

高导热铝合金的开发与研究进展

王 慧¹, 李元东^{1, 2}, 罗晓梅¹, 毕广利^{1, 2}, 马 颖^{1, 2}

(1. 兰州理工大学省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 甘肃兰州 730050;

2. 兰州理工大学有色金属合金及加工教育部重点实验室, 甘肃兰州 730050)

摘要: 铝合金具有密度小、强度高、导电导热性能好的优点, 因此被广泛应用于电子及通讯行业。但是随着系统及设备都趋向于小型化、轻量化, 并且功率密度的增加, 对散热要求越来越高, 常规铝合金已不能满足要求。文中重点阐述了高导热铝合金的分类、导热机理、影响导热性能的因素, 并对目前国内外的研究进展情况进行了初步梳理和总结, 对提高铝合金导热性能的研究方向给出了一些建议。

关键词: 变形铝合金; 铸造铝合金; 导热机理; 热导率

随着现代技术的进步与迅速发展, 尤其是在汽车、电子及通信电器行业^[1-4], 一些电子产品、LED照明设备、通讯基站用的散热壳体等都趋向于小型化和轻量化, 并且随着功率密度的增加, 对散热性能的需求也正在增加^[1]。提高散热器散热性能最有效的方法是提高材料的导热性能, 因而急需开发一种高导热性能的材料来满足设备高散热的能力。

Al的导热性能仅次于Au、Ag和Cu, 为237 W/(m·K), 且Al具有价格低、密度小、容易进行表面处理、在地壳中含量多等优点, 铝合金具有良好的综合性能被广泛应用于航空航天、汽车、机械制造等行业^[1]。但是常规的铝合金其导电率、热导率都不能满足散热器散热性能不断提高的要求, 因此研究开发一种高性能、高导热的新型铝合金是非常重要的, 具有广泛的应用前景^[5-8]。本文主要阐述了高导热铝合金的分类、导热机理、影响导热性能的因素, 并对目前国内外的研究进展情况进行了初步梳理和总结, 对提高铝合金导热性能的研究方向给出了一些建议。

1 导热机理

材料发生热传导是因为内部温度不平衡, 导致温度经接触部位从高温区域传递到低温区域。单位温度梯度下, 单位时间内通过单位截面积上的温度就是热导率, 热传导的表达公式如下:

$$\Delta Q = -\lambda \frac{dT}{dx} \Delta S \Delta t \quad (1)$$

式中: ΔS 为截面积, ΔQ 为通过截面的能量, Δt 为时间, $\frac{dT}{dx}$ 代表在 x 方向传热温度, 负号表示热量传递方向和温度梯度方向相反。

金属的热传递主要有两种方式: 一种是金属内存在大量的自由电子, 自由电子可以在金属内快速运动, 实现热量的传递; 另一种是晶格振动和杂质缺陷, 自由电子在运动的过程中会受到晶格振动和杂质缺陷产生的热阻的影响; 随着温度升高, 纯金属的晶格振动加剧, 阻碍自由电子的运动, 因此纯金属的热导率一般随温度升高而减小。而合金主要通过晶格振动实现导热, 杂质和缺陷大量存在破坏了原有纯金属的晶格完整性, 阻碍了自由电子的运动, 因此合金的热导率低于相应纯金属的热导率, 合金中含有的合金元素比较多, 热阻主要由杂质元素产生的缺陷热阻为

作者简介:

王 慧(1994-), 女, 硕士研究生, 研究方向为高性能导热铝合金。E-mail: 1307741937@qq.com

通信作者:

李元东, 男, 教授, 博士生导师, 电话: 0931-2976795, E-mail: liyd_lut@163.com

中图分类号: TG146.21

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2019)10-1104-07

基金项目:

国家重点研发计划支持项目(2018YFB2001800)。

收稿日期:

2019-04-02 收到初稿,

2019-05-28 收到修订稿。

主,合金随着温度升高,晶格振动加强,因此合金的热导率一般随温度升高而增大。

由于热导率的测量过程比较复杂,其准确度也就不高,Wiedemann-Franz定律^[9]给我们提供了一个测量热导率比较简单的方法,可以通过测量导电率来间接测得热导率,因为金属的热传递主要是靠自由电子的运动完成的,所以金属的导电系数和热导率之间存在必然的联系,可以用下式表示:

$$\frac{\lambda}{\delta T} = L \quad (2)$$

式中: λ 为热导率, δ 为导电系数, L 为洛伦兹常数,对于铝 $L=2.2 \times 10 \text{ W} \cdot \text{K}$, T 为绝对温度。

2 高导热铝合金的分类

2.1 铸造铝合金

高导热铸造铝合金主要以铝-硅合金为基,引入其他一些强化元素提高铝硅合金的性能,具有铸造性能好、密度小、优良的耐蚀性、耐热性和焊接性等优点。但是铸造铝合金中硅元素的含量会影响合金的热导率,含量越多,热导率越低,这是因为硅在Al基体中的固溶度增大,使得晶格畸变程度增大,并且随着硅含量的增多,组织中的共晶硅含量增多,尺寸变大,对运动电子的散射作用强,电子传输时的阻力变大,热导率下降^[10]。

2.2 变形铝合金

变形铝合金在导热性能和力学性能方面都比较优良,常用于具有强度要求的结构件或形状简单的散热器上。例如Al-Cu-Mg系属于高强度铝合金,适用于飞机结构(机身、机翼)等重要用途。Al-Mg-Si系合金是用途广泛的中等强度结构合金,普遍具有较高的导热能力,市场上广泛用来制造电脑散热片,取代了铜质散热器。其中Al-Mg-Si系的6063铝合金应用最为广泛,它具有良好的挤压性能、热塑性和导热性能,生产工艺成熟简单,从而成为散热材料的首选^[10]。

3 影响铝合金热导率的因素

影响铝合金热导率的因素^[11]有很多,从影响机理上总体可分为以下几个方面:①固溶度,合金元素以及一些第二相在铝基体中的固溶,通过影响铝基体晶格畸变的程度来影响合金的热导率,主要有合金元素的类型和含量,添加稀土元素;②铸造过程中的缺陷,通过影响合金的致密度来影响热导率,主要有杂质、孔隙、枝晶偏析以及熔炼方式;③组织调控,通过影响合金中相的形态、尺寸和分布来改变对运动电子的散射作用,进而影响合金的热导率,主要有热处理、成形方式(挤压比和挤压温度等),都在一定程度上对铝合金的热导率有影响。

理、成形方式(挤压比和挤压温度等),都在一定程度上对铝合金的热导率有影响。

4 影响铝合金热导率的因素和机理

4.1 合金元素对铝合金热导率的影响

在铝合金中合金元素是影响合金热导率的主要因素之一,主要取决于合金元素的存在形式和含量^[12]。合金元素除了生成第二相的影响外,几乎所有的合金元素都降低了铝合金的热导率,不同的只是影响程度。图1为不同合金元素对纯铝电导率的影响^[13-14]。可以看出,不同的元素对纯铝电导率的影响大不相同,Cr、Li、Mn等元素的影响最大,随着含量的增加,导热率急剧下降,Sb、Cd、Sn、Bi等元素对铝合金的电导率几乎没有影响,而合金中常见的元素Si、Mg、Cu等元素的影响居中。因此我们可以通过研究合金元素对铝合金热导率的影响,适当调整成分可以提高合金的热导率。

4.1.1 镁硅质量比对铝合金热导率和力学性能的影响

Si元素有利于提高合金的铸造性能以及力学性能,Mg元素与Si结合可实现时效强化,合适的镁硅质量比有利于提高合金的导热性能^[15-18]。当Mg与Si完全生成 Mg_2Si 相时,两者的质量比为1.73。研究表明,当两者的质量比稍小于1.73时,合金的热导率最高。

由图2^[16]可以看出,当两者的质量比为1.48时电导率达到最高,因为当镁硅质量比稍小于1.73时,过剩的硅刚好与合金中的铁形成 $\text{Al}_3\text{Fe}_2\text{Si}_2$ 均匀分布于铝基体中,减少了Si、Fe在Al中的固溶,使合金的电导率升高。但是当镁硅质量比过小时,过剩的硅不仅固溶于铝基体中,还易与Fe形成粗大相,增大了电子的散射,降低了合金的电导率。当镁硅质量比大于1.73时,过剩Mg的存在显著降低了 Mg_2Si 在铝中的溶解度,造成强化相从铝基体中析出。同时,过剩的Mg溶于铝基体

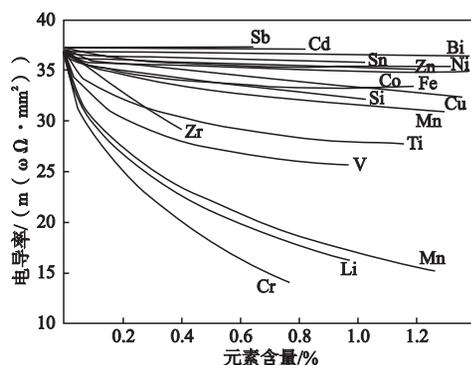


图1 不同元素对纯铝电导率的影响^[13-14]

Fig. 1 Effect of different alloying elements on electric conductivity of pure aluminum

中,增加了自身在铝基体中的固溶度,导致合金的导电性能下降显著。

4.1.2 添加稀土元素对铝合金热导率的影响

刘顺华^[19]等人研究表明,稀土元素可作为铝合金的精炼剂,对熔体有除气作用,同时降低了合金中的杂质含量,在很大程度上降低了熔体中的气孔率,使组织变得更加紧密,加强了合金化程度。在铝合金中,添加稀土元素可以与Fe、Si等合金元素形成过渡性化合物分布于晶界,降低了铁、硅元素在铝基体中的固溶分布,可以提高合金的导热性能^[20]。稀土元素对铝合金导热性能的影响也与其含量有关。由图3^[21]可以看出,当稀土含量小于0.05%时,对6063铝合金的热导率没有影响;当含量小于0.3%时,随着稀土含量的升高,热导率是增大的,达到0.3%时热导率达到峰值;当稀土含量超过0.3%时,随着稀土含量的继续增大,热导率急剧降低。原因可能是:一方面稀土含量的增加使得部分稀土固溶于铝基体中,在晶界处易出现稀土元素偏聚;另一方面是稀土的加入,引起了铝合金晶粒组织的细化,晶界的增多增大了电子通过的难度,使6063铝合金热导率下降。

4.2 热处理对铝合金热导率的影响

铝合金的热处理工艺是退火、淬火和时效,不同的热处理工艺^[22-24]具有不同的热导率。由于淬火冷却速度很快,易形成过饱和固溶体,引起晶格畸变,电子的散射增加,使热导率降低。然而,退火是相对平衡的,容易产生再结晶,退火前,晶格畸变程度减轻,使电子转移更容易,提高了铝合金热导率。

4.2.1 固溶处理对铝合金热导率和强度的影响

通常,元素以固溶态形式存在的铝合金,热传导性能和热扩散性能低于铝合金基体中元素相以析出方式时的导热性能和热扩散性能。原因是由于经过固溶处理后,材料组织明显变化,一些合金元素和强化相会重新溶解在基体中,形成过饱和固溶体,使得晶格畸变严重^[26],强度增加,热率下降。张建新^[25]等人研究了固溶温度对Al-Mg-Si合金强度及热导率的影响,结果见图4^[25]。可以看出,随着固溶温度的升高,热导率呈下降趋势,但是强度在一定范围内是增加的;在525℃左右已充分固溶,材料强度达到峰值,而铝合金在510℃固溶处理后,其强度和导热性能适中,达到最佳配合,完全可以满足一般散热型材的需要。

4.2.2 时效处理对铝合金热导率和力学性能的影响

时效处理温度对导热性能的影响机理^[27-28],主要有以下几个方面:①温度较高时,由于原子扩散容易,合金组织中的空位、位错缺陷修复速度较快,所以前期合金的热导率上升幅度较大,达到峰值的时间较

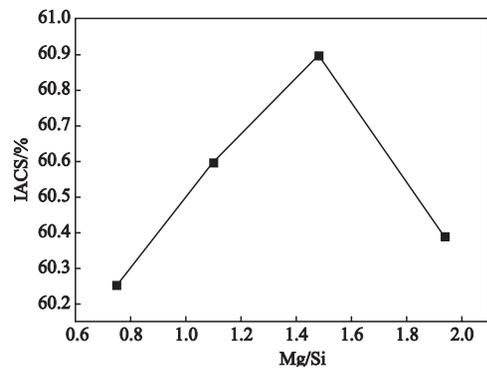


图2 不同Mg/Si质量比对时效Al-Mg-Si合金热导率的影响
Fig. 2 Effect of different Mg/Si mass ratios on thermal conductivity of aged Al-Mg-Si alloy

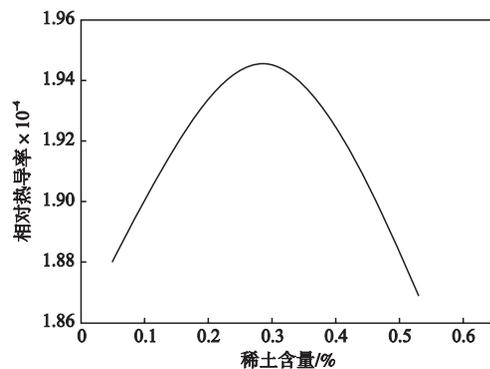


图3 稀土对6063铝合金热导率的影响
Fig. 3 Effect of different levels of rare earth on thermal conductivity of 6063 aluminum alloy

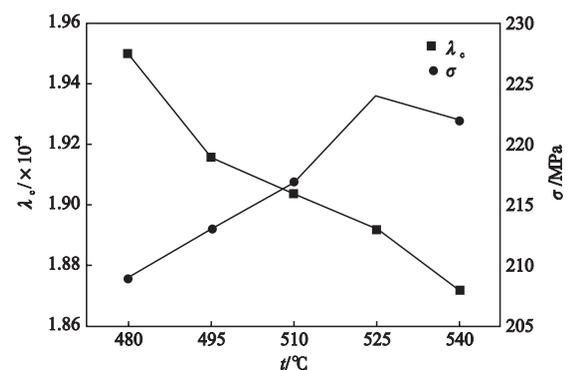


图4 固溶温度对Al-Mg-Si合金强度及热导率的影响
Fig. 4 Effect of solution temperature on strength and thermal conductivity of Al-Mg-Si alloy

短,但在后续热处理中,组织中过剩的Si固溶于合金组织中,就会出现热导率下降的趋势;②温度较低时,由于原子扩散较慢,合金组织中缺陷不易修复,即使保温时间很长,组织中的缺陷也只能部分得到修复,且过剩的游离态Si元素溶解量很少,所以试样热导率相对值达到峰值的时间长,且数值不高;③时效过程中部分平衡相从固溶体中析出,这些相的状态与分布对试样的强度、导热性能有较大影响。当析出的脱溶相(Mg₂Si、过剩Si等)较少而且不均匀时,材料的热导率相对值较低,而强度较高,当析出相较多且呈弥散分布时,材料的导热性能相对值较高,此时强度稍低。

4.2.3 退火处理对铝合金热导率和力学性能的影响

选择不同的退火温度^[29]和冷却方式对6063铝合金的热导率有很大的影响,因为退火处理能够均匀材料组织和成分,消除残余应力,细化晶粒,减少组织中的缺陷。由图5^[21]可以看出,随着退火温度的升高,热导率是下降的,并且冷却方式不同,热导率下降的程度也不相同^[30]。因为当退火温度不断升高时,铝合金中有更多的第二相溶解于铝基体中,过饱和度升高,导致晶格严重畸变,自由电子运动受阻,使热导率下降。由图也可以看出,退火处理一般选择较低的退火温度,选择随炉冷却来获得较高的热导率。

4.3 熔炼方式对铝合金热导率的影响

熔炼时的精炼方式和熔炼温度对铝合金的热导率也有一定的影响^[18],因为合金中存在的气、渣会明显降低热导率,选用NaCl和KCl作为覆盖剂,熔炼温度控制在700~750℃,并用六氯乙烷作精炼剂可以除掉合金中的有害气体和一些非金属夹杂物^[31]。温度过高或者过低都会使合金内部出现缺陷,在熔炼时^[32]可以加入一定量的氟化钙、活性炭、氯化钠等来降低气孔度,使氧化物夹杂物减少,合金的导热性能、强度、耐腐蚀性、延展性、加工性得到提高^[18]。

4.4 成形方式对铝合金导热率的影响

挤压过程中,可以将原来铸态中聚集的夹杂破碎和气孔被压合。随着挤压比的增大,合金开动的滑移系增多,在热挤压的高温条件下,动态再结晶也容易发生,再结晶时有大量的晶核在晶格严重畸变的高能位区域里生成,促进了新晶粒的生成,从而细化了晶粒。在挤压变形过程中,通过增大变形量能够有效地改善铸态合金中偏析、气孔和晶粒粗大等缺陷,以获得细小均匀的再结晶组织。

4.4.1 挤压温度对铝合金热导率的影响

温度主要通过影响合金的固溶度来影响热导率。由图6^[33]看出,挤压比相同时,随着挤压温度的升高,热导率都是呈下降趋势。在Al-Mg-Si合金中,Mg和Si

反应生成Mg₂Si强化相,随着温度的升高,Mg₂Si相溶入铝基体的量增多,形成过饱和固溶体过饱和程度也增加,在铝合金冷却的时候,就会有更多的固溶体析出,导致晶格畸变更加严重,运动电子受阻,热导率下降^[33-37]。

4.4.2 挤压比对铝合金热导率的影响

由图7^[33]可见,对于6063铝合金,在相同的挤压温度下,随着挤压比的增大,热导率是先增大后减小,当挤压比达到50%时,热导率达到最大。当挤压比小于50%时,随着挤压比的增大,使合金内部的气孔、夹杂减少,提高了合金的致密度,正是这些孔隙增加了对运动电子的散射,使热导率下降。随着挤压比的增大,还会增大颗粒与颗粒之间的接触面积,使原子扩散容易,界面结合得到改善,界面热阻也降低,热导率升高^[33]。但是当挤压比大于50%时,合金产生大的形变,发生形变诱发析出,使Mg₂Si相析出越多,合金热导率下降。

4.5 杂质和孔隙度的影响

如果合金中存在少量杂质^[38-39],将会导致合金的电导率增加,热导率降低。如果铝合金中存在一些孔隙,

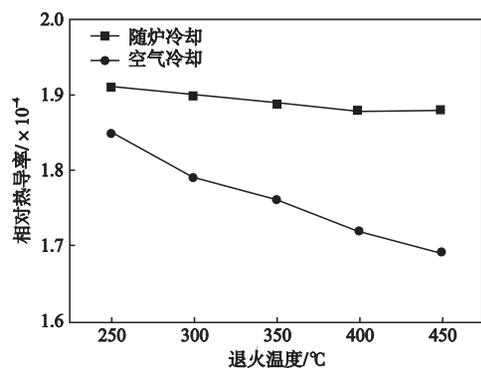


图5 退火处理对6063铝合金热导率的影响

Fig. 5 Effect of different annealing temperatures on thermal conductivity of 6063 aluminum alloy

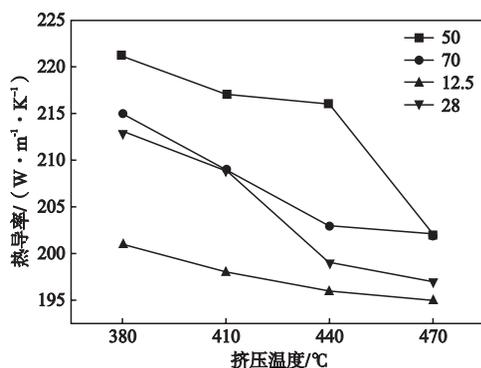


图6 挤压温度对6063铝合金热导率的影响

Fig. 6 Effect of extrusion temperature on thermal conductivity of aluminum 6063 alloy

则也会严重降低铝合金的热导率。铝熔体中的气体主要是氢气，它在铝中的溶解度很小，而且容易成为阻碍电子运动的气孔，因此使合金的热导率降低。由于不同的精炼和熔渣方式对合金的导热性有不同的影响，所以我们需要对铝合金熔体进行精炼和除渣处理。

5 研究进展

随着高导热铝合金应用越来越广泛，对其性能提出了更高的要求，国内外一些研究机构和企业对开发新型的高热导率铝合金研究也越来越关注。其中国内主要有：邓邦惠、余云等^[40]通过合金成分优化（加入钴、硼、钛元素）和氧化钴变质处理，将 $w(\text{Si})=10.5\% \sim 13.5\%$ 的铝硅合金的热导率从 $125 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 提高到了 $190 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，实现了性能良好、成本低廉的高热导率AlSi12铝合金压铸件，扩大了其应用范围。许德英、杨昭等^[41]采用氧化硼作变质剂，再结合钛、锆元素的加入和后续热处理将 $w(\text{Si})=6.5\% \sim 7.5\%$ 的铝硅合金的热导率从 $146 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 提高到了 $210 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，实现了在现有良好的铸造性能、力学性能以及热处理性能基础上，显著提高了AlSi7Mg铸造铝合金的导热性能，扩大了其应用范围。

国际上，Cheol-Woo Kim^[42]等人分析了在压铸合金Al-Si-Cu-Fe-Mg-Mn中，合金元素Si、Cu、Mg、Fe和Mn对导热性、压铸特性和力学性能的影响，并找出了每种合金元素合适的添加量，用于开发散热器零部件。Mn对热导率的影响最大，Si和Fe含量对提高强度和限制铸造缺陷（热撕裂）具有重要意义。J. K. Chen^[43]等人该研究中，使用重力铸造和压铸工艺研究了铸造工艺和热处理对Al-10Si-0.6Cu-0.9Fe-0.7Zn铝合金的热导率的影响。对压铸铝合金进行固溶（T4）和时效处理（T6），硅沉淀物被球化，使导热性大大提高，从压铸条件下的 $126.8 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 增加到 $550 \text{ }^\circ\text{C}$ 固溶和 $200 \text{ }^\circ\text{C}$ 下时效4 h的 $151.6 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。Y. H. Cho^[44]等人研究了Ni对含Si量低的Al-Si铸造合金的热导率和流动性的影响。当添加0.5%Ni时，Al-2%Si合金的室温热导率立即下降，而进一步添加Ni至3%对热导率几乎没有影响，均在 $180 \sim 185 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 的范围内。Veijo Rauta^[45]等人通过对所研究的Al-Si-Mg和Al-Si-Cu合金进行热处理，可以实现高达50%的导热率的改进。用铈和钠改变微观结构会略微增加导热性，而流变铸造和晶粒细化处理不会影响导热性。Vamsi Krishna Balla^[46]采用激光净化技术在铝合金上沉积80Cu-20Mo涂层，明显提高了2024铝合金的热导率，使其平均热导率从 $121 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 提高到 $225 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。这成功地证明了使用激光表面改性来沉积涂层可以提高各种封装材料的导热性。

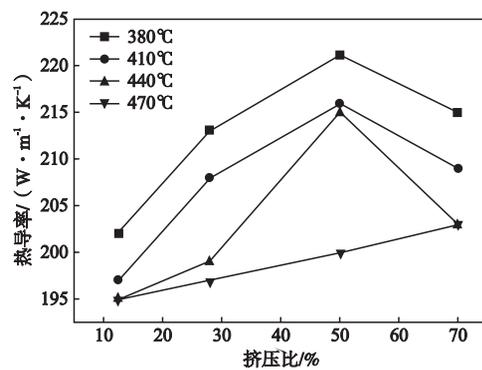


图7 挤压比对6063铝合金热导率的影响

Fig. 7 Effect of extrusion ratio on thermal conductivity of 6063 aluminum alloy

6 发展方向

为了进一步提高高导热铝合金的性能，在未来的研究中需要对以下几个方面加以关注。

(1) 由Wiedemann-Franz定律可知，在一定的温度下，对于同种合金，导电率与热导率成正比，因此，在不降低力学性能条件下，添加提高铝合金导电性的元素来增加其热导率。许多研究人员通过添加不同的合金元素和调整元素添加量，成功地提高了铝合金的热导率，合金元素B或Sr的适当加入有利于提高合金的导电性和力学性能^[47]，还应该避免加入一些严重降低铝合金热导率的元素，例如V、Ti、Cr等元素的添加，将使合金的电导率大幅降低。

(2) 变形铝合金（例如Al-Mg-Si合金）具有很好的力学性能和导热性能，但是其铸造性能差，不适合生产结构复杂的一体化壳类零件和箱体，所以变形合金铸造化^[48]，将变形铝合金采用铸造的方法进行铸造成形零部件，可以获得很好的性能，对生产高性能导热铝合金具有重要指导意义。

(3) 硅元素含量可以提高合金的流动性，但是随着硅含量的升高，严重降低了合金的热导率，其伸长率也下降，所以降低硅含量，采用半固态成形来解决宽结晶温度范围的问题是开发高导热铝合金的发展趋势，比如半固态压铸或挤压成形^[49]，改变初生相的形态和尺寸，使其不长成枝晶，也使共晶硅相的颗粒细化，减少对运动电子的散射来提高热导率。

(4) 热处理可以提高材料的力学性能，改善金属的切削加工性，消除残余应力，可以通过控制热处理过程中的参数来控制合金元素的固溶度和第二相的析出，进而提高合金的热导率，但是不宜选用过高的温度，否则导致晶格严重畸变，影响合金导热性能。

参考文献:

- [1] SHAJI M C, RAVIKUMAR K K, RAVI M, et al. Development of a high strength cast aluminium alloy for possible automotive applications [J]. *Materials Science Forum*, 2013, 765: 54–58.
- [2] HIRSCH J, AL-SAMMAN T. Superior light metals by texture engineering: Optimized aluminum and magnesium alloys for automotive applications [J]. *Acta Materialia*, 2013, 61 (3): 818–843.
- [3] YUAN W, LIANG Z. Effect of Zr addition on properties of Al-Mg-Si aluminum alloy used for all aluminum alloy conductor [J]. *Materials & Design*, 2011, 32 (8-9): 4195–4200.
- [4] TZOU G J, TSAO C C, LIN Y C. Improvement in the thermal conductivity of aluminum substrate for the desktop PC Central Processing Unit (CPU) by the Taguchi method [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2010, 34 (6): 706–710.
- [5] 张建新, 高爱华. 热处理工艺对Al-Mg-Si系合金导热性能的影响 [J]. *特种铸造及有色合金*, 2011, 31 (10): 911–913.
- [6] CUI Xiaoli, WU Yuying, LIU Xiangfa, et al. Effects of grain refinement and boron treatment on electrical conductivity and mechanical properties of AA1070 aluminum [J]. *Materials & Design*, 2015, 86: 397.
- [7] BAKHTIYAROV S I, OVERFELT R A, TEODORESCU S G. Electrical and thermal conductivity of A319 and A356 aluminum alloys [J]. *Journal of Materials Science*, 2001, 36 (19): 4643–4648.
- [8] OLAFSSON P, SANDSTROM R, ÅKARLSSON. Comparison of experimental, calculated and observed values for electrical and thermal conductivity of aluminium alloys [J]. *Journal of Materials Science*, 1997, 32 (16): 4383–4390.
- [9] KLEMENS P G, WILLIAMS R K. Thermal conductivity of metals and alloys [J]. *International Metals Reviews*, 1986, 31 (1): 197–215.
- [10] 潘复生, 张丁非. 铝合金及应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006, 1.
- [11] HUANG Ya-ying, HU Zhi-liu. Research progress on the aluminum alloy with high thermal conductivity [J]. *Mechanics and Materials*, 2014, 574: 396–400.
- [12] 杨涤心, 夏青, 杨留栓. 铸造铝-硅合金的电导率与化学成分 [J]. *特种铸造及有色合金*, 2002 (4): 58–60.
- [13] 吴孟武, 华林. 导热铝合金及铝基复合材料的进展 [J]. *材料导报*, 2018, 32 (5): 1487–1495.
- [14] KARABAY S. Modification of AA-6201 alloy for manufacturing of high conductivity and extra high conductivity wires with property of high tensile stress after artificial aging heat treatment for all-aluminium alloy conductors [J]. *Materials & Design*, 2006, 27 (10): 821–832.
- [15] 高爱华, 王福荣. 镁硅质量比对6063铝合金组织和性能的影响 [J]. *材料热处理技术*, 2012, 8: 23–25, 28.
- [16] HAN Y, SHAO D. Effect of Mg/Si ratio on the microstructure and hardness-conductivity relationship of ultra fine grained Al-Mg-Si alloys [J]. *J Mater Sci* (2017) 52: 4445–4459.
- [17] 杨迎新, 张乐平, 钟建华. 提高6063铝合金导热性能的途径探讨 [J]. *金属功能材料*, 2004, 11 (3): 23–25.
- [18] 李林君. 高性能热传导6063铝合金的研究 [D]. 南宁, 广西大学, 2015.
- [19] 刘顺华, 王桂芹, 吴爱民. 稀土元素对工业纯铝导电性的影响 [J]. *中国有色金属学报*, 2000, 10 (3): 334–339.
- [20] 饶克, 钟建华. 稀土对6063铝合金导电、导热性能的影响 [J]. *铝加工*, 2002, 25 (6): 22–24.
- [21] 钟建华, 张建新. 提高铝合金导热性能的研究 [J]. *铸造技术*, 2003, 24 (6): 549–550.
- [22] LUMLEY R N, POLMEAR I J, GROOT H, et al. Thermal characteristics of heat-treated aluminum high-pressure die-castings [J]. *Scripta Materialia*, 2008, 58 (11): 1006–1009.
- [23] 李斌. Si、Cu和热处理工艺对Al-Si合金性能的影响 [D]. 长沙: 中南大学, 2014.
- [24] LUMLEY R N, DEEVA N, ROBERT Larsen. The Role of Alloy Composition and T7 Heat Treatment in Enhancing Thermal Conductivity of Aluminum High Pressure Die Castings [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2013, 44 (2): 1074–1086.
- [25] 张建新, 高爱华. 热处理工艺对Al-Mg-Si系合金导热性能的影响 [J]. *特种铸造及有色合金*, 2011, 31 (10): 911–913.
- [26] 张茁, 陈康华. 固溶处理对Al-Zn-Mg-Cu铝合金电导率的影响 [J]. *粉末冶金材料科学与工程*, 2004, 9 (1): 79–83.
- [27] 邓朝飞, 安宁. 热处理对铸造ZL102合金组织和性能的影响 [J]. *材料热处理技术*, 2011, 40 (24): 216–217.
- [28] 高红选, 古文全, 吴建. 固溶时效处理对铝合金电阻率及力学性能的影响 [J]. *热加工工艺*, 2014 (12): 210–211.
- [29] 王剑, 曹东, 许德英. 高导热共晶Al-Si合金的制备及其性能 [J]. *特种铸造及有色合金*, 2018 (4): 441–445.
- [30] 王宗和, 周光永. 根据工艺和材料用途控制6063铝合金的成分 [J]. *轻合金加工技术*, 2000, 28 (12): 31–32.
- [31] 黄雅莹. B和Er对Al-Mg-Si合金组织及导热性能的影响研究 [D]. 南宁: 广西大学, 2015.
- [32] 骆宣佐. 高热传导稀土散热器铝合金材料及其制造方法 [P]. 中国: CN103352153, 2013.7.2.
- [33] 胡治流, 罗付秋. 挤压温度和挤压比对6063铝合金导热性能的影响 [J]. *铝加工*, 2011 (5): 30–33.
- [34] JI X, ZHANG H, LUO S, et al. Microstructures and properties of Al-Mg-Si alloy overhead conductor by horizontal continuous casting and continuous extrusion forming process [J]. *Materials Science & Engineering A*, 2016, 649: 128–134.
- [35] 杨伏良, 甘卫平, 陈招科. 挤压温度对高硅铝合金材料物理性能的影响 [J]. *机械工程学报*, 2006, 42 (6): 7–10.
- [36] YING T, ZHENG M Y, LI Z T, et al. Thermal conductivity of as-cast and as-extruded binary Mg-Al alloys [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, 608: 19–24.
- [37] 章冰. 散热用Al-Mg-Si系铝合金组织与性能的研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2003.

- [38] 徐纪平, 廖秋慧, 傅子卿. 杂质元素Fe对铸造铝合金YL102电导率的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2005, 25 (2) : 78-80.
- [39] CHOI S W, KIM Y M, LEE K M, et al. The effects of cooling rate and heat treatment on mechanical and thermal characteristics of Al-Si-Cu-Mg foundry alloys [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2014, 617: 654-659.
- [40] 邓邦惠, 余云. 一种高导热压铸铝合金及其制备方法: CN 104264017 A [P]. 2015-01-07.
- [41] 许德英, 杨昭. 高导热铸造铝合金及其制备方法: CN 103526082 A [P]. 2014-01-22.
- [42] CHEOL-WOO, JAE-IK Cho. The effect of alloying elements on thermal conductivity and casting characteristic in high pressure die casting of aluminum alloy [J]. Material Society, 2012.
- [43] CHEN J K, HUNG H Y. Effects of casting and heat treatment processes on the thermal conductivity of an Al-Si-Cu-Fe-Zn alloy [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017: 189-195.
- [44] CHO Y H, KIM H W. A new approach to the design of a low Si-added Al-Si casting alloy for optimising thermal conductivity and fluidity [J]. J Mater Sci, 2015, 50: 7271-7281.
- [45] VEIJO R, CELAL C. Effect of annealing and metallurgical treatments on thermal conductivity of aluminium alloys [J]. Foundry Engineering, 2016: 157-171.
- [46] VAMSI K B, SUSMITA Bose. Laser surface modification of Al-4Cu-1Mg alloy for enhanced thermal conductivity [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2009, 47: 651-655.
- [47] CUI Xiaoli, CUI Hongwei, WU Yuying, et al. The improvement of electrical conductivity of hypoeutectic Al-Si alloys achieved by composite melt treatment [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019.
- [48] SAHA D, SHANKAR S, APELIAN D. Casting of aluminum based wrought alloys using controlled diffusion solidification [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2004, 35 (7) : 2174-2180.
- [49] ROGER N L, Thermal Conductivity of Aluminium High-Pressure Die Castings Fundamentals of Aluminium Metallurgy [M]. VIC, AWBell Pty. Ltd, Dandenong South, VIC, Australia: La Trobe University, Melbourne, 2018: 217-247.

Development and Research Progress of High Thermal Conductivity Aluminum Alloys

WANG Hui¹, LI Yuang-dong^{1,2}, LUO Xiao-mei¹, BI Guang-li^{1,2}, MA Ying^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Non-Ferrous Metals, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China; 2. Key Lab. of Non-Ferrous Metal Alloys and Processing, Ministry of Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China)

Abstract:

Aluminum alloys have been used widely in electronics and communications industries because of their low density, high strength, good electric and thermal conductivity. However, since some systems and equipment tend to be miniaturized, lightweight, and with the increase of power density, the requirement for heat dissipation is getting higher and higher. Therefore, the conventional aluminum alloys have not met the requirements of design and application. This paper expounds the high thermal conductivity aluminum alloys' classification, the mechanism of thermal conductivity and the factors affecting the thermal conductivity. The research progress at home and abroad is summarized, and the research direction of improving the thermal conductivity of aluminum alloys is advised.

Key words:

wrought aluminium alloy; cast aluminium alloy; mechanism of thermal conductivity; thermal conductivity