DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2023.2327

均匀化退火工艺对5A83铝合金铸锭组织及性能的影响

杨　龙,代　敏,车　云,门三泉,李　祥
(贵州华科铝材料工程技术研究有限公司,贵州 贵阳 550014)

摘　要:本文研究了5A83铝合金均匀化退火工艺,并探索了不同温度条件对其微观组织及性能的影响。在退火时长为15 h的情况下,分别观察了350、400、440、470、485、540 ℃6种不同退火温度下的显微组织变化,测量了其晶粒尺寸与硬度。结果表明,β相和Mn相交互作用的特征为:当退火温度低于400 ℃时,β相的回溶与过饱和Mn相的析出同时进行,后者对晶粒粗化的作用掩盖了前者对晶粒的细化作用;当退火温度高于440 ℃时,Mn相的回溶对晶粒细化发挥主导作用,对反常态(随着均匀化退火温度升高,基体硬度先下降后上升)给出了合理解释,并认为485 ℃是最为理想的退火温度。

关键词:5A83铝合金;工业化生产;均匀化退火工艺;组织性能

中图分类号:TG156　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2023)03-0268-06

Effect of the Homogenization Annealing Process on the Microstructure and Properties of 5A83 Aluminum Alloy Ingot

YANG Long, DAI Min, CHE Yun, MEN Sanquan , LI Xiang
(Guizhou Huake Aluminum Materials Engineering Research Co. Ltd., Guiyang 550014, China)

Abstract: The homogenization annealing process of 5A83 aluminum alloy was studied to explore the effects of different temperature conditions on its structure and properties. Under the condition of an annealing time of 15 h, the microstructure evolution at different annealing temperatures of 350, 400, 440, 470, 485 and 540 ℃ was observed and the grain size and hardness were measured. The results show that the interaction between the β phase and Mn phase is characterized as follows: when the annealing temperature is lower than 400 ℃, dissolution of the β phase and precipitation of the supersaturated Mn phase occur simultaneously, and the coarsening effect of the latter on the grain size conceals the refining effect of the former on the grain size. When the annealing temperature is above 440 ℃, the redissolution of the Mn phase plays a leading role in grain refinement. A reasonable explanation is given for the abnormal state (the matrix hardness decreases first and then increases with increasing homogenizing annealing temperature), and 485 ℃ is the most ideal annealing temperature.

Key words: 5A83 aluminum alloy; industrial production; homogenization annealing process; microstructure and properties

我国国防及基础工业的发展对高强、高韧、耐蚀铝合金具有迫切的需求,而国内铝合金工业发展水平相比国际顶尖水平仍有一定差距。国外铝加工工艺质量精益求精,产品附加值更高,并且节能环保,向着更细化方向发展,因此强化铝合金的强度、韧性、耐蚀性能研究和创新,对于我国铝产业发展具有重要的意义[1-3]。5A83变形铝合金牌号于2017年成功注册,这类合金是在5083合金基础上进行成分调整,并对其实施更精准、更均匀的控制工艺,从而使铸坯的铸造残余应力更低。5A83仍以Mg为主要合

收稿日期:2022-11-16
基金项目:贵州省科技计划项目(黔科合成果[2021]一般112);贵州省科技计划项目(黔科合平台人才[2020]5022)
作者简介:杨　龙,1996年生,本科,助理工程师.主要从事材料性能测试及分析方面的工作.电话:15285524453,
Email: 869549241@qq.com
通讯作者:代　敏,1998年生,本科,助理工程师.主要从事有色金属材料改性及热处理方面的工作.电话:18286046242,
Email: Sense_D@163.com
引用格式:杨龙,代敏,车云,等.均匀化退火工艺对5A83铝合金铸锭组织及性能的影响[J].铸造技术,2023,44(3): 268-273.
YANG L, DAI M, CHE Y, et al. Effect of the homogenization annealing process on the microstructure and properties of 5A83 aluminum alloy ingot[J]. Foundry Technology, 2023, 44(3): 268-273.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

金元素，力学性能与5083接近，强度比1×××系和3×××系铝合金高，属于中高强度铝合金，具有良好的疲劳性能、焊接性能以及耐海洋大气腐蚀性能[4]。用5A83制作的精铸铝合金超平板材，作为支撑高精尖制造业的“预制板”，现已被广泛应用于医疗、汽车、航空、5G通信等领域，可被加工成精密机械、高精模具、热工元件、超低温半导体等高端元部件。

在5系铝合金热处理过程中，均匀化退火的目的是通过宏观保形、微观相变、合金元素和金属间化合物的形貌和分布状态重构，达到组织和成分均匀及消除应力的目的，防止后续加工变形[5-7]。其中，均匀化退火温度对于基体非平衡共晶相的回溶和转变起关键作用，会显著影响析出相的形貌、数量和尺寸，从而影响合金性能[8-9]。因此，选择合适的均匀化退火温度对于5A83合金的硬度有一定的改善作用。

本文以温度为变量研究了均匀化退火工艺对5A83合金组织及性能的影响，观察了合金中主要相Al_6(Mn，Fe)等在均匀化过程中发生的转变，探究了主要相Al_6(Mn，Fe)对合金材料硬度的影响，最终得到了较为适合的均匀化退火温度区间，对该材料的工业生产过程具有一定指导作用。

1　实验材料与方法

1.1　试样成分

本实验材料采用贵州华科铝材料工程技术研究有限公司提供的半连续水冷铸造方法制备的5A83铝合金铸锭，通过CX-9800光电直读光谱仪测得5A83铝合金铸锭样品的主要化学成分(质量分数，%)：4.41 Mg，0.53 Mn，0.10 Fe，0.07 Si，0.01 Cu，余量Al。以铸锭长度为中心沿铸造方向截取尺寸为10 mm×20 mm×20 mm的长方体作为铸态试样，选取较小面作为组织观察面。

已知Mg在铝基体中的溶解度随温度升高单调递增，在300 ℃时Mg溶解度为6.60%(质量分数)[10]，本实验中5A83样品的Mg含量为4.41%，故在300 ℃以上的均匀化退火中，理论上不会析出Al-Mg相；而对应的Mn则超过合金固态下所有温度状态的溶解度，Mn在658 ℃时达到最大溶解度1.82%(质量分数)[10]。在均匀化退火过程中，基体内部会析出Al_6(Mn，Fe)相[8-12]。

1.2　微观结构表征

采用同步热分析仪(耐驰449 F3)对铸态试样进行了差示差扫描量热分析(DSC)。测试方法：将样品置于50 ℃的坩埚中，然后以10 ℃/ min的速度加热到650 ℃。为避免氧化，整个过程均在流速为60 mL/ min的氩气氛围下进行。

切割试样经过磨制、抛光，用Keller试剂腐蚀，采用4XC-V数字金相显微镜(OM)观察试样的微观组织结构。打磨抛光的试样采用MHV-5BZ维氏硬度计进行硬度测试，加载重量为0.3 kg，保持时间为10 s，每个样品在不同位置测试5次。采用配有能谱分析仪(EDS)的SU8010扫描电子显微镜(SEM)分析合金微观组织。

2　实验结果及讨论

2.1　铸态5A83合金的DSC分析

图1为铸态5A83合金的DSC曲线，通过测量发现，均匀化过程中第二相的熔化温度，铸态合金从368.9~414.2 ℃出现了多个吸热峰，说明在此范围内有相变的发生；此外，508.5 ℃时也出现了一个热效应峰，此峰的面积较大，说明和此温度对应的相含量较多。因此，均匀化处理过程要考虑这种相对于过烧的影响，如果合金元素含量较多，在均匀化升温过程较快时，对应的低熔点相来不及扩散到基体当中，则会发生过热或过烧现象，使产品失效甚至报废[13]。根据分析结果与已有研究结论[8-9,11-16]，本次实验选择均匀化的温度范围为350~540 ℃。祖立成[16]研究5083铝合金在480 ℃时进行均匀化退火，性能较为稳定。马成国[11]研究5083铝合金在480~520 ℃进行均匀化退火，屈服强度逐渐下降，抗拉强度略有上升。因此重点观察440~485 ℃的合金变化，选择在350、400、440、470、485、540 ℃6个温度进行均匀化退火实验。

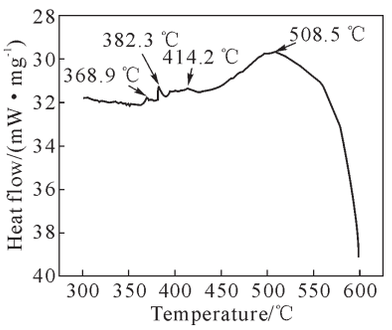

图1　铸态5A83合金差热(DSC)分析曲线

Fig.1　DSC analysis curve of the as-cast 5A83 aluminum alloy

在工业化生产中，铝镁合金均匀化保温时间一般控制在13~36 h，镁含量高时控制在上限[13]。马成国[11]研究了5083铝合金在465 ℃进行不同时间的均匀化退火后发现，随着保温时间的延长，合金强度逐渐降低，在保温15 h时，合金内部共晶相和大部分合金元素固溶到基体中，对于合金强度起到强化作用。本实验中，为使合金基体晶内偏析消除和第二

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

相保持稳定，出于工业生产节能考虑，选择均匀化退火时间为 15 h。

2.2 不同温度下的微观组织

如图 2(a_1)所示，合金在 350 ℃均匀化退火后，晶界狭长细小，枝晶网络明显，晶界上分布着少量黑色相(Mg_2Al_3)，与 5083 合金铸态试样微观组织表现出相似的形貌[9]，表明 350 ℃不是理想的均匀化退火温度。结合图 2(a_2)可观察到合金在 350 ℃均匀化退火后的一个完整晶粒，晶粒内部弥散分布着颗粒状的黑色 Mg_2Al_3 相(β 相)，铸造时由于半连续铸造冷却造成的不均匀结晶，使得少量的镁相以 β 相形态在基体内析出，这是造成大型铸锭坯料宏观残余应力的原因之一；晶界上存在着黑色的和浅黑色的第二相，说明晶界上至少存在 2 种相。

如图 2 (b_1~e_1) 所示，随着均匀化温度升高至 400～485 ℃，铸锭组织中的枝晶网部分或完全固溶，晶界清晰可见。由于在高温下均匀化，在晶界上偏聚的合金化元素或合金相已固溶到基体中，晶界及其边沿呈合金元素贫化状态。因此，晶界及其周围呈贫化的灰白区域，随着均匀化温度的升高，晶界灰白贫化区域的宽度以及连续性发生变化。观察对比图 2(a_2)和(d_2)：随着温度升高，晶粒内部 β 相减少。因为部分 β 相溶入了铝基体中，β 相的回溶，消解了残余应力[12]。而在晶界附近出现了颗粒状的第二相，体积稍微比 β 相细小，并且该相没有溶入基体而是向着晶界聚集，并且随着温度的升高而增多，如图(d_2)所示，这与 β 相回溶到基体内部的行为相反，说明这不是 Mg_2Al_3 相。王宇等[8]对 5182 铝合金进行 520 ℃/ 2 h 的均匀化退火工艺研究，发现 $Al_6(Fe,Mn)$颗粒从过饱和基体中脱溶析出，多分布在晶界和枝晶界附近。

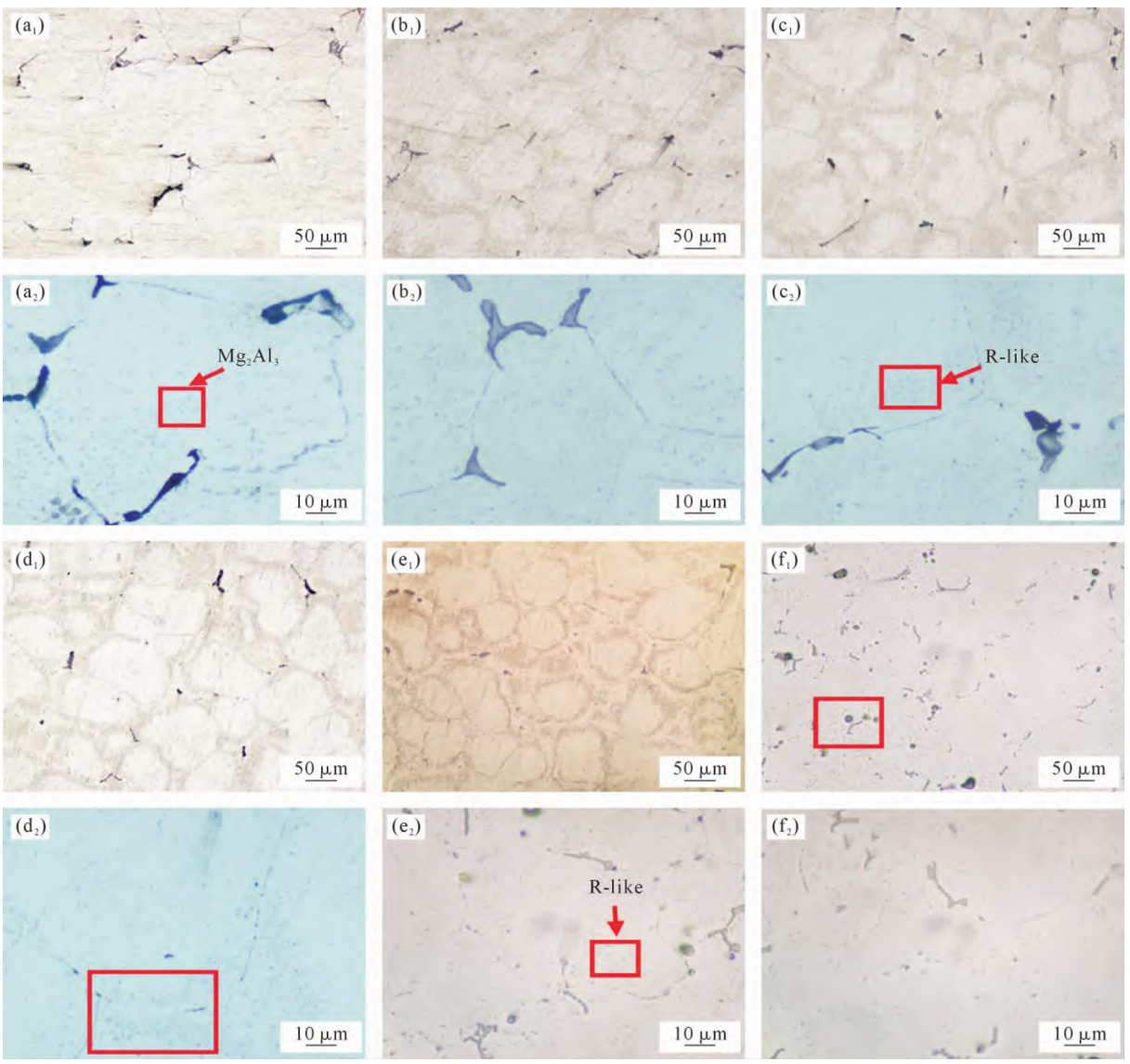

图 2 5A83 合金在不同温度下均匀化退火 15 h 的金相图：(a_1~a_2) 350 ℃, (b_1~b_2) 400 ℃, (c_1~c_2) 440 ℃, (d_1~d_2) 470 ℃, (e_1~e_2) 485 ℃, (f_1~f_2) 540 ℃

Fig.2 Metallographic photograph of the 5A83 alloy homogenized at different temperatures for 15 h: (a_1~a_2) 350 ℃, (b_1~b_2) 400 ℃, (c_1~c_2) 440 ℃, (d_1~d_2) 470 ℃, (e_1~e_2) 485 ℃, (f_1~f_2) 540 ℃

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

吴欣凤[17]指出：$MnAl_6$ 和 $FeAl_3$ 会转化成 $Al_6(Fe,Mn)$，其转变式为：

$$MnAl_6+FeAl_3 \rightarrow Al_6(Fe,Mn)+Al \quad (1)$$

因此，晶界附近的细小颗粒状相是含 Mn 相，该相的转变会导致晶界灰白贫化区域宽度变化。

如图 2(e_2)所示，当均匀化温度升高至 485 ℃，晶界附近有针状相生成，晶界变薄。Ratchev[18]在研究 5182 铝合金时，发现在晶界附近偏聚的颗粒状相和针状相为 $Al_6(Mn,Fe)$相，颗粒状相实际为菱形状(rhomboidal)，针状相实际为薄片状(plate)，在图 2(c_2)和(e_2)中用 R-like 和 P-like 来标注这 2 种相。这两种相在晶粒内部分布不均匀，是由于 Al-Mn 合金相图的富铝端发生的是共晶反应，在凝固过程中先凝固的 Mn 含量较低，后凝固的 Mn 含量较高，从晶粒中心到晶界 Mn 元素的含量逐渐增加[15]。因此，均匀化退火后析出的 $Al_6(Mn,Fe)$相在晶粒中心少，晶界附近多。

如图 2(f_1~f_2)所示，当均匀化温度升高至 540 ℃晶界几乎熔化，晶粒内部产生明显的复熔球，第二相大量减少，表明合金在 540 ℃均匀化退火会出现过烧现象[14]。图 3 为 5A83 合金在 540 ℃均匀化退火 15 h 的背散射图像，其中黑色块状为过烧坑，对白色相进行 EDS 点扫分析其元素含量(原子百分比，%)为：87.23 Al，ND Mg，5.31 Mn，7.46 Fe，ND Si，可知白色相为 $Al_6(Mn,Fe)$，也表明 5A83 合金在均匀化退火过程中存在 $Al_6(Mn,Fe)$相的变化。

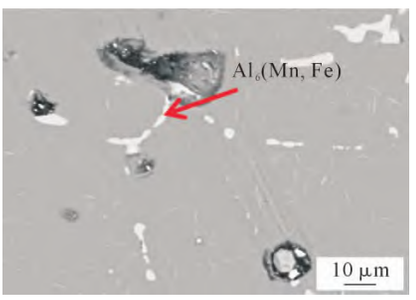

图 3　5A83 合金 540 ℃均匀化退火 15 h 背散射照片

Fig.3　BSE image of the 5A83 alloy homogenized at 540 ℃ for 15 h

2.3　不同温度下的晶粒尺寸

合金的晶粒尺寸对于材料的强度和塑性具有重要的影响，也是材料最基本的特性。根据 Hall-Petch (霍尔佩奇)公式可计算出材料的屈服极限 σ_y：

$$\sigma_y=\sigma_0+\frac{k_y}{\sqrt{d}} \quad (2)$$

式中，σ_y 为材料的屈服极限，是材料发生 0.2%变形时的屈服应力；$\sigma_{0.2}$ 通常可以用显微硬度 HV 来表示；σ_0 为移动单个位错时产生的晶格摩擦阻力；k_y 为常数，与材料的种类性质以及晶粒尺寸有关；d 为平均晶粒直径。故本文对合金晶粒尺寸变化展开研究。

对合金的100 倍金相图采用线截距法测量晶粒尺寸，结果如图 4 所示。合金在 350 、400 ℃均匀化退火后的晶粒尺寸较大，平均晶粒尺寸分别为 115.9 μm 和 118.2 μm，这是因为随着均匀化退火温度开始升高时，原子扩散能力增加，晶界更容易迁移，晶粒尺寸开始长大。但随着均匀化温度的升高，基体内部 β 相回溶，在自然冷却造成的二次析出过程中细化了再结晶晶粒，合金平均晶粒尺寸大幅度降低，从 440 ℃开始，基体内部主要析出颗粒状的含 Mn 相，并随着温度的升高逐渐转变为针状，针状 $Al_6(Mn,Fe)$相对再结晶过程有促进作用，从而细化晶粒[8]。在 485 ℃时合金晶粒尺寸达到最低值，为 92.1 μm。当均匀化温度升高到 540 ℃，合金内部出现过烧现象，晶粒开始长大[19]，平均晶粒尺寸为 98 μm。

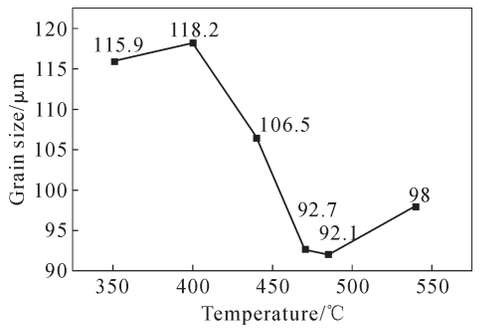

图 4　5A83 合金在不同温度下均匀化退火 15 h 后的平均晶粒尺寸

Fig.4　Average grain size of the 5A83 aluminum alloy after homogenizing annealing for 15 h at different temperatures

2.4　不同温度下的硬度

图 5 为 5A83 合金在不同温度下均匀化退火后的硬度。铸锭经过 350 ℃均匀化退火，此时合金元素固溶度较高，第二相含量较少，合金的硬度性能一般[9]。升温至 400 ℃，基体内 β 相回溶，提高机体强度，合金元素固溶度降低，合金的硬度略有提升。在

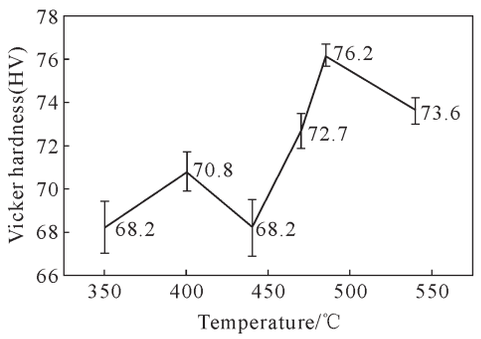

图 5　5A83 合金在不同温度下均匀化退火 15 h 后的硬度

Fig.5　Hardness of 5A83 aluminum alloy after homogenizing annealing for 15 h at different temperatures

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

440 ℃退火时合金硬度反而下降，合金晶粒内部过饱和的含 Mn 相转变为与铝基体不共格的颗粒状 $Al_6(Mn,Fe)$相，并且向着晶界聚集，不仅降低了合金的强硬度，而且还压制了 β 相回溶提高基体强度的优势。随着均匀化温度升高，晶体内部的颗粒状 $Al_6(Mn,Fe)$相开始转变为针状，针状相与基体呈共格结构，在相界面上形成均匀分布的微观应力场，对于基体的强化作用显著，从而改善合金硬度[18]，当均匀化温度达到 485 ℃时，合金的硬度升高到 76.2 HV。可见，含 Mn 相自身的转变对合金的力学性能起到了决定性作用。而当均匀化温度达到 540 ℃时，合金的硬度降为 73.6 HV，合金发生过烧现象。

总体来说，随着这种颗粒状的 $Al_6(Mn,Fe)$相向针状的 $Al_6(Mn,Fe)$相转化，合金的硬度大体呈现上升趋势。

3 结论

(1)在均匀化退火过程中，5A83 合金基体中含有过饱和的含 Mn 相，随着均匀化温度升高，含 Mn 相逐渐析出为颗粒状和针状的 $Al_6(Mn,Fe)$相，并沿晶界分布，有效改善合金硬度。在 485 ℃均匀退火保温 15 h，5A83 合金硬度表现较好。温度升高至 540 ℃时，合金出现过烧特征，硬度下降。

(2)随着均匀化退火温度的升高，5A83 合金内部 β 相和 Mn 相的变化对合金晶粒尺寸有显著的影响。400 ℃之前，β 相的回溶与过饱和 Mn 相的析出同时进行，后者对晶粒粗化的作用掩盖了前者对晶粒的细化作用，440 ℃之后，Mn 相的回溶对晶粒细化发挥了主导作用，在 485 ℃时细化效果最佳，为 92.1 μm。

参考文献：

[1] 周双巢,张天意,赵瑞宁,等.航空铝合金加工工艺的研究现状及发展方向[J]. 科技创新与应用，2018, 225(5): 38-39.
ZHOU S C, ZHANG T Y, ZHAO R N, et al. Research status and development direction of aerospace aluminum alloy processing technology[J]. Technology Innovation and Application, 2018, 225 (5): 38-39.

[2] 夏静. 铝镁合金压铸模热处理工艺探讨与应用 [J]. 内燃机与配件，2020(4): 91-92.
XIA J. Discussion and application of heat treatment process for die casting die of Al-Mg alloy[J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2020(4): 91-92.

[3] 戴威然，田怡，秦龙万，等. 航空用 7150 高强铝合金发展现状[J]. 云南冶金，2018, 47(3): 76-78.
DAI W R, TIAN Y, QIN L W, et al. The development situation of 7150 high strength aluminum alloy for aviation[J]. Yunnan Metallurgy, 2018, 47(3): 76-78.

[4] 刘保义. 短时高温热处理提高铝合金板成形性研究[D]. 沈阳：沈阳航空航天大学，2018.
LIU B Y. Study on short-term high temperature heat treatment to improve the formability of aluminum alloy plate [D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2018.

[5] DING Y L, WANG J G, ZHAO M, et al. Effect of annealing temperture on joints of diffusion bonded Mg/Al alloys[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2018, 28(2): 251-258.

[6] 罗兵辉，单毅敏，柏振海. 退火温度对淬火后冷轧 5083 铝合金组织及腐蚀性能的影响[J]. 中南大学学报:自然科学版，2007, 38 (5): 802-808.
LUO B H, SHAN Y M, BO Z H, Effect of annealing temperature on microstructure and corrosive properties of cold-rolled 5083 aluminum alloy after quenching[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2007, 38(5): 802-808.

[7] 陈永禄，傅高升，陈文哲，等. 均匀化退火对 Al-1Mn-1Mg 合金高温压缩流变应力的影响[J]. 材料热处理学报，2008, 29(2): 103-107.
CHEN Y L, FU G S, CHEN W Z, et al. Influence of homogenization on flow stress of Al-1Mn-1Mg alloy during hot compression deformation[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2008, 29(2): 103-107.

[8] 王宇，曹零勇，李俊鹏，等. 均匀化工艺对 5182 铝合金铸锭组织的影响[J]. 材料热处理学报，2015, 36(S1): 101-106.
WANG Y, CAO L Y, LI J P, et al. Effect of different homogenization processes on microstructure of 5182 aluminum alloy[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2015, 36(S1): 101-106.

[9] 蒙玲，赵启忠，李春流，等. 均匀化处理对 5083 铝合金铸锭组织与性能的影响[J]. 金属热处理，2014, 39(8): 101-104.
MENG L, ZHAO Q Z, LI C L, et al. Effect of homogenization on microstructure and properties of 5083 aluminium alloy ingot[J]. Heat Treatment of Metals, 2014, 29(8): 101-104.

[10] 张士林，任颂赞 著. 简明铝合金手册[M]. 上海：上海科学技术文献出版社，2001.
ZHANG S L, Ren S Z. Concise aluminum alloy manual[M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Academic Press, 2001.

[11] 马成国，桑玉博. 5083 铝合金均匀化退火工艺研究[J]. 热加工工艺，2012, 41(24): 205-207.
MA C G, SANG Y B. Research on homogenizing annealing process of 5083 aluminum alloy[J]. Hot Working Technology, 2012, 41(24): 205-207.

[12] 李学伟，王国军，周长海，等. 5083 铝合金铸锭均匀化退火的组织与性能[J]. 黑龙江科技学院学报，2013, 23(4): 341-344.
LI X W, WANG G J, ZHOU C H, et al. Homogenizing annealing microstructure and mechanical properties of 5083 aluminum alloy ingot[J]. Journal of Heilongjiang University of Science and Technology, 2013, 23(4): 341-344.

[13] 唐明君，吉泽升，吕新宇，等. 5×××铝合金的研究进展[J]. 轻合金加工技术，2004, 32(7): 1-6.
TANG M J, JI Z S, LV X Y, et al. The research progress of 5××× aluminium alloy[J]. Light Alloy Processing Technology, 2004, 32 (7): 1-6.

[14] 付世强，廖斌. 5154 铝合金均匀化温度研究[J]. 有色金属加工，2017, 46(1): 42-45.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

FU S Q, LIAO B. Study of homogenization temperature of 5154 aluminum alloy[J]. Nonferrous Metals Processing, 2017, 46(1): 42-45.

[15] 祖立成,张义,任国春,等. 均匀化退火对5083铝合金再结晶过程的影响[J]. 热加工工艺,2020, 49(14): 153-156.
ZU L C, ZHANG Y, REN G C, et al. Effects of homogenization annealing on recrystallization process of 5083 aluminum alloy[J]. Hot Working Technology, 2020, 49(14): 153-156.

[16] 雷虎,尹志民,唐蓓,等. 5A01铝合金铸造板坯均匀化处理[J].轻合金加工技术,2011, 39(2): 15-20.
LEI H, YIN Z M, TANG B, et al. homogenization of 5A01 aluminum alloy casting slab[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2011, 39(2): 15-20.

[17] 吴欣凤. 5083铝合金铸锭均匀化处理对铸锭和板材组织与性能的影响[J]. 轻合金加工技术,2007, 35(8): 48-53.
WU X F. Effects of 5083 aluminium alloy ingot homogenizing on properties and structures of ingot and plates[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2007, 35(8): 48-53.

[18] RATCHEV P, VERLINDEN B, HOUTTE P V, Effect of preheat temperature on the orientation relationship of (Mn,Fe)Al_6 precipitates in an AA 5182 Aluminium—Magnesium alloy[J]. Acta Metallurgica et Materialia, 1995, 43(2): 621-629.

[19] 林汉卿,罗兵辉,柏振海,等. 5383铝合金再结晶全图[J]. 铝加工,2013(6): 4-9.
LIN H Q, LUO B H, BAI Z H, et al. Recrystallization diagram of 5383 aluminum alloy[J]. Aluminium Fabrication, 2013(6): 4-9.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net