

# 合金元素及热处理工艺对 5×××系铝合金性能的影响

宋美学,董瑞峰,徐天元

(内蒙古工业大学材料科学与工程学院,内蒙古呼和浩特 010051)

**摘要:** 5×××系铝合金属于Al-Mg合金系,Mg为该合金的主要元素,是一种变形铝合金。5×××系铝合金具有较好的耐腐蚀性能,常作为防锈铝合金,被广泛应用于海洋工程建造领域。5×××系铝合金还具有质量轻、强度高优点,在汽车零件制造及船舶结构制作等领域也广泛应用。文章总结了近年来合金元素及热处理工艺对5×××系铝合金综合性能影响的研究进展,重点分析了稀土元素对5×××系铝合金组织性能的影响,为后续研发具有更高综合力学性能的5×××系铝合金提供理论指导。

**关键词:** 5×××系铝合金;化学成分;稀土元素;热处理工艺

中图分类号: TG146.2

文献标识码: B

文章编号: 1009-5438(2024)03-0045-08

## Effects of Alloying Elements and Heat Treatment Process on Properties of 5××× Series Aluminum Alloy

*Song Mei-xue, Dong Rui-feng, Xu Tian-yuan*

*(School of Materials Science and Engineering, Inner Mongolia University of Technology,  
Hohhot 010051, Inner Mongolia Autonomous Region, China)*

**Abstract:** The 5××× series aluminum alloy belongs to Al-Mg alloy system and Mg is its main element, which is a type of wrought aluminum alloy. The 5××× series aluminum alloy is with better corrosion resistance and is often as rust-proof aluminum alloy, which is widely used in the field of off-shore building. It is also with such advantages as light weight and high strength as well as is also widely used in the fields of automobile parts manufacturing and ship structure making. In this paper, the research progress for the effects of alloying elements and heat treatment process on comprehensive properties of 5××× series aluminum alloy in recent years is summarized as well as the effects of rare earth elements on microstructure and properties of 5××× series aluminum alloy are mainly analyzed, which provide the theoretical guidance for subsequent research and development of 5××× series aluminum alloy with higher comprehensive mechanical properties.

**Key words:** 5××× series aluminum alloy; chemical composition; rare earth elements; heat treatment process

铝合金被广泛应用于航空航天、机械制造、建筑、化工等领域,是高科技产业不可缺少的材料之

收稿日期: 2024-04-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(52161015)。

作者简介: 宋美学(2001-),女,河北省阜城县人,硕士,现从事铝合金研究工作。

一。铝合金具有密度小、比强度高特点,在轮船船侧、船底外板等船体结构中广泛应用<sup>[1]</sup>,对轮船减重、节省燃料、提高速度有显著效果。为了进一步提高铝合金的综合性能,研究者已进行了大量的研究,发现不同的合金元素及其含量对 5 × × × 系铝合金的性能具有重要影响。作为铝合金中的主要合金元素, Mg 起到了固溶强化和加工硬化的作用,提高了铝合金的综合性能。另外,铝合金中少量的 Mn 元素可以减少热裂纹,起到补充强化的作用。此外,向铝合金中添加 Ce、Sc、La、Y、Er 等稀土元素,细化铝合金的枝晶组织,抑制富 Fe 相的产生,起变质作用,稀土元素与 Al 形成稳定的金属间化合物可以钉扎位错,阻碍晶界运动,提高再结晶温度,进而提高铝合金的强度。5 × × × 系铝合金是一种可以不经固溶处理和时效处理就能提高性能的合金。尽管 5 × × × 系铝合金主要依靠形变强化提高综合性能,但是使用时仍需要进行热处理。本文对合金元素及热处理工艺对铝合金的影响进行了分析与总结,为进一步改进铝合金的性能提供参考。

## 1 合金元素对 5 × × × 系铝合金性能的影响

### 1.1 铝合金中的主要合金元素

#### 1.1.1 Mg 元素

Mg 元素是 5 × × × 系铝合金中最主要的合金元素, Al - Mg 二元合金相图(图 1)<sup>[2]</sup>表明, Mg 在铝合金中的溶解度主要受温度影响,常温溶解度约为 1%,当温度升至 450 °C 时, Mg - Al 合金会形成共晶结构, Mg 在铝合金基体中的最大溶解度达到 17.4% (质量分数,下同)。当 Mg 的含量小于 3% 时,会固溶在铝合金基体中,当 Mg 含量超过 3% 时,多余的 Mg 将以 Al<sub>3</sub>Mg<sub>2</sub> 相的形式从晶界处析出,从而降低铝合金的塑性和耐腐蚀性<sup>[3]</sup>,并增加合金应力腐蚀开裂敏感性。第二相粒子尺寸越大,分布越不均匀,局部腐蚀敏感程度越高。随着 Mg 含量增加,铝镁合金的强度提高。国内研究的 5 × × × 系铝合金基体中 Mg 含量通常控制在 4% ~ 8% 之间,合金的抗拉强度最大值约为 490 MPa<sup>[4]</sup>。由于 Mg 元素在 5 × × × 系铝合金中起到固溶强化作用,因此高镁铝合金也逐渐成为 5 × × × 系铝合金的发展趋势,为获得综合性能更优异的 5 × × × 系铝合金,控制 Mg 含量至关重要。

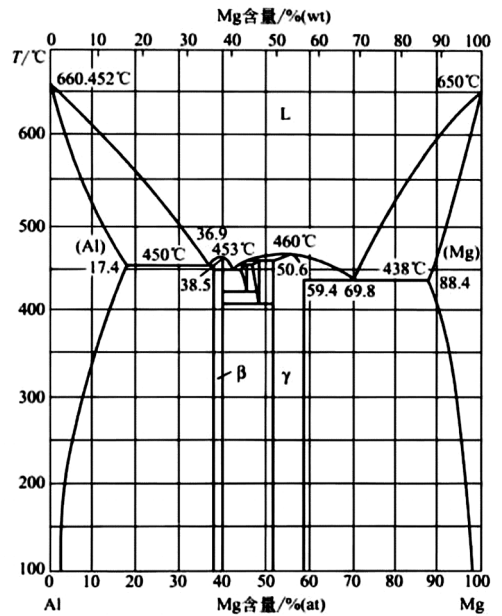


图 1 铝 - 镁合金二元相图

#### 1.1.2 Mn 元素

在 5 × × × 系铝合金的制造过程中,除了主要成分 Mg 元素之外, Mn 作为一种微量添加元素,也具有至关重要的作用。添加 Mn 元素可有效降低铝合金在热加工过程中产生热裂纹的倾向,对铝合金起到补充强化作用。根据 Al - Mn 二元合金相图(图 2)<sup>[5]</sup>可知,常温时 Mn 在 Al 合金中的溶解度比较低,受其影响, Mn 元素在常温时主要以 Al<sub>6</sub>Mn 的形式存在于铝合金中,对铝合金基体起到细微的细晶强化作用。此外, Al<sub>6</sub>Mn 还能与铝合金中的有害元素 Fe 结合,形成 Al<sub>6</sub>(Mn, Fe) 相,有助于降低 Fe 元素对基体抗腐蚀性能的影响。加入 Mn 元素可显著提高 5 × × × 系铝合金的抗晶间腐蚀性能,提高材料的强度,同时抑制晶粒粗化。但是,过多地添加 Mn 元素会导致合金的塑性下降,因此,一般建议 Mn 含量不超过 0.7%<sup>[6]</sup>。当 Mg 含量保持不变时,适当提高 Mn 含量,会促进铝合金中 β (Al<sub>3</sub>Mg<sub>2</sub>) 相均匀沉淀,进一步提高铝合金的抗腐蚀性能<sup>[4]</sup>。除此之外, Mn 元素通过形变强化机制,对提高铝合金的力学性能产生积极影响。

#### 1.1.3 Fe 元素

在 5 × × × 系铝合金的熔炼过程中,不可避免的会有少量的杂质元素 Fe 掺入, Fe 有着较强的活性,通过观察 Al - Fe 二元合金相图(图 3)<sup>[7]</sup>,易知少量 Fe 元素与 Al 元素反应生成 FeAl<sub>3</sub> 相,在铝合

金基体中作阴极存在,这导致合金基体的电极电位更负,而优先被腐蚀,降低了合金的耐腐蚀性能<sup>[8]</sup>。此外,Fe元素含量较高时,它倾向于与铝合金中的Mn元素和Cr元素结合,形成难溶性的金属化合物,这些脆硬性化合物在铝合金基体中含量较高时,会迅速降低合金塑性,严重时会导致轧制过程中出现开裂现象。因此,为了保证铝合金良好的加工性能和耐腐蚀性能,必须严格控制铝合金中Fe元素的含量,通常建议不超过0.25%<sup>[6]</sup>。

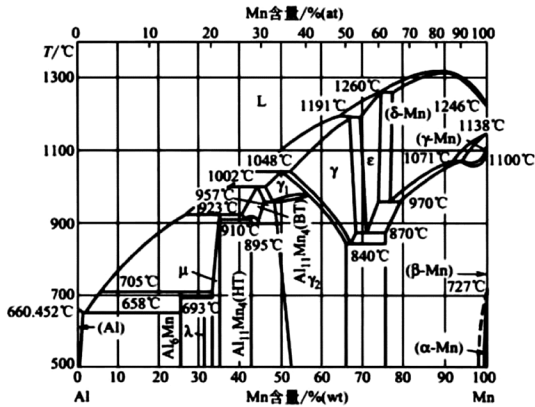


图2 铝-锰二元合金相图

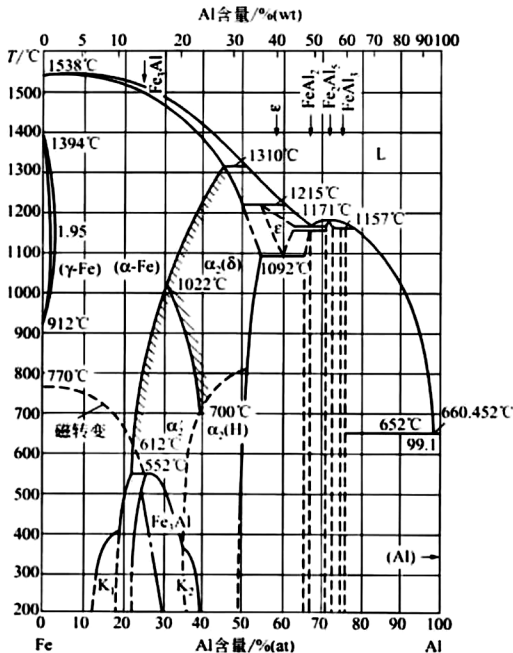


图3 铝-铁二元合金相图

## 1.2 其他微合金元素

### 1.2.1 稀土元素

稀土元素因其独特的电子结构展现出活泼的化学性质,它们与Al元素反应形成稳定的金属间化合物,这些化合物能细化铝合金的枝晶组织,有效抑制富Fe相的生成,从而对铝合金起到显著的变质作用。此外,稀土元素的添加还能减少熔体中氢元素的含量和气孔的数量,从而对铝合金起到精炼和净化作用。在5×××系铝合金的制造中,稀土元素的添加通常分为3种情况:①当稀土元素含量较低时,它们几乎完全溶解在铝合金 $\alpha$ 基体中;②当稀土元素含量超出其在铝合金基体中的最大溶解度时,部分稀土元素会继续溶解在 $\alpha$ 基体中,而剩余的则倾向于偏聚在晶界、相界以及枝晶界上;③如果稀土元素添加量过多,稀土元素会与合金中的其他元素形成很多粒子化、球化或者细化的新相<sup>[9]</sup>。稀土元素在铝合金中的添加还能带来三种不同的强化效果:①细晶强化,通过细化晶粒来提高材料的强度;②固溶强化,当稀土元素含量小于0.1%时,通过溶解稀土元素于铝合金基体中来增加材料强度;③第二相强化,当稀土元素含量大于0.3%时,通过形成新的强化相来提高材料的性能。具体哪种强化机制在特定的情况下起主导作用,这取决于稀土元素的添加量<sup>[9]</sup>。

(1)Ce元素。在铝合金铸造过程中,稀土元素Ce发挥了6种关键作用:①变质作用;②净化富铁相;③微合金化;④改善凝固组织;⑤细化晶粒;⑥改变夹杂物的性质,在表面形成一层钝化膜<sup>[10]</sup>。铝合金中加入微量Ce可显著改善铸态铝合金的显微组织,细化晶粒,减少微观偏析。与大角度晶界相比,小角度晶界与晶内的腐蚀电位差较小,因此沿晶界的腐蚀敏感性降低。此外,添加Ce促进铝合金表面钝化膜形成,有效阻挡了氯离子的侵蚀。

已有研究证实,在铝合金中适量添加稀土元素Ce,可以显著提高铝合金的力学性能和疲劳性能<sup>[11-12]</sup>。刘政军等<sup>[13]</sup>发现添加Ce能够细化铝合金的铸态组织以及热挤压变形后的组织。高红选等<sup>[14]</sup>对铸态镁铝合金中加入Ce开展研究,得出Ce可以通过促进合金析出细小弥散的且对位错和晶界具有钉扎作用的 $\text{Al}_4\text{Ce}$ 相,从而增强铝镁合金的综合力学性能,特别是Ce含量为0.3%时,铸态镁铝合金的综合力学性能最佳,然而Ce添加量大于0.5%时,可能会导致铝合金综合力学性能降低。图4展示了Al-Ce二元合金相图<sup>[15]</sup>,进一步阐释了Ce在铝合金中的作用机理。

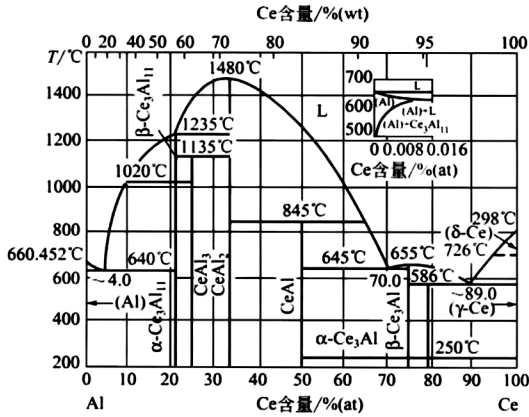


图 4 铝-铈二元合金相图

(2) La 元素。La 元素在铝合金中的溶解度相对较低,常温下仅为 0.5% 左右,在铝合金的凝固过程中,主要聚集在固-液界面前沿,这种聚集作用增加了成分过冷,促进了铝合金基体晶粒均匀形核,同时提高了形核率,从而达到细化晶粒的效果。当 La 元素含量增加到 1.5% 时,在铝基体中达到饱和,此时晶粒外富集了 La 原子,导致合金凝固速度变慢,阻碍晶粒长大,从而提高了合金的综合力学性能。当 La 元素的含量过高时,在铝基体中会形成粗大的 Al-La 相,该相呈树枝状,其形成过程会释放结晶潜热,减小液态金属的过冷度,从而导致晶粒粗化。因此在铝合金中添加 La 元素时,要严格控制其含量,以避免产生不利影响。

余聪等<sup>[9]</sup>报道过,在 Al-Si 合金中添加 La 能有效细化铝合金组织并且提高其综合力学性能。甘培原等<sup>[16]</sup>研究发现在 Al-3Si-0.4Cu-1.0Fe 中添加 La 元素,可以产生额外的成分过冷,对合金中的共晶 Si 起到变质作用,吸附在共晶 Si 表面,改变其凝固形态和生长方式,实现晶粒细化,并提高合金的强度与断后伸长率。温杨等<sup>[17]</sup>对 La 元素细化 2024 铝合金的铸态组织的现象进行了深入分析,发现当 La 含量为 0.3% 时细化效果最佳,当 La 含量超过 0.3% 时会导致晶粒粗化,控制 La 的含量在 0.2% 时,可以获得力学性能最佳的 2024 铝合金。朱锐祥等<sup>[18]</sup>在进行大量实验下得出在 Al-Si-Cu-Mg 合金中添加 0.4% 的 La,可以细化合金组织,且此时合金力学性能最佳,抗拉强度和伸长率分别比 Al 基体提高了 7.0% 和 19.3%。这些研究表明,合理控制 La 元素的添加量对优化铝合金的性能

至关重要。

(3) Sc 元素。Sc 元素由于其活泼的化学性质,在铝合金中扮演着重要角色,主要表现在以下三个方面:①细化晶粒,Sc 元素能够促进铝合金晶粒细化,提高材料的力学性能;②抑制再结晶,Sc 的存在有助于提高铝合金再结晶温度,从而抑制再结晶过程;③提高性能,Sc 元素的加入可以全面提高铝合金的强度、塑性、焊接性以及耐腐蚀性能等。在铝合金中,Sc 元素会形成块状的  $\text{Al}_3\text{Sc}$  相,该相与铝合金基体之间存在共格关系,晶体结构基本相同,有助于合金凝固时的异质形核,从而有效细化晶粒。根据 Al-Sc 二元合金相图(图 5)<sup>[19]</sup>可知,室温下 Sc 在铝中的溶解度很低,通常小于 0.1%,因此,在熔铸过程中,会有细小的  $\text{Al}_3\text{Sc}$  相析出,这些相能够钉扎位错,阻碍晶界移动,进一步提高铝合金的再结晶温度<sup>[20]</sup>。Sc 元素对铝合金的耐蚀性能的提高主要体现在以下 4 个方面:①电化学稳定性, $\text{Al}_3\text{Sc}$  相的电极电位与 Al 元素相近,使得电化学反应更为稳定;②组织细化,Sc 元素的加入增加晶界的体积分数,使脆性沉淀物在晶界处不连续分布,有助于抑制裂纹扩展,改善铝合金的应力腐蚀性能;③改变化合物特性,Sc 元素还能改变铝合金中其他化合物的成分和尺寸;④提高耐晶间腐蚀性能,通过降低或消除无沉淀析出带,提高铝合金耐晶间腐蚀性能<sup>[21-22]</sup>。

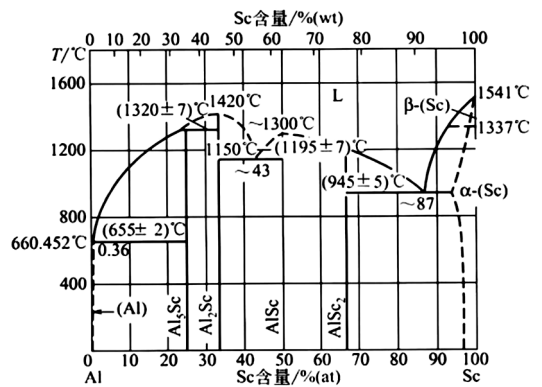


图 5 铝-钪二元合金相图

(4) Y 元素。在铝合金中添加稀土元素 Y,能显著改善铝合金微观组织,使组织分布更均匀,晶粒尺寸更细小。为了获得最佳的综合性能,Y 的添加量应该控制在 0.1%~0.3% 之间,其中当 Y 含量在 0.25% 时,对铝基体的细化效果最为显著。

余聪等<sup>[9]</sup>对 Y 元素在铝合金中的变质机理进

行了深入研究,得出以下结论:①当Y原子进入Al原子晶格时,由于Y和Al原子尺寸差异较大,会导致晶格畸变,从而增加系统自由能,为了避免该现象,大部分Y原子应该形成稀土化合物,分布在晶界处;②Y在晶界处形成的化合物能够有效阻碍晶界迁移和晶粒长大,从而起到细化晶粒的作用,同时Y与Al元素结合形成的 $Al_3Y$ 相可以作为异质形核核心,提高形核率,进一步实现细化晶粒。彭二宝等<sup>[23]</sup>的实验证实了上述观点,在研究Y元素对 $AlSi_6Cu_3Mg$ 合金晶粒细化效果的影响时,发现当Y含量为0.2%时,合金的晶粒细化效果最为明显,此时合金的抗拉强度达到最高,伸长率也有显著提高。综上所述,稀土元素Y的添加对铝合金的微观组织和力学性能有着显著的优化作用,但必须精准控制其含量以获得最佳效果。

(5)Er元素。稀土元素Er对铝合金的组织性能也有显著的改善作用<sup>[24]</sup>,除了细化晶粒,还可以降低甚至消除铝合金基体中的有害杂质,同时提高铝合金的强韧性。Er元素在合金中主要以化合物形式存在,有助于提高铝合金在高温下的热力学性能,进一步细化晶粒,增强铝合金硬度和耐磨性。Er元素能够有效抑制铝合金再结晶过程,实现晶粒细化,使铝合金的强度、硬度都有所提高<sup>[16]</sup>。Er与Al元素结合形成的细小弥散第二相粒子 $Al_3Er$ ,通过钉扎晶界阻碍其运动,也是实现晶粒细化的重要机制。

### 1.2.2 Cr元素

Cr元素在5×××系铝合金中的应用能够显著提高铝合金的抗应力腐蚀性能,Cr与Mn元素结合使用,能够产生协同效应,显著增强铝合金的强化效果,Cr元素在铝合金基体中起到补充强化作用,有效提高合金强度,同时不改变Al的腐蚀电位,Cr元素的添加量一般建议控制在0.15%~0.25%之间。

邹晶<sup>[25]</sup>报道过Cr元素在不影响Al腐蚀电位的同时,有效提高了铝合金的再结晶温度,从而抑制再结晶过程,实现细化晶粒,进而增强铝合金的强度。邹立颖等<sup>[26]</sup>在进行大量实验后发现,Cr元素的加入会导致铝基体产生晶格畸变,这种畸变能阻碍位错运动,随着Cr含量的增加,铝合金的加工硬化程度提高,同时固溶强化作用增强。丛福官<sup>[27]</sup>在7N01铝合金板材中添加Cr元素,发现Cr元素可以有效抑制再结晶现象,从而提高合金强度。房洪杰等<sup>[28]</sup>指出在7136铝合金中添加Cr,不仅会细化铝

合金的组织结构,抑制再结晶,还能使铝合金组织分布更加均匀,从而提高铝合金的抗拉强度和塑性。

### 1.2.3 Ti元素

Ti元素能够提高铝合金锻件的耐蚀性和可焊性,同时对铝合金起到变质作用,有助于获得晶粒更细小的铝合金锻件,此外,Ti的加入还能消除铝合金在铸造过程中出现的热裂纹倾向,并减小铸件壁厚效应的影响。

杨成刚等<sup>[29]</sup>对在铝合金基体中添加Ti元素进行了系统的分析,表明Ti在铝合金基体中可以充当形核质点,有效细化合金组织结构,他们还发现,当复合添加Ti和Zr元素时,细化铝合金组织的效果更为显著。

### 1.2.4 Si元素

Si元素与Mg元素反应会形成大而脆的 $Mg_2Si$ 相,这种相的存在会降低铝合金的塑性和机械性能,并且显著降低铝合金的耐蚀性能,因此为保证铝合金性能,控制Si在5×××系铝合金的含量小于0.2%<sup>[6]</sup>。

李秋梅等<sup>[30]</sup>开展Si对铝合金基体的影响实验,发现Si可以改善铝合金的铸造性能,对铝合金的硬度影响较大,能够提高其耐磨性,然而,当Si含量超过0.65%时,铝合金中会出现偏析现象。陈铁等<sup>[31]</sup>报道过,Si元素在铝合金中溶解度较小,其存在会导致铝合金晶界粗化,从而降低铝合金耐腐蚀性,Si还容易与铝合金中Al、Fe、Mn等元素反应,生成 $Al(FeMnSi)$ 相,这会影响铝合金综合性能。叶於龙<sup>[32]</sup>对6101铝合金展开系统分析,得出在Si含量过高的情况下进行时效处理后,过量Si会从铝基体中析出,减少晶格畸变,从而提高合金导电性。此外,过量的Si还能与合金中其他元素反应,使合金时效强化效果增强。

## 2 热处理工艺对5×××系铝合金的影响

尽管5×××系铝合金主要依靠形变强化提高综合性能,但是使用时仍需要进行热处理。5×××系铝合金属于不可热处理强化合金,因此一般使用的5×××系铝合金为加工硬化冷变形态或者是退火态,5×××系铝合金常见的热处理方法有三种形式:①均匀化退火;②中间退火;③稳定化退火。

### 2.1 均匀化退火工艺

5×××系铝合金的熔炼铸造是非平衡凝固过

程,因此铸锭中必然会存在枝晶偏析现象,这导致后续制作的板材综合性能降低,为提高板材的塑性并确保组织均匀,消除偏析的均匀化退火处理是至关重要的。由于 $5 \times \times$ 系铝合金主要以形变强化来提高其性能,其组织具有遗传效应(在相同的生产条件下,合金的组织性能由原材料的微观组织和质量决定,其原始状态对合金熔体及最终产品微观结构产生影响),因此进行均匀化退火处理对于确保材料性能的稳定性和一致性是非常必要的。均匀化退火有助于消除合金在轧制变形过程中被轧碎的脆性第二相,促进成分均匀分布,避免枝晶偏析,减少铝合金成品在后续的使用过程中可能出现的安全隐患或严重的安全事故。

吴欣凤<sup>[33]</sup>发现经过充分均匀化处理的 5083 铝合金铸锭展现出良好的塑性和热加工性能。蒙玲等<sup>[34]</sup>对不同均匀化处理条件下的 5083 铝合金铸锭的微观组织进行分析,发现其组织良好,未观察到明显的冶金缺陷、晶粒长大和异常长大等现象。并且还发现,双级均匀化处理在改善合金铸锭微观组织的均匀性和综合力学性能的效果都比单级均匀化处理更有效,在考虑加热温度、保温时间对综合力学性能的影响后,得出双级均匀化处理比单级均匀化处理能耗低、组织性能更优越等结论。肖政兵等<sup>[35]</sup>报道了随着退火温度升高,保温时间延长,5083 铝合金板材强度和硬度降低,而伸长率呈现出与之相反逐渐升高的状态,由此易知退火温度是影响热轧板的力学性能最主要的因素。

综上所述,对于 $5 \times \times$ 系铝合金而言,实施合理的均匀化退火处理是必不可少的。

## 2.2 中间退火工艺

铝合金在塑性变形过程中,由于受到外力会产生不同程度的加工硬化,增大了合金的变形抗力,降低了合金的塑性。当加工硬化强度过高时,合金会在外力作用下开裂。中间退火就是通过加热、保温的手段消除加工硬化,恢复合金的塑性,从而提高冷加工后的产品质量。

## 2.3 稳定化退火工艺

$5 \times \times$ 系铝合金的力学性能提高主要依赖于加工硬化、形变强化,以此来满足使用标准。 $5 \times \times$ 系铝合金在进行冷变形加工硬化处理后,基体中处于过饱和状态的高自由能不稳定的 Mg 元素及其他微合金元素,会因冷变形和加工硬化产生大量位错,导致性能变得特别不稳定,在这种状态下,

基体中的  $\beta$  相易析出于晶界处和滑移带上,导致耐腐蚀性下降。因此稳定化退火工艺对 $5 \times \times$ 系铝合金是至关重要的,该工艺可以有效提高合金的耐腐蚀性,稳定其力学性能,使  $\beta$  相更容易弥散分布。

朱庆丰等<sup>[36]</sup>探讨了稳定化退火制度对 5059 铝合金板材耐腐蚀性能的影响,得出 5059 铝合金热轧板材在进行了 270 °C 保温 2 h 和 300 °C 保温 2 h 两次稳定化退火热处理后,热轧板的晶粒形貌变化不大,而  $\beta$  相的数量会随着稳定化退火温度的升高呈现先增大后减少的趋势。韩颖等<sup>[37]</sup>对 Al - 4.5Mg - 0.7Mn - 0.2Er 冷轧板材在 290 °C 进行退火处理时,发现随着退火时间的延长,板材的强度逐渐降低,塑性逐渐提高,同时板材的晶间腐蚀失重值也会随着退火时间的增加而逐渐减小;经过 290 °C 保温 45 min 的退火工艺处理后,板材可以获得最佳的强度、塑性和耐蚀性能。

总之,稳定化退火工艺是制备 $5 \times \times$ 系铝合金板材的最后一步,在执行稳定化退火时,要根据不同合金的具体成分和变形工艺来制定相应的退火工艺,以确保最终得到的板材具有更优异的综合力学性能。

## 3 结束语

Mg 作为铝合金中的主要成分,对铝合金的固溶强化和加工硬化起到关键作用,从而显著提高铝合金综合性能。铝合金中添加的少量的 Mn 元素有助于降低热裂纹倾向,对铝合金起到补充强化作用。向铝合金中添加 Ce、Sc、La、Y、Er 等稀土元素,细化铝合金的枝晶组织,抑制富 Fe 相的产生,起变质作用,稀土元素与 Al 形成稳定的金属间化合物可以钉扎位错,阻碍晶界运动,提高再结晶温度,进而提高铝合金的强度。尽管 $5 \times \times$ 系铝合金属于不可热处理强化的铝合金,但通过采用各种不同的退火工艺,仍然能够拥有良好的综合力学性能,满足我国在多个领域对于铝合金的使用需求。

## 参 考 文 献

- [1] 李慎兰,黄志其,蒋福利,等. 固溶温度对 6061 铝合金组织和性能的影响[J]. 材料热处理学报,2013,34(5):133 - 138.
- [2] 冯艳,王日初,彭超群. 镁合金与铝合金阳极材料[M]. 长沙:中南大学出版社,2015.
- [3] 赵海,吉猛,王光东,等. Mg 含量对 Al - xMg

- 合金板材显微组织的影响[J]. 轻合金加工技术, 2018, 46(5): 18.
- [4] 郭成, 李宝绵, 张海涛, 等. 高强耐蚀 $5 \times \times \times$ 系铝合金的研究现状及发展趋势[J]. 稀有金属, 2018, 42(8): 878.
- [5] 刘楚明. 铝合金相图集[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2014.
- [6] 周庆波, 张宏伟, 冷金凤, 等. 化学成分对5083合金性能的影响[J]. 轻合金加工技术, 2007, 35(10): 33-34.
- [7] 周振平. Al-Fe合金熔体处理及凝固特性研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2009.
- [8] 高家诚, 张延可, 李宁, 等. 自蔓延法制取锰铝中间合金的实验[J]. 重庆大学学报, 2013, 36(9): 113.
- [9] 余聪, 陈乐平, 周全. 稀土元素对铝合金组织与性能影响的研究进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(2): 241-246.
- [10] 刘政, 罗浩林, 白光珠. 电磁搅拌频率对半固态A356铝合金初生 $\alpha$ 相和铈分布的影响[J]. 中国稀土学报, 2015, 33(3): 328-335.
- [11] 文健, 周承恩, 郭锋, 等. 稀土元素Ce对Al-Mg-Si合金断裂韧性的改善及其微观机理分析[J]. 内蒙古工业大学学报(自然科学版), 1996(4): 1.
- [12] 张秀梅. Ce的加入对变形铝合金组织与疲劳性能的影响[J]. 包头钢铁学院学报, 2000, 19(3): 244.
- [13] 刘政军, 赵东宁, 郝雪枫, 等. 稀土元素Ce对热挤压变形Al-Mg合金组织与性能的影响[J]. 铸造, 2008, 57(7): 693.
- [14] 高红选, 卫广智, 樊磊, 等. 稀土元素铈对铸态Al-Mg合金组织和力学性能的影响[J]. 有色金属工程, 2014, 4(3): 15-17.
- [15] Gschneidner K A, Calderwood F W. The Al-RE (Aluminum - Rare Earth) Systems [J]. Bulletin of Alloy Phase Diagrams 9, 1988, 9(6): 658-668.
- [16] 甘培原, 韦德仕, 韦世强, 等. 稀土元素La, Ce对Al-3Si-0.4Cu-1.0Fe压铸铝合金微观组织、力学性能及热导率的影响[J]. 稀有金属与硬质合金, 2023, 51(5): 50-56.
- [17] 温杨, 于长富, 孙巍, 等. 稀土元素La对2024铝合金铸态组织及性能的影响[J]. 热处理技术与装备, 2021, 42(6): 6-9.
- [18] 朱锐祥, 秦新宇, 胡南, 等. 稀土元素对Al-Si-Cu-Mg系压铸铝合金组织和性能的影响[J]. 材料研究与应用, 2019, 13(1): 27-32.
- [19] 曾凡浩, 夏长清, 古一. Al-Mg-Sc-Zr系富Al角相图评估[J]. 材料导报, 2002, 16(6): 16.
- [20] 陈志国, 杨文玲, 王诗勇, 等. 微合金化铝合金的研究进展[J]. 稀有金属材料与工程, 2010, 39(8): 1499.
- [21] Yu V M. Microstructure and Mechanical Properties of Cast and Wrought Al-Zn-Mg-Cu Alloys Modified with Zr and Sc[J]. Materials Science Forum, 2002, 449(396-402): 1217-1222.
- [22] Ahmad Z, Ul-Hamid A. The Corrosion Behavior of Scandium Alloyed Al 5052 in Neutral Sodium Chloride Solution [J]. Corrosion Science, 2001, 43(7): 1227-1243.
- [23] 彭二宝, 陈昌铎. Y元素对汽车发动机用高强铝合金组织与性能的影响[J]. 热加工工艺, 2021, 50(20): 65-67.
- [24] 车海亮, 邓文渊, 王河洲, 等. Sm、Er稀土元素对铝合金性能的影响[J]. 化工管理, 2023(9): 49-52.
- [25] 邹晶. Ag及形变热处理对5083铝合金组织与性能的影响[D]. 沈阳: 东北大学, 2022.
- [26] 邹立颖, 董学光, 陈伟, 等. Mn、Cr元素对5182铝合金板材组织及性能的影响[J]. 铝加工, 2022(6): 17-20.
- [27] 丛福官. Zr、Cr元素对7N01铝合金板材组织及性能的影响[J]. 轻合金加工技术, 2017, 45(11): 22-27.
- [28] 房洪杰, 刘慧, 尹红霞, 等. 微量元素Cr对7136铝合金组织和性能的影响[J]. 热加工工艺, 2017, 46(8): 74-77.
- [29] 杨成刚, 冀海贵, 黄忠宝, 等. Ti、Zr元素对2A12铝合金焊缝组织和性能的影响[J]. 热加工工艺, 2018, 47(3): 210-212.
- [30] 李秋梅, 王春雷, 董刘颖, 等. Si、Mn元素含量对铝合金型材组织及性能影响[J]. 有色金

属加工,2020,49(5):46-48.

- [31] 陈铁,王恩泽,闫羽,等.合金元素对 3104 铝合金组织和力学性能的影响[J].企业科技与发展,2018(9):71,74.
- [32] 叶於龙.过量 Mg、Si 元素对 6101 铝合金电工导线性能的影响及机制探究[D].长沙:中南大学,2015.
- [33] 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.
- [34] 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.

- [35] 肖政兵,申振宇,黄元春,等.退火制度对热轧态 5083 铝合金性能和组织的影响[J].材料热处理学报,2021,42(6):37-43.
- [36] 朱庆丰,韩旭琛,黄建航,等.稳定化退火制度对 5059 铝合金板材耐腐蚀性能的影响[J].轻合金加工技术,2023,51(6):15-21.
- [37] 韩颖,邹立国,王国军,等.稳定化退火制度对 Al-4.5Mg-0.7Mn-0.2Er 合金板材组织和性能的影响[J].轻合金加工技术,2021,49(3):26-30.

(上接第 35 页)

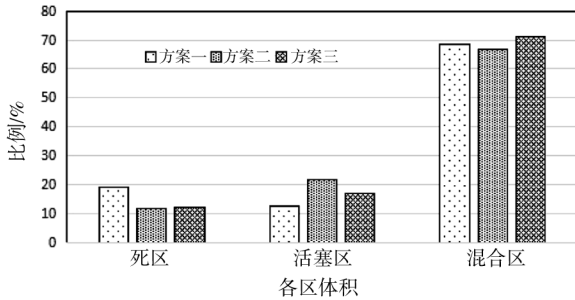


图 8 不同方案钢液各区的计算结果

### 3 结论

(1)通过在双流板坯连铸机中间包采用湍流控制器、挡墙、挡坝的控流装置,可以优化钢液的流动状态,有利于钢液在湍流控制器内和挡墙、挡坝区域内进行充分的混合,促进中间包内夹杂物碰撞、聚集、上浮。

(2)采用方案二控流装置,钢液的峰值时间增加比率为 240.98%,钢液的平均停留时间增加比率为 2.37%,死区体积减少了 7.56 个百分点。

### 参 考 文 献

- [1] 梁新腾.连铸中间包内钢水流动行为的数理模拟研究[D].包头:内蒙古科技大学,2007.
- [2] 熊玮,李全君.两流连铸中间包控流装置的优化设计[J].铸造技术,2012,33(10):1203-1206.
- [3] 刘菲,刘丹.六流连铸机 T 型中间包控流装置优化的物理模拟研究[J].宽厚板,2016,22(1):11-14.
- [4] 张娜,张明军,李凤善,等.中间包钢液中夹杂物去除的物理模拟研究[J].连铸,2017,42(1):8-12.