

Mg-Al-Zn 系镁合金在大气中的散热性能研究

任凌宝^{1,2}, 权高峰^{1,2}, 江柱中^{1,2}, 尹冬弟^{1,2}

(1. 西南交通大学, 四川 成都 610031)

(2. 材料先进技术教育部重点实验室, 四川 成都 610031)

摘要: 在 20~220 °C 范围内对比研究了 AZ80、AZ31、ZK60 镁合金和 AA6082 铝合金在大气中的散热性能, 分别测量其环境散热曲线并用指数型热动力学方程 $T=T_0+\Delta T_0 \exp(-t/A_0)$ 拟合。结果表明, 固溶处理可使铸态或挤压态镁合金热导率下降, 而固溶+时效处理后其热导率有所提升。分析了瞬时温差与瞬时温度比值 $\Delta T/T$ 与镁合金、铝合金散热性能的关系, 自然对流条件下, 柱高对 AZ80 镁合金散热性能影响较小; 在人工强制对流条件下, 当 $0.25<\Delta T/T<0.45$ 时, 高柱 (60 mm) 散热速率约为低柱 (20 mm) 的两倍。在自然对流条件下, AZ80、AZ31 镁合金的散热性能在 $0.25<\Delta T/T<0.45$ (120~220 °C) 时, 明显优于 AA6082 铝合金。在 $0.05<\Delta T/T<0.25$ (20~120 °C) 时, 这 3 种合金的散热性能无明显差别。

关键词: 镁合金; 散热性能; 热导率; 热动力学

中图分类号: TG146.2*2

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2017)05-1265-06

随着动力、电子电气设备的高功率密度化、微型化、轻量化和集成化的发展趋势, 镁合金、铝合金等轻质散热材料得到了更多的开发与应用^[1], 镁合金和铝合金都具有轻质高强和高散热性的特点, 特别是镁合金由于其比强度高, 轻量化效果更加显著。塑性变形可以进一步提高镁合金、铝合金的强度等力学性能, 对比研究不同状态下镁合金和铝合金的导热和散热性能, 可以在加深对镁合金散热机制的理解的基础上, 通过材料设计和加工工艺设计, 开发出更高导热-散热性能的器件。

一般认为, 合金中的合金化组元数目越多, 其热导率越低。其原因是合金中的溶质元素做为散射中心的声子耗散了热量。关于合金元素对镁合金散热性能的影响, 前人多有研究。Zn 的添加有助于 Mg-RE 合金形成长程有序堆垛相 (LPSO), 这种组织会消耗稀土元素并提高导热性能^[2], 热扩散系数和热导率随着温度的增加而增加, AS21 镁合金的热扩散系数和热导率比 AM20 的要低 30% 左右, 原因为 Si 抑制了 $Mg_{17}Al_{12}$ 沉淀相的形成^[3]。在温度低于 160 °C 时, AM20 的热扩散率随着温度的增加而增加, 当温度超过 160 °C 时, 热扩散率随温度增加增速变缓。对于 Mg-Al-Mn 合金, 温度与热扩散系数曲线斜率的变化可能是由于

$Mg_{17}Al_{12}$ 沉淀相的减少而导致的^[4]。随着铝含量的增多, 铸态 Mg-Al 合金的热导率逐渐降低。挤压态的镁合金的热导率存在各向异性。当在纯镁中每添加 0.5at% 的铝元素, 其热扩散系数就降低 $10 \text{ m}^2/\text{s}$, 原因是由于杂质的散射^[5]。声子对热导率的贡献在整个浓度范围内几乎是不可见的, 而电子的贡献随着 Sc 浓度的增加而降低。声子热导率对整个热导率的影响可以通过浓度的洛伦兹数体现出来。当 Sc 含量增加时, 洛伦兹数增加^[6]。过渡元素 Y 的添加降低了镁合金的传热性能^[7]。本实验中重点研究了 Mg-Al-Zn, Mg-Zn-Zr 以及 Al-Mg-Si 合金的散热性能。环境温度和合金元素的含量对具有析出强化组织的镁合金的导热性能影响尤为明显。不同材质的金属合金, 由于价电子、原子核大小和质量、声子散射系数等不同, 其热导率具有很大差异。散热性能是具体几何-物理构型的材料通过向环境中散发热量、使得自身温度下降的一种特性, 既与热导率 (材料内部的热量传输特性) 有关, 也与外表面热辐射特性有关。而表面辐射特性除了和表面几何形态 (如形状、光洁度等)、化学特性 (物质构成、氧化-钝化状态、吸附物等) 有关外, 与表面黑度系数、环境特性 (环境温度、流动状态、介质化学等) 紧密相关。因此散热性能是一个综合指标, 本研究试图通

收稿日期: 2016-05-06

基金项目: 国家自然科学基金青年项目 (51401172); 四川省科技计划 (2015HH0012); 中央高校基本科研业务费专项资金 (2682014BR002); 西南交通大学拔尖创新人才、优秀博士学位论文培育项目

作者简介: 任凌宝, 男, 1990 年生, 博士生, 西南交通大学材料科学与工程学院, 四川 成都 610031, 电话: 028-87634673, E-mail: bk20095024@my.swjtu.edu.cn

过在简化的条件下，通过对材料样品热导率和散热曲线的测试，初步探讨镁合金在不同状态下的散热规律和机制，丰富镁合金的工程应用基础信息。

对于可热处理镁合金，其热处理工艺过程与其散热性能密切相关，合金在时效时热导率的变化可根据关系式(1)来解释^[8]。其中热阻率 $\rho_{\text{precipitation}}$ 是控制因素， ρ_{solute} 、 ρ_{defect} 是由于固溶原子和晶体缺陷引起的热阻率， ρ_0 为基本热阻率， ρ 为总热阻率。热处理将对(1)中后面 3 项产生影响：

$$\rho = \rho_0 + \rho_{\text{solute}} + \rho_{\text{precipitation}} + \rho_{\text{defect}} \quad (1)$$

同时固溶处理淬火后得到的过饱和固溶体，将使得溶质临近的晶格发生扭曲畸变，进而破坏了晶格势场的周期性，从而增加了电子的散射几率，降低合金的导热性能。

材料主要通过接触介质热传导、空气接触热传导和辐射散热的方式进行散热。大部分文献在研究材料的散热性能时，只考虑到材料内部的散热情况，用材料热散失系数来描述材料内部达到热平衡的快慢程度。然而这种描述方法只能表示材料内部的散热情况。而在环境温度下，材料还会通过空气接触和热辐射的方式将热量散失掉。显然热散失系数不能描述材料在室温下空气中的散热情况。环境温度下，材料散热能力与材料的容热能力和降温时间有关，研究表明，在降温初期，容热能力越小，材料温度下降得越快，随着降温时间增加，降温速度最终趋于零。

1 实验

实验所用的材料如表 1 所示，将不同热处理状态、不同材质的试样加工成 $\Phi 30.0 \text{ mm} \times 3.0 \text{ mm}$ 的测试标准样，使用 DRL-II 热导率测试仪，在圆盘试样上下表面涂覆导热硅脂，圆盘上表面紧贴加热紫铜圆盘，下表面紧贴散热紫铜圆盘。

在自然散热条件下测量室温到 493 K (220 °C) 范围内不同散热棒高度及对流情况下的散热曲线，拟合了散热动力学曲线方程。将不同材料按照 $\Phi 8.0 \text{ mm} \times 20.0 \text{ mm}$ 和 $\Phi 8.0 \text{ mm} \times 60.0 \text{ mm}$ 加工成不同长度的散热

棒，每种规格 3 根。基座尺寸为 $27.0 \text{ mm} \times 27.0 \text{ mm} \times 50.0 \text{ mm}$ 。基座与试样连接为螺纹连接以保证密接装配，整体加热后，置于空气中自然散热。设定棒状试样顶端为第 1 温度测试点，与基座配接部位为第 2 温度测试点。使用 K 型热电阻配接多功能万用表 (Faith®368 True RMS Multimeter) 的温度测试端分别采集在不同对流状态下，不同材料和不同长度规格的散热棒顶部和底部两个温度测试点的温降数据，据此绘制温降曲线，其中人工强制对流是通过鼓风机距试样约 1 mm 等高处稳定送风，使用扇叶风速计测定风速，实验过程中测定 5 次，取平均风速值。

金相组织观察采用 4% 硝酸乙醇溶液腐蚀，在 Zeiss Axio Lab.A1 光学显微镜下观察不同热处理状态下材料组织状态，分析不同热处理组织对合金散热性能的影响规律。

2 结果与讨论

2.1 不同合金元素及热处理对镁合金热导率的影响

图 1 是本实验所用的 4 种镁合金材料组织，可以看出 ZK60 铸态组织主要是由 $\alpha\text{-Mg}$ 和 MgZn_2 析出相组成^[9]。没有明显的枝晶偏析，析出相在晶界和晶内均匀分布；AZ31 挤压态组织主要为 $\alpha\text{-Mg}$ ；AZ80 铸态组织主要由 $\alpha\text{-Mg}$ 和 $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 析出相组成，析出相为离异共晶组织，呈枝晶形貌分布于晶界；挤压态 AZ80 为等轴晶组织，有少量片层状 $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 在晶界附近析出^[10]。

对挤压态 AZ31、铸态和挤压态 AZ80、挤压态 ZK60 进行热处理后各自加工成图 1 所示的盘状测试试样，测试热导率。实验测试温度区间为 293~493 K (20~220 °C)。

图 2 为不同热处理工艺下的镁合金与钢、纯铝热导率。从图 2 中可以看出，材料的热导率与材料种类和对材料的热处理方式密切相关 (图中，C 代表铸态，E 代表挤压态；F 为加工态；T4 为 440 °C，4 h；T5 为 170 °C，10 h；T6 为 440 °C，4 h+170 °C，10 h)。一般来讲，铸态铝热导率高于铸态镁，两者热导率都

表 1 实验材料及相关性能

Table 1 Basic data of experimental materials

Materials	State	Composition, $\omega/\%$	Density, $\rho/\text{g cm}^{-3}$	Specific heat, $C/\text{kJ (kg K)}^{-1}$	Thermal conductivity, $\lambda/\text{W (m K)}^{-1}$
Pure Mg	As-cast	99.99-Mg	1.74	1.025	153
Pure Al	As-cast	99.9-Al	2.71	0.91	220
AZ31	Extruded	2.5~3.5Al, 0.7~1.3Zn, Bare Mg	1.78	1.05	96.4
AZ80	Extruded/As-cast	7.8~9.2Al, 0.2~0.8Zn, Bare Mg	1.80	1.05	58.62
ZK60	Extruded	4.8~6.2Zn, 0.5Zr, Bare Mg	1.80	1.03	117.23
AA6082	Rolled	0.6~1.2Mg, 0.7~1.3Si, Bare Al	2.70	0.90	170~220

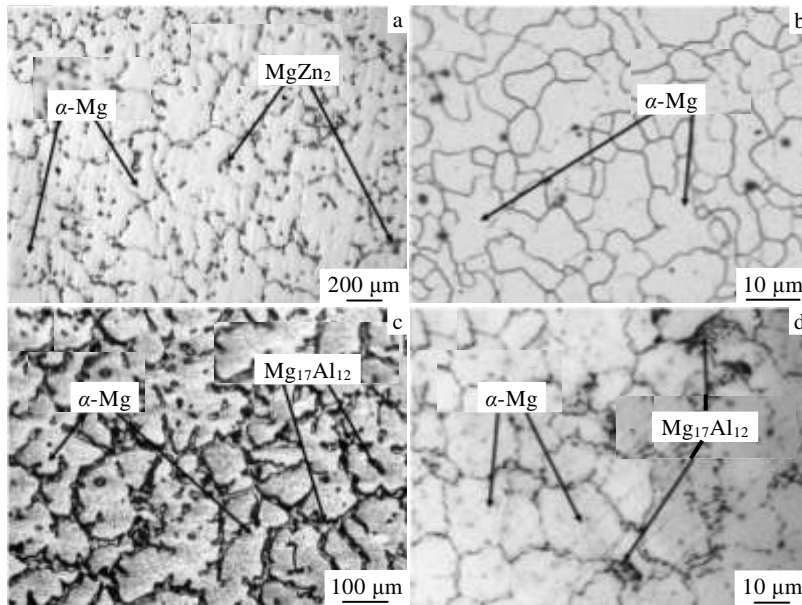


图 1 4 种镁合金显微组织

Fig.1 Microstructures of cast ZK60 (a), extruded AZ31 (b), cast AZ80 (c), and extruded AZ80 (d) alloys

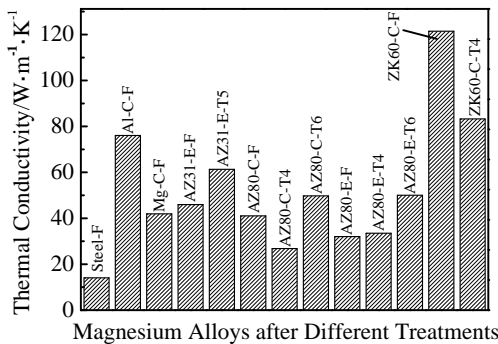


图 2 不同热处理工艺下的镁合金与钢、纯铝热导率

Fig.2 Thermal conductivity of magnesium alloys after different heat treatments

比钢高。对于 AZ31 挤压态, AZ80 铸态, ZK60 铸态, 固溶处理后热导率有所下降, AZ80 挤压态固溶处理后热导率基本不变; 经过时效处理后, AZ31 挤压态, AZ80 铸态和挤压态, 热导率有所增加。铸态 ZK 系镁合金 (ZK60) 与 AZ 系镁合金相比较, 热导率提升近 1 倍, 甚至高于铸态纯镁和纯铝的热导率。

固溶处理后, 材料热导率有所下降, 但经过固溶+时效处理后, 镁合金热导率可有明显提高, 可见 $Mg_{17}Al_{12}$ 的存在在一定程度可提升材料的热导率。固溶处理对挤压态镁合金影响不大, 由图 1 可知, AZ80 和 AZ31 在经过热挤压加工后, 材料组织包含少量析出相的双相组织甚至单相组织, 特别是 AZ31, 基本没

有析出相存在, 所以固溶处理对组织形态的改变微小, 对导热性能的影响也较小。基体相中 Al 元素的增加和 Zn 含量的减少将不利于其热导率提高。Zr 微量合金元素的加入可以提升镁合金材料的热导性能。

2.2 基于微观换热物理模型的镁合金散热动力学方程

空气与材料碰撞前空气分子的动能的平均值为 $5/2kT_0$, T_0 为室温, k 为玻尔兹曼常数。假设在和材料碰撞后空气分子的温度和材料温度相同, 动能为 $5/2kT$ 。由此可以计算出一次碰撞所带走的平均能量为 $(5/2kT-5/2kT_0)$, 假设在 dt 时间内由 $nSvd$ 个分子碰撞, 其中 n 为空气的分子密度, S 为材料的表面积, V 为材料的体积。 v 为空气的平均速度, 则此时材料的温度满足如下微分方程:

$$-nSvdt(5/2kT-5/2kT_0)=\rho VCdT \tag{2}$$

$$T=T_0+(T_s-T_0)e^{-nSvkt/(2\rho VC)} \tag{3}$$

令

$$-5nSvk/2\rho VC=-M, \Delta T_0=T_s-T_0 \tag{4}$$

$$则 T=T_0+\Delta T_0e^{-Mt} \tag{5}$$

镁合金和铝合金在不同对流条件下的散热曲线如图 3 所示, 人工强制对流可显著提高镁合金和铝合金的散热速率, 从 480 K (207 °C) 降低到 300 K (37 °C), 在自然对流条件下, AZ80 需要的时长约为 600 s, AZ31 需要约为 800 s, 而 AA6082 铝合金则需要约 1200 s。可见, 在自然对流条件下, AZ80 的散热性最优; 对 AZ80 体系加热, 施加 2.72 m/s 的横向人工强制对流后, 其降温所需时间缩减将近 83%, 需要约 100 s,

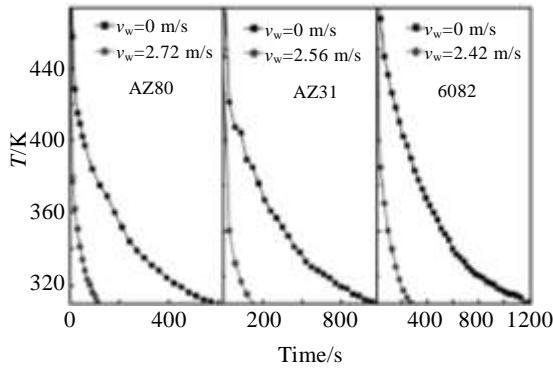


图 3 不同对流情况下镁合金与铝合金散热曲线

Fig.3 Thermal dispersion curves of magnesium and aluminium alloys under different convection condition

AZ31 和 AA6082 的情况也与之类似。对散热曲线加以拟合发现，其动力学拟合曲线方程如表 2 所示。

其数学形式正与方程 (5) 一致，在当前散热温度和时长水平下，材料没有明显的相变反应发生，没有额外的内生相变热量交换，由此可见镁合金散热曲线可认为满足指数型散热动力学方程 $T=T_0+\Delta T_0 \exp(-Mt)$ 。

对时间微分可得

$$T' = -M\Delta T_0 e^{-Mt} \quad (6)$$

可见，当其中 n 、 S 、 v 、 V 相等时，即去除环境变量和材料尺寸效应，在某一降温时刻 t 材料的散热速率 T' 只与环境温差 ΔT_0 、密度 ρ 、比热容 C 有关。

联立 (5) (6) 可得：

$$T' = -M(T-T_0) = -M\Delta T \quad (7)$$

$$M \propto 1/(\rho C) \quad (8)$$

以 AZ80 和 AA6082 在自然对流情况下的散热为例，可得表 3。

假定 AA6082 和 AZ80 的材料常数基本接近，则 M 与 $1/(\rho C)$ 正相关， $1/(\rho C)$ 表征了材料的容热能力，此时 $C_{AA6082} \approx C_{AZ80}$ ， $\rho_{AA6082} \approx 1.5\rho_{AZ80}$ ，则 $M_{AA6082} < M_{AZ80}$ ，所以在相同形状参数和对流条件下，AZ80 镁合金的散热性能要优于 AA6082 铝合金。

2.3 形状参数和对流条件对散热性能的影响

图 4 为 AZ80 与 AA6082 散热模型顶部与底部升温阶段温差变化曲线。从图 4 可知，铝合金散热模型底部与顶部的平衡温差 $\Delta T'$ ($\Delta T' = T_{\text{bottom}} - T_{\text{top}}$) 要小于

镁合金，这可能是由于铝合金制品的热导率相比镁合金较大。参考表 1 可知，AA6082 合金的热导率大约为 $170\sim 220 \text{ W}(\text{m K})^{-1}$ ，而 AZ31 约为 $42 \text{ W}(\text{m K})^{-1}$ ，所以在升温过程中，AA6082 铝合金将很快达到平衡温度，并在材料内部保持较低温差水平。

由公式 (7) 可知，材料的散热性能与材料当前所处的环境温差水平密切相关，定义， $|T'|=V_c$ ， V_c 是冷却速率 (K/s)， $\Delta T/T$ ($0 < \Delta T/T < 1$) 作为约化温度分点值点进行数学计量， $\Delta T/T$ 越小，其环境温差水平越低。讨论 AZ80 柱高、对流情况对其散热速率的影响。

图 5 显示了 AZ80 镁合金在 2 种柱高和 2 种环境对流情况下散热棒顶部的散热性能，当风速 $v_w=2.72 \text{ m/s}$ 时，空气流动速度加快，由方程 (4) 可知， $M \propto v_w$ ，则对于同一种材料，在相同环境温差水平下，散热性能将有较大提高。同时当柱高由 20 mm 增加为 60 mm 时，自然对流条件下的散热性能并未有显著提高，在有相近的对流风速时，柱高的增加有利于端部的散热。

2.4 AZ31、AZ80、AA6082 散热性能分析比较

图 6 为 AZ31、AZ80、AA6082 散热性能对比曲线。从图 6 可以看出，在自然对流条件下，AZ80、AZ31 镁合金的散热性能在 $0.25 < \Delta T/T < 0.45$ ($120\sim 220 \text{ }^\circ\text{C}$) 时，明显优于 AA6082 铝合金，如 II 区所示；在 $0.5 < \Delta T/T < 0.25$ ($20\sim 120 \text{ }^\circ\text{C}$) 时，这 3 种材料的散热性能没有明显差别，如 I 区所示。

表 2 镁合金和铝合金在不同对流条件下散热动力学方程拟合
Table 2 Fitted thermal dispersion dynamic equation under different convection conditions for magnesium and aluminum alloys

Physical parameter	T_0/K	M
AZ80 (free convection)	300.8	0.005
AZ80 (forced convection)	297.4	0.018
AZ31 (free convection)	299.1	0.003
AZ31 (forced convection)	297.4	0.012
AA6082 (free convection)	298.4	0.004
AA6082 (forced convection)	298.0	0.008
Fitting equation	$T=T_0+\Delta T \exp(-Mt)$	

表 3 AZ80 镁合金和 AA6082 铝合金在自然对流条件下的物理参数对比

Table 3 Thermal dispersion physical parameters for AZ80 and AA6082 under free convection

Alloy	Density, $\rho/\text{g cm}^{-3}$	Specific heat, $C/\text{kJ}(\text{kg K})^{-1}$	Heat adsorption, $1/(\rho C)/\text{J}(\text{cm}^3 \text{K})^{-1}$
AZ80 (free convection)	1.80	1.05	0.53
AA6082 (free convection)	2.70	0.90	0.41

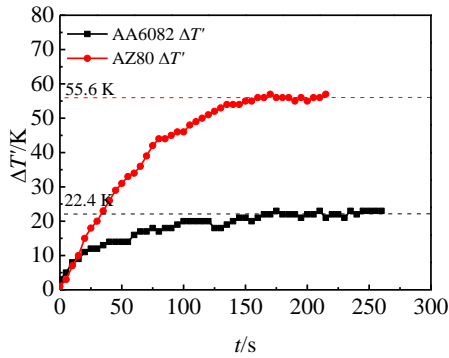


图 4 AZ80 与 AA6082 散热模型顶部与底部升温阶段温差变化曲线

Fig.4 Temperature Difference between the top and the bottom in AZ80 and AA6082 alloys

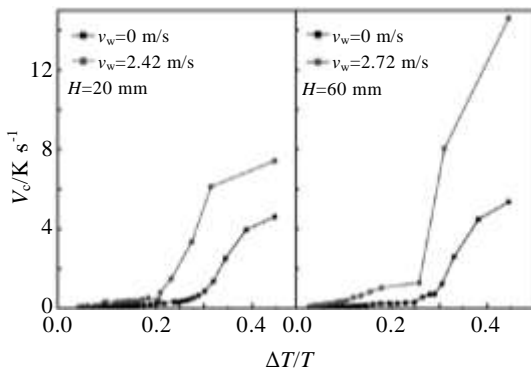


图 5 AZ80 低柱 (20 mm) 与高柱 (60 mm) 在不同对流条件下散热棒顶部的散热降温曲线

Fig.5 Relationship between the $\Delta T'/T$ and V_c in top of high and low column model under different convection conditions

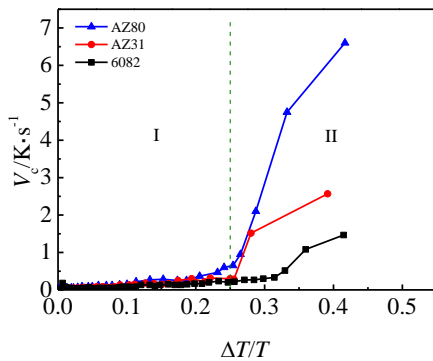


图 6 AZ31、AZ80、AA6082 散热性能对比曲线

Fig.6 Thermal dispersion properties of AZ31, AZ80, AA6082

3 结 论

1) 对于铸态镁合金, AZ80 在经过 T6 (440 °C, 4 h+170 °C, 10 h) 固溶+时效处理后, 热导率提升了约 21%, 而 T4 固溶处理 (440 °C, 4 h) 使其热导率降低了约 53%; 对于挤压态 AZ80 镁合金, T4 固溶处理 (440 °C, 4 h) 对其热导率影响不大, 但 T6 (440 °C, 4 h+170 °C, 10 h) 固溶+时效处理可使其热导率提升约 56%。

2) Zn、Zr 元素的添加使材料的热导率提升, 铸态 ZK60 的热导率约为铸态 AZ80 的 3 倍, 固溶处理 (440 °C, 4 h) 将大幅降低其热导率; 挤压态 AZ31 的热导率也优于挤压态 AZ80, 时效处理 (170 °C, 10 h) 可提高 AZ31 挤压态的热导率 33%。

3) 自然对流条件下, 柱高对 AZ80 镁合金散热性能影响较小; 在人工强制对流条件下, 当 $0.25 < \Delta T'/T < 0.45$ 时, 高柱 (60 mm) 散热速率约为低柱 (20 mm) 的 2 倍。

4) 镁合金散热曲线满足指数型散热动力学方程 $T = T_0 + \Delta T_0 \exp(-Mt)$, 其散热速率方程可表示为 $T' = -M(T - T_0) = -M \cdot \Delta T$, 环境温差水平 ΔT 及容热系数 $1/(\rho C)$ 越大, 材料散热速率越大。在相同形状参数和对流条件下, AZ80 的容热系数大于 AA6082, 其散热性能要优于 AA6082 铝合金。

5) 自然对流条件下, 在瞬时温差与瞬时温度的比值 $0.25 < \Delta T'/T < 0.45$ (120~220 °C) 时, 挤压态 AZ80、AZ31 镁合金散热性能明显优于挤压态 AA6082 铝合金; 其中 AZ80 镁合金散热速率约为 AA6082 铝合金的 3 倍。

参考文献 References

[1] Chung D D L. *Applied Thermal Engineering*[J], 2001, 21: 1593
 [2] Yamasaki M, Kawamura Y. *Scripta Materialia*[J], 2009, 60(4): 264
 [3] Rudajevova A, Lukáč P. *Materials Science and Engineering A*[J], 2005, 397(1): 16
 [4] Rudajevova A, Staněk M, Lukáč P. *Materials Science and Engineering A*[J], 2003, 341(1): 152
 [5] Ying T, Zheng M Y, Li Z T *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2014, 608: 19
 [6] Rudajevová A, Von Buch F, Mordike B L. *Journal of Alloys and Compounds*[J], 1999, 292(1): 27
 [7] Chen C J, Wang Q D, Yin D D. *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2009, 487(1-2): 560

- [8] Zhang Bin(章冰). *Thesis for Doctorate*(博士论文)[D]. Changsha: Central South University, 2003
- [9] Li Xiaohui(黎小辉), Feng Xiaowei(冯晓伟), Wang Shuncheng(王顺成) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2014, 43(12): 2927
- [10] Ren L B, Wu J, Quan G F. *Materials Science and Engineering A*[J], 2014, 612: 278

Atmospheric Heat Dispersion Research of Mg-Al-Zn Magnesium Alloys

Ren Lingbao^{1,2}, Quan Gaofeng^{1,2}, Jiang Zhuzhong^{1,2}, Yin Dongdi^{1,2}

(1. Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

(2. Key Laboratory for Advanced Technologies of Materials, Ministry of Education, Chengdu 610031, China)

Abstract: The atmospheric heat dispersion of magnesium alloys AZ80, AZ31, ZK60 and aluminum alloys AA6082 were measured in the temperature range of 20~220 °C. The thermal dispersion curves of the columnar model could be exponentially fitted as $T=T_0+\Delta T_0 \exp(-t/A_0)$. The result shows that the solution treatment can decrease the thermal conductivity of the magnesium alloys. However, the solution plus aging treatment can increase the thermal conductivity. The relationship between $\Delta T/T$ and the heat dispersion rate was also studied. The heat dispersion rate of high columns (60 mm) is about two times larger than that of low columns (20 mm) in the condition of forced air convection, while there is no obvious difference in the condition of natural convection. Moreover, the dispersion properties of these alloys can be evidently divided into two regions by $\Delta T/T$ in natural convection. There is no much difference among AZ80, AZ31, AA6082 alloys when $0.05<\Delta T/T<0.25$ (20~120 °C), while the AZ80 and AZ31 exhibit superior performance to AA6082 alloys when $0.25<\Delta T/T<0.45$ (120~220 °C).

Key words: magnesium alloys; thermal dispersion properties; thermal conductivity; thermodynamics

Corresponding author: Yin Dongdi, Ph. D., Associate Professor, School of Material Science and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P. R. China, Tel: 0086-28-87634673, E-mail: ahnydd@swjtu.edu.cn