0$) 合金,研究了 Y 含量对含有二十面体准晶相(*I* 相) $MgZn_{6x}Y_x$ 合金组织和性能的影响。结果表明, $MgZn_{6x}Y_x$ 合金由 α -Mg 基体和分布在晶界周围的(α -Mg+*I* 相)共晶组织组成。随着 Y 含量增加,基体晶粒尺寸减小,共晶组织尺寸增大,含量增加,由不连续分布转变为连续分布。在凝固过程中,二十面体准晶相通过共晶转变形成。 $Mg_{89.5}Zn_{9.0}Y_{1.5}$ 合金的抗拉强度和伸长率达到最大值,分别为 179.2 MPa 和 3.5%。 $MgZn_{6x}Y_x$ 合金的断口呈现准解理断裂特征。

关键词 $MgZn_{6x}Y_x$ 合金;二十面体准晶相;显微组织;力学性能

中图分类号 TG146.22;TG292 文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.03.003 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Microstructure and Mechanical Properties of Mg-Zn-Y Alloys Containing Icosahedral Quasicrystal

Yang Ling, Zhao Yuhong, Hou Hua
(School of Materials Science and Engineering, North University of China)

Abstract: $MgZn_{6x}Y_x$ ($x=0.7, 1.0, 1.5, 2.0$, atomic in%) alloys were prepared by conventional solidification technique. The effects of Y content on microstructure and mechanical properties of $MgZn_{6x}Y_x$ alloys containing icosahedral quasicrystal phase (*I*-phase) as a secondary solidification phase were investigated. The results show that $MgZn_{6x}Y_x$ alloys consist of α -Mg matrix and (α -Mg+*I*-phase) eutectic structure which is distributed around the grain boundaries. With the increase of Y addition, the matrix grain size is decreased, and the content and the size of eutectic structure are increased, meanwhile the morphology of which also is transformed from discontinuous distribution to continuous distribution. During the solidification process, *I*-phase is formed undergoing eutectic reaction. $Mg_{89.5}Zn_{9.0}Y_{1.5}$ alloy exhibits the maximum ultimate tensile strength of 179.2 MPa and the maximum elongation of 3.5%, respectively. The fracture mode of $MgZn_{6x}Y_x$ alloys is characterized by quasi-cleavage fracture.

Key Words: $MgZn_{6x}Y_x$ Alloys, *I*-phase, Microstructures, Mechanical Properties

自 SHECHTMAN D 等^[1]在 20 世纪 80 年代首次发现二十面体准晶相(*I* 相)以来,准晶的形成得到了广泛研究^[2~7]。许多合金系中均含有准周期的二十面体结构,如 Mg-Zn-Al^[8], Mg-Zn-Y^[9~11], Ti-Zr-Ni^[12] 和 Al-Cu-Fe^[13] 合金等。准晶的特殊结构使其具有独特的力学性能,含二十面体准晶相的 Mg 合金因优异的力学性能使其在工业应用中具有巨大潜力。在富镁 Mg-Zn-Y 合金中一般存在 3 种三元平衡相,分别为立方结构的 $Mg_3Zn_3Y_2$ (*W* 相)、二十面体准周期结构的 Mg_3Zn_6Y

(*I* 相)和长程有序堆垛结构的 $Mg_{12}ZnY$ (*Z* 相)^[14~16]。 $w(Zn)/w(Y)$ 比对 Mg-Zn-Y 合金的显微组织有显著影响,当 $w(Zn)/w(Y)$ 比为 4.38~7 时,采用常规铸造得到的合金组织为 α -Mg 和 *I* 相,当 $w(Zn)/w(Y)$ 比为 1.1~4.38 时,主要形成 *I* 相和 *W* 相,由于 *W* 相为立方结构,其与 α -Mg 基体界面结合力较弱,与 *I* 相相比,*W*-相会给合金的力学性能带来不利影响^[17,18]。二十面体准晶相作为强化相会显著提高 Mg-Zn-Y 合金的室温和高温力学性能,使其成为发展高强镁合金的一种有潜

收稿日期:2020-10-10;修改稿收到日期:2020-11-26
基金项目:山西省科技重大专项资助项目(20181101014,20191102008,20191102007);国家自然科学基金资助项目(51774254,51774253,51701187,51674226,51804279,51801189);山西省平台基地和人才专项资助项目(201805D211036);中央引导地方科技发展专项资金资助项目(YDZX20191400002796);山西省科技成果转化引导专项资金资助项目(201804D131039);装备预研领域基金重点资助项目(61409230407);山西省青年科技研究基金资助项目(201901D211256,201801D221152)
第一作者简介:杨玲,女,1981 年出生,副教授,太原(030051),E-mail: yangling19810128@163.com
通信作者:赵宇宏,女,1974 年出生,教授,太原(030051),E-mail: zhaoyuhong@nuc.edu.cn
引用格式:杨玲,赵宇宏,侯华. 含二十面体准晶相 Mg-Zn-Y 合金的组织 and 性能[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(3):275-279.
YANG L, ZHAO Y H, HOU H. Microstructure and mechanical properties of Mg-Zn-Y alloys containing icosahedral quasicrystal[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(3):275-279.

力的强化相^[19,20]。因此,需要通过凝固过程使 Mg-Zn-Y 合金获得合适的显微组织。

尽管一些研究者分析了 $w(\text{Zn})/w(\text{Y})$ 比对 Mg-Zn-Y 合金显微组织的影响,但是关于 Mg-Zn-Y 合金的凝固过程研究报道较少。本课题采用常规凝固技术制备了富镁 Mg-Zn-Y 系合金,为了避免 W 相的生成,同时降低材料的密度,重点设计了 $w(\text{Zn})/w(\text{Y})$ 比为 4.38,即 $x(\text{Zn})/x(\text{Y})$ 比为 6 的 $\text{MgZn}_{6x}\text{Y}_x$ 合金系,以研究 Mg-Zn-Y 合金的成分、组织和力学性能之间的关系,旨在为其应用提供参考。

1 试验过程及方法

MgZn_{6x}Y_x 合金的名义成分见表 1,试验原材料(质量分数)为 99.9% 的 Mg 锭、99.9% 的 Zn 锭和 Mg-30Y 中间合金。将坩埚放入电阻炉内,预热至 200 ℃,然后将清理干净的 Mg 锭放入坩埚内,将温度升到 400 ℃时开始通入压缩空气、CO₂ 和四氟乙烷保护气体;待 Mg 锭全部熔化后,去除表面熔渣,加入预先称量好的 Zn 锭,搅拌以使其充分熔解;升温至 760 ℃,按照设计的合金成分缓慢加入 Mg-30Y 中间合金,待合金全部熔化后,搅拌 5 min,使熔液成分均匀化;在 700 ℃下静置 15 min,然后在此温度下浇入预热温度为 200 ℃的金属型中,金属型尺寸见图 1。

表 1 MgZn_{6x}Y_x 合金的名义化学成分

合金	x _B		
	Mg	Zn	Y
1	95.1	4.2	0.7
2	93.0	6.0	1.0
3	89.5	9.0	1.5
4	86.0	12.0	2.0

试样经打磨、抛光后采用硝酸乙醇溶液(96 mL 无水乙醇+4 mL 浓硝酸)腐蚀,在 SU-1500 型扫描电镜上观察合金的组织 and 断口形貌;采用 D/Max-RB 型 X 射线衍射仪进行物相分析;将磨削厚度为 60 μm 左右的薄膜试样在 MTP-1 型化学电解双喷研磨仪上进行电解双喷(电解液为 5% 的硝酸乙醇,双喷电压为 40 V,

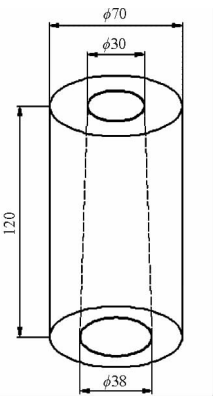


图 1 金属型示意图

Fig.1 Schematic diagram of metal mold

电流为 20~30 mA,液氮制冷),减薄后的试样采用 JEM-2010(HT)型透射电镜进行相结构分析;合金的相变温度采用 NETZSCH STA 449C 差示扫描量热仪进行分析;拉伸试样尺寸见图 2,拉伸试验在 CMT5105 微机控制电子万能试验机上进行,拉伸速率为 0.5 mm/min。

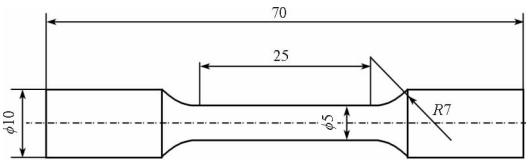


图 2 拉伸试样尺寸

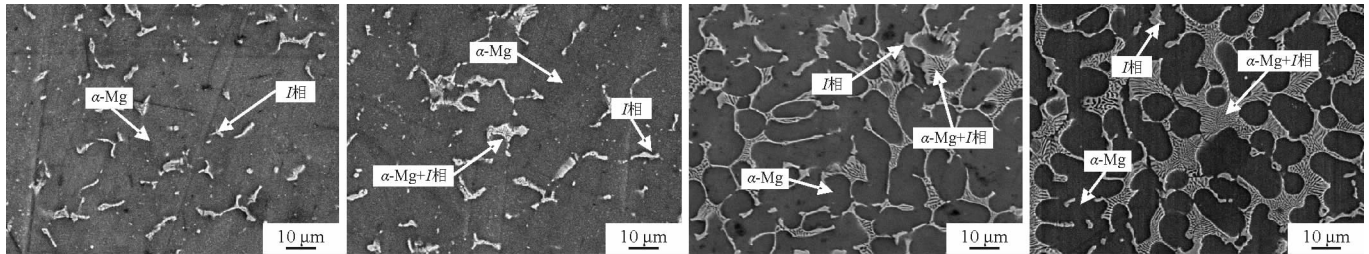
Fig.2 Dimension of tensile specimen

2 试验结果及分析

2.1 MgZn_{6x}Y_x 合金的组织成分分析

图 3 为 MgZn_{6x}Y_x 合金的 SEM 显微组织。可见,合金组织由 α-Mg 基体相和晶界相组成。图 4 为 Mg-Zn-Y 合金的 X 射线衍射图谱。可以看出,合金的主要物相为 α-Mg 和准晶相,表明晶界相为颗粒状 I 相和 (α-Mg+I 相)共晶组织。此外,随着 Y 含量增加,I 相的衍射峰强度增加,说明其含量增加。

从图 3a 看出,Mg_{95.1}Zn_{4.2}Y_{0.7} 合金的铸态组织由初生 α-Mg 和晶界相组成,晶界相比较细小,为不连续分



(a) Mg_{95.1}Zn_{4.2}Y_{0.7} (b) Mg_{93.0}Zn_{6.0}Y_{1.0} (c) Mg_{89.5}Zn_{9.0}Y_{1.5} (d) Mg_{86.0}Zn_{12.0}Y_{2.0}

图 3 MgZn_{6x}Y_x 合金的 SEM 显微组织

Fig.3 SEM microstructures of MgZn_{6x}Y_x alloys

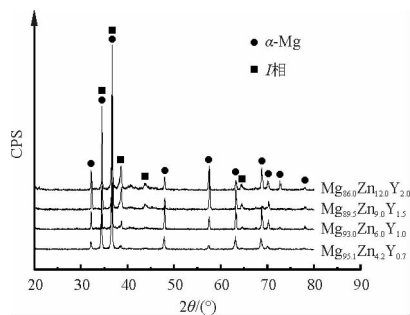


图 4 MgZn_{6x}Y_x 合金的 X 射线衍射图谱
Fig.4 XRD patterns of MgZn_{6x}Y_x alloys

布的准晶相。随着 Y 含量增加,少量的层片状(α -Mg + I 相)共晶组织出现,见图 3b。从图 3c、图 3d 可以看出,随着 Y 含量继续增加,Mg_{89.5}Zn_{9.0}Y_{1.5}和 Mg_{86.0}Zn_{12.0}Y_{2.0}合金中的 I 相含量增加,大部分 I 相以(α -Mg + I 相)共晶组织形式存在,从不连续分布转变为连续分布,

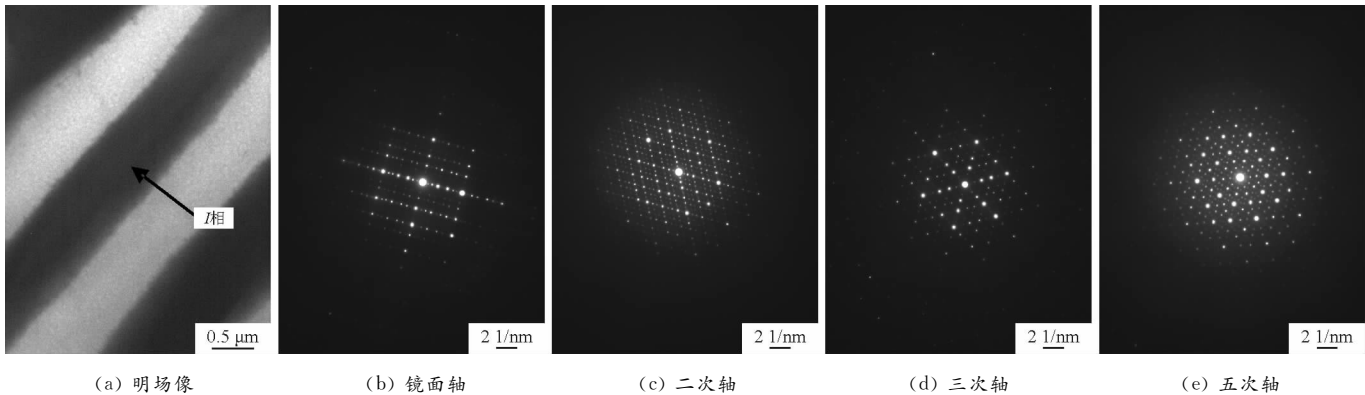


图 5 Mg_{95.1}Zn_{4.2}Y_{0.7} 合金中准晶相的明场像照片和选区电子衍射花样

Fig.5 Bright-field image and selected area electron diffraction patterns (SADP) of I phase in Mg_{95.1}Zn_{4.2}Y_{0.7} alloy

图 6 为 Mg_{95.1}Zn_{4.2}Y_{0.7} 合金的 DSC 曲线。可以看出,合金在 600.5 °C 存在一放热峰,对应 α -Mg 相的析出,在 448.6 °C 存在另一放热峰,在此温度发生共晶反应生成层片状共晶组织: $L \rightarrow \alpha\text{-Mg} + \text{I}$ 相,因此合金中存在 α -Mg 相和 I 相,和 XRD 结果一致。

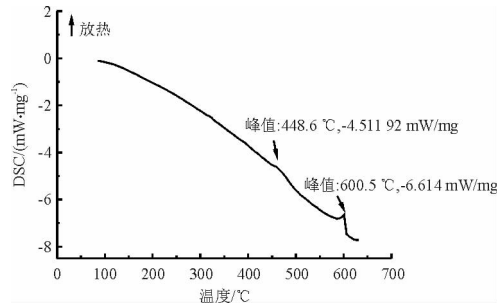


图 6 Mg_{95.1}Zn_{4.2}Y_{0.7} 合金的 DSC 曲线
Fig.6 DSC curve of Mg_{95.1}Zn_{4.2}Y_{0.7} alloy

综上,在常规铸造下,MgZn_{6x}Y_x 合金的凝固方式为:首先初生 α -Mg 相从合金液中形成,随着温度降低和凝固过程进行,Y 和 Zn 元素在 α -Mg 狭小的晶界区域富集,在较慢的冷却速度下 I 相在晶界处形核并充分

尤其对 Mg_{86.0}Zn_{12.0}Y_{2.0} 合金, α -Mg 几乎被连续网状分布的共晶组织包围。

另外,从图 3 看出,随着 Y 含量增加, α -Mg 基体晶粒尺寸分别为 24.0、17.4、15.0 和 13.1 μm ,晶粒尺寸逐渐减小。这是因为,首先,凝固过程中溶质再分配增加了固液界面前沿的成分过冷度;其次,由于 Y 元素具有较高的表面活性,在凝固过程中,当其在固液界面前沿富集到一定程度时,会阻碍晶粒长大,起到细化晶粒的作用;另外,凝固过程中结晶前沿析出的准晶相具有较低的界面能,其与基体之间可以形成稳定界面,阻碍 Mg、Zn 原子扩散,有效抑制基体晶粒进一步长大。

为了验证合金中晶界相的结构,对其进行透射电镜分析,见图 5。从图 5a 可以清楚看到晶界相由 α -Mg 和 I 相两相共晶组织组成,图 5b~图 5e 分别为 I 相的镜面轴、二次轴、三次轴和五次轴。

长大,从而形成 α -Mg 和 I 相的共晶组织。

2.2 MgZn_{6x}Y_x 合金的力学性能

图 7 为 MgZn_{6x}Y_x 合金的力学性能。可以看出,随着 Y 含量增加,合金的抗拉强度和伸率先增大后减小,当 Y 含量为 1.5% 时,抗拉强度和伸长率均达到最大值,分别为 179.2 MPa 和 3.5%,性能提高的原因在于细晶强化和准晶强化作用。但是,当 Y 含量从 1.5% 增至 2.0% 时,抗拉强度稍有降低,伸长率下降明显,这是因为 Mg_{86.0}Zn_{12.0}Y_{2.0} 合金中准晶含量最多,且晶粒尺

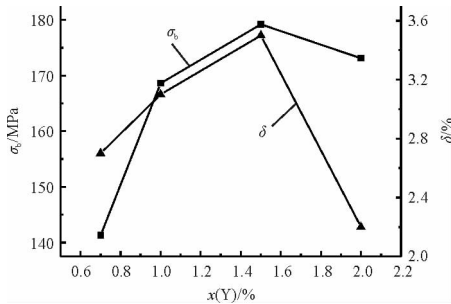


图 7 MgZn_{6x}Y_x 合金的力学性能

Fig.7 Mechanical properties of MgZn_{6x}Y_x alloys

寸比 $\text{Mg}_{89.5}\text{Zn}_{9.0}\text{Y}_{1.5}$ 合金小,这对提高合金性能有利,但是, $\text{Mg}_{86.0}\text{Zn}_{12.0}\text{Y}_{2.0}$ 合金中 $\alpha\text{-Mg}$ 基体几乎完全被连续网状结构包围,这对力学性能不利,因此,晶粒尺寸、准晶含量和连续网状结构三者的综合作用导致了合金力学性能的下降。

图 8 为 $\text{MgZn}_{6x}\text{Y}_x$ 合金的拉伸断口形貌。可以发

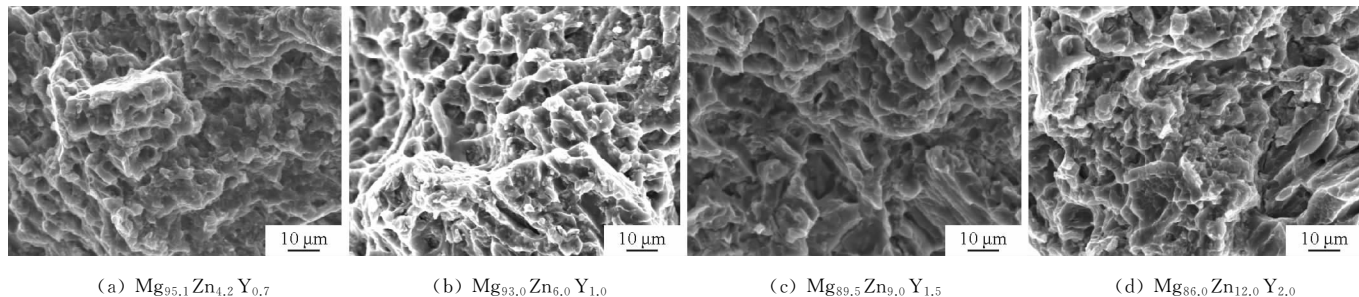


图 8 $\text{MgZn}_{6x}\text{Y}_x$ 合金的拉伸断口形貌

Fig.8 Tensile fracture morphology of $\text{MgZn}_{6x}\text{Y}_x$ alloys

3 结 论

(1)采用常规铸造法制备了不同准晶含量的 $\text{MgZn}_{6x}\text{Y}_x$ 合金,其主要由 $\alpha\text{-Mg}$ 基体和($\alpha\text{-Mg}+I$ 相)共晶结构组成,随着 Y 含量增加, $\alpha\text{-Mg}$ 基体晶粒尺寸减小, ($\alpha\text{-Mg}+I$ 相)共晶组织含量增加,尺寸增大,由不连续分布转变为连续分布。

(2) $\text{MgZn}_{6x}\text{Y}_x$ 合金凝固过程中,首先初生 $\alpha\text{-Mg}$ 相从液相中析出,随着温度降低,通过共晶反应形成($\alpha\text{-Mg}+I$ 相)结构。

(3)随着 Y 含量增加, $\text{MgZn}_{6x}\text{Y}_x$ 合金的抗拉强度和伸长率先增大后减小,当 Y 含量为 1.5% 时,合金抗拉强度和伸长率均达到最大值,分别为 179.2 MPa 和 3.5%。 $\text{MgZn}_{6x}\text{Y}_x$ 合金的断裂模式为准解理断裂。

参 考 文 献

- [1] SHECHTMAN D, BLECH I, GRATIAS D, et al. Metallic phase with long-range orientational order and no translational symmetry[J]. Physical Review Letters, 1984, 53(20): 1 951-1 953.
- [2] MOHAMMAD A S, RAJIV K M, ONKAR N S. On the formation of nano-sized quasicrystals in $\text{Ti}_{53}\text{Zr}_{27}\text{Ni}_{20}$ alloy[J]. Materials Science and Engineering, 2001, A304-306: 860-862.
- [3] LEE J H, KIM K B, LEE J S, et al. Formation of nano-sized $\text{Ti}_{68}\text{Fe}_{26}\text{Si}_6$ icosahedral quasicrystalline phase by rapid quenching and mechanical alloying[J]. Materials Science and Engineering, 2001, A304-306: 849-854.
- [4] POPESCU R, JIANU A, MANCIU M, et al. Chemical trends of icosahedral order in Al-Cu-TM quasicrystals[J]. Journal of Alloys and Compounds, 1995, 221: 240-247.
- [5] GUO J Q, TSAI A P. Stable icosahedral quasicrystals in the Ag-In-Ca, Ag-In-Yb, Ag-In-Ca-Mg and Ag-In-Yb-Mg systems[J]. Philosophical Magazine Letters, 2002, 82(6): 349-352.

现,随着 Y 含量增加,合金的拉伸断口特征没有明显改变,呈现准解理断裂特征, $\text{Mg}_{89.5}\text{Zn}_{9.0}\text{Y}_{1.5}$ 合金相较于其他 $\text{MgZn}_{6x}\text{Y}_x$ 合金,断口上存在较多韧窝。其余 3 种 $\text{MgZn}_{6x}\text{Y}_x$ 合金断口上出现大量的准解理台阶,几乎看不到韧窝,偏脆性断裂,这是由于第二相含量较高导致应力集中和裂纹产生。

- [6] FISHER I R, KRAMER M J, ISLAM Z, et al. Growth of large single-grain quasicrystals from high-temperature metallic solutions[J]. Materials Science and Engineering, 2000, 294-296: 10-16.
- [7] HUANG H, TIAN Y, YUAN G Y, et al. Formation mechanism of quasicrystals at the nanoscale during hot compression of Mg alloys[J]. Scripta Materialia, 2014, 78-79: 61-64.
- [8] BOKHONOV B B, IVANOV E Y, TOLOCHKO B P, et al. In situ study of structural transformations of $\text{Mg}_{44}\text{Al}_{15}\text{Zn}_{41}$ quasicrystals under heating[J]. Materials Science and Engineering, 2000, A278: 236-241.
- [9] ZHANG J S, ZHANG Y Q, ZHANG Y, et al. Effect of Mg-based spherical quasicrystal on microstructures and mechanical properties of ZA54 alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20(7): 1 199-1 204.
- [10] WAN D Q, YANG G C, ZHU M, et al. Solidification of Mg-28Zn-2Y alloy involving icosahedral quasicrystal phase[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2007, 17(3): 586-589.
- [11] JIA Q G, ZHANG W X, SUN Y, et al. Microstructure and mechanical properties of as-cast and extruded biomedical Mg-Zn-Y-Zr-Ca alloy at different temperature[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2019, 29(3): 515-525.
- [12] HUANG H G, CHEN L, XU Q Y. Effect of Pd substitution on phase formation and stability in Ti-Zr-Ni quasicrystalline alloys[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2015, 44(4): 821-825.
- [13] TAKAGI S, KYONO A, MITANI S, et al. X-ray diffraction study of the icosahedral AlCuFe quasicrystal at megabar pressures[J]. Materials Letters, 2015, 161: 13-16.
- [14] ZENG X Q, ZHANG Y, LU C, et al. Precipitation behavior and mechanical properties of a Mg-Zn-Y-Zr alloy processed by thermomechanical treatment[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2005, 395(1-2): 213-219.
- [15] LUO Z P, ZHANG S Q. Comment on the so-called Z-phase in magnesium alloys containing zinc rare-earth elements[J]. Journal of Materials Science Letters, 1993, 12: 1 490-1 492.

Ti 对 Nb-20Si-5Al 超高温合金性能的影响

龙文元 陈 勤
(南昌航空大学航空制造工程学院)

摘 要 采用放电等离子烧结法 (SPS) 制备了 Nb-20Si-5Al-*x*Ti (*x* = 0, 18, 20, 22, 摩尔分数) 超高温合金, 研究了 Ti 加入量对 Nb-20Si-5Al 合金的室温断裂韧度和高温抗氧化性的影响。结果表明, 随着 Ti 加入量的增加, 超高温合金的相组成由 Nbss、Nb₅Si₃ 和 Al₃Nb 相转变成成为 Nbss、(Nb, Ti)₅Si₃ 和 Ti 相。Ti 能明显改善 Nb-20Si-5Al 超高温合金的断裂韧度和高温抗氧化性能, 随着 Ti 加入量的增加均先提高然后降低, 在 Ti 加入量为 20% 时, 合金断裂韧度最大, 为 7.41 MPa·m^{1/2}, 相比未加 Ti 时提高了约 56.9%, 其高温氧化速率最低, 为 0.72×10⁻⁴ g²/(cm⁴·h)。添加 Ti 元素后, 其氧化产物中出现 Ti₂Nb₁₀O₂₉、TiNb₂O₇、TiO₂ 等, 可以提高其氧化膜的致密性, 从而提高高温抗氧化性能。

关键词 放电等离子烧结; Nb-Si 超高温合金; 高温抗氧化性; 断裂韧性

中图分类号 TG146 **文献标志码** A

DOI: 10.15980/j.tzzz.2021.03.004

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Ti Addition on the Properties of Nb-20Si-5Al Ultrahigh Temperature Alloy

Long Wenyuan, Chen Qin

(School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University)

Abstract: Nb-20Si-5Al-*x*Ti (*x* = 0, 18, 20, 22, %) ultrahigh temperature alloys were prepared by the spark plasma sintering (SPS) technology. The effects of Ti addition on the fracture toughness and high temperature oxidation resistance of the alloys were analyzed. The results reveal that the phase composition of Nb-20Si-5Al ultrahigh temperature alloys is transformed from Nbss, (Nb, Ti)₅Si₃ and Al₃Nb to Nbss, (Nb, Ti)₅Si₃, Ti and Al₃Ti phases. The fracture toughness and high temperature oxidation resistance of alloys can be obviously improved with the addition of Ti element, which are both increased firstly and then decreased with the increase of Ti content. When the content of Ti is 20%, the fracture toughness reaches the maximum value of 7.41 MPa·m^{1/2}, which is 56.9% higher than that of one without Ti, and the high temperature oxidation rate is the lowest, which is 0.72×10⁻⁴ g²/(cm⁴·h). After adding Ti, Ti₂Nb₁₀O₂₉, TiNb₂O₇, TiO₂ and so on can be observed in the oxidation products, which improve the compactness of the oxide film, thus enhancing the oxidation resistance at high temperature.

Key Words: SPS, Nb-Si Based Ultrahigh Temperature Alloy, High Temperature Oxidation Resistance, Fracture Toughness

随着航空工业的迅速发展,航空发动机的推重比越来越高,对其叶片材料的耐高温能力要求也相应提高,

收稿日期: 2020-09-25; **修改稿收到日期:** 2020-11-05
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51271091); 江西省自然科学基金资助项目(20161BAB206107)
第一作者简介: 龙文元, 男, 1971 年出生, 教授, 南昌(330063), E-mail: longwy@nchu.edu.cn
引用格式: 龙文元, 陈勤. Ti 对 Nb-20Si-5Al 超高温合金性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(3): 279-283.
LONG W Y, CHEN Q. Effect of Ti addition on the properties of Nb-20Si-5Al ultrahigh temperature alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(3): 279-283.

[16] ZHANG Y A, ZENG X Q, LIU L F, et al. Effects of yttrium on microstructure and mechanical properties of hot-extruded Mg-Zn-Y-Zr alloys[J]. Materials Science and Engineering, 2004, A373 (1-2): 320-327.

[17] LEE J Y, KIM D H, LIM H K, et al. Effects of Zn/Y ratio on microstructure and mechanical properties of Mg-Zn-Y alloys[J]. Materials Letters, 2005, 59(29-30): 3 801-3 805.

[18] LIU J F, YANG Z Q, YE H Q. Solid-state formation of icosahedral quasicrystals at Zn₃Mg₃Y₂/Mg interfaces in a Mg-Zn-Y alloy [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 650: 65-69.

[19] BAE D H, LEE M H, KIM K T, et al. Application of quasicrystalline particles as a strengthening phase in Mg-Zn-Y alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2002, 342(1-2): 445-450.

[20] SINGH A, SOMEKAWA H, MUKAI T. High temperature processing of Mg-Zn-Y alloys containing quasicrystal phase for high strength[J]. Materials Science and Engineering, 2011, A528 (21): 6 647-6 651.

(编辑:张正贺)