

耐热铝合金研究进展*

王建华 易丹青 陈康华 卢斌 刘沙

(中南工业大学 长沙 410083)

文 摘 介绍了各类耐热铝合金的组织 and 性能特点,综述了耐热铝合金的研究现状及其发展趋势,并对其研究方向作了展望。

关键词 耐热铝合金,组织,性能,研究进展

High-Temperature Aluminum Alloys and Their Research Development

Wang Jianhua Yi Danqing Chen Kanghua Lu Bing Liu Sha

(Central South University Changsha 410083)

Abstract In this paper microstructure and property features of high-temperature aluminum alloys are introduced. The comprehensive development overview of high-temperature aluminum alloys is presented, and finally the prospect of these alloys is given.

Key words High-temperature aluminum alloys, Microstructure, Property, Research development

1 前言

所谓耐热铝合金,是指在高温下有足够的抗氧化性和在温度和载荷(动的和静的)的长时间作用下,具有抵抗塑性变形(蠕变)和破坏能力的铝合金。耐热铝合金由于具有导热性好和密度低等优点,所以在航空航天上得到广泛应用,如航空发动机的汽缸头和活塞、飞机蒙皮等^[1]。

2 耐热铝合金分类

一般可将耐热铝合金分为铸造耐热铝合金和变形耐热铝合金及新型耐热铝合金。铸造状态的合金,强度及塑性一般都比变形态低,但是耐热性却比变形态高^[2]。近 20 年来,采用快速凝固/粉末冶金技术(RS/PM)、喷射沉积^[3~5]的方法生产出了新型耐热铝合金,利用快速凝固技术可以获得过饱和固溶体,其固溶度比平衡态大大提高,在随后的处理过程中析出高体积分数的弥散第二相粒子,这种粒子

是高温下非常稳定的金属间化合物,能有效地提高耐热铝合金的强度和耐热温度,是极有发展前途的耐热铝合金。

2.1 铸造耐热铝合金^[6]

铸造 Al - Si - Mg 系合金耐热性低,其工作温度一般低于 185 。当要提高工作温度至 200 ~ 225 时,应使用铸造 Al - Si - Cu - Mg 系合金,因为该合金中存在耐热性好的 W(Al_xMg₅Si₄Cu₄)相。内燃机活塞材料,一般采用 Al - Si 类活塞合金。共晶型铝硅合金是 Al - Si - Mg 系的扩展,加入 Cu、Ni 产生耐热相以提高耐热温度。过共晶铝硅合金中加入稀土,可显著提高耐热性。铝硅合金总体强度水平不高,耐热性低,除活塞铝合金外,高者只能在 225 以下工作,欲达更高水平,要用铝铜类合金。

铝铜类合金可以热处理强化,它有很高的室温机械性能,在各类铝合金中耐热性也最好,常用作于

收稿日期:2000 - 04 - 10

*国家 973 重点资助项目,编号 G1999064909,并得到粉末冶金国家重点实验室开放课题资助
王建华,1964 年出生,副教授,主要从事铝合金组织和性能的研究工作

250 ~ 350 工作的耐热铝合金或高强铝合金的基础。

Al - Cu - Mn - Ti 系含有小于 1 % Mn (质量分数,下同),热处理后形成大量高温下比较稳定、不易聚集长大、热硬性高的二次 $Al_{12}CuMn_2$ 质点弥散分布与基体中,部分初次 $Al_{12}CuMn_2$ 相呈不连续网状分布于晶界,大大提高耐热性。

Al 和 Ce、La、Rb 等均形成共晶型相图,共晶温度在 635 ~ 640 之间。在 Al - Ce 系中,在 56.45 % 处形成 Al_4Ce 相,熔点 1 250 ,在共晶温度 638 Ce 在 (Al) 中的溶解度为 0.05 %,温度下降,固溶度不变,加之 Al_4Ce 成分一定,结构复杂,合金在高温下很稳定,且其热硬性很高,所以 Al - Ce 系合金有很高的热硬性,但二元 Al - Re 性能不高,应加入 Cu、Mn 强化。

2.2 变形耐热铝合金^[1,2]

变形合金需要有良好的塑性变形能力,合金的主要组成相为固溶体,为了提高强度,合金中包含少量的第二相。硬铝 Al - Cu - Mg - Mn 系合金中,主要强化相为 $(CuAl_2)$ 、 $S(CuMgAl_2)$ 和 $T(CuMg_4Al_6)$ 及 (Mg_5Al_8) 相,当 Cu/Mg 逐渐减小时,主要强化相由相过渡到 S 相。S 相具有很高的室温强度,且耐热性也较高,因此耐热硬铝皆保持较低的铜镁比,以获得 (+ S) 相组织。耐热硬铝常用作高温下工作的零件,如航空发动机压气机的叶片等。

Al - Cu - Mg - Fe - Ni 系耐热铝合金,可在 150 ~ 225 范围内使用。此类合金除了有足够数量的 S 相,还同时加入 Fe 和 Ni,当 Fe/Ni = 1 (质量分数比) 时,形成 $FeNiAl_9$ 相,可显著提高合金的高温强度。合金的主要组成相为 (Al)、 $S(CuMgAl_2)$ 、 $FeNiAl_9$ 及少量的 $AlCuNi$ 、 Mg_2Si 相,在航空工业中做叶片、叶轮及盘等高温工作零件。

Al - Cu - Mn 系耐热铝合金的挤压和模锻制品可在 200 ~ 300 下工作,板材可用做常温和高温使用的焊接件。合金的退火组织 (Al) + $(CuAl_2)$ + $T(CuMn_2Al_{12})$ 相并有少量的 $TiAl_3$ 相。合金在人工时效状态下使用,主要强化相为 $(CuAl_2)$,在淬火加热过程中,同时进行两个过程: $CuAl_2$ 相溶入基体,而 $T(CuMn_2Al_{12})$ 相从基体析出,并成点状弥散分布,

二者均有助于增加合金的高温强度。

2.3 新型耐热铝合金^[3~5,7,8]

传统的高强度变形铝合金在 150 以上工作环境中,由于起强化作用的析出相长大,失去了强化作用而无法继续使用。某些铸造铝合金虽然耐热强度比变形铝合金高,但塑性加工性能差。自 70 年代以来,由于喷射沉积和快速凝固粉末冶金技术的发展,出现了新型耐热铝合金。这类快速凝固耐热铝合金含有两种或两种以上在平衡条件下几乎不固溶于铝的过渡族金属元素(如 Fe、Ni、Ti、Zr、Cr、V、Mo 等)和稀土元素(如 La、Ce、Cd 等),这些元素以高温稳定高弹性模量弥散的金属间化合物存在,从而强化了基体和晶界。快速凝固耐热铝合金正是依靠这种强化相而表现出优良的室温和高温综合力学性能,成为航空航天领域倍受青睐的合金系之一。

迄今为止,研究的快凝耐热铝合金主要有 Al - Fe 合金,以 Al - Fe 为基的三元、四元合金和以 Al - Cr 为基的合金。如 FVS212 合金具有较高的室温和高温力学性能指标,这主要归功于该合金在快速凝固与适当热处理后形成体积分数达 24 % ~ 37 % 的弥散的金属间化合物 $Al_{13}(FeV)_3Si$ 沉淀相,这种亚稳相具有良好的热稳定性,在 500 时仍可保持。

3 耐热铝合金研究现状

3.1 铸造耐热铝合金^[9~13]

通过调整成分,添加微量元素及加入一定量的稀土元素可以生成金属间化合物或构成固溶强化,对提高铝合金的耐热性能具有显著的作用。为保证 RR350 合金的性能,要求合金必须为细晶粒的多元共晶体,且不允许有粗大相析出。对 Al - Re - Cu - Mn - Si 合金的性能及微观结构特征研究表明,5.5 % Re 可使合金在 350 ~ 400 高温下仍具有优越的力学性能,比一般耐热铝合金的耐热温度提高 50 ,主要是因为形成了多种高温稳定的稀土化合物呈放射状分布在晶间,有效地阻碍高温下晶界的滑移。

3.2 变形耐热铝合金^[14~27]

研究表明,在 Al - Cu - Mg 系合金中等量地添加 Fe 和 Ni 元素可以生成在基体内不易溶解和扩散的异相不均匀组织组成物 Al_9FeNi 相,可以使合金的

高温性能提高 20 MPa ~ 40 MPa 或 10 % ~ 15 %。A. A 包契瓦尔在 1947 年就曾指出^[1],冷变形引起的强化效应在再结晶温度以下仍能保持它的作用,因此在 Al - Cu - Mg - Fe - Ni 系合金中添加 Mn 以提高再结晶温度,采用形变热处理使变形强化效果在高温下保留下来,可以提高 Al - Cu - Mg - Fe - Ni 合金高温强度 30 MPa ~ 40 MPa。对 2618 和 LD7 耐热铝合金的实验研究表明,将 Cu、Mg、Si 含量控制在工艺上限,以形成更多的 S 相、微细的 FeNiAl₉ 相及 Mg₂Si 相,同时将杂质含量控制在上限以提高再结晶温度,并细化晶粒可提高合金的耐热性能。优选 T6 热处理制度、采取双级时效处理亦可稳定和合金的耐热性。含 Zr 的第二相可明显提高导电铝合金的耐热性,而向 2618 合金中添加微量元素 Sc 和 Zr 可以生成细小弥散的共格 Al₃(Sc, Zr) 质点可有效地钉扎位错、稳定亚结构、阻止晶界滑移及提高再结晶温度,从而抑制合金的再结晶。此外,Al₃(Sc, Zr) 质点可明显提高时效硬化效果,使 S 相更加弥散均匀析出,由于 Al₃(Sc, Zr) 热稳定性很高,使合金的室温和高温强度同时提高。增加 2618 合金中的 Cu 含量可使强度提高,但当 Cu 增至 3 % 以后合金的塑性会下降。此外,合金的晶粒度对 AK4-1 合金的强度和断裂韧性有较大影响,晶粒度越小越好。减少 Fe、Ni 量,加入 Zr 合金化的 AK4-2 板材,锻件有更高的抗断裂性。研究指出,采用超细的氧化物作为增强剂制成的铝基复合材料可在 200 °C 以上条件下使用。

3.3 新型耐热铝合金^[4,5,28~36]

非共格硬颗粒弥散物对合金产生的强烈弥散强化可大大提高铝合金的耐热性,如粉末冶金法生产的烧结铝合金,工作温度可达 350 °C。采用新型多级雾化—快速凝固制粉装置制得的 Al - Fe - V - Si 合金粉在低温和大压力下将粉末热压、挤压成合金材料,可获得性能优良的保持微细结构的粉末耐热铝合金。利用锻造可以有效地破碎喷射沉积耐热铝合金 Al - Fe - V - Si 层与层之间的氧化物界面及粗大聚合粒子,从而有效地提高合金的塑性和其它力学性能。加入稀土 Y 的合金中产生了大量类球形的 Al₂₀(V, Fe)₂V 相质点可以明显改善其室温强度,

而加 Ce 可部分固溶于 Al₁₂(Fe, V)₃Si 中,明显细化该质点,从而改善 FVS0812 合金的综合力学性能。在相同的喷射沉积轧制工艺条件下,Al - Fe - W - Si 的综合性能优于 Al - Fe - V - Si,因为 Al₁₂(Fe, W)₃Si 强化相的细小粒子的形成对冷却速度的要求较低,而且粗化率明显低于 Al₁₂(Fe, V)₃Si。对快速凝固的 Al - Ce 二元合金的研究发现,第二相 Al₄Ce 及 AlCe₃ 在 350 °C 以上才开始长大。将 B 加入 Al - Ce - Ni 合金中可细化组织,生成 CeB₆ 相起弥散强化和晶界强化作用,抑制其它弥散相的高温生长,阻碍位错运动,使合金耐热性提高。

Allied-Signal 公司用平流铸造法生产的 40 目以下的快凝耐热铝合金 Al - Fe - V - Si 粉末为基体合金,加入 3 μm 的 SiC 颗粒作增强相,采用粉末混合—真空热压—热挤压—轧制工艺生产的颗粒增强耐热铝合金复合材料,其室温和高温强度分别比基体合金提高了 90 MPa 和 40 MPa。

机械合金化工艺使固溶度比快速凝固技术成倍增加,如 Al - Ti 系耐热铝合金,用快速凝固技术只能使 Ti 在 Al 中的溶解度达到 2 %,超过此值时,Al₃Ti 呈粗大颗粒结晶,使材料性能恶化,而机械合金化可以使 Ti 在 Al 中超饱和固溶达 8 %,在热固成型过程中以弥散相 Al₃Ti 析出,从而改善合金的性能。目前已用该工艺生产了 Al - Fe、Al - Ti、Al - Mn 等系列的耐热铝合金。

4 结束语

目前,在铸造耐热铝合金的研究中,应注重合金的成分和高温耐热相的设计,研究加入一定量的稀土元素及添加微量元素对合金耐热相的形成作用及其对合金耐热性的影响。对变形耐热铝合金,应力求形成热稳定性好的多级多相异相强化相,并且加以细化,提高其高温强化作用。同时,加入多元微量元素提高再结晶温度的合金元素,采用形变热处理提高铝合金的耐热性。此外,应加强超细颗粒耐热铝合金复合材料的研究。虽然快速凝固耐热铝合金的耐热温度可达 300 °C 以上,甚至可以部分取代价格昂贵、生产工艺复杂的钛合金,但它的生产工艺还较为复杂,探讨更为简单经济的生产工艺将是今后的重点研究方向。

参考文献

- 1 东北工学院金相教研室. 有色合金及其热处理. 中国工业出版社, 1962: 96 ~ 106
- 2 张宝昌. 有色合金及其热处理. 西北工业大学, 1993: 3 ~ 10
- 3 Hariprasad S, Sastry S L, Jerina K L. Microstructure and mechanical Properties of dispersion process. Metall Trans, 1993; 24A (4): 865 ~ 873
- 4 王建强等. 快速凝固耐热铝合金研究动态与前景. 材料工程, 1995; (12): 43
- 5 黄晖等. 快速凝固耐热铝合金及其进展. 材料开发与应用, 1996; (8): 38
- 6 郑来苏. 铸造有色合金及其熔炼. 国防工业出版社, 1994: 38 ~ 76
- 7 Nie J F, Sridhara S, Muddle B C. Characterization of dispersed intermetallic phases in rapidly quenched Al - Ti - Ce alloys. Metall Trans. , 23A: 3 193 ~ 3 205
- 8 Xiao Yude et al. Second phases of rapidly solidified AlFe-CrZrVSi alloy and their thermal stabilities. J. Cent. South Univ. Technol. , 1998; 5(1) : 3 ~ 5
- 9 贾均等. 高强耐热铸造铝合金的试验研究. 航空学报, 1994; 15(2) : 242 ~ 245
- 10 刘钦. 稀土. 北京: 冶金工业出版社, 1983: 131 ~ 135
- 11 侯爱琴等. Al - RE 合金的高温强化研究. 兵器材料科学与工程, 1995; 18(4) : 19 ~ 22
- 12 董天春等. RP350 耐热铝合金的热处理实践. 兵器材料科学与工程, 1989; 5: 37 ~ 43
- 13 孙伟成等. 稀土元素在铝合金中的合金化作用. 兵器材料科学与工程, 1990; 2: 33 ~ 35
- 14 王奎民. Fe 和 Ni 对 Al - Cu - Mg 系合金高温性能的影响. 热加工工艺, 1987; 2: 29 ~ 32
- 15 竹添. 修等, 鲁江林译. 耐热性 CR - 18 铝合金的开发. 铝加工, 1991; 5: 48 ~ 55
- 16 王奎民. 异相强化对 Al - Cu - Mg - Fe - Ni 系合金高温性能的影响. 轻合金加工技术, 1985; 11: 23 ~ 27
- 17 王奎民. 形变热处理对 Al - Cu - Mg - Fe - Ni 系合金高温性能的影响. 轻合金加工技术, 1985; 4: 30 ~ 35
- 18 刘静安等. 高温耐热铝合金棒材的工艺研究. 铝加工, 1988; 3: 7 ~ 12
- 19 郝雨林等. LD7 铝合金时效工艺的研究. 热加工工艺, 1997; 2: 30 ~ 32
- 20 刘存玉等. 2618 铝合金锻件 T6 热处理制度的研究. 轻合金加工技术, 1993; 21(10) : 26 ~ 29
- 21 余琨等. 含 Sc 和 Zr 的 2618 铝合金冷轧板材退火时组织性能的变化. 金属热处理, 1999; 11: 14 ~ 16
- 22 杜晓东等. 微量锆对导电铝合金耐热性的影响. 热加工工艺, 1995; 2: 20 ~ 22
- 23 Bergsma S C, Li X et al. Effects of thermal processing and copper additions on the mechanical properties of aluminum alloy ingot AA 2618. J. Mater. Eng. & Perform, 1996; 5(1) : 100
- 24 谢变揆. -2 耐热铝合金板材的组织 and 性能. 轻金属, 1994; 6: 47 ~ 50
- 25 Teleshov V V et al. Mechanical properties of alloy 4-1 at elevated temperatures. Met. Sci. Heat Treat. , 1983; 25(7 ~ 8) : 516 ~ 520
- 26 Yu Kun et al. Effect of trace Sc and Zr on aging behavior and tensile properties of 2618 Trans. Nonferrous Met. Soc. , 1999; 9(3) :
- 27 Pitche P D, Shakesheff A J et al. Aluminum based metal matrix composites for improved elevated temperature performance. Mater. Sci. Technol. , 1998; 14: 1 015 ~ 1 023
- 28 苏学常. 铝合金的强化. 轻合金加工技术, 1996; 24(9) : 2 ~ 5
- 29 周多三等. 快速凝固 Al - Fe - V - Si 粉末耐热铝合金的研究. 中南矿冶学院学报, 1991; 22(1) : 89 ~ 93
- 30 宋雯等. 锻造对喷射沉积耐热铝合金 AlFeVSi 组织性能的影响. 铝加工, 1999; 22(2) : 33 ~ 36
- 31 肖于德等. 稀土元素对快凝 AlFeVSi 合金性能和组织的影响. 中南工业大学学报, 1998; 29(5) : 472 ~ 475
- 32 黎文献等. 两种快速 AlFeX(V, W) Si 合金的组织性能. 中南工业大学学报, 1996; 27(4) : 436 ~ 439
- 33 邱庆荣等. 快速凝固 Al - Ce 二元合金的显微组织和时效硬化形为. 宇航材料工艺, 1997; 6: 47 ~ 50
- 34 李宗霞. 机械合金化—研制生产金属材料的一种新工艺. 材料工程, 1995; 11: 3 ~ 7
- 35 李志超等. 机械合金化 Al - Ti 合金的力学性能. 宇航材料工艺, 1996; 6: 22 ~ 25
- 36 邱庆荣等. B 对快速凝固 Al-Ce-Ni 合金组织和耐热性的影响. 铸造, 1998; 3: 1 ~ 3