

文章编号:1673-9981(2022)02-0253-09

# Zr含量对工业纯铝组织及性能的影响

王振<sup>1,2</sup>,甘春雷<sup>1</sup>,李锋<sup>2</sup>,周楠<sup>1</sup>

(1. 广东省科学院新材料研究所,广东广州 510650; 2. 沈阳工业大学材料科学与工程学院,辽宁 沈阳 110870)

**摘要:** 为了发展高性能耐热铝锆合金,采用重力铸造和热挤压方法制备了4种不同成分的铝锆合金,利用光学显微镜、扫描电子显微镜、拉伸机和导电仪等测试手段表征铝锆合金的组织及性能,研究了Zr含量(质量分数0.05%~0.2%)对工业纯铝的组织及性能的影响规律。结果表明:Zr含量较少时,对合金组织细化效果显著;随着Zr含量的增加,对合金组织细化效果衰退,并且出现粗大的Al<sub>3</sub>Zr相;当Zr含量为0.1%时,合金的拉伸性能最优,{100}面织构最弱,对立方织构抑制效果最强;未加入Zr时,导电率最高,Zr含量为0.05%时,导电率次之,耐热性能最好。

**关键词:** Zr含量;工业纯铝;微观组织;力学性能;织构;耐热性能

**中图分类号:** TG139.6

**文献标志码:** A

**引文格式:**王振,甘春雷,李锋,等. Zr含量对工业纯铝组织及性能的影响[J]. 材料研究与应用,2022,16(2):253-261.

WANG Zhen, GAN Chunlei, LI Feng, et al. Effect of Zr Content on Microstructure and Properties of Commercial Pure Aluminum[J]. Materials Research and Application, 2022, 16(2): 253-261.

铝锆合金是一类具有耐高温软化和抗蠕变性能好等优点的耐热铝合金,发展高性能的铝锆耐热铝合金导线,对提高输电容量、减少电能损耗、提升电能利用效率和保障输电安全具有十分重要的意义<sup>[1-3]</sup>。由于在铝中加入Zr元素能有效提高合金的再结晶温度,进而提升合金的耐热性能,相关学者开展了一系列的研究。韩钰等<sup>[4]</sup>发现,Zr含量(质量分数)为0.08%时,合金的抗拉强度比纯铝提高约7%,耐热性能提高约8%。蒋炜华等<sup>[5]</sup>发现,Zr含量为0.2%时,合金的耐热性能会下降,侯雅尘等<sup>[6]</sup>在Al-Er合金中加入微量Zr后发现,尽管合金的耐热性得到提高,但其导电率会降低。这些研究表明,在纯铝中添加适量的Zr元素可以提升铝锆合金的耐热性能,但是仍存在强度、导电率、工作温度等性能

偏低的问题,虽然对造成这一原因进行了较多的讨论和研究,但未从变形织构的角度系统地阐明Zr元素对铝导线性能的影响。鉴于此,通过向工业纯铝中添加微量Zr元素,研究Zr含量对工业纯铝微观组织、导电性能、力学性能、织构及耐热性能的影响规律,为进一步开发高性能耐热铝合金导线提供实验参考和理论支撑。

## 1 实验材料及方法

以工业纯铝(成分见表1)和Al-10%Zr中间合金为原材料,利用铝熔炼炉制备四种不同组分的铝合金。

首先在150℃下对原材料进行烘干处理,然后

表1 实验用工业纯铝化学成分

Table 1 Chemical composition of pure industrial aluminum for experimental

元素	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	V	Al
含量 w/%	0.08	0.1	0.01	0.03	0.02	0.02	0.03	0.01	99.7

收稿日期:2022-04-20

基金项目:广东省科学院项目(2020GDASYL-20200503001-03);清远市科技计划项目(2020KJJH022)

作者简介:王振(1996-),男,辽宁盘锦人,硕士研究生,主要从事铝合金制备与成形加工的研究,E-mail:1209001019@qq.com。

把工业纯铝放入熔炼炉中,在750℃下进行熔化,待铝锭完全熔化后向熔体中添加Al-10%Zr中间合金,待中间合金熔化后利用铝合金粉末精炼剂(主要成分为硝酸钠)进行精炼,再扒渣处理,保温静置30 min后降温至700℃进行浇注,最后得到直径120 mm、高200 mm的铸锭。

采用电感耦合等离子体原子发射光谱法(ICP-AES),分析试样的化学成分。所获得四种Al-Zr合金的成分列于表2。

表2 Al-Zr合金化学成分  
Table 2 Chemical composition of Al-Zr alloy

Alloy	Zr含量 $w/\%$
Al-0.05Zr	0.06
Al-0.1Zr	0.12
Al-0.15Zr	0.16
Al-0.2Zr	0.22

将铸锭扒皮加工成直径100 mm、高度120 mm的挤压坯料,在挤压温度为400℃和挤压速度为 $2\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 的条件下,将坯料挤压成直径为13 mm的铝杆,然后将铝杆拉拔成直径为3 mm的铝线,用于测量Al- $x$ Zr的耐热性能。

利用DMI3000M型金相显微镜(OM),对铝杆试样的横、纵截面进行金相组织观察。通过GeminiSEM 300型扫描电镜(SEM)和背散射衍射仪

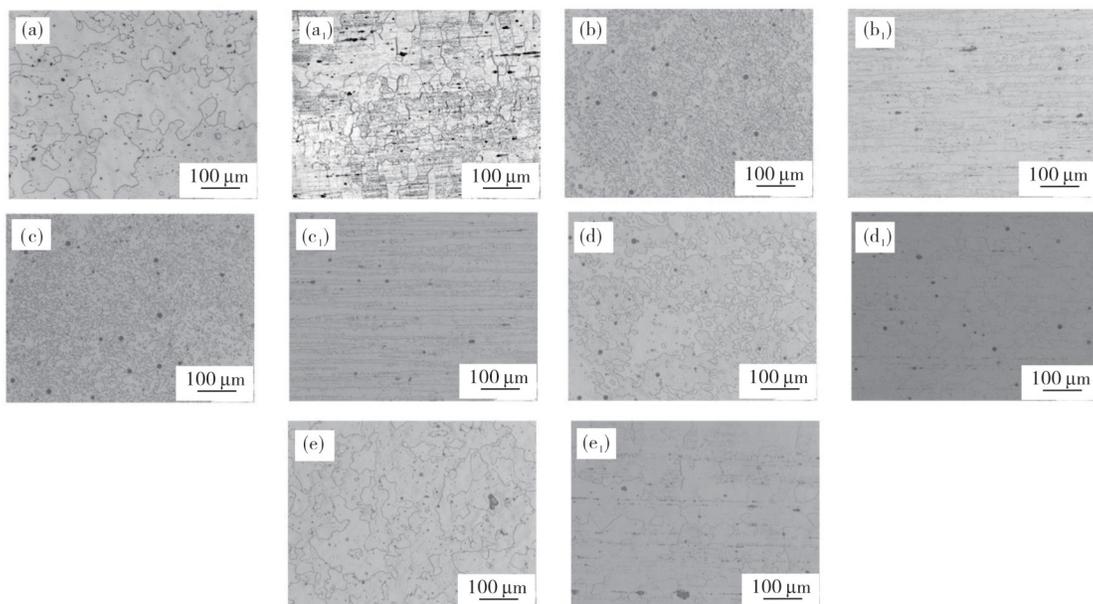
(EBSD),对铝杆试样的横、纵截面进行组织分析,使用Channel 5软件进行EBSD分析。按照国标GB/T228.1-2010的要求,将铝杆加工成拉伸试样,每种合金3组试样,在DNS200型万能电子拉伸机上进行室温拉伸试验,拉伸速度为 $2\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 。采用QJ-36型直流型双臂桥测试仪,测定铝杆的导电率。通过计算铝线试样经230℃保温1 h后恢复室温的抗拉强度与室温抗拉强度的比值,获得热保持率,通过热保持率判断合金的耐热性能。

## 2 结果与讨论

### 2.1 Zr含量对工业纯铝微观组织的影响

图1为铝锆合金横、纵截面金相组织照片。从图1可见:合金横截面金相组织,当Zr含量小于0.1%时晶粒明显的细化,但是Zr含量大于0.1%时晶粒开始变得粗大,并在Zr含量为0.2%时出现粗大的第二相;合金纵截面的金相组织,杂质相和被破碎的第二相沿着挤压方向平行分布,晶粒细化的效果和横截面观察到的结果一致,合金的晶粒尺寸呈现先减小后增大的变化规律。

采用面、点扫描方法,确定合金内部的元素分布及相的元素组成。图2为Al-Zr合金的SEM图像和面扫描结果。从图2可见,与纯铝相比,铝锆合金中仍存在Fe杂质元素。在面扫描结果中发现:当Zr



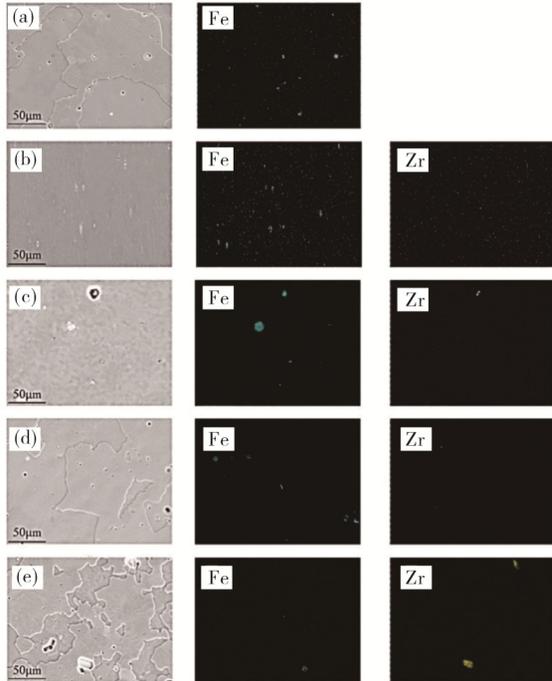
(a)和(a<sub>1</sub>) 纯铝;(b)和(b<sub>1</sub>) Al-0.05Zr;(c)和(c<sub>1</sub>) Al-0.1Zr;(d)和(d<sub>1</sub>) Al-0.15Zr;(e)和(e<sub>1</sub>) Al-0.2Zr。

(a), (a<sub>1</sub>) pure Al; (b), (b<sub>1</sub>) Al-0.05Zr; (c), (c<sub>1</sub>) Al-0.1Zr; (d), (d<sub>1</sub>) Al-0.15Zr; (e), (e<sub>1</sub>) Al-0.2Zr.

图1 Al- $x$ Zr( $x=0, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2$ )合金横、纵截面OM图像

Fig. 1 OM images of Al- $x$ Zr( $x=0, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2$ ) alloy in transverse (a-e) and longitudinal (a<sub>1</sub>-e<sub>1</sub>) sections

含量为 0.05% 时,Zr 元素分布不明显;进一步增加 Zr 含量时,Zr 元素出现在 Al 基体中且出现在粒状相中;当 Zr 含量为 0.15% 时,粒状相成分有 Al,Zr 和 Fe;当 Zr 含量为 0.2% 时,明显观察到初生 Al<sub>3</sub>Zr 脆性相。



(a) pure Al; (b) Al-0.05Zr; (c) Al-0.1Zr; (d) Al-0.15Zr; (e) Al-0.2Zr。

(a) pure Al; (b) Al-0.05Zr; (c) Al-0.1Zr; (d) Al-0.15Zr; (e) Al-0.2Zr。

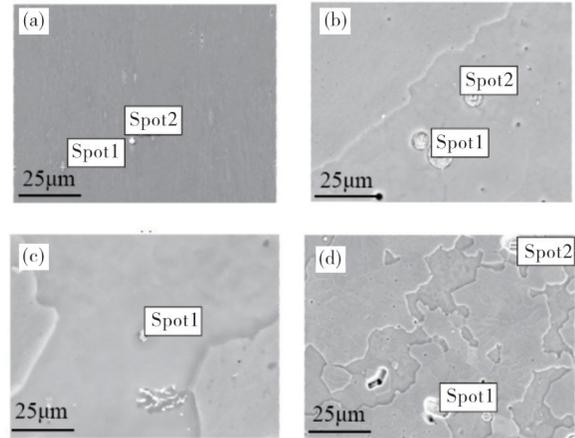
图 2 Al-xZr (x=0、0.05、0.1、0.15、0.2) 合金的 SEM 图像和面扫描结果

Fig. 2 SEM images and surface scanning results of Al-xZr (x=0, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2) alloys

分析认为:Zr 元素对合金再结晶行为有明显的抑制作用,但随着 Zr 含量的增加抑制作用减弱<sup>[7]</sup>。Zr 含量小于 0.1% 时,由于 Zr 与 Al 形成了亚稳态 Al<sub>3</sub>Zr(L1<sub>2</sub>)相<sup>[8-11]</sup>,其与母相的失配率只有 0.8%<sup>[12]</sup>,此时 Zr 元素对再结晶行为有较强的抑制作用,所以细化效果明显。而 Zr 含量大于 0.1% 时,由于 Zr 元素抑制再结晶效果减弱,再结晶晶粒开始生长并变得粗大。根据 Al-Zr 二元相图可知,当 Zr 含量超过了包晶点时,在凝固过程中会析出初生 Al<sub>3</sub>Zr 粒子<sup>[13-16]</sup>。

图 3 为 Al-xZr(x=0.05、0.1、0.15、0.2)合金的 SEM 图像和点扫描分布图,表 3 为图 3 中不同位置的 EDS 分析结果。由表 3 可知:在 Zr 含量小于

0.1% 时,由于 Zr 元素的加入合金中的 Fe 和 Si 杂质未有析出,所以基体中仍以 Al-Fe 相为主;当 Zr 含量大于 0.1% 时,由于 Zr 含量增加,Zr 原子易发生偏聚,从而形成了粗大的 Al<sub>3</sub>Zr 相。



(a)Al-0.05Zr;(b)Al-0.1Zr;(c)Al-0.15Zr;(d)Al-0.2Zr

图 3 Al-xZr(x=0.05、0.1、0.15、0.2)合金的 SEM 图像和点扫描分布图

Fig. 3 SEM image and point scan distribution map of Al-xZr (x=0.05, 0.1, 0.15, 0.2) alloy

表 3 图 3 中不同位置的 EDS 分析结果

Table 3 EDS analysis results of different positions in Fig. 3

合金	位置	元素含量(at.)/%		
		Al	Fe	Zr
Al-0.05Zr	Spot1	95.17	4.83	—
	Spot2	97.11	2.89	—
Al-0.1Zr	Spot1	83.19	16.81	—
	Spot2	86.38	13.62	—
Al-0.15Zr	Spot1	75.21	0.71	24.08
Al-0.2Zr	Spot1	50.14	—	49.86
	Spot2	57.09	—	42.01

## 2.2 Zr 含量对工业纯铝导电率的影响

图 4 为不同铝锆合金的导电率。从图 4 可见,随着 Zr 含量的增加,合金的导电率逐渐减小。当 Zr 含量为 0.05% 时合金的导电率最高为 59.8%IACS,当 Zr 含量增加至 0.2% 时合金导电率最低为 56.9%IACS。这是因为随着 Zr 含量的增加,基体中 Zr 溶质原子浓度增大,溶质原子与基体点阵错配会导致畸变场增大,这些畸变场对电子的传输起到散射作用,导致合金的导电率降低。

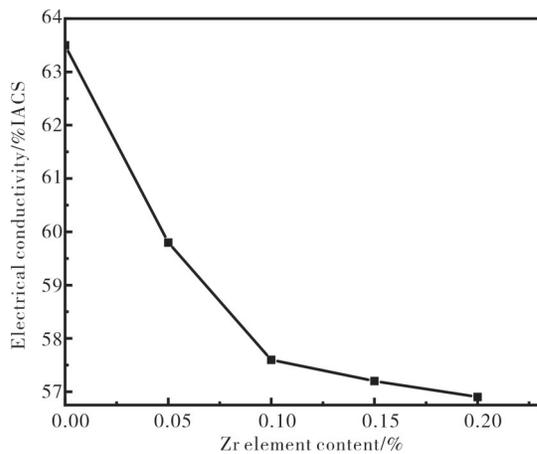


图4 Al-xZr ( $x=0, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2$ )合金的导电率  
Fig. 4 Electrical conductivity of Al-xZr ( $x=0, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2$ ) alloys

### 2.3 Zr含量对工业纯铝力学性能的影响

图5为铝锆合金的抗拉强度、屈服强度和延伸率随Zr含量增加的变化情况。从图5可见:当Zr含量小于0.1%时,合金的抗拉强度和屈服强度随着Zr含量的增加而增加,但延伸率有所降低;当Zr含量为0.1%时,合金的抗拉强度最大为92 MPa,屈服强度最大为75 MPa,但延伸率降至最低为39%;当Zr含量大于0.1%时,合金的抗拉强度和屈服强度随着Zr含量的增加而较大幅度地降低,但延伸率逐渐增加;当Zr含量为0.2%时,合金的抗拉强度最低为65 MPa,屈服强度最低为37 MPa,延伸率最大为44%。

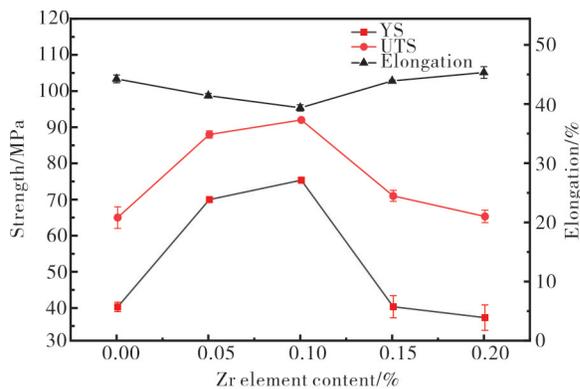


图5 Al-xZr ( $x=0, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2$ )合金的抗拉强度、屈服强度及延伸率

Fig. 5 Tensile strength, yield strength and elongation of Al-xZr ( $x=0, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2$ ) alloys

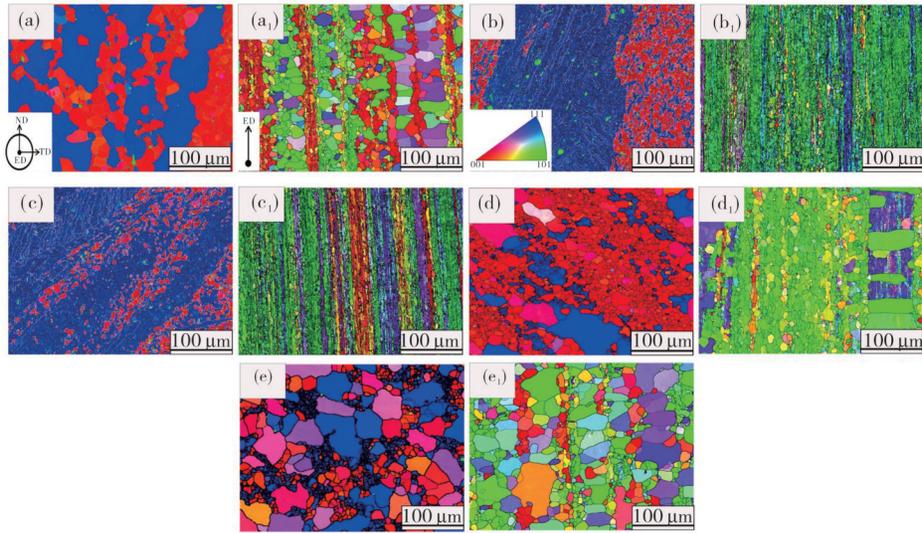
Zr元素的形态有固溶态、粗大 $Al_3Zr$ 相、亚稳态 $Al_3Zr$ 相和稳定平衡 $Al_3Zr$ 相几种形式。由于包晶反应点的Zr含量为0.11%,所以在Zr含量小于0.1%时,Zr元素会固溶到铝基体中,并且随着Zr含量的增加,固溶在Al中的Zr元素增多,在固溶强化的作用下合金的强度逐渐升高;另一方面,由于Zr元素对晶粒的细化作用,也使合金的强度有所提升。但是当Zr元素大于0.1%后,形成了Zr原子的偏聚,从而出现了粗大的 $Al_3Zr$ 相<sup>[17-19]</sup>,这种粗大的 $Al_3Zr$ 相会破坏Al基体,恶化铝合金的性能;此外,在Zr元素大于0.1%后,晶粒开始变得粗大,也会降低合金的强度。所以,在Zr元素大于0.1%时合金的抗拉强度和屈服强度均会出现明显下降。

### 2.4 Zr含量对工业纯铝织构的影响

#### 2.4.1 晶粒取向

图6为铝锆合金的晶粒取向图。从图6可见:在横截面中,Zr含量小于0.1%时晶粒取向主要为 $\langle 111 \rangle$ 取向和部分 $\langle 001 \rangle$ 取向,Zr含量增加到0.15%和0.2%时晶粒取向主要为 $\langle 001 \rangle$ 取向和少量的 $\langle 111 \rangle$ 取向;在纵截面中,合金的晶粒取向主要为 $\langle 101 \rangle$ 取向;随着Zr含量的增加,横、纵截面中的晶粒平均尺寸为先减小后增加。合金经热挤压后,横截面中晶粒主要取向为 $\langle 111 \rangle$ 和 $\langle 001 \rangle$ 取向,在纵截面中沿平行ED方向观察可以发现形成了大量的 $\langle 101 \rangle$ 取向以及少量的 $\langle 001 \rangle$ 取向。由于Zr含量小于0.1%时,Zr元素会抑制晶粒从 $\langle 111 \rangle$ 向 $\langle 001 \rangle$ 取向旋转,但是Zr含量大于0.1%后这种抑制效果减弱。

表4为铝锆合金横、纵截面中晶界角的占比,其中大角度晶界大于 $15^\circ$ 。由表4可知:Zr含量小于0.1%时,合金中的大角度晶界的比例相比于纯铝有一定程度的减小,但是随着Zr含量逐渐增加,合金中的大角度晶界比例逐渐增大;在Zr含量为0.2%时,横截面中大角度晶界占比达到49%,纵截面中大角度晶界占比达到54%。这是因为弥散分布的 $Al_3Zr$ 粒子对位错的滑移和攀移具有很强的钉扎作用,可以稳定变形组织的亚结构,阻碍位错重新排列成亚晶界及随后发展成大角度晶界的过程,但是随着Zr含量的增加,对合金再结晶程度的影响逐渐减弱,形成大角度晶界的动力增加,导致大角度晶界占比增加。



(a)和(a1) 纯 Al;(b)和(b1) Al-0.05Zr;(c)和(c1) Al-0.1Zr;(d)和(d1) Al-0.15Zr;(e)和(e1) Al-0.2Zr。  
(a), (a1) pure Al;(b), (b1) Al-0.05Zr;(c), (c1) Al-0.1Zr;(d), (d1) Al-0.15Zr;(e), (e1) Al-0.2Zr.

图 6 Al-xZr(x=0,0.05,0.1,0.15,0.2)合金横(a至e)、纵(a1至e1)截面晶粒取向

Fig. 6 Transverse (a-e) and longitudinal (a1-e1) grain orientation of Al-xZr(x=0, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2) alloy

表 4 横、纵截面晶界角度占比

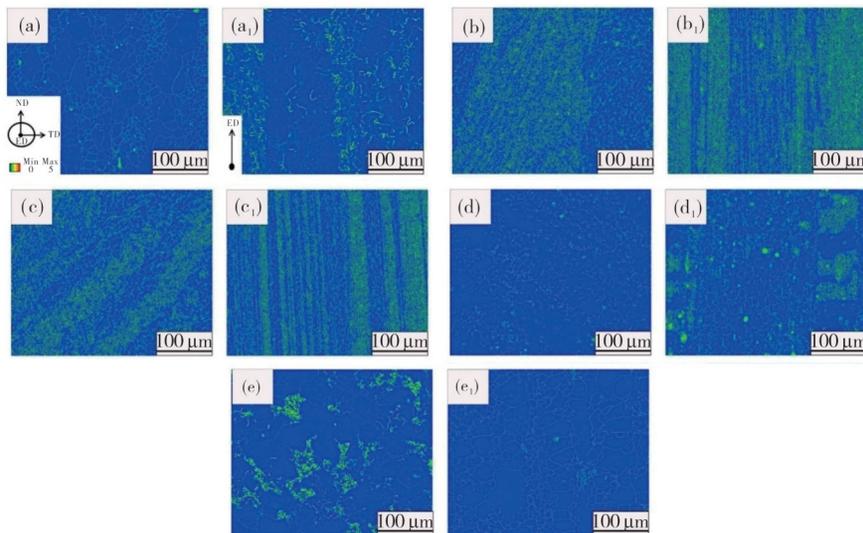
Table 4 Grain boundary angle ratio of transverse and longitudinal sections

合金	小于5°占比/%		5~15°占比/%		大于15°占比/%	
	横截面	纵截面	横截面	纵截面	横截面	纵截面
纯铝	37	20	28	32	35	48
Al-0.05Zr	31	21	36	21	33	43
Al-0.1Zr	35	23	34	37	34	44
Al-0.15Zr	39	20	48	30	45	50
Al-0.2Zr	21	27	30	29	49	54

### 2.4.2 KAM图

图7为铝锆合金横、纵截面的KAM(Kernel average misorientation, KAM)图。从图7可见:在横截面中,Zr含量小于0.1%时合金内部位错密度较大且主要集中在<111>晶粒取向和晶粒较小的区域,当Zr含量大于0.1%时内部位错密度开始减小;在纵截面中,位错密度较大的区域其晶粒比较细小,即位错均集中出现在晶粒小的区域。

当Zr含量小于0.1%时,合金内部位错密度明



(a)和(a1) 纯铝;(b)和(b1) Al-0.05Zr;(c)和(c1) Al-0.1Zr;(d)和(d1) Al-0.15Zr;(e)和(e1) Al-0.2Zr。

(a), (a1) pure Al;(b), (b1) Al-0.05Zr;(c), (c1) Al-0.1Zr;(d), (d1) Al-0.15Zr;(e), (e1) Al-0.2Zr.

图 7 Al-xZr(x=0,0.05,0.1,0.15,0.2)合金横(a至e)、纵(a1至e1)截面KAM图

Fig. 7 KAM images of Al-xZr(x=0, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2) alloy in transverse (a-e) and longitudinal (a1-e1) sections

显增大,这是由于在加入Zr元素后由于晶粒细化的作用,使得合金内部位错密度较大。但是当Zr元素大于0.1%,由于Zr元素抑制再结晶效果的减弱,晶粒变得粗大,合金内部位错密度开始减小。同时,在横截面中位错密度大的区域晶粒取向均为 $\langle 111 \rangle$ 取向, $\langle 111 \rangle$ 取向产生的越多,则位错密度就越大,进而使得 $\langle 111 \rangle$ 取向织构对合金强度的增加有一定的贡献。

#### 2.4.3 ODF图和正极图

图8和图9分别为铝锆合金横截面和纵截面的ODF(恒 $\Phi_2$ 截面)图。从图8可见:在横截面中,纯铝的织构组分为 $\langle 100 \rangle // ED$ 和 $\langle 110 \rangle // ED$ ;当Zr含量小于0.1%时,合金的织构组分为 $\langle 110 \rangle // ED$ , $\langle 100 \rangle // ED$ 和 $\langle 111 \rangle // ED$ ;当Zr含量大于0.1%时,恒 $\Phi_2$ 截面上 $\langle 111 \rangle // ED$ 会消失。从图9可见:在纵截面中,纯铝的织构组分为Cube,Brass,

$\langle 111 \rangle // ED$ , $\langle 110 \rangle // ED$ 和 $\langle 100 \rangle // ED$ 织构;当Zr含量小于0.15%时,合金中织构组分为Brass, $\langle 110 \rangle // ED$ , $\langle 100 \rangle // ED$ 和 $\langle 111 \rangle // ED$ ;在Zr含量为0.2%时,合金恒 $\Phi_2$ 截面上织构组分在原有的基础上又增加了Cube织构。

由于Al在的滑移面和滑移方向为别为 $\{100\}$ 和 $\langle 110 \rangle$ ,晶体在这个滑移系上滑移所需的点阵阻力最小,在热挤压过程中形成了 $\langle 110 \rangle // ED$ 织构,同时存在较强的 $\langle 111 \rangle$ 和较弱的 $\langle 100 \rangle$ 取向织构。在横截面中,在Zr含量小于1%时,加入Zr元素抑制了 $\langle 100 \rangle$ 织构的形成,但是在Zr含量大于0.1%时,Zr对 $\langle 100 \rangle$ 织构的抑制效果减弱,织构组分又再次转变成为 $\langle 100 \rangle // ED$ 和 $\langle 110 \rangle // ED$ 。在纵截面中,当Zr含量为0.2%时,晶体内部开始形成了Cube再结晶织构,这种再结晶织构使合金的强度降低。

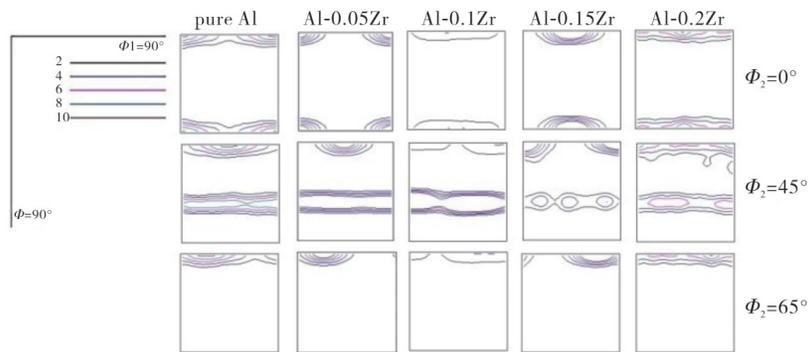


图8 Al- $x$ Zr ( $x=0, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2$ )合金横截面ODF图

Fig. 8 ODF diagram of transverse sections for Al- $x$ Zr ( $x=0, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2$ ) alloys

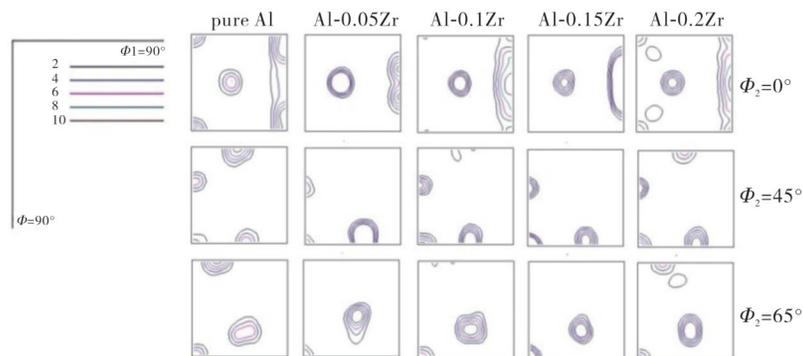


图9 Al- $x$ Zr ( $x=0, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2$ )合金横截面ODF图

Fig. 9 ODF diagram of longitudinal sections for Al- $x$ Zr ( $x=0, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2$ ) alloys

图10为铝锆合金横、纵截面的正极图。从图10可见:在横截面中,当Zr含量小于0.1%时, $\{100\}$ 面取向密度的分布比较分散且织构强度逐渐减小,而 $\{111\}$ 面取向密度的分布较为集中且织构强度开始增大;当Zr含量大于0.1%时, $\{100\}$ 面取向密度的

分布比较集中且织构强度开始增大,而 $\{111\}$ 面取向密度的分布开始分散且织构强度开始减弱。从图10还可见,在纵截面中,合金的 $\{100\}$ 面和 $\{111\}$ 面取向密度分布在TD方向的两级边缘,其织构强度的变化规律与横截面一致。

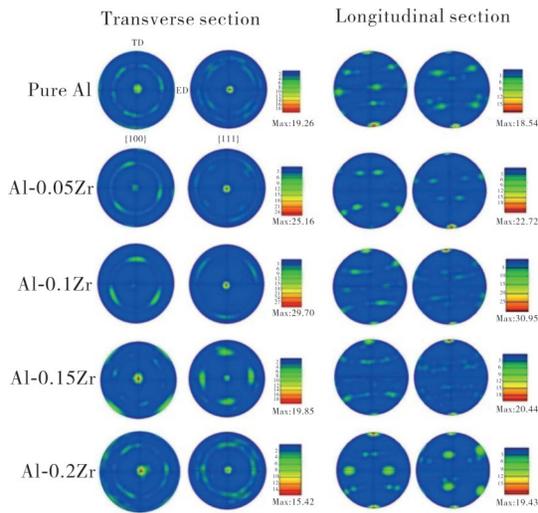


图 10 Al-xZr (x=0、0.05、0.1、0.15、0.2)合金横、纵截面正极图

Fig. 10 PF diagram of transverse and longitudinal sections for Al-xZr (x=0, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2) alloys

当 Zr 含量小于 0.1% 时, {100} 面的织构强度较弱, 晶体越难滑移, 这是 Zr 元素的加入使铝发生了晶格畸变所导致的, 所以合金能展现出优良的力学性能。当 Zr 含量大于 0.1% 时, {100} 面的织构强度

较强, 晶体越易滑移, 这是 Zr 含量增加更易与 Al 形成了粗大的 Al<sub>3</sub>Zr 相, 晶粒细化作用减弱, 导致合金力学性能下降。因此, 通过设计 Zr 的含量调控工业纯铝 {100} 面织构, 可以改善铝合金的力学性能。

### 2.5 Zr 含量对工业纯铝耐热性能的影响

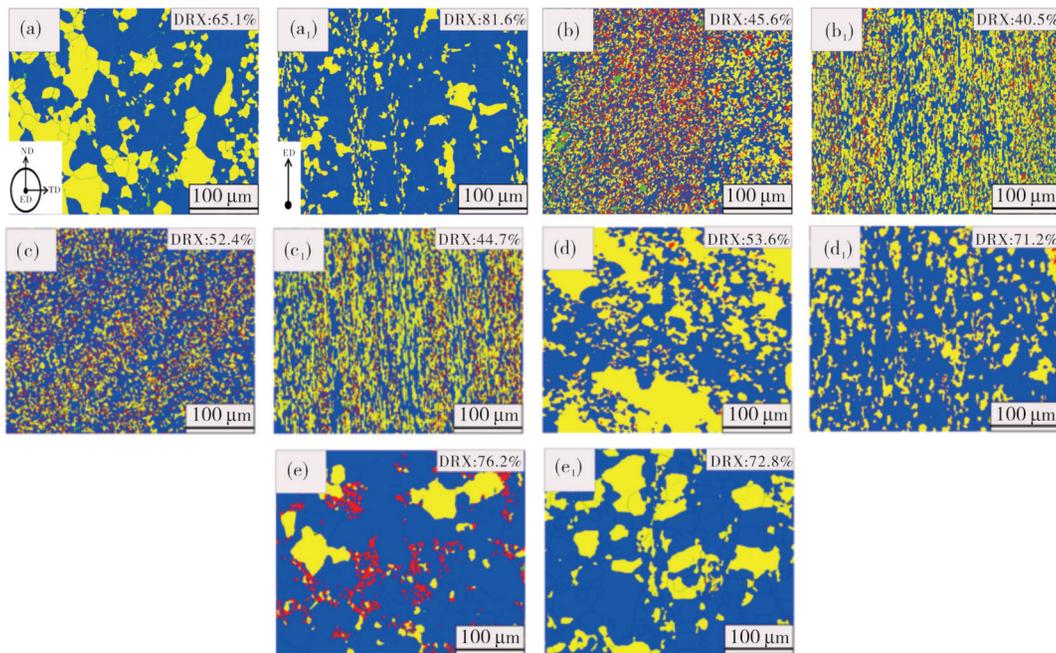
表 5 为 Al-xZr 的耐热性能。由表 5 可知, 工业纯铝热保持率为 83.7%, 在工业纯铝中加入 0.05% 的 Zr 后, 合金的热保持率达到最大值 93.9%, 然后随着 Zr 含量的增加, 合金的耐热性能逐渐下降。

表 5 Al-xZr (x=0、0.05、0.1、0.15、0.2)合金耐热性能测试结果

Table 5 Heat resistance test of Al-xZr (x= 0, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2) alloy

Alloy	$\sigma_{RT}/\text{MPa}$	$\sigma(230\text{ }^\circ\text{C})/\text{MPa}$	热保持率/%
Pure Al	141	118	83.7
Al-0.05Zr	165	155	93.9
Al-0.1Zr	172	158	91.9
Al-0.15Zr	155	136	87.7
Al-0.2Zr	147	123	83.7

铝锆合金的耐热性能和再结晶行为密切相关<sup>[7]</sup>。图 11 为 Al-xZr (x=0、0.05、0.1、0.15、0.2)



(a)和(a1)纯铝;(b)和(b1)Al-0.05Zr;(c)和(c1)Al-0.1Zr;(d)和(d1)Al-0.15Zr;(e)和(e1)Al-0.2Zr。  
(a, a1) pure Al; (b, b1) Al-0.05Zr; (c, c1) Al-0.1Zr; (d, d1) Al-0.15Zr; (e, e1) Al-0.2Zr.

图 11 Al-xZr (x=0、0.05、0.1、0.15、0.2)合金横(a~e)、纵(a1~e1)截面的动态再结晶图

Fig. 11 Dynamic recrystallization diagram of Al-xZr (x=0, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2) alloys in transverse (a-e) and longitudinal (a1-e1) sections

合金的动态再结晶图。从图 11 可见:当 Zr 含量小于 0.1% 时,Zr 对 DRX(动态再结晶)的抑制作用较显著;当 Zr 含量大于 0.1% 时,Zr 对合金 DRX 过程的影响减弱,使得合金的 DRX 体积分数开始增大。分析认为:一方面,由于 Zr 元素有抑制纯铝再结晶的作用,并且 Zr 与 Al 的原子半径相差较大,添加 Zr 原子会使基体发生晶格畸变,而晶格畸变引起合金内能增高,微观应力增大,阻碍位错滑移变形以及晶界的迁移,从而阻碍合金的再结晶过程;另一方面,根据单位面积上晶界所受阻力的公式  $F/A=3f\gamma_b/2r$ <sup>[20]</sup> ( $F/A$  为单位面积上晶界所受阻力,  $f\gamma_b$  为第二相体积分,  $r$  为第二相颗粒半径),第二相颗粒体积分数越大,颗粒越细小,  $F/A$  值就越大,该颗粒对晶界迁移所施加的阻力越大,弥散的  $Al_3Zr$  粒子具备阻碍晶界迁移的条件,因此再结晶过程受阻。表明 DRX 体积分数越小,合金耐热性能越好。

### 3 结论

(1)随着 Zr 含量的增加,合金的平均晶粒尺寸先减小后增大,Zr 含量小于 0.1% 时,对工业纯铝具有明显的晶粒细化作用,而 Zr 含量大于 0.1% 时,由于抑制再结晶的效果减弱,晶粒变得粗大。

(2)随着 Zr 含量的增加,合金导电率逐渐减小,合金导电率从 59.8%IACS 降低至 56.9%IACS。Zr 含量为 0.05% 时,合金的热保持率达到最大值 93.9%,随着 Zr 含量继续增加,合金的热保持率逐渐下降,表明合金的耐热性能逐渐下降。

(3)当 Zr 含量小于 0.1% 时,合金的抗拉强度随着 Zr 含量的增加而增加,在 Zr 含量为 0.1% 时,合金平均抗拉强度最大值达到 92 MPa,平均屈服强度达到 75 MPa,但是延伸率降低至 39%;当 Zr 含量大于 0.1% 时,合金的抗拉强度随着 Zr 含量的增加而减小,在 Zr 含量为 0.2% 时,合金平均抗拉强度最低值为 65 MPa,平均屈服强度最低值为 37 MPa,而延伸率达到最大值 44%。

(4)当 Zr 含量小于 0.1% 时,合金的 {100} 面织构强度随着 Zr 含量的增加而减弱,对 Cube 织构的抑制效果较强;当 Zr 含量大于 0.1%,合金的 {100} 面织构强度随着 Zr 含量的增加而增加,对 Cube 织构抑制效果减弱。当 Zr 含量为 0.1% 时, {100} 面织构强度最小,而当 Zr 含量为 0.2% 时, {100} 面织构强度最大。

### 参考文献:

- [1] 方振邦,王若民,李宸宇,等.高导耐热铝合金导线的人工时效及其低周疲劳性能[J].材料热处理学报,2022,43(2):41-48.
- [2] 赵立洋,贾伟,张恒,等.耐热导电铝合金耐热性能改善的研究[J].特种铸造及有色合金,2021,41(10):1232-1234.
- [3] 张强,杨长龙,韩钰,等.耐热铝合金导线综述[J].热加工工艺,2018,47(22):35-37.
- [4] 韩钰,夏延秋,刘东雨,等.微量 Zr,Er 对导线用耐热铝合金性能的影响[J].金属热处理,2015,40(7):71-73.
- [5] 蒋炜华,李昊,张乃保.Zr 元素对耐热铝合金导线组织和性能的影响[J].热加工工艺,2018,47(8):71-73.
- [6] 侯雅尘,杨晟,蔡彬,等.Er,Zr 和 B 对耐热铝合金组织和性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2019,37(05):550-553.
- [7] 王秀芳.Zr 元素对铝合金导线组织及性能的影响[D].太原:太原理工大学,2011.
- [8] SRIVATSAN T S, SRIRAM S, VEERARAGHAVAN D, et al. Microstructure, tensile deformation and fracture behaviour of aluminium alloy 7055 [J]. Journal of Materials Science, 1997, 32(11): 2883-2894.
- [9] HIDEO YOSHIDA, YOSHIO BABA. The role of zirconium to improve strength and stress-corrosion resistance of Al-Zn-Mg and Al-Zn-Mg-Cu alloys [J]. Transactions of the Japan Institute of Metals, 1982, 23(10): 620-630.
- [10] NES E. Precipitation of the metastable cubic  $Al_3Zr$  phase in subperitectic Al-Zr alloys [J]. Acta Metallurgica, 1972, 20(4): 499-506.
- [11] ZHANG J C, DING D Y, ZHANG W L, et al. Effect of Zr addition on microstructure and properties of Al-Mn-Si-Zn based alloy [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(12): 3872-3878.
- [12] 谢优华,杨守杰,戴圣龙,等.锆元素在铝合金中的应用[J].航空材料学报,2002,22(04):56-61.
- [13] KIKUCHI S, YAMAZAKI H, OTSUKA T. Peripheral-recrystallized structures formed in Al-Zn-Mg-Cu-Zr alloy materials during extrusion and their quenching sensitivity [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1993, 38(4): 689-701.
- [14] DORWARD R C, BEERNTSEN D J. Grain structure and quench-rate effects on strength and toughness of AA7050 Al-Zn-Mg-Cu-Zr alloy plate [J]. Metallurgical Transactions A, 1995, 26(9): 2481-2483.
- [15] RYUM N. Precipitation and recrystallization in an Al-

- 0.5wt.%Zr-alloy[J]. *Acta Metallurgica*, 1969, 17(3): 269-278.
- [16] RYSTAD S, RYUM R. A metallographical investigation of the precipitation and recrystallization process in an Al-Zr alloy [J]. *Aluminium*, 1977, 53(3): 193-195.
- [17] ZHANG Y, BETTLES C, ROMETSCH P A. Effect of recrystallisation on  $Al_3Zr$  dispersoid behaviour in thick plates of aluminium alloy AA7150 [J]. *Journal of Materials Science*, 2014, 49(4): 1709-1715.
- [18] KHVAN A V, ESKIN D G, STARODUB K F, et al. New insights into solidification and phase equilibria in the Al- $Al_3Zr$  system: Theoretical and experimental investigations [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 743: 626-638.
- [19] BELOV N A, ALABIN A N, TELEUOVA A R. Comparative analysis of alloying additives as applied to the production of heat-resistant aluminum-base wires [J]. *Metal Science and Heat Treatment*, 2012, 53(9): 455-459.
- [20] NES E. Precipitation of the metastable cubic  $Al_3Zr$  phase in subperitectic Al-Zr alloys [J]. *Acta Metallurgica*, 1972, 20(4): 499-506.

## Effect of Zr Content on Microstructure and Properties of Commercial Pure Aluminum

WANG Zhen<sup>1,2</sup>, GAN Chunlei<sup>1</sup>, LI Feng<sup>2</sup>, ZHOU Nan<sup>1</sup>

(1. Institute of New Materials, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

**Abstract:** In order to develop high-performance heat resistant aluminum zirconium alloy, four kinds of aluminum alloys with different Zr contents were prepared by gravity casting and hot extrusion. The effect of Zr (0.05~0.2wt.%) on the microstructure and properties of pure industrial aluminum was studied by optical microscope, scanning electron microscope, tensile machine, and conductometer. The results show that when the Zr content is low, the microstructure refinement effect is remarkable. With the increase of Zr content, the refinement effect declines, and the coarse  $Al_3Zr$  phase appears. When the Zr content is 0.1wt.%, the alloy has the best tensile properties, and the texture of the  $\{100\}$  plane is the weakest, which has the strongest effect on the inhibition of cubic texture. When Zr is not added, the alloy has the highest conductivity. When Zr content is 0.05wt.%, the electrical conductivity of the alloy ranks second, and the heat resistance is best.

**Key words:** Zr content; pure industrial aluminum; microstructure; mechanical properties; texture; heat resistance

(学术编辑:宋琛)