



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 115287504 A

(43) 申请公布日 2022. 11. 04

(21) 申请号 202211011265.2

B22F 3/14 (2006.01)

(22) 申请日 2022.08.23

B22F 3/15 (2006.01)

(71) 申请人 中南大学

B22F 9/08 (2006.01)

地址 410083 湖南省长沙市岳麓区麓山南路932号

G22C 1/04 (2006.01)

(72) 发明人 江勇 陆盛 吴华建

(74) 专利代理机构 长沙瀚顿知识产权代理事务所(普通合伙) 43223

专利代理师 吴亮 朱敏

(51) Int. Cl.

G22C 21/00 (2006.01)

G22F 1/04 (2006.01)

B22F 1/054 (2022.01)

B22F 3/02 (2006.01)

B22F 3/105 (2006.01)

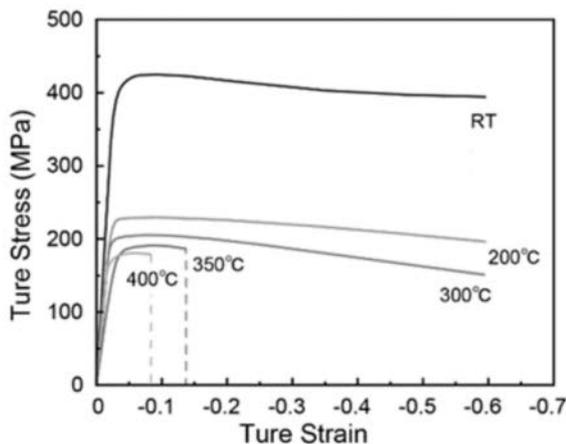
权利要求书2页 说明书7页 附图2页

(54) 发明名称

一种新型轻质Al-Sc-Zr-Y-O耐热铝合金及其制备方法

(57) 摘要

本发明提供了一种新型轻质Al-Sc-Zr-Y-O耐热铝合金及其制备方法,通过粉末冶金方式制备,主要在晶内形成大量弥散分布的Y-Zr-O和Y-Al-O纳米氧化物相和Al₃(Sc,Zr)复合相,其中,所述Y-Zr-O和Y-Al-O纳米氧化物相的粒度为4~50nm,数密度为1~3×10¹⁵个/m²,所述Al₃(Sc,Zr)复合相粒度为3~20nm,数密度为2~4×10¹⁸个/m².获得物理比重为2.73~2.74g/cm³的轻质Al-Sc-Zr-Y-O耐热铝合金.通过轻量元素Sc、Y和中等比重元素Zr的微量添加,使得耐热铝合金的物理比重显著减小,确保轻质优势;通过粉末冶金制备,弥散析出氧化物相Y-Zr-O、Y-Al-O以及复合相L1₂-Al₃(Sc,Zr),它们本身是热稳定性更高的增强相,以晶内为主的大量弥散析出,不仅使铝合金获得更高的高温强度,同时保证了铝合金的优良塑韧性,而且第二相不导电,确保高的耐腐蚀性。



1. 一种新型轻质Al-Sc-Zr-Y-O耐热铝合金的制备方法,其特征在于,包括以下步骤:

步骤S1,预处理:将Al-Sc合金铸锭进行气雾化处理,得到Al-Sc合金粉末,粒径为5~30 μm ;

步骤S2,球磨混料:按重量百分比计微合金化成分:Sc 0.1~0.5%,Zr 0.3~0.6%,Y 0.2~1%,O 0.01~0.25%,余量为Al和不可避免的杂质;将含Y粉末、含Zr粉末和所述Al-Sc合金粉末装入高速摆振球磨机,在惰性气体保护下充分混合,得到混合粉末;其中,含Y粉末平均粒径为1~20 μm ,含Zr粉末平均粒径为5~20 μm ;

步骤S3,机械合金化处理:将所述混合粉末在惰性气体保护下进行机械合金化处理,Sc、Y、Zr、O以原子形式回溶进铝基体,形成过饱和固溶体的机械合金化粉末;

步骤S4,致密化处理:将所述机械合金化粉末冷压成坯块,装入包套抽真空,采用热挤压/热等静压/放电等离子体烧结方式进行致密化处理,得到铝合金块体,此时铝基体中过饱和的Y、Zr、O溶质原子重新析出,主要在晶内形成大量弥散分布的Y-Zr-O和Y-Al-O纳米氧化物相,其中,所述Y-Zr-O和Y-Al-O纳米氧化物相的粒度为4~50nm,数密度为 $1\sim 3\times 10^{15}$ 个/ m^2 ;

步骤S5,时效热处理:将所述铝合金块体进行时效热处理,Sc、Zr溶质原子进一步析出,在晶内形成大量细小弥散分布的 $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ 复合相,所述 $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ 复合相粒度为3~20nm,数密度为 $2\sim 4\times 10^{18}$ 个/ m^2 ;

由此,获得物理比重为2.73~2.74g/ cm^3 的Al-Sc-Zr-Y-O耐热铝合金。

2. 根据权利要求1所述的一种新型轻质Al-Sc-Zr-Y-O耐热铝合金的制备方法,其特征在于,所述Y-Zr-O和Y-Al-O纳米氧化物相,是以 $\text{Y}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 和 YAlO_3 为主的高热稳定性的三元氧化物。

3. 根据权利要求1所述的一种新型轻质Al-Sc-Zr-Y-O耐热铝合金的制备方法,其特征在于,所述 $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ 复合相,是纳米尺度、高热稳定性的 $\text{L}1_2$ 结构。

4. 根据权利要求1所述的一种新型轻质Al-Sc-Zr-Y-O耐热铝合金的制备方法,其特征在于,步骤S2中,所述含Y粉末、含Zr粉末为 YH_2 粉末和 ZrO_2 粉末、 Y_2O_3 粉末和 ZrH_2 粉末、 Y_2O_3 粉末和 ZrO_2 粉末这三种组合中的一种。

5. 根据权利要求1所述的一种新型轻质Al-Sc-Zr-Y-O耐热铝合金的制备方法,其特征在于,步骤S2中,所述高速摆振球磨机的振动时间为1~2h,振动频率为1300-1500Hz。

6. 根据权利要求1所述的一种新型轻质Al-Sc-Zr-Y-O耐热铝合金的制备方法,其特征在于,步骤S3中,所述机械合金化处理中采用的是全方位行星球磨机,盘面转速为300~500rpm,纵向转速10~20rpm,球料质量比为10~15:1,球磨时间为20~48h;且每球磨15~30min,停机5~10min。

7. 根据权利要求1所述的一种新型轻质Al-Sc-Zr-Y-O耐热铝合金的制备方法,其特征在于,步骤S4中,所述冷压是在冷压机中进行,压力为20~40MPa,保压1~2h;所述包套抽真空,真空度为 2×10^{-3} Pa。

8. 根据权利要求1所述的一种新型轻质Al-Sc-Zr-Y-O耐热铝合金的制备方法,其特征在于,步骤S4中,所述热等静压烧结方式,压强为150~200MPa,保压时间4~6h,温度为400~600 $^{\circ}\text{C}$ 。

9. 根据权利要求1所述的一种新型轻质Al-Sc-Zr-Y-O耐热铝合金的制备方法,其特征

在于,步骤S5中,所述时效热处理是指,时效温度为375~425℃,时效时间为6~12h。

10.一种根据权利要求1-9任一项的新型轻质Al-Sc-Zr-Y-O耐热铝合金的制备方法制备的新型轻质Al-Sc-Zr-Y-O耐热铝合金,其特征在于,弥散增强铝基体的纳米相包括所述 $Y_2Zr_2O_7$ 和 $YA1O_3$,同时还包括 $L1_2$ 结构的所述 $Al_3(Sc,Zr)$ 复合相。

一种新型轻质Al-Sc-Zr-Y-O耐热铝合金及其制备方法

技术领域

[0001] 本发明涉及合金材料技术领域,具体涉及一种新型轻质Al-Sc-Zr-Y-O耐热铝合金及其制备方法。

背景技术

[0002] 铝合金因具有优异的比强度、塑性和抗腐蚀、易加工成形等特点,被广泛应用于航空航天、交通等领域。大多数铝合金属于析出强化型合金,主要依赖于基体中大量、弥散析出的第二相,有效阻碍位错和晶界的运动,实现高的合金强度。然而,铝合金服役温度被普遍限制在200℃以下,主要原因是铝合金中常见析出相在200℃以上均容易发生粗化,对位错和晶界的阻碍能力大大降低,导致强化效果急剧下降。耐热变形铝合金能在较高温度下使用而不软化,依然保持高强度和一定的塑韧性。

[0003] 目前常见的耐热铝合金主要包括Al-Cu系、Al-Si系、Al-Fe系等。其中,Al-Cu系析出的主要强化第二相为 Ω 相(Al_2Cu),其表面被Mg、Ag原子包覆,可以有效抑制其粗化,同时塑韧性较好,可以作为变形耐热合金使用,但自身热稳定性有限,高温下会回溶,一般使用温度不超过250℃;Al-Si系析出的金属硅化物第二相(Al-X-Si),自身热稳定性很高,但容易粗化,尤其是晶界上粗化速度快,导致合金塑韧性较差,一般只作为铸造铝合金使用。Al-Fe系目前主要包含Al-Fe-Ce和Al-Fe-Si两大类,由于合金化含量较高,一般需要采用快速凝固和粉末冶金制造。最典型的Al-Fe-V-Si系列合金,能够生成扩散慢但热稳定性高的 $Al_{12}(Fe,X)_3Si$ 为主的第二相,使用温度可达300℃以上,其中300℃屈服强度可达170~270MPa左右,但塑韧性一般,最大伸长率7~17%。由于Fe、Mn、Ce、Zn等重金属元素的添加总量较高(一般8~15wt%),Al-Fe-V-Si耐热合金的比重一般达3.0~3.5g/m³,严重削弱了铝基体的轻质优势,而且Fe、Si、Ce等都是晶界强偏析元素,金属硅化物在晶界上析出较多,会降低铝合金的塑韧性,并且金属硅化物一般具有较好的导电性,容易与铝基体之间形成微电池腐蚀,严重危害铝合金的抗腐蚀性能。

[0004] 针对上述耐热铝合金的物理比重大、塑韧性不够高、抗腐蚀性能不足的技术问题,研发高性能的变形耐热铝合金,就要求铝合金不仅能够在更高温度下保持足够高的强度,同时尽可能保持铝合金良好的塑韧性、低的物理比重、耐腐蚀等优势。

[0005] 在上述技术问题引导下,研发高性能的变形耐热铝合金,必须为铝基体设计四条:(1)轻质的、固溶度极限较低的合金化元素;(2)热稳定性高且不易粗化的第二相;(3)第二相在晶内和晶界同时析出,但需要以晶内为主,且分布均匀、弥散,具有高的析出数密度、低的析出尺度、以及良好的界面结合;(4)第二相粒子与铝基体之间尽可能减少微电池腐蚀的倾向。

发明内容

[0006] 针对背景技术中存在的技术问题,本发明提供了一种新型轻质Al-Sc-Zr-Y-O耐热铝合金及其制备方法,通过轻金属元素Sc和中比重元素Y、Zr的微量添加,使得耐热铝合金

的物理比重显著减小,确保轻质优势;通过粉末冶金制备,弥散析出氧化物相Y-Zr-O、Y-Al-O以及复合相 $L1_2$ - Al_3 (Sc,Zr),它们本身是热稳定性更高的增强相,以晶内为主的大量弥散析出,不仅使铝合金获得更高的高温强度,同时保证了铝合金的优良塑韧性,而且氧化物第二相不导电,可以确保高的耐腐蚀性;刻意添加的O元素,以Zr氧化物或Y氧化物为携氧剂方式进行添加,可以准确控制合金中的O含量,使铝基体不会发生直接氧化,却能够使超饱和固溶的Zr和Y原子在铝基体中得到优先氧化。

[0007] 为实现上述目的,本发明采用如下技术方案:

[0008] 提供一种新型轻质Al-Sc-Zr-Y-O耐热铝合金的制备方法,其特征在于,包括以下步骤:

[0009] 步骤S1,预处理:将Al-Sc合金铸锭进行气雾化处理,得到Al-Sc合金粉末,粒径为5~30 μ m;

[0010] 步骤S2,球磨混料:按重量百分比计微合金化成分:Sc 0.1~0.5%,Zr 0.3~0.6%,Y 0.2~1%,O 0.01~0.25%,余量为Al和不可避免的杂质;将含Y粉末、含Zr粉末和所述Al-Sc合金粉末装入高速摆振球磨机,在惰性气体保护下充分混合,得到混合粉末;其中,含Y粉末平均粒径为1~20 μ m,含Zr粉末平均粒径为5~20 μ m;

[0011] 步骤S3,机械合金化处理:将所述混合粉末在惰性气体保护下进行机械合金化处理,Sc、Y、Zr、O以原子形式回溶进铝基体,形成过饱和固溶体的机械合金化粉末;

[0012] 步骤S4,致密化处理:将所述机械合金化粉末冷压成坯块,装入包套抽真空,采用热挤压/热等静压/放电等离子体烧结方式进行致密化处理,得到铝合金块体,此时铝基体中过饱和的Y、Zr、O溶质原子重新析出,主要在晶内形成大量弥散分布的Y-Zr-O和Y-Al-O纳米氧化物相,其中,所述Y-Zr-O和Y-Al-O纳米氧化物相的粒度为4~50nm,数密度为1~3 $\times 10^{15}$ 个/ m^2 ;

[0013] 步骤S5,时效热处理:将所述铝合金块体进行时效热处理,Sc、Zr溶质原子进一步析出,在晶内形成大量细小弥散分布的 Al_3 (Sc,Zr)复合相,所述 Al_3 (Sc,Zr)复合相粒度为3~20nm,数密度为2~4 $\times 10^{18}$ 个/ m^2 ;

[0014] 由此,获得物理比重为2.73~2.74g/ cm^3 的Al-Sc-Zr-Y-O耐热铝合金。

[0015] 进一步地,所述Y-Zr-O和Y-Al-O纳米氧化物相,是以 $Y_2Zr_2O_7$ 和 $YAlO_3$ 为主的高热稳定性的三元氧化物。

[0016] 进一步地,所述 Al_3 (Sc,Zr)复合相,是纳米尺度、高热稳定性的 $L1_2$ 结构。

[0017] 进一步地,步骤S2中,所述含Y粉末、含Zr粉末为 YH_2 粉末和 ZrO_2 粉末、 Y_2O_3 粉末和 ZrH_2 粉末、 Y_2O_3 粉末和 ZrO_2 粉末这三种组合中的一种。

[0018] 进一步地,步骤S2中,所述高速摆振球磨机的振动时间为1~2h,振动频率为1300-1500Hz。

[0019] 进一步地,步骤S3中,所述机械合金化处理中采用的是全方位行星球磨机,盘面转速为300~500rpm,纵向转速10~20rpm,球料质量比为10~15:1,球磨时间为20~48h;且每球磨15~30min,停机5~10min。

[0020] 进一步地,步骤S4中,所述冷压是在冷压机中进行,压力为20~40MPa,保压1~2h;所述包套抽真空,真空度达到 2×10^{-3} Pa。

[0021] 进一步地,步骤S4中,所述热等静压烧结方式,压强为150~200MPa,保压时间4~

6h,温度为400~600℃。

[0022] 进一步地,步骤S5中,所述时效热处理是指,时效温度为375~425℃,时效时间为6~12h。

[0023] 本发明还提供一种根据新型轻质Al-Sc-Zr-Y-O耐热铝合金的制备方法制备的新型轻质Al-Sc-Zr-Y-O耐热铝合金,其特征在于,弥散增强铝基体的纳米相包括所述 $Y_2Zr_2O_7$ 和 $YA1O_3$,同时还包括 $L1_2$ 结构的所述 $Al_3(Sc,Zr)$ 复合相。

[0024] 进一步地,所述Al-Sc-Zr-Y-O耐热铝合金的物理比重仅为2.73~2.74g/cm³。

[0025] 本发明的设计思路:

[0026] (1) 针对前述耐热铝合金设计的第一条,如何选择理想的合金化元素以析出合适的氧化物第二相。为突出铝合金的轻质优势,一方面,应尽可能避免添加比重大的合金化元素。Fe、Mn、Ce、Ni、Co、V、Cu等元素为常见耐热铝合金的添加元素,且添加总量要求较高,都不在本发明的设计考察范围内。即便是添加中等比重的合金化元素,也限定只能为微量添加。另一方面,Al对O的亲合力很强,可以形成很强的化学键,在广泛的温度区间能形成多种不同晶型的氧化铝(包括 γ 、 η 、 θ 、 α 、 δ 等),其中 α - Al_2O_3 热稳定性最高,常作为高温熔炼坩埚使用。与Al一样,很多过渡族或稀土元素都可以形成热稳定性高的自身氧化物,但由于Al的氧化能力很强(尤其是Al粉末极易氧化),在限定只能微量添加的条件下,这些元素是否能够在周边包围着Al基体的环境中优先氧化,形成大量的氧化物且稳定地存在,有复杂苛刻的热力学和动力学要求,这是难以简单判断的。本发明选择了微量的、较低比重的Sc和中等比重的Y、Zr元素,在铝合金中可以实现高数密度、低纳米尺度、高热稳定性、与基体界面结合好的三元(Y-Zr-O和Y-Al-O)纳米氧化物和复合结构的 $L1_2$ - $Al_3(Sc,Zr)$ 纳米颗粒的均匀、弥散析出。其中三元Y-Zr-O和Y-Al-O氧化物相比二元的 Al_2O_3 、 ZrO_2 和 Y_2O_3 ,三元包壳结构 $L1_2$ - $Al_3(Sc,Zr)$ 相比二元的 $L1_2$ - Al_3Sc 和 $L1_2$ - Al_3Zr ,均具有更高的热稳定性、更小的析出尺度和更慢的长大速率。它们在铝基体中共同形成且稳定地存在,可以极大提升铝合金的强度和耐热性。

[0027] 针对前述耐热铝合金设计的第二条,纳米析出相的设计:(1) 由于添加量被严格限制,析出相都必须具有低的纳米尺度,以保证足够的析出数密度,才可能有效阻碍晶内位错和晶界的运动,获得明显的析出强化效果。(2) 纳米析出相都必须具有高的热稳定性,在高温下长期稳定存在,不易粗化,才能在高温下保持高的强化效率和强度水平。(3) 纳米析出相必须与Al基体有良好的界面结合,与基体的变形协调性好,尽可能减少对合金塑韧性的影响。Y和Zr在Al基体中优先氧化,形成的三元Y-Zr-O和Y-Al-O纳米氧化物相,满足全部以上特征。同时,多余的Zr可与Sc在Al基体中形成高度共格的包壳结构 $L1_2$ - $Al_3(Sc,Zr)$ 相,由于Zr壳对Sc原子扩散有明显阻碍作用, $L1_2$ - $Al_3(Sc,Zr)$ 相能够在300~400℃下稳定存在且不易粗化长大,也满足全部以上特征。

[0028] 针对前述耐热铝合金设计的第三条,如何析出第二相,关系到制备工艺的设计:(1) 本发明设计的合金化元素Sc、Y和Zr,在Al基体中的平衡固溶度都极低,其中 $Sc < 0.28at. \%$ (655℃)、 $Zr < 0.033at. \%$ (660℃)、 $Y < 0.17at. \%$ (639℃)。传统熔炼-铸造的方法难以无法实现这些元素的超饱和固溶。必须采用一些非平衡的极端制备工艺,比如机械合金化高能球磨,将超饱和数量的Sc、Zr、Y强制固溶进Al基体,获得非平衡的过饱和固溶体,从而为后续过程中溶质原子(Sc、Zr、Y、O)再析出形成纳米氧化物和纳米 $L1_2$ 相,提供了极大

的热力学驱动力。(2) 配合相应合理的热致密化和热处理过程, 在实现接近和达到完全致密的前提下, 通过热处理过程中的再析出机制(非原位氧化)形成的纳米氧化物和纳米 $L1_2$ 相。这样的纳米第二相具有确定的惯析面以及结合良好的共格/半共格界面, 能够与Al基体保持良好的组织相容性, 在有效强化铝基体的同时能够保持良好的塑韧性, 使合金性能明显优于颗粒增强型金属基复合材料。此外, 机械合金化高能球磨能够突破传统熔炼制备对合金元素添加量的限制, 实现纳米氧化物析出种类与析出数量的可设计性和可控性, 从而可以极大扩展高强耐热铝合金的设计思路和设计自由度。

[0029] 针对前述耐热铝合金设计的第四条, 第二相粒子与铝基体之间尽可能减少发生微电池腐蚀的倾向。本申请弥散析出的氧化物相Y-Zr-O、Y-Al-O以及复合相 $L1_2$ - Al_3 (Sc, Zr), 完全不导电, 与铝基体之间不会形成微电池腐蚀回路, 因此有利于提高耐热铝合金的耐腐蚀性能。

[0030] 需要值得注意的是, 发明人在先的专利“一种纳米氧化物弥散强化耐热锆合金及其制备方法”(专利号ZL202110116461.5)与本申请类似, 虽然在制备方法上都是利用机械合金化结合热处理获得含Y的三元氧化物, 但是两者的设计出发点是完全不同的。第一, 锆合金本身不具有轻量化优势, 合金化设计中不需要考虑轻量化因素, 而铝合金本身具有轻量优势。如何确保耐热铝合金也具有轻量优势, 一直是渴望解决的问题, 因为长久以来人们都认为只有加高熔点的重元素才能得到耐热的铝合金。第二, 锆基体和铝基体中元素的氧化能力差异性不同。耐热锆合金添加的合金化元素是Ti和Y, 在锆合金中可以获得大量、稳定的含Ti氧化物, 但在耐热铝合金中如果想获得大量、稳定的含Ti氧化物, Al基体有被直接氧化的危险, 因为Ti与Al的氧化成键能力非常接近。第三, 本发明的耐热铝合金中添加了微量的Zr元素, 目的是获得高热稳定性的三元Y-Zr-O纳米氧化物相和三元 $L1_2$ - Al_3 (Sc, Zr)纳米相, 同时Zr不会影响高热稳定性的三元Y-Al-O纳米氧化物相的均匀、弥散析出, 确保铝合金获得更高的耐热性能。本发明需要从铝合金的析出热力学和动力学条件出发, 综合考虑上述因素, 重新设计不同的合金化元素以及不同的析出相, 并探索相应的合理制备工艺。本申请耐热铝合金所涉及的技术关键, 不能从耐热锆合金中得到简单启示。

[0031] 本发明的有益效果:

[0032] (1) 本发明设计的合金化元素为Sc、Y和Zr, 其比重分别为2.99、4.47和6.61g/cm³, 它们的添加量都很小, 分别控制在小于0.5、1和0.6wt%, 由此获得的铝合金比重仅为2.73~2.74g/cm³, 仅比纯铝(2.70g/cm³)重小于1%, 比AlFeVSi合金减重10~22%, 确保了铝合金的轻质优势。

[0033] (2) Y和Zr能够在Al基体中优先氧化, 负责提供氧化物相。多余的Zr可与Sc在Al基体中形成 $L1_2$ 相。在晶内大量弥散析出的纳米氧化物相Y-Zr-O、Y-Al-O以及复合相 $L1_2$ - Al_3 (Sc, Zr), 本身都是热稳定性更高的增强相, 高温下钉扎位错和晶界能力强, 可抑制晶粒发生再结晶, 从而大幅度提高铝合金的强度和耐热性; 两种纳米增强相均以晶内析出为主, 晶界上相对析出较少, 保证了铝合金的优良塑韧性, 并且氧化物增强相完全不导电, 确保了合金获得良好的耐腐蚀性。

[0034] (3) 在铝合金中刻意添加O元素。以Zr氧化物或Y氧化物为携氧剂方式进行添加, 可以准确控制合金中的O含量, 从而创造合适的氧化热力学和动力学条件, 使超饱和固溶的Zr和Y原子能够在铝基体中优先氧化, 在晶粒内部获得足够数量的纳米氧化物相Y-Zr-O和Y-

Al-0,同时又不会使铝基体发生直接氧化。0的含量控制和添加方式也是新型轻质耐热铝合金能够兼具高强度和良好塑韧性的关键设计。

附图说明

[0035] 为了更清楚地说明本发明实施例中的技术方案,下面将对实施例描述中所需要使用的附图作简单地介绍,显而易见地,下面描述中的附图仅仅是本发明的一些实施例,对于本领域普通技术人员来讲,在不付出创造性劳动的前提下,还可以根据这些附图获得其他的附图。

[0036] 图1为本发明实施例1制备的一种新型轻质Al-Sc-Zr-Y-0耐热铝合金的透射电子显微(TEM)照片;

[0037] 图2为本发明实施例1制备的一种新型轻质Al-Sc-Zr-Y-0耐热铝合金的微观组织选区电子衍射(SAD)分析图;

[0038] 图3为本发明实施例1制备的一种新型轻质Al-Sc-Zr-Y-0耐热铝合金单向压缩变形的真实应力-应变曲线;

具体实施方式

[0039] 为了使本技术领域的人员更好地理解本发明实施例中的技术方案,并使本发明的上述目的、特征和优点能够更加明显易懂,下面对本发明的具体实施方式作进一步的说明。

[0040] 在本文中所披露的范围的端点和任何值都不限于该精确的范围或值,这些范围或值应当理解为包含接近这些范围或值的值。对于数值范围来说,各个范围的端点值之间、各个范围的端点值和单独的点值之间,以及单独的点值之间可以彼此组合而得到一个或多个新的数值范围,这些数值范围应该被视为在本文中具体公开。

[0041] 以下通过具体的实施例对本发明提供的纳米析出相弥散增强的轻质耐热铝合金及其制备方法进行详细阐述。

[0042] 实施例1

[0043] 一种新型轻质Al-Sc-Zr-Y-0耐热铝合金的制备方法,包括如下步骤:

[0044] 步骤S1,将Al-Sc铝合金铸锭进行气雾化处理,得到Al-Sc合金粉末;

[0045] 具体地,包括按重量百分比计的如下成分:

[0046] Sc 0.1~0.5%,余量为Al和不可避免的杂质;采用氩气雾化,得到粒径在5~30 μm 的Al-Sc合金粉末。

[0047] 步骤S2,粉末预混合:将重量为0.3wt.%的 Y_2O_3 粉末、0.3wt.%的 ZrH_2 粉末与Al-Sc合金粉末装入高速摆振球磨机预混,振动时间为1h,频率为1400rpm,得到混合粉末;

[0048] 步骤S3,机械合金化:将混合粉末装入刚玉球磨罐,在氩气保护下进行球磨,球磨时间为30h,盘面转速为300rpm,纵向转速为20rpm,球料质量比为10:1,冷却系统温度设置为0 $^\circ\text{C}$,获得过饱和固溶体的机械合金化粉末;

[0049] 步骤S4,致密化成型:将机械合金化粉末在50MPa下机械冷压1h成坯块,装入包套抽真空,真空度为 10^{-3}Pa ;采用热等静压进行致密化,热等静压压强为180MPa,保压4h,温度为480 $^\circ\text{C}$,在铝合金基体中过饱和固溶的溶质原子重新析出,得到Y-Zr-0和Y-Al-0纳米氧化物弥散增强铝合金。

[0050] 步骤S5,将得到的块体进行时效热处理,进一步析出 $L1_2$ 结构的纳米 $Al_3(Sc,Zr)$ 相。时效温度为 $375^{\circ}C$,时效时间为6h。

[0051] 附图为本发明实施例1制备得到的Al-Sc-Zr-Y-O耐热铝合金的微观组织和宏观性能。其中,图1为基体中纳米析出相的透射电子显微(TEM)照片;图2为合金微观组织的选区电子衍射(SAD)分析图;图3为不同温度下合金单向压缩力学性能测试得到的应力-应变曲线。可见,时效热处理后,铝合金基体中析出有大量、弥散分布、低纳米尺度的氧化物相和 $L1_2$ 结构的 $Al_3(Sc,Zr)$ 相,氧化物颗粒粒度为4.5-50nm,数密度可达 $1\sim 3\times 10^{15}$ 个/ m^2 , $L1_2$ 结构相颗粒粒度为3.6~20nm,数密度为 $2\sim 4\times 10^{18}$ 个/ m^2 。经压缩力学性能测试,合金室温屈服强度为424MPa, $300^{\circ}C$ 下屈服强度达200MPa,相当于AlFeVSi合金,但最大压缩变形量可达60%,表现出更优的塑韧性和成形性。 $400^{\circ}C$ 下屈服强度仍有178MPa,优于AlFeVSi合金,最大压缩变形量下降到8%,可能与高温压缩端面施加的润滑失效有关,但仍相当于AlFeVSi合金。

[0052] 实施例2

[0053] 一种新型轻质Al-Sc-Zr-Y-O耐热铝合金的制备方法,包括如下步骤:

[0054] 步骤S1,将Al-Sc铝合金铸锭进行气雾化处理,得到预合金粉末;

[0055] 具体地,包括按重量百分比计的如下成分:

[0056] Sc 0.1~0.5%,余量为Al和不可避免的杂质;采用氩气雾化,得到粒径在 $5\sim 30\mu m$ 的预合金粉末。

[0057] 步骤S2,粉末预混合:将Al-Sc预合金粉末重量的0.38wt.%的 YH_2 粉末、0.3wt.%的 ZrO_2 粉末与Al-Sc预合金粉末装入高速摆振球磨机预混,振动时间为2h,振动频率为1400rpm,得到混合粉末;

[0058] 步骤S3,机械合金化:将混合粉末装入刚玉球磨罐,在氩气保护下进行球磨,球磨时间为30h,盘面转速为300rpm,纵向转速为20rpm,刚玉磨罐、球作为球磨介质,球料质量比为10:1,冷却系统温度设置为 $0^{\circ}C$,球磨后形成过饱和固溶体的机械合金化粉末;

[0059] 步骤S4,致密化成型:将机械合金化粉末在50MPa下机械冷压1h成坯块,装入包套抽真空,真空度为 $10^{-3}Pa$;采用热等静压进行致密化,热等静压压强为180MPa,保压4h,温度为 $480^{\circ}C$,在铝合金基体中过饱和固溶的溶质原子重新析出,得到Y-Zr-O和Y-Al-O纳米氧化物。

[0060] 经检测,Y-Zr-O和Y-Al-O纳米氧化物析出相的粒度为4.5-50nm,数密度可达 $1\sim 3\times 10^{15}$ 个/ m^2 。

[0061] 步骤S5,将得到的块体进行时效热处理,进一步析出 $L1_2$ 结构的纳米 $Al_3(Sc,Zr)$ 相,粒度为3.6~20nm,数密度为 $2\sim 4\times 10^{18}$ 个/ m^2 。时效温度为 $425^{\circ}C$,时效时间12h。

[0062] 实施例3

[0063] 将实施例1中的致密化处理替换用热挤压方式进行,其它工艺相同。

[0064] 实施例4

[0065] 将实施例1中的致密化处理替换用放电等离子体烧结方式进行,其它工艺相同。

[0066] 对比例1

[0067] 制备不添加氢化物(YH_2)和氧化物(ZrO_2)粉末的铝合金,预合金粉末成分与实施例1相同,制备工艺与实施例1相同。

[0068] 对比例2

[0069] 制备单独添加0.3wt.% Y_2O_3 粉末的铝合金,预合金粉末成分与实施例1相同,制备工艺与实施例1相同。

[0070] 对比例3

[0071] 制备单独添加0.3wt.% ZrO_2 粉末的铝合金,预合金粉末成分与实施例1相同,制备工艺与实施例1相同。

[0072] 对比例4

[0073] 制备添加0.3wt.%Y和0.3wt.% ZrO_2 粉末的铝合金,预合金粉末成分与实施例1相同,制备工艺与实施例1相同。

[0074] 对比例5

[0075] 制备添加0.3wt.% Y_2O_3 和0.3wt.%Zr粉末的铝合金,预合金粉末成分与实施例1相同,制备工艺与实施例1相同。

[0076] 以上对本发明的发明原理和实施方式作出了详细说明,但本发明不局限于所描述的实施方式。对本领域的技术人员而言,在不脱离本发明的原理和精神的情况下对这些实施例进行的多种变化、修改、替换和变型,均仍落入在本发明的保护范围之内。

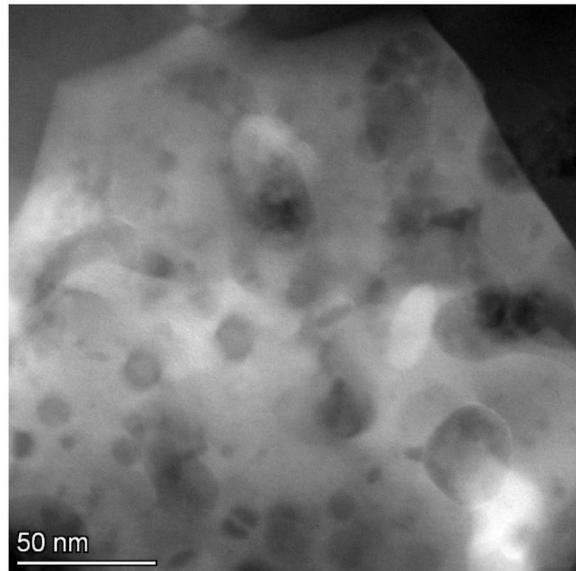


图1

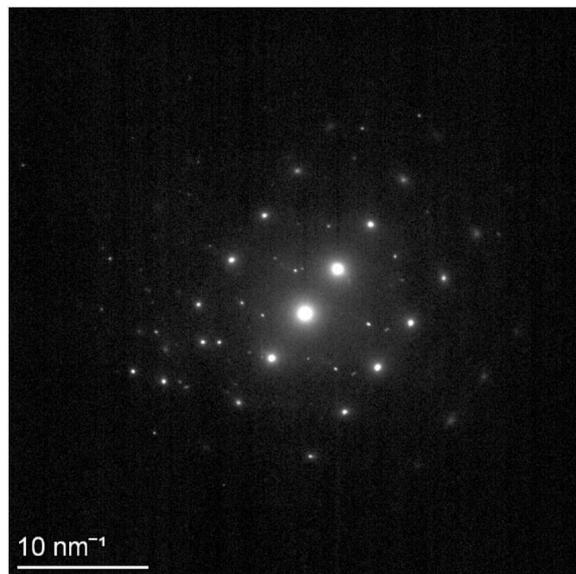


图2

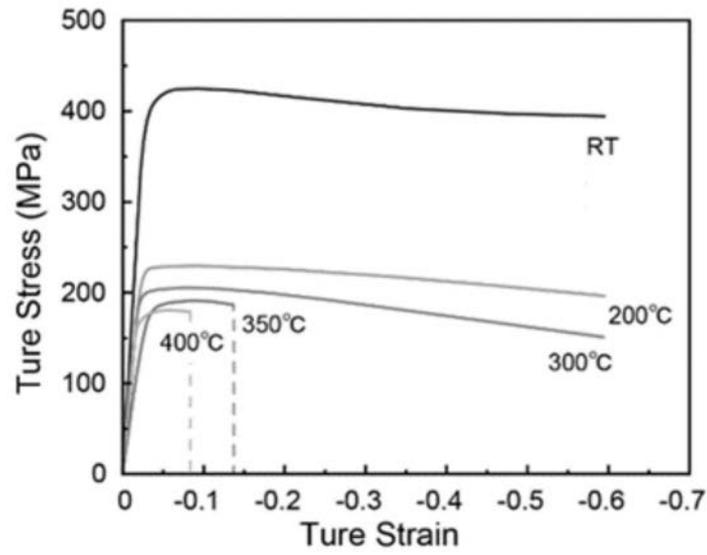


图3