

变形铝合金均匀化热处理的应用现状与研究进展

仲志国,左秀荣,翁永刚,宋天福,王明星,刘忠侠,杨 升
(郑州大学 物理工程学院 材料物理教育部重点实验室,河南 郑州 450052)

摘要:均匀化热处理是变形铝合金生产工艺中重要的工序,对产品的质量影响很大。介绍了变形铝合金均匀化热处理的基本原理和微观组织变化,论述了均匀化热处理的应用现状,研究进展及与国外先进技术的差距。

关键词:均匀化热处理;应用现状;研究进展

中图分类号: TG166.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-7235(2006)01-0010-04

The application situation and the study development of the wrought aluminium alloy's homogenization

ZHONG Zhi-guo, ZUO Xiu-rong, WENG Yong-gang,
SONG Tian-fu, WANG Ming-xing, LIU Zhong-xia, YANG Sheng
(Zhengzhou University School of Physical Science & Technology
Key Laboratory of Material Physics Ministry of Education, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: The homogenization is an important heat treatment step during wrought aluminium alloy production, it influences greatly the quality of the products. The basic principle and the microstructural changes of the homogenization have been introduced in this paper. The current application situation, the study development and the difference from the advanced foreign technology of the homogenization have been summarized.

Key words: homogenization; application situation; study development

由于铸造过程的非平衡结晶,变形铝合金锭都要经过均匀化热处理^[1]。均匀化热处理是将铸锭加热到接近固相线或共晶温度,长时间保温后冷却到室温,使可溶解的相组织完全或接近完全溶解,形成过饱和固溶体以及少量弥散析出的细小质点。将均匀化处理过的样品与未经均匀化处理过的样品相比较,挤压前的加热时间缩短,挤压力下降,成品表面明亮、色泽均匀,抗拉强度及屈服强度变化不大,但伸长率却大幅提高^[2-4]。对于占挤压材产量2/3的Al-Mg-Si系合金来说,高质量的产品在很大程度上取决于生产过程中对Mg₂Si、游离Si、AlFeSi等相组织行为的控制水平,而均匀化工艺可以决定第二相的状态和分布^[5-9]。世界上产量最多的饮料罐材3004铝合金经均匀化热处理后的Al(FeMn)Si相形态和分布决

定后续工艺的组织状态,进而决定罐体的最终性能^[10]。航空航天工业中广泛采用的7075高强度铝合金,经合理的均匀化和固溶处理工艺后,可以减少或消除粗大的T(AlZnMgCu)相和Mg₂Si相带来的不利影响,使合金性能得到改善^[11-12]。均匀化对产品质量有重大影响,本文将对均匀化过程微观组织变化和研究应用现状进行介绍。

1 均匀化热处理基本原理

铝合金铸锭在铸造过程中通常会产生晶内偏析、区域偏析和形成粗大金属间化合物,铝基体中固溶的主要合金元素也处于过饱和状态,铸锭有很强的内应力。均匀化热处理就是为了消除这些非平衡结晶,使偏析和富集在晶界和枝晶网络上的可溶解

收稿日期:2005-10-08

第一作者简介:仲志国(1978-),男,河南南阳人,硕士研究生。

金属间化合物发生溶解,使固溶体浓度沿晶粒或整个枝晶均匀一致,消除内应力^[13-14]。均匀化工艺是基于原子的扩散运动。温度升高,扩散运动加速进行^[15-16],因此为了提高反应速度,通常采用较高的均匀化温度。

均匀化热处理可使铝合金中偏析的粗大第二相充分溶解或转变,在冷却过程中均匀析出,挤压时再次溶入基体,淬火时效后,均匀析出,充分强化。

对于 6063 铝合金,均匀化时的显微组织有以下变化:

(1) AlFeSi 相由较硬的 β -AlFeSi 相转变成 β' -AlFeSi 相^[5,17];

(2) β -Al + Mg₂Si 共晶固溶体溶解,残留 Mg₂Si 相发生聚集;

(3) 冷却过程大量 Mg₂Si 相析出,冷却的目标应该是在 270 ~ 320 °C 之间析出棒状亚稳、六方结构的 β -Mg₂Si 相, β -Mg₂Si 相的形核温度较低,故其扩散生长速率慢,尺寸较小。细小均匀析出 β -Mg₂Si 相在挤压过程中重新固溶于基体,使挤压力减小,挤压速度增大^[18-19]。

对于 3004 铝合金,均匀化热处理可使针状 Mg₂Si 相溶解,初生 β -Al₆(FeMn) 相转变成 β' -Al₁₂(FeMn)₃Si 相,同时晶内析出细小弥散的 β' -Al₁₂(FeMn)₃Si 相。这种基体中微细相对材料的减薄拉伸性能几乎无影响,在罐体成形时,可减少罐体与模具之间的摩擦,提高罐体表面的光洁度^[10]。

2 均匀化热处理工艺参数的确定

确定均匀化热处理工艺参数的关键就是保温温度、保温时间、冷却速度的选择。优选均匀化制度时,先找出过烧温度,然后确定保温温度,通过不同保温时间样品的对比,得出最佳保温时间,最后找出合适的降温方式和降温速度。通常采用的保温温度为 $(0.9 \sim 0.95) T_m$, T_m 为铸锭实际开始融化温度。并低于不平衡固相线或共晶温度 5 ~ 40 °C。当温度超过合金的最低共晶温度,将发生共晶反应,显微组织中将出现复熔共晶球和晶间复熔物,导致晶界粗化,出现过烧现象。过烧的合金强度虽不下降,但抗疲劳性能严重降低^[4],产品必须报废。

对于 6063 合金, Mg₂Si、游离 Si 均是可溶相, Mg₂Si 的溶解温度为 520 °C,游离 Si 的溶解温度较低,在一般的均匀化温度下 AlFeSi 相是不溶解的,只是 β -AlFeSi 相转变成 β' -AlFeSi 相。595 °C 为 Al-Mg-Si

系共晶温度,由于实际 6063 合金是一个多元系,实际的过烧温度要比 595 °C 低一些,所以合适的均匀化温度在 520 ~ 590 °C 之间^[17]。对于 Al-Si 系的 4A11 (类 4032) 铝合金,共晶温度为 577 °C,过烧温度为 540 °C;当采用 510 °C 16 h 的均匀化制度时,枝晶网稀疏,残留相较少,效果明显^[20]。3004 合金均匀化温度由 595 °C 提高到 615 °C 时,第二相粒子分布均匀,体积分数由 4.0 % 降到 3.5 %,弥散相无析出带变窄^[10]。

保温时间取决于非平衡相溶解及消除晶内偏析所需要的时间^[21]。温度较高时原子扩散快,保温时间就短。所以,保温温度和保温时间必须综合考虑。随着 6A51 铝合金均匀化时间延长,第二相体积分数逐渐减小,枝晶间距逐渐增大,固溶百分数逐渐增大;6A51 合金经 530 °C 保温 8 h,固溶百分数就达到 46.1 %;520 °C 保温 16 h,固溶百分数才达到 53 %,可见保温温度的影响远大于保温时间的影响^[22]。

均匀化后的冷却速度对析出物的大小、数量与分布有重大影响^[4,23]。均匀化后慢冷时,析出物成粗大针状,铸锭变形抗力小,有利于挤压成形,但淬火时不易完全溶解,降低时效强化效果,明显降低制品屈服强度,并严重影响制品的表面质量。均匀化后快冷时,析出物成细小弥散质点,有利于提高制品屈服强度和表面质量^[24]。对于均匀化后快冷的 6063 合金铸锭,可以在较低的温度下(400 ~ 460 °C)快速挤压,并获得优良的力学性能和表面光洁度。对于均匀化后慢冷的铸锭(100 °C/h 以下),将促进 Mg₂Si 和过剩 Si 析出并粗化,这样的铸锭必须在较高的温度下(470 ~ 530 °C)慢速挤压,才能获得合适的力学性能,这将导致表面质量下降,并降低了生产率^[25]。冷却速度应该与该合金的淬火敏感度相适应,如淬火敏感度较低的 6005、6181、6063 合金可以风淬,对淬火敏感度较高的 7005、6061 合金,只能水冷^[26]。淬火敏感度中等的 6005A、6351、6082 合金可水雾淬或强风淬。

3 均匀化热处理研究状况及存在问题

3.1 均匀化热处理研究状况

通常研究均匀化热处理时,主要通过改变其内部组织和改变热处理制度两种方式,使其第二相形态、数量和分布发生变化,从而达到最佳的均匀化效果。

添加稀土的 6063 铝合金,由于稀土原子半径比

铝原子的大,只能向原子排列不规则的晶界富集,在晶内的溶解量很少。当稀土含量增加到 0.20% 时,合金中枝状和针状组织变成球状组织,达到均匀化的效果,并使合金得到细化^[27]。也有文献提到,在电解槽中添加稀土化合物,电解成稀土铝合金,当稀土含量为 0.10% ~ 0.20% 的样品与无稀土经过均匀化处理的样品比较,他们具有相同的结构效应,可完全替代均匀化热处理^[28]。

在 6xxx 系合金均匀化保温过程中,使 Mg_2Si 相溶解的时间很短,很大一部分时间都要用来使 $-AlFeSi$ 相转变成 $-AlFeSi$ 相,添加 0.015% ~ 0.03% 的 Sr 后,使针状 $-AlFeSi$ 相变成汉字形 $-AlFeSi$ 相,铸锭均匀化时间减少 60% ~ 70%^[21,29]。

微量的 Mn 在 Al-Mg-Si 合金中主要以 Al_6Mn 相形式存在,其作用与 Sr 的类似^[26]。有研究证实,由于在 6xxx 系合金中添加约 0.1% 的 Mn 元素,使铝合金铸造组织中 $-AlFeSi$ 相向 $-AlFeSi$ 相转化温度低于 580 (无 Mn 时转变温度),缩短转变时间,并使再结晶温度提高,从而细化晶粒,改善型材弯曲性能^[30]。

由于均匀化处理冷却时析出物的形态对制品性能影响较大,1990 年以来,国外开发出一种阶段冷却均匀化方法。对于均匀化后的铸锭采取阶段冷却的 6063 合金,经过 580 均匀化保温后,出炉后风冷至 250 (冷却速度约为 350 /h),而后用水冷至 50,可使绝大部分镁与硅固溶于铝中,降低挤压温度^[31-32]。

二级均匀化法是较早就出现的一种均匀化方法,特别适合于第二相变化比较复杂的高合金化合金,通常采用两个不同的均匀化温度。由于 7075 合金共晶相的固溶程度不同,其共晶相组成、共晶温度及共晶存在的状态亦不同,即有最低熔点三相 ($Al + (MgZn_2) + T(AlZnMgCu)$) 共晶,中间过渡的两个两相 ($Al + (MgZn_2)$ 和 $Al + T(AlZnMgCu)$) 共晶和最后残留的最高熔点两相 ($Al + T(AlMg_3Zn_3)$) 共晶的区别。针对其有三个共晶温度 (475, 483 ~ 489, 489),采用二级均匀化法 (460 (6~16) h, 480 (2~6) h),对其铸锭进行均匀化处理,实验证明效果明显^[12,33]。

强化均匀化法是通过略高于传统均匀化温度,大幅度延长均匀化时间的热处理制度。7B04 铝合金经 468 48 h 的强化均匀化处理,材料的铸态组织得到明显的改善,材料的伸长率较传统均匀化的提

高 14%^[11,34]。

连续均匀化是将均匀化与后续的挤压连续进行,即在均匀化后温度降至挤压温度,立即进行挤压,取消一般均匀化后降温过程和挤压前加热过程。国内研究人员采用 2A70 铝合金经 450 (10~12) h 保温后,直接进行挤压,取得了良好的效果^[35]。世界著名的德国 ALUNORF 铝厂生产的 3004 铝合金锭连续均匀化工艺:600 保温 3 h ~ 5 h,待铝合金锭降温至 500,再保温 1h,出炉热轧^[36]。

3.2 均匀化热处理存在的问题

经过半个世纪的发展,中国的铝合金产业已取得巨大的成就。就产量而言,我国已跻身前列,但铝材的质量与国外先进水平相比较,还有较大差距,我国铝材质量的突出问题是均匀性(一致性)和稳定性低,不同品种的加工成品率比国外的低 5% ~ 20%^[37],其中不合理的工艺和落后的设备是其中很重要的原因。

在工业发达国家,1980 年开始对 6063 合金挤压型材的铸锭进行均匀化处理^[32],现在已经普及,但我国经过均匀化处理的还不到铸锭总量的 18%。多数挤压厂为了节省成本,取消了这一步热处理,从而造成我国大部分高级铝型材市场被国外产品所占领,只有少数较大的企业对其铸锭进行均匀化处理^[1],而且均匀化质量检验没有标准^[38]。国外许多铝合金厂都已采用的连续均匀化,国内还没有使用。

国内均匀化炉子普遍较小,温度控制不准确,通常采用强制风冷或强制水冷,没有与均匀化炉子相配套的专业冷却装置。在工业发达国家的大型铸锭生产企业,铸锭的均匀化处理向着连续化、自动化与阶段式冷却的方向发展,即长圆铸锭的超声探伤、装炉、均匀化处理、阶段式冷却、锯切、称重、打捆与装车连成一条由计算机控制的连续的自动化生产线^[1]。如国外的铝锭推进式加热炉,均匀化加热时生产能力 35 t/h ~ 45 t/h,采用强风循环加热,铸锭温差 3,炉子热效率大于 70%^[36],这样不仅能源耗费少,而且保证了产品质量,提高了效率。

4 结束语

均匀化热处理是变形铝合金必需的热处理制度,在国外已经普遍应用,国内应用的并不普及。随着我国铝加工业的发展,均匀化热处理一定会广泛应用。均匀化热处理只是变形铝合金热处理中的一步,综合考虑各个因素和步骤,来确定均匀化热处理工艺,建立起相应的炉子和配套设施是将来发展的趋势。

参 考 文 献:

- [1] 王祝堂. 我国铝加工业冶金炉能耗现状与展望(1) [J]. 轻合金加工技术, 1999, 27 (5) :1 - 5.
- [2] 刘静安. Al-Mg-Si 系合金的热加工工艺与可挤压性[J]. 铝加工, 2002, 25(1) :1 - 4.
- [3] 曹圣泉, 张胜华. 6063 合金型材表面缺陷分析[C]:2001 年铝型材技术论坛会文集. 广州:广东省有色金属加工学术委员会, 2001:185 - 189.
- [4] 变形铝合金金相图谱编写组. 变形铝合金金相图谱[M]. 北京:冶金工业出版社, 1975.
- [5] Liu YL, Kang S B, Kim H W. The complex microstructures in an ascast Al-Mg-Si alloys[J]. Materials Letters, 1999, 41 :267 - 272.
- [6] Cai M, Field D P, Lorimer G W. A systematic comparison of static and dynamic aging of two Al-Mg-Si alloy[J]. Materials Science and Engineering, 2004, A373 :65 - 71.
- [7] Marioara C D, Andersen S J, Jansen J, et al. The influence of temperature and storage time at RT on nucleation of the phase in a 6082 Al-Mg-Si alloys[J]. Acta Materialia, 2003, 51 :789 - 793.
- [8] Lodgaard Lars, Ryum Nils. Precipitation of dispersoids containing Mn and/or Cr in Al-Mg-Si alloys[J]. Materials Science and Engineer, 2000, A283 :144 - 152.
- [9] Totik Y, Sadeler R, Kaymaz I, et al. The effect of homogenisation on cold deformations of AA2014 and AA6063 alloys [J]. Materials Processing Technology, 2004, 147 :60 - 64.
- [10] 孙东立, 姜石峰, 高兴锡. 均匀化处理对 3004 铝合金显微组织的影响[J]. 中国有色金属学报, 1999, 9 (3) :556 - 561.
- [11] 刘红卫, 陈康华, 刘允中. 强化固溶对 7075 铝合金组织与性能的影响[J]. 金属热处理, 2000, (9) :16 - 17.
- [12] 陈绍康. LC4 合金低熔点共晶相组成及固溶变化[J]. 铝加工, 1994, 17(6) :18 - 23.
- [13] Purdy G R, Kirkaldy J S. Homogenization by diffusion[J]. Metall Trans, 1971, (2) :371-378.
- [14] Cole G S. Inhomogeneities and their control via solidification[J]. Metall Trans, 1971, (2) :357 - 370.
- [15] Porter D A, Easterling K E. Phase transformations in metals and alloys [M]. New York:Van Nostrand Reinhold Co, 1981:62 - 69.
- [16] 崔忠圻. 金属学与热处理[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 1989:226 - 234.
- [17] Engler Olaf, Hirsch Jurgen. Texture control by thermomechanical processing of AA6xxx Al-Mg-Si sheet alloys for automotive applications[J]. Materials Science and Engineer, 2000, A336 :249 - 262.
- [18] Langkruis J van de, Kool W H, Sellars C M, et al. The Effect of β_1 and β_2 precipitates in homogenised AA6063 alloy on the hot deformability and the peak hardness[J]. Materials Science and Engineer, 2001, A299 :105 - 115.
- [19] 万仁勇. 高挤压性能 6063 铸锭的生产[J]. 铝加工, 1997, (6) :17 - 20.
- [20] 张万金, 王美琪. LD11 铸锭均匀化试验及过烧温度的确定[J]. 轻合金加工技术, 1998, 26 (7) :40 - 42.
- [21] 张士林, 任颂赞. 简明铝合金手册[M]. 上海:上海科学技术文献出版社, 2001.
- [22] 韩德光, 金云鹤, 耿晓华, 等. 长孕育期 6A51 铝合金铸锭均匀化工艺研究[J]. 轻合金加工技术, 2004, 32 (6) :47 - 51.
- [23] Gupta A K, Lloyd D J, Court S A. Precipitation hardening in Al-Mg-Si alloys with and without excess Si [J]. Materials Science and Engineer, 2000, A316 :11 - 17.
- [24] 苏学常, 吴锡坤. 论铝合金建筑型材的内部质量控制[C]:2001 年铝型材技术论坛会文集. 广州:广东省有色金属加工学术委员会, 2001 :9 - 12. (下转第 53 页)

(上接第 13 页)

- [25] 计海涛,于得资,孙绍华. 6063-T5 铝合金建筑型材生产工艺优化[J]. 轻合金加工技术,2002,30(8):26-34.
- [26] McQueen H J, Cellies O C. Application of hot workability studies to extrusion processing. part :physical and mechanical metallurgy of Al-Mg-Si and Al-Zr-Mg alloys [J]. Canadian Metallurgical Quarterly,1997,(2):73-86.
- [27] 王冰. 非均匀化稀土 6063 变形铝合金电解着色的研究[J]. 稀有金属,1997,21(5):398-400.
- [28] 韩平,王冰. 非均匀化处理稀土铝合金的组织结构[J]. 汽车工艺与材料,1998,(11):12-14.
- [29] 高泽生. Sr 在变形铝合金的应用[J]. 轻合金加工技术,1997,25(8):31-37.
- [30] 王荣,何兴仙,宋伟. 6082 铝合金型材生产工艺实践[J]. 铝加工,2001,(6):30-32.
- [31] 顾景诚. 铝合金铸锭析出退火处理的进展[J]. 轻合金加工技术,1996,24(11):7-11.
- [32] 王祝堂. 世纪之交的我国铝型材挤压技术发展目标[J]. 轻合金加工技术,1999,27(3):1-7.
- [33] 曾渝,尹志民,朱远志,等. 热处理工艺对超高强铝合金组织与性能的影响[J]. 矿冶工程,2004,(3):67-69.
- [34] 宁爱林,曾苏民. 强化均匀化对 7B04 铝合金铸态组织与性能的影响[J]. 热加工工艺,2003,(6):5-7.
- [35] 岳忠生,马兴振,张冰. 2A70 铝合金挤压型材生产工艺研究[J]. 轻合金加工技术,2001,29(10):29-31.
- [36] 魏云华. 现代铝锭推进式加热炉的加热和均热技术[C]:全国第十二届轻合金加工学术交流会论文集,哈尔滨:中国有色金属加工工业协会轻金属分会,2003:57-59.
- [37] 曾苏民. 我国铝加工业发展趋势[J]. 中国有色金属学报,2004,14(1):179-181.
- [38] 王自焘. 中国铝型材的发展历史与现状[J]. 世界有色金属,2002,(1):16-20.

(上接第 30 页)

- [3] 孙业赞,曹刚,厉松春,等. 液态 ZL205A 高强度铝合金的吸氢特性[J]. 上海交通大学学报,2002,36(1):39-42.
- [4] 巫瑞智,倪红军,孙宝德. 铝熔体吹气除氢净化技术[J]. 铸造技术,2003,24,(3):166-167.
- [5] Samuel A M, Samuel F H. Review various aspects involved in the production of low-hydrogen aluminum castings[J]. Journal of Materials Science,1992,27:6533-6563.
- [6] Chen X G, Klinkerberg F J, Engler S, et al. Comparing hydrogen testing methods for wrought aluminum[J]. JOM, 1994,(8):34-38.
- [7] 西南铝业有限责任公司计量控制中心. ELH IV 型铝熔体快速测氢仪使用指南[Z].
- [8] 王肇经. 铸造铝合金中的气体和非金属夹杂物[M]. 北京:兵器工业出版社,1989.
- [9] 巫瑞智,倪红军,孙宝德,等. 精炼温度对 JDN-I 熔剂净化纯铝的影响[J]. 热加工工艺,2003,(3):23-25.
- [10] 倪红军. 新型熔剂对铝熔体覆盖保护和净化的研究[D]. 上海:上海交通大学博士学位论文,2003.
- [11] Ruizhi Wu, Baode Sun. Effects of melt temperature on mechanical properties and fracture structure of commercial purity aluminum purified with salt-based Flux[J]. Journal of Materials Science,2004,39:6867-6869.
- [12] 管国锋,赵汝溥. 化工原理[M]. 北京:化学工业出版社,2003.
- [13] Anderson A R. Rotary impeller degassing: practical observations[J]. AFS Transactions,1987,83:533-536.
- [14] Impey S A, Stephenson D J, Nicholls J R. Mechanism of scale growth on liquid aluminium[J]. Materials Science and Technology,1988,4(12):1126-1132.
- [15] Cao X, Campbell J. A. Critical Review of techniques for the removal of oxide films(including the heat treatment of liquid metal) [C]. Proc. From the 2nd International Aluminum Casting Technology Symposium,2002:135-146.
- [16] 甘武奎,龙国荣,曾建民. 调压铸造过程液态铝合金氢含量变化规律[J]. 航空制造技术,2004,(6):103-105.
- [17] Stevens J G, Yu H A. Computer model investigation of the effects of operation parameters on the hydrogen removal rate in the ALCOA622 process[C]. Light Metals,1992:1023-1028.