

Al-2.15%Mn合金的组织及摩擦学特性

赵明露, 刘炳, 高填
(新疆大学机械工程学院, 830047, 乌鲁木齐)

摘要: 采用搅拌法制备了 Al-2.15%Mn 合金, 对其显微组织、强化机制及摩擦磨损性能进行了试验研究. 结果表明: Al-2.15%Mn 合金的组织为含 $\text{Al}_{11}\text{Mn}_4$ 和 Al_6Mn 的 $\alpha\text{-Al}$ 固溶体; 合金中 Al_6Mn 的沉淀强化作用使其硬度较纯 Al 提高了 60%; 纯 Al 的冲击断口形貌为塑性断裂, Al-2.15%Mn 合金的冲击断口形貌为准解理断裂; 纯 Al 与 Al-2.15%Mn 合金在湿摩擦下的磨损量均大于干摩擦的磨损量; 湿摩擦的腐蚀-机械磨损作用使磨痕为犁沟和蚀坑, 干摩擦中磨屑的成片脱落由机械磨损中的黏着磨损引起; 在干摩擦与湿摩擦中, 纯 Al 的摩擦因数均大于 Al-2.15%Mn 合金的摩擦因数, Al-2.15%Mn 合金较纯 Al 表现出更加优良的耐磨性.

关键词: 铝锰合金; 显微组织; 摩擦磨损

中图分类号: TG146.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)09-0119-06

Microstructure and Tribological Performance of Al-2.15%Mn Alloy

ZHAO Minglu, LIU Bing, GAO Tian
(College of Mechanical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China)

Abstract: Al-2.15%Mn alloy was fabricated by stirring casting. Its microstructure, strengthening mechanism, and friction and wear behavior were investigated. The results show that: 1) The as-cast microstructure of Al-2.15%Mn alloy is composed of $\alpha\text{-Al}$ matrix with $\text{Al}_{11}\text{Mn}_4$ and Al_6Mn compounds; 2) The hardness of Al-2.15%Mn alloy gets 60% higher than that of pure aluminum because of deposition strengthening by Al_6Mn ; 3) The impact fractures exhibit plastic morphology for pure aluminum and quasi-cleavage morphology for Al-2.15%Mn; 4) The worn mass losses of both pure aluminum and Al-2.15%Mn alloy under lubricating condition are greater than that under dry condition because combination of corrosion and mechanical wear in wet friction condition generates furrows and corroded pits on sample surface, while adhesive wear in dry friction condition makes worn chips flake off the sample surface; 5) Al-2.15%Mn alloy shows smaller friction coefficient and better wear resistance than pure aluminum in both wet and dry wears.

Keywords: Al-2.15%Mn alloy; microstructure; friction and wear

在金属 Al 中添加各种合金元素以获得具有高强度或较高综合力学性能的铸造铝合金, 如 Al-Zn 系^[1-3]、Al-Mg 系^[4-6]、Al-Cu 系^[7-10]等铸造合金, 用来取代部分铸钢件和高温合金, 已成为一种趋势, 也是科学界的研究热点. 但是, 目前对于 Al-Mn 合金

的摩擦腐蚀性能研究较少, 且研究的多为 Mn 质量分数低于 1.6% 的变形 Al-Mn 合金, 而对 Mn 质量分数高于 1.6% 的 Al-Mn 合金研究较少^[11-12].

本文针对新疆的高盐碱水质特点, 为开发具有耐腐蚀磨蚀性能的节水灌溉过流部件, 使用搅拌法

制备了 Al-2.15%Mn 合金,并对其微观组织和在干、湿不同介质环境中的摩擦磨损性能进行了试验研究.

1 试验材料与方法

1.1 材料制备

将 Al 锭(牌号为 Al99.00)置于石墨坩埚内,在井式高温电阻炉中熔化,温度为 900 ℃.在熔融状态下,一组不添加任何物质,另一组加入经破碎后的金属 Mn 细粒,用石墨棒连续搅拌 5~8 min,随后降温至 750 ℃,加入质量分数 0.3%的 MnCl₂ 精炼除气,撇渣后浇入铸铁模具,冷却后得到纯 Al 和 Al-2.15%Mn 合金样品. Al-2.15%Mn 合金的成分(质量分数)为:Al 97.85%,Mn 2.15%,其他元素为痕量.

磨损试验的上试样为所制备的纯 Al 与 Al-2.15%Mn 合金,采用线切割机切割,在精密铣床上加工,尺寸为 8 mm×8 mm×31 mm.下试样为 45 钢圆环(摩擦副),其热处理工艺为 860 ℃保温 1 h,水中淬火,圆环尺寸为 Φ40 mm×10 mm.

1.2 试验分析方法

用 X 射线衍射仪(XRD)分析试样的物相组成;用扫描电子显微镜(SEM)观察试样的显微组织;用能谱仪(EDS)分析元素组成及质量、原子数量;用 JB30A 型冲击试验机测试 Al-2.15%Mn 合金的冲击韧度;用 HR-150 布洛维硬度计测试试样的布氏硬度,压头钢球直径为 5 mm,加载质量为 62.5 kg,保压时间为 60 s;用 ANSYS 10.0 模拟试样在磨损试验机上磨损时的最高温度.

试样的摩擦磨损性能试验在 M-2000 型环-块磨损试验机上进行,上试样固定在试验机的专用夹具上,下试样安装于试验机主轴上,用水平仪保持上、下试样垂直接触,上试样固定不动,下试样转动,通过加载系统施加载荷来进行摩擦磨损试验,载荷设定为 110 N.

经测定,Al-2.15%Mn 合金的硬度(HB)为 24.5,纯 Al 的硬度(HB)为 15.3,下试样 45 钢环的硬度(HRC)为 48.

摩擦磨损试验的摩擦形式分为湿滑动摩擦和干滑动摩擦两种,摩擦行程为 945 m,用时 42 min,相对滑动线速度为 0.375 m/s.湿滑动摩擦采用腐蚀介质作为润滑介质,腐蚀介质模拟新疆希克尔水库中水体的实际成分配制而成,pH 值为 8.2,水的化学类型为 SO₄·Cl-Na·Ca·Mg 型,矿化度为

5.607 g/L^[13].腐蚀介质使用漏斗滴注,并设定漏斗流量为 60~70 滴/min,计算流量为 5 mL/min.试验前用丙酮和体积分数为 95%的乙醇对上试样进行清洗、吹干,并用精度为 0.1 mg 的电光天平进行称量.试验过程中记录摩擦力矩 M 随时间的变化,并通过下式计算摩擦因数

$$\mu = M / RF$$

式中: R 为摩擦副外径; F 为外加载荷.试验完成后取下上试样并同样进行表面清理,再用电光天平进行称量,记录数据,并计算出磨损质量.

2 试验结果与分析

2.1 Al-2.15%Mn 合金的显微组织

图 1 是 Al-2.15%Mn 合金的 XRD 谱.在 Al-2.15%Mn 合金中主要有以下 3 种物质:前 4 个强峰对应的是 Al 基体,第 5 到第 8 个强峰主要对应的是金属间化合物 Al₁₁Mn₄ 和 Al₆Mn.

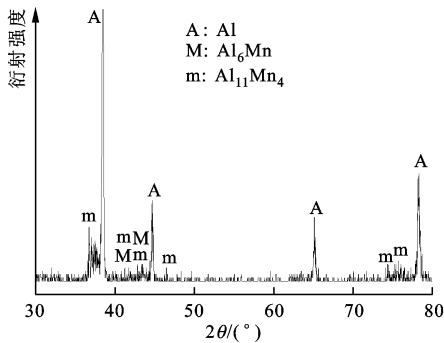


图 1 Al-2.15%Mn 合金的 XRD 谱

图 2 是 Al-Mn 合金相图,从中可以观察到,在 Mn 的质量分数小于 2.5%时,液相线与固相线的垂直距离很近,对应的温度与纯 Al 的熔点接近,而水平距离却很大,即在结晶过程中固相和液相的成分差别较大,因而容易产生晶内偏析,会出现成分不均匀分布情况.从图 3a 中可以看到一些不均匀、不连续但方向有序分布的细针状形态及少量粗大棒状结构存在于 Al 基体中,说明金属间化合物 Al₁₁Mn₄ 与 Al₆Mn 均以针状形态存在于 α -Al 固溶体中,验证了对相图的分析.

图 3b 是粗大棒状 Al₆Mn 的表面形貌,可见在棒状结构表面密布着白色小亮斑.通过电子探针对该合金表面该部分进行点扫描,结果如图 3c 所示,可知含有 Al、Mn 和少量的杂质元素 Fe、F,其质量分数和原子分数见表 1.由表 1 可知,Fe 的质量分数为 0.59%.当 Fe 的质量分数为 0.5%~0.65%时,可

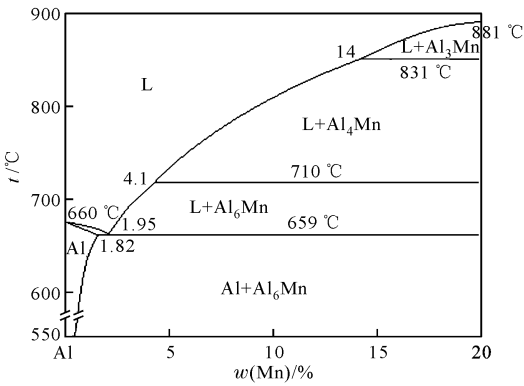


图 2 Al-Mn 二元合金相图

的亮灰色块状物质(图 3b 中 B 处),该物质为 $\text{Al}_6(\text{FeMn})^{[15]}$,由此可说明杂质 Fe 具有细化剂的作用,使制成的材料中存在许多弥散颗粒增强相.

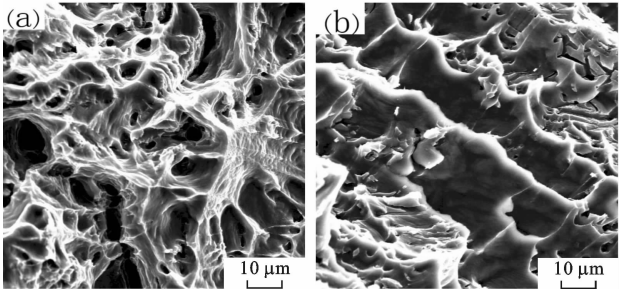
表 1 各元素的质量分数和原子分数 %

元素	质量分数	原子分数
F	0.28	0.42
Al	74.34	84.85
Mn	24.79	14.07
Fe	0.59	0.34

2.2 Al-2.15%Mn 合金的强化机理

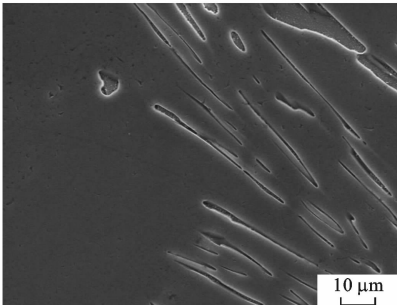
Al-2.15%Mn 合金的铸态组织是较软的固溶体上分布着硬而脆的 Al_6Mn 和 $\text{Al}_{11}\text{Mn}_4$ 相,其显微硬度(HV_{10})为 58,而纯 Al 的 HV_{10} 为 38.前已述及,纯 Al 试样的 HB 为 15.3,Al-2.15%Mn 合金试样的 HB 为 24.5,也就是说在纯 Al 中加入 Mn 元素后,硬度提高了 60%.这是因为,Mn 在 Al 中的溶解度虽较大,但无明显的强化作用,不能进行强化热处理,当合金中存在细小的 Al_6Mn 质点时,能起到一定的沉淀强化作用^[16],故强度比纯 Al 高.

图 4a 为纯 Al 的冲击断口表面形貌特征,可看出有大量的韧窝,是典型的延性、塑性断裂.当 Al-2.15%Mn 合金中 Mn 的质量分数超过其共晶点(1.95%)时,将有硬而脆的铝锰化合物 Al_6Mn 和 $\text{Al}_{11}\text{Mn}_4$ 相生成,在变形过程中铝锰化合物相有利于晶面开裂产生准解理面,形成准解理断裂断口形貌,如图 4b 所示.由图 4b 还可以发现,试样断口处存在部分被拉长的韧窝,表明这些韧窝经过了一定的塑性变形.在石敏等^[17]的研究中发现:随着 Mn 含量的继续增加,合金的硬度提高,但冲击韧度明显降低,致使材料过脆而影响其力学性能.

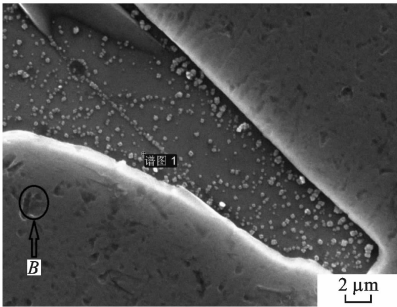


(a)纯 Al (b)Al-2.15%Mn 合金

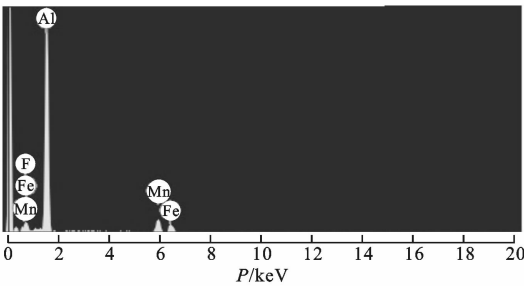
图 4 冲击断口形貌



(a)低倍放大照片



(b)高倍放大照片



(c)能谱分析结果

图 3 Al-2.15%Mn 合金的 SEM 照片及能谱分析结果

以使粗大的晶粒形成不固溶的 $\text{Al}_6(\text{FeMn})$,减少 Mn 的偏析,从而可获得具有较多细晶粒的材料^[14].在除棒状之外的基体部分,可以看到一些细小、弥散

2.3 Al-2.15%Mn 合金的滑动摩擦磨损性能

图5为纯Al与Al-2.15%Mn合金在载荷为110 N、摩擦行程为945 m、不同摩擦环境下的滑动摩擦磨损质量损失。从图中可以看出,无论是干滑动摩擦还是有腐蚀液体的湿滑动摩擦,Al-2.15%Mn合金的质量损失均少于纯Al的质量损失。由此可见,纯Al中加入Mn元素后,在硬度增加的同时也表现出优良的耐磨性。

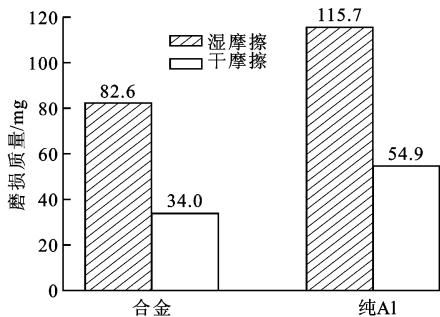


图5 纯Al与Al-2.15%Mn合金在不同摩擦环境下的摩擦磨损质量损失

图6为纯Al与Al-2.15%Mn合金在不同摩擦环境下,用扫描电子显微镜观察到的磨损表面形貌,从中可以看出:不论是纯Al还是Al-2.15%Mn合金,在有腐蚀液体润滑时,滑动摩擦磨损表面的破坏程度要比干滑动摩擦磨损表面的破坏程度严重。

在湿摩擦情况下,纯Al的磨损表面(见图6a)与Al-2.15%Mn合金的磨损表面(见图6b)均有犁沟状磨痕和脱落的鳞片状磨屑,且纯Al的情况更为严重,说明在湿摩擦情况下不但有磨粒磨损,还存在腐蚀磨损。在磨损过程中,材料表面的位错容易聚集,进而产生微裂纹,最终导致材料呈鳞片状脱落^[18]。由于Al-2.15%Mn合金的耐磨性优于纯Al,所以纯Al的磨损更严重。

在干摩擦情况下,纯Al的磨损表面(见图6c)与Al-2.15%Mn合金的磨损表面(见图6d)均较为光滑,纯Al表面有河流状花纹和零散的细小蚀坑(见图6c中椭圆圈出的部分),而Al-2.15%Mn合金表面则是较为明显的由黏着磨损引起的磨屑成片脱落,说明干摩擦时主要以黏着磨损为主,同时伴有磨粒磨损。对于纯Al来说,一方面在较大的载荷下摩擦面产生较高的温度(用ANSYS 10.0模拟了试样在干摩擦情况下的摩擦面温度分布,发现摩擦结束时摩擦面上的温度最高达158℃),虽然在该温度下Al及其合金并不存在固相间的同素异构转变,但是对Al的氧化速度、塑性变形能力都会有较大

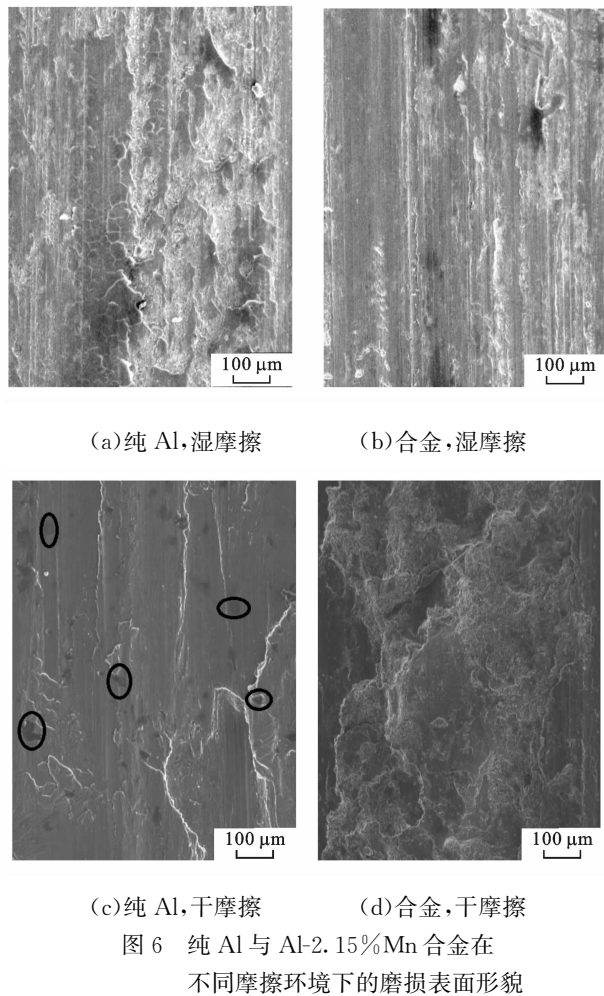


图6 纯Al与Al-2.15%Mn合金在不同摩擦环境下的磨损表面形貌

的影响;另一方面,纯Al在磨损的过程中,其中的杂质成分Fe、Cu等会逐渐析出并突出于基体,承载了对摩擦副的压力,当基体与杂质之间的附着力不足以抵抗摩擦力时,杂质成分脱落,在磨损面上形成蚀坑^[19]。

在不同摩擦环境下纯Al与Al-2.15%Mn合金的摩擦因数 μ 随时间的变化曲线如图7所示。总体看来,Al-2.15%Mn合金在干、湿环境下的摩擦因数均小于纯Al的,且Al-2.15%Mn合金在湿摩擦时摩擦因数变化最小,而纯Al在干摩擦时摩擦因数起伏变化最大。

由图7可以看出:纯Al在干摩擦情况下摩擦因数曲线变化明显,趋势不稳定;在25 min时,纯Al的干、湿摩擦因数接近,随后干摩擦因数急剧增大,而湿摩擦因数继续保持稳定状态;Al-2.15%Mn合金的干、湿摩擦因数曲线没有明显的增大或减小,干摩擦曲线平缓,湿摩擦曲线从15 min开始缓慢上升。

在干摩擦情况下,摩擦副为固-固滑动摩擦,由

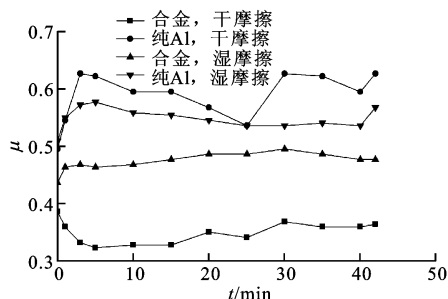


图7 纯Al与Al-2.15%Mn合金在不同摩擦环境下的摩擦因数变化曲线

于固体表面不可能达到绝对光滑,会有凹凸不平的粗糙表面,并且纯Al与Al-2.15%Mn合金的硬度远低于45钢,所以在相对滑动时,摩擦副中45钢的硬质微凸起将在试样表面产生犁削作用,形成磨粒磨损。另一方面,在较大的载荷作用下,试样表面的温度会升高并发生塑性变形,从而使纯Al或其合金试样与钢试样紧密接触,在微凸点处产生黏着,随后在切向滑动力作用下,这些黏着点被切断,造成材料表面的成片剥落,导致黏着磨损。对于纯Al来说,由于Al与O₂有极高的化学亲和力,在室温即能形成致密的Al₂O₃保护膜(厚约5~10 nm)^[14]。因为氧化膜十分薄,所以很容易被磨掉,而氧化膜被破坏后又会形成新膜,这样的过程不断交替进行。对于Al-2.15%Mn合金来说:①在摩擦磨损进行过程中,首先是Al基体受到磨损,由于合金表面磨损、机械热等的作用,导致Al₁₁Mn₄、Al₆Mn与合金中的杂质物质在摩擦表面偏聚,从而使材料的黏着与摩擦因数下降;②材料的黏着倾向与硬度有一定关系,随着Mn元素的加入,合金的硬度提高,黏着时所需要的变形程度也会增大。在这两种因素的共同作用下,Al-2.15%Mn合金在干摩擦时的磨损量与摩擦因数均小于纯Al。

在湿摩擦的情况下,由于有腐蚀液体的存在,摩擦面不再是固-固接触方式,而是由SO₄·Cl-Na·Ca·Mg型水溶液中的极性分子吸附在摩擦表面形成一层边界润滑膜,从而使摩擦副界面的微凸起不能直接接触^[20],阻止了黏着磨损的发生;并且由于腐蚀液体连续性的流动冲刷,减缓了摩擦表面温度升高的速度,降低了材料软化与表面磨损的速率。但是,另一方面,由于腐蚀溶液的pH值为8.2^[13],呈弱酸性,从而对材料表面具有腐蚀作用。所以,在湿摩擦时的磨损是由腐蚀-机械磨损作用的结果。对于纯Al来说,由于Al是活泼金属,Al₂O₃膜是具有

酸、碱两重性的氧化物,所以它们很容易发生化学或电化学反应。反应后的产物附着于摩擦表面,随后又被磨去,裸露的表面再被腐蚀,如此不断反复,最终形成了纯Al表面的磨损形貌和相对稳定的摩擦因数变化趋势。对于Al-2.15%Mn合金,情况又略微复杂些:①由于腐蚀液体的作用,材料表面的纯Al发生腐蚀,但是细小弥散的片状或块状Al₆(FeMn)却不易发生腐蚀,而是离散地存在于摩擦表面,使摩擦形式由“二体”摩擦转化为“三体”摩擦,从而起到减小磨损和降低摩擦因数的作用^[21];②随着腐蚀的继续进行,晶粒较为粗大的Al₆Mn也暴露于摩擦表面,由于Al₆Mn为针状或粗大的硬质棒状结构,使得边界层的润滑膜不能够阻止摩擦副双方的接触而导致磨粒磨损^[21],并逐渐加剧,所以在湿摩擦后期,Al-2.15%Mn合金的摩擦因数增大。

3 结 论

(1) 搅拌法制备的Al-2.15%Mn合金的组织结构为α-Al固溶体中存在着Al₁₁Mn₄与Al₆Mn。

(2) 由于Al₆Mn的沉淀强化作用,使得Al-2.15%Mn合金的硬度比纯Al提高了60%;Mn的加入使冲击断口形貌由纯Al的塑性断裂变为Al-2.15%Mn合金的准解理断裂。

(3) 纯Al和Al-2.15%Mn合金在湿摩擦下的磨损量均大于干摩擦下的磨损量,这是由于湿摩擦是腐蚀和机械磨损的共同作用。Al-2.15%Mn合金的耐磨性优于纯Al。

(4) 在干、湿摩擦环境下,纯Al的摩擦因数均高于Al-2.15%Mn合金的摩擦因数,且材料在干摩擦时主要为黏着磨损——磨屑成片脱落;在湿摩擦时为腐蚀-机械磨损——磨痕为犁沟和蚀坑。

参考文献:

- [1] SHARMA M M. Microstructural and mechanical characterization of various modified 7XXX series spray formed alloys [J]. Materials Characterization, 2008, 59 (1): 91-99.
- [2] SHARMA M M, AMATEAU M F, EDEN T J. Mesoscopic structure control of spray formed high strength Al-Zn-Mg-Cu alloys [J]. Acta Materialia, 2005, 53(10): 2919-2924.
- [3] SHIMIZU H, OSAMURA K, ADACHI H, et al. Influence of additional Mn and Cu contents on mechanical properties of Al-Zn-Mg ternary based alloys [J]. Journal of Japan Institute of Light Metals, 2004, 54(1):

- 2-8.
- [4] FILATOV Y A, YELAGIN V I, ZAKHAROV V V. New Al-Mg-Sc alloys [J]. Materials Science and Engineering: A, 2000, A280: 97-101.
- [5] BEREZINA A L, CHUISTOV K V, KOLOBNEV N I, et al. Sc in aluminum alloys [J]. Materials Science Forum, 2002, 396/397/398/399/400/401/402: 741-746.
- [6] PARKER B A, ZHOU Z F, NOLLEX P. The effect of small additions of scandium on the properties of aluminum alloys [J]. Journal of Materials Science, 1995, 30(9): 452-458.
- [7] HAYNES M J, GANGLOFF R P. Elevated temperature fracture toughness of Al-Cu-Mg-Ag sheet: characterization and modeling [J]. Metal Trans: A, 1997, A28(9): 1815-1829.
- [8] XIAO Daihong, WANG Jiannong, DING Dongyan. Effect of Cu content on the mechanical properties of an Al-Cu-Mg-Ag alloy [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2002, 343(1/2): 77-81.
- [9] 肖代红, 王健农, 陈世朴, 等. 微量 Ag 对 Al-5.3Cu-0.8Mg 合金组织和耐热性能的影响[J]. 机械工程材料, 2003, 27(1): 38-40.
XIAO Dai-hong, WANG Jian-nong, CHEN Shi-pu, et al. Effect of small amount of Ag on microstructure and mechanical properties of an Al-5.3Cu-0.8Mg alloy [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2003, 27(1): 38-40.
- [10] 倪红军, 孙宝德, 蒋海燕, 等. 稀土熔剂对 A356 合金二次枝晶臂间距的影响[J]. 中国有色金属学报, 2002, 12(5): 940-944.
NI Hong-jun, SUN Bao-de, JIANG Hai-yan, et al. Effect of rare earth flux on secondary dendrite arm spacing of A356 alloy [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2002, 12(5): 940-944.
- [11] WANG S C, ZHU Z, STARINK M J. Estimation of dislocation densities in cold rolled Al-Mg-Cu-Mn alloys by combination of yield strength data, EBSD and strength models [J]. Journal of Microscopy, 2005, 217(2): 1-5.
- [12] 耿兴国, 傅恒志. Al-Mn 合金快速定向凝固组织中的带状结构[J]. 西北工业大学学报, 2004, 22(2): 247-250.
GEN Xingguo, FU Hengzhi. Determination of difficult-to-determine banding structure during high rate directional solidification of Al-Mn alloy [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2004, 22(2): 247-250.
- [13] 樊自立, 王喜鹏. 新疆平原湖泊(包括人工湖)水质盐化及其防治途径[J]. 自然资源学报, 1990, 5(4): 311-314.
FAN Zi-li, WANG Xi-peng. Water salinization of plain lakes (including man-made lakes) and its prevention and control in Xinjiang [J]. Journal of Natural Resource, 1990, 5(4): 311-314.
- [14] 林肇琦. 有色金属材料学[M]. 沈阳: 东北工学院出版社, 1986: 1-51.
- [15] 上海市机械制造工艺研究所. 金相分析技术[M]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1987: 742-743.
- [16] CARROL M C. Improvements to the strength and corrosion resistance of Al-Mg-Mn alloys of near-AA5083 chemistry [D]. Kolumb, USA: The Ohio State University, 2001.
- [17] 石敏, 刘炳, 孙金梅. 锰含量对铝锰合金冲击韧度和金相组织的影响[J]. 热加工工艺, 2010, 39(18): 13-19.
SHI Min, LIU Bing, SUN Jinmei. Effect of Mn content on impact toughness and metallurgical microstructure of Al-Mn alloy [J]. Material & Heat Treatment, 2010, 39(18): 13-19.
- [18] 柳伟, 郑玉贵, 姚治铭, 等. CrMnN 不锈钢的抗空蚀和磨蚀性能[J]. 材料研究学报, 2001, 15(5): 505-509.
LIU Wei, ZHENG Yu-gui, YAO Zhi-ming, et al. Resistance to cavitation erosion and cavitation-abrasion of CrMnN stainless steel [J]. Chinese Journal of Materials Research, 2001, 15(5): 505-509.
- [19] 彭成章, 朱玲玲. 电沉积 Ni-P/纳米 Al_2O_3 复合镀层的摩擦磨损与耐铝液侵蚀性能[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(6): 1177-1182.
PENG Cheng-zhang, ZHU Ling-ling. Tribological properties and erosion resistance of electroplated Ni-P/nano- Al_2O_3 composite coatings to aluminum liquid [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(6): 1177-1182.
- [20] 李新梅, 刘炳, 董晓锋. Al_2O_3 颗粒增强 Al-Mn 合金基复合材料的制备及摩擦学性能[J]. 材料热处理学报, 2011, 32(7): 6-11.
LI Xin-mei, LIU Bing, DONG Xiao-feng. Fabrication and friction and wear behavior of Al_2O_3 particulates reinforced Al-Mn alloy matrix composites [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2011, 32(7): 6-11.
- [21] WILSON S, ALPAS A T. Wear mechanism map for meal matrix composites [J]. Wear, 1997, 212(4): 41-49.

(编辑 葛赵青)