

半固态成型 Al-Si-Fe 合金的组织及性能

Microstructure and Properties of Semi-solid Formed Al-Si-Fe Alloy

赵树国^{1,2}, 袁晓光¹, 李 胜¹, 于海朋¹ (1 沈阳工业大学材料科学与工程学院, 沈阳 110023; 2 沈阳航空学院, 沈阳 110034)
ZHAO Shu-guo^{1,2}, YUAN Xiao-guang¹, LI Sheng¹, YU Hai-peng¹ (1 College of Materials Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110023, China; 2 Shenyang Institute of Aeronautical Engineering, Shenyang 110034, China)

摘要: 采用半固态成型技术制备了 Al-17Si-5Fe-3Mn-4Cu-1Mg (质量分数/%) 合金, 分析了合金的微观组织, 检测了合金的力学性能, 研究了合金的高温磨损行为。结果表明: 经过半固态成型后, 合金第二相发生了明显细化, 尖角钝化, 且分布更均匀; 常温极限抗拉强度达到了 239.6 MPa, 伸长率达到了 2.0%; 150℃干磨和润滑条件下的磨损失重分别是 390 铝合金的 30.78% 和 3.09%。

关键词: 半固态成型; Al-Si-Fe 合金; 微观组织; 力学性能; 磨损
中图分类号: TG113 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2007)02-0034-05

Abstract: A kind of Al-17Si-5Fe-3Mn-4Cu-2Ni-1Mg alloy has been prepared by semi-solid forming technology. The microstructure of the alloy has been analyzed, the mechanical properties of the alloy have been tested, and the wear-resisting property and the wear failure form of the alloy have been studied by wear test. The results show that the second phase in the semi-solid formed alloy become fine and spherical, and its distribution is homogeneous. The ultimate tensile strength and elongation of the alloy are 239.6 MPa and 2.0% respectively. Under the condition of dry and lubrication friction wear at 150℃, the mass loss are 30.78% and 3.09% that of as cast 390 aluminum alloy respectively.
Key words: semi-solid forming technology; Al-Si-Fe alloy; microstructure; mechanical property; wear

铝硅铁合金是极具前途的汽车发动机、压缩机等的轻质、低膨胀、高耐磨材料^[1]。采用铝硅合金取代传统的铸铁和铸钢制造汽车发动机零部件特别是运动部件, 可减轻部件质量, 提高发动机效率, 节约燃油^[2]。汽车发动机零部件特别, 需要较高的耐磨性和一定的耐热性, 通常情况下, 轻质材料多选用高硅铝合金, 但因铝硅合金中的硅相易于粗化, 且耐热性较差, 限制了其应用^[3]。目前的解决办法是向铝硅合金中加入铁等耐热合金元素^[4], 但是, 合金中第二相粗化的问题仍然需要进一步解决。减小铝硅合金中硅相尺寸的方法较多, 诸如向合金中加合金元素、变质处理等, 但效果有限^[5,6]。利用快速凝固技术制备此类合金可以解决上述问题, 但是, 快速凝固技术高成本, 复杂的工艺过程, 很难在制造汽车零部件上得到推广^[7,8]。

半固态成型技术是在合金处于半固态时进行挤压充型, 成型过程中半固态坯料的流变, 可以实现组织的

细化^[9]。根据半固态技术的这一特点, 本研究拟采用该技术制备高硅、高铁含量的 Al-Si-Fe 合金, 通过半固态时的挤压成型, 实现对脆性的初晶硅相和富铁相的破碎, 从而达到细化组织和提高性能的目的。

1 实验材料与方法

实验用原材料为含量不低于 99.95% (质量分数/%, 下同) 工业纯铝, 硅含量大于 98% 的 2 号结晶硅, 含量大于 99.9% 的纯铜, 镁含量大于 99.98% 的纯镁, Al-10% Fe 中间合金和 Al-10Mn 中间合金; 变质剂选用赤磷, 精炼剂选用六氯乙烷。合金的化学成分见表 1。

制备工艺为: 将配置好的合金电磁搅拌制备成半固态坯料, 将坯料和模具一起二次加热到半固态温度 (本研究选用 580℃), 保温后, 夹入外模具中挤压成

表 1 Al-Si-Fe 合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of Al-Si-Fe alloy

Alloy element	Si	Fe	Mn	Cu	Mg	Al
Mass fraction/ %	17	5	3	4	1	Bal

型。定义外模具内腔截面积与型腔内浇道截面积比为挤压比,本次实验共设有 6:1,8:1 和 10:1 三组挤压比的模具;挤压力为 3000kN,保压时间为 10s,挤压速度 2mm/s。

合金组织分析分别在 ISA-4 图像分析仪和 EMP-810Q 型电子探针电子探针微分仪上进行。

合金的抗拉性能在 CSS-55100 型电子万能实验机上进行,拉伸试样尺寸见图 1。拉伸试样经半固态成型后,采用 T6 工艺进行热处理。合金的磨损性能测试在 MMW-1 型立式万能摩擦磨损试验机上进行。对比材料为铸态 390 铝合金,对磨材料为 45 号淬火钢,润滑油为 RHG68 机油,磨损温度为 150℃。

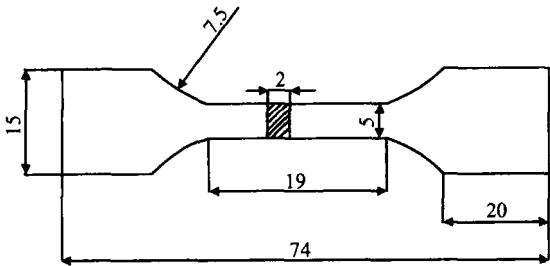


图 1 板状拉伸试样尺寸

Fig. 1 The size of sheet type tensile specimen

2 实验结果及分析

2.1 合金的微观组织

图 2 是 Al-17Si-5Fe-3Mn-4Cu-1Mg 合金铸态、电磁搅拌态和半固态成型微观组织。由图 2a 可以看出,普通金属型铸造条件下,合金的微观组织由多边形初生 β -Si、针片状 β -Al₅FeSi、共晶 β -Si 和 β -Al₅FeSi 相,以及基体 α -Al 相组成^[10]。其中,多边形初生 β -Si 和针片状 β -Al₅FeSi 相尺寸均较粗大, β -Si 相数量较少, β -Al₅FeSi 相数量较多。

图 2b 是电磁搅拌后的合金微观组织。与合金铸态组织相比较(见图 2a),电磁搅拌后的第二相得到了细化和圆整化,多边形初晶 β -Si 相尺寸减小,而且更加圆整;针片状 β -Al₅FeSi 相发生断裂,长度减小,形状近似球形,分布也更加均匀;针片状共晶相尺寸明显减小;基体 α -Al 相球化明显。但是,电磁搅拌后,粗大的针片状富铁相仍然存在,还存在很多尺寸较大的

多边形 β -Si。这说明电磁搅拌不可能完全实现第二相的细化。

图 2c 是二次加热后的合金微观组织。与电磁搅拌态微观组织比较(见图 2b),二次加热后,合金组织严重长大,第二相的尺寸也明显增大,针状富铁相变成细条状相,片状第二相和基体相都长大,但相的尖角发生溶解而圆整化。这就说明二次加热会粗化组织和第二相。

图 2d 是半固态成型后合金的微观组织。与铸态微观组织比较(见图 2a),挤压后的组织发生了显著的变化,粗大的片状和针状富铁相消失,转化为较为圆整的近粒状相,尺寸减小。与此同时,共晶组织变得细小而且均匀,共晶硅相变得十分短小且圆整。

图 3 是 Al-17Si-5Fe-3Mn-4Cu-1Mg 合金经过深腐蚀后相的立体形貌。由图 3a 可以看出,普通金属型铸造条件下,初生硅相属于片状结构,带有尖锐的棱角。电磁搅拌后,合金第二相的立体形貌(见图 3b)呈粒状和短棒状,尺寸变小,粒状相比较圆整,短棒状相同原来大的针状相断裂形成。二次加热后,初生和共晶硅相都长大,棱角重新出现,见图 3c。半固态成型后,第二相均变为粒状相,尺寸较均匀、细小,见图 3d。

上述现象说明,在半固态成型过程中,成型力足以使部分初生硅相发生破碎,使几乎全部的富铁相破碎呈粒状相。这是因为,在半固态成型过程中,第二相处于三向应力状态,同时合金发生很大的变形,从而使第二相在翻滚流动过程中发生多次破碎,从而达到了破碎和重新均匀分布的目的。

2.2 合金的力学性能

表 2 是半固态不同挤压比合金与铸态合金(均经过 T6 热处理)的力学性能。从表 2 可知,半固态成型合金的常温最大抗拉强度达到 239.6MPa,同时伸长率达到 2.0%。与金属型铸造合金相比较,强度提高了 117.4%,同时延伸率得到很大的改善。随着挤压比的增大,其抗拉强度越大,延伸率越好。可见,采用半固态成型技术可以显著提高 Al-Si-Fe 合金的力学性能。

合金性能提高的原因主要是半固态成型过程中,粗大的初晶富铁相和硅相发生了破碎细化,同时,共晶组织也得到了粒状化和细化,这些相对基体的割裂作用减小,而且还起到了一定的强化作用,从而有效地提高了合金的力学性能。

从图 4 可以看出,合金断口主要由脆断平台及韧窝组成,随着挤压比的增大,这样的韧窝和锥状突起越多。脆断平台是由大的块状硅相或富铁相穿晶断裂造成的,韧窝实际是由许多平滑的小平台组成,这些小平

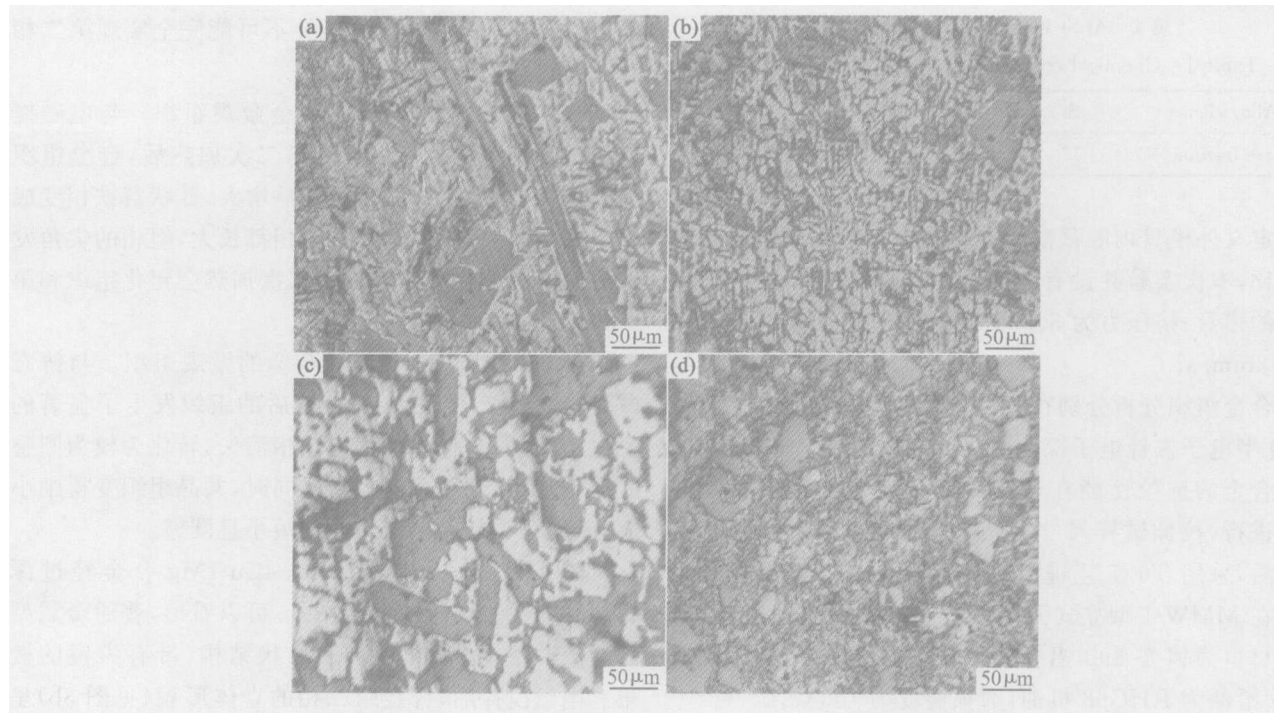


图 2 Al-17Si-5Fe-3Mn-4Cu-1Mg 合金微观组织 (a) 金属型铸造; (b) 电磁搅拌; (c) 二次加热; (d) 半固态成形
Fig. 2 Microstructure of Al-17Si-5Fe-3Mn-4Cu-1Mg alloy (a) permanent mold cast;
(b) electromagnetic stirring; (c) sem+solid state; (d) semi solid forming

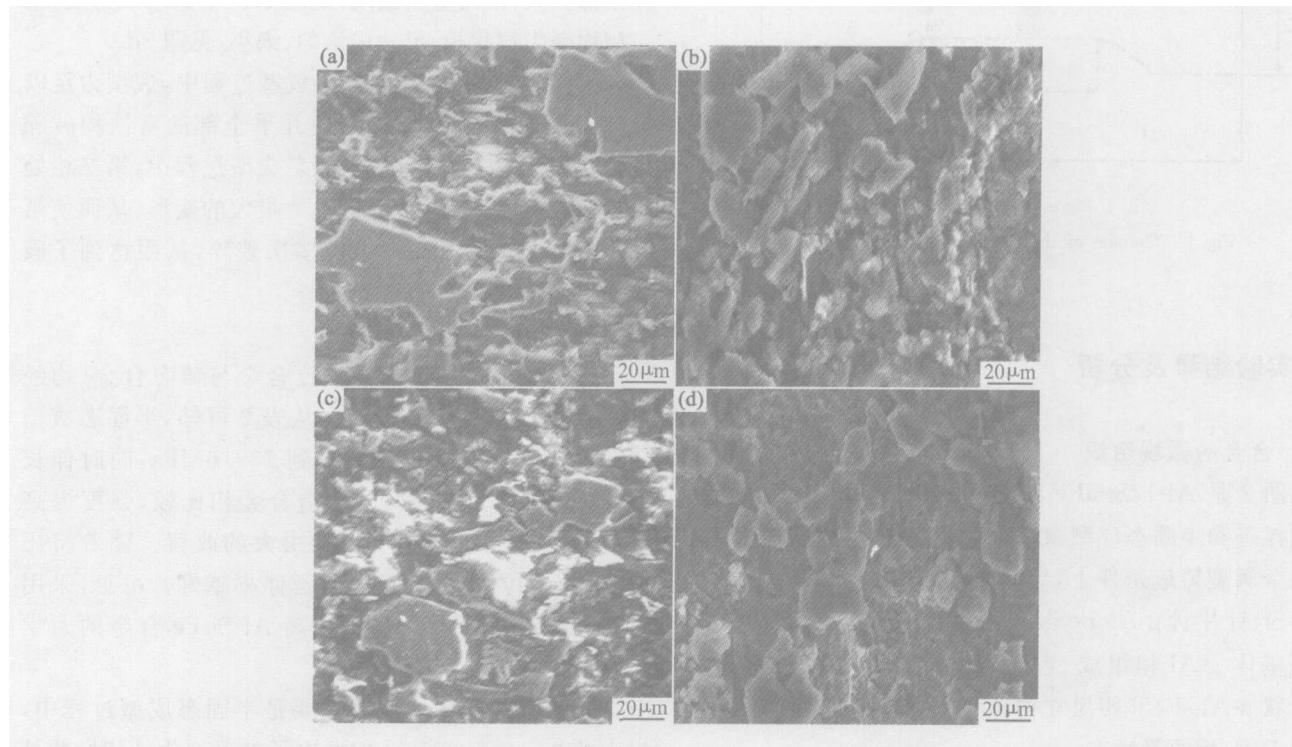


图 3 Al-17Si-5Fe-3Mn-4Cu-1Mg 合金相的立体形貌 (a) 金属型铸造; (b) 电磁搅拌; (c) 二次加热; (d) 半固态成形
Fig. 3 The cubic morphology of phase in Al-17Si-5Fe-3Mn-4Cu-1Mg alloy (a) permanent mold cast;
(b) electromagnetic stirring; (c) sem+solid state; (d) semi solid forming

台如同脆断的解理面。因此,合金断口即使有韧窝形态,但韧性不会很好。随着挤压比的增大,第二相越来越细小,解理平台尺寸越来越小,从而其抗拉强度和延伸率就越来越高。

2.3 合金的磨损行为
2.3.1 高温干摩条件下的磨损行为
图 5 是 150℃干磨擦条件下,不同挤压比的 Al-17Si-5Fe-3Mn-4Cu-1Mg 合金和 390 铝合金对比的磨

表 2 Al-17Si-5Fe-3Mn-4Cu-1Mg 合金力学性能

Table 2 The mechanical properties of Al-17Si-5Fe-3Mn-4Cu-1Mg alloy		
Condition	Tensile strength/(N·mm ⁻²)	Elongation/%
Extrusion ratio 6: 1	209.6	1.5
Extrusion ratio 8: 1	222.3	1.7
Extrusion ratio 10: 1	239.6	2.0
Permanent mold cast	110.2	0.5

损失重曲线。曲线表明: 磨损失重分为两个阶段, 磨损开始时失重随磨损时间的增加而急剧增大, 该阶段时磨合磨损阶段; 此后随着磨损时间的增加, 磨损失重的

增大相对缓慢, 为稳定磨损阶段。比较而言, 挤压比为 10: 1 的 Al-17Si-5Fe-3Mn-4Cu-1Mg 合金磨损失重最小, 其次是挤压比为 8: 1 和 6: 1 的合金, 390 铝合金失重量最大, 从而反映了该半固态合金具有比 390 铝合金更高的耐磨性。当磨损 70min 后, 挤压比为 10: 1 的 Al-17Si-5Fe-3Mn-4Cu-1Mg 合金磨损失重为 2.61mg, 是 390 铝合金的 30.78%; 挤压比为 8: 1 的合金磨损失重为 5.11mg, 是 390 铝合金的 60.26%; 挤压比为 6: 1 的合金磨损失重为 6.35mg, 是 390 铝合金的 74.88%。由此可见, 半固态挤压合金具有比 390 铝合金更高的抗高温干摩擦失重能力, 即具有更高的耐磨性。

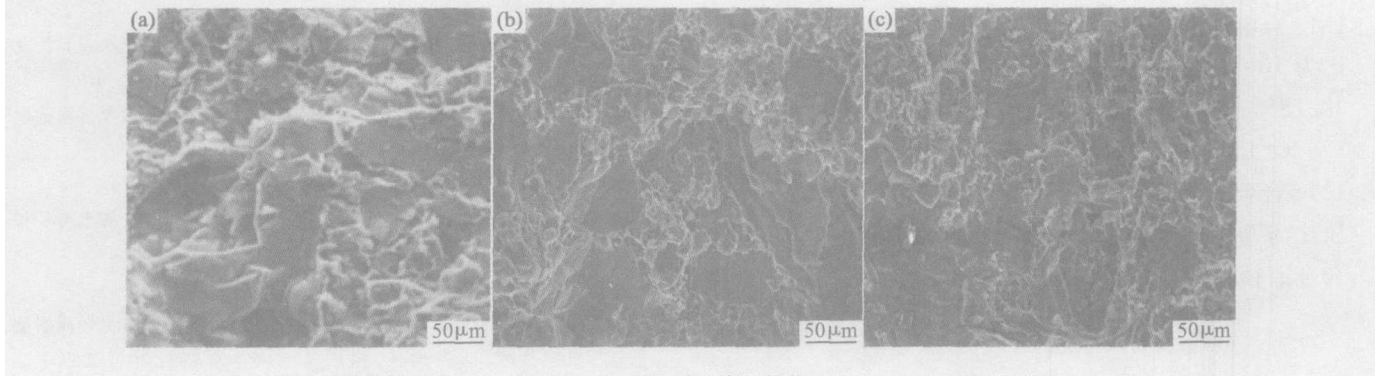


图 4 不同挤压比 Al-17Si-5Fe-3Mn-4Cu-1Mg 合金断面形貌 (a) 6: 1; (b) 8: 1; (c) 10: 1

Fig. 4 Fracture morphology of Al-17Si-5Fe-3Mn-4Cu-1Mg alloy with different extrusion ratio (a) 6: 1; (b) 8: 1; (c) 10: 1

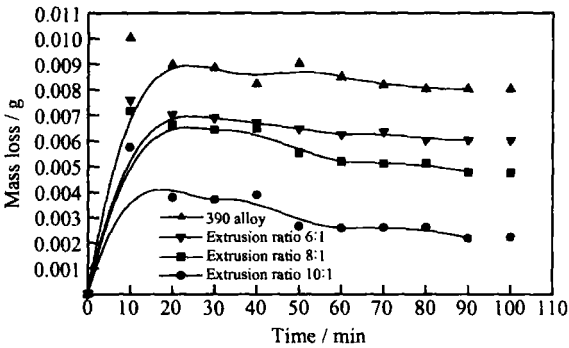


图 5 150℃干摩擦 Al-17Si-5Fe-3Mn-4Cu-1Mg 半固态成型合金和 390 铸造铝合金磨损失重曲线

Fig. 5 The abrasion loss curves of semi-solid forming Al-17Si-5Fe-3Mn-4Cu-1Mg alloy and cast 390 alloys under 150°C dry frictions

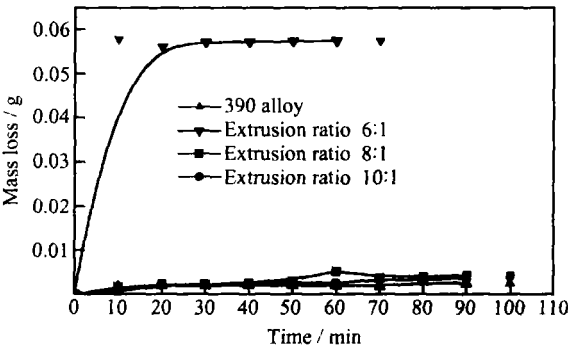


图 6 150℃润滑摩擦 Al-17Si-5Fe-3Mn-4Cu-1Mg 合金和 390 合金磨损失重曲线

Fig. 6 The abrasion loss curves of semi-solid forming Al-17Si-5Fe-3Mn-4Cu-1Mg alloy and cast 390 alloy under 150°C lubricant friction condition

2.3.2 高温润滑摩擦条件下的磨损行为

图 6 是 150℃有润滑条件下, 不同半固态挤压比 Al-17Si-5Fe-3Mn-4Cu-1Mg 合金和 390 合金对比的磨损失重曲线。曲线表明: 合金的磨损失重分为两个阶段, 磨合磨损阶段和稳定磨损阶段。其中, 挤压比为 6: 1, 8: 1, 10: 1 的 Al-17Si-5Fe-3Mn-4Cu-1Mg 合金磨损失重量都比较小, 相比而言, 挤压比为 6: 1 的合金失重量稍微大。磨损失重最严重的是 390 合金, 其

磨损失重量远远大于挤压后的合金。当磨损 70min 后, 390 合金的磨损失重为 57.35mg; 挤压比为 10: 1 的 Al-17Si-5Fe-3Mn-4Cu-1Mg 合金试样磨损失重为 1.77mg, 仅是 390 合金的 3.09%。由此说明, 半固态成型的 Al-17Si-5Fe-3Mn-4Cu-1Mg 合金具有比 390 铝合金具有更高的抗高温润滑条件下的耐磨性。

3 结论

- (1) Al-17Si-5Fe-3Mn-4Cu-1Mg 合金在半固态成型后,粗大的片状和针状初生相消失,尖角钝化,形成较为圆整的近粒状相,尺寸减小;共晶组织变得细小而且均匀,且圆整化。
- (2) 半固态成型并经过 T6 热处理后,Al-17Si-5Fe-3Mn-4Cu-1Mg 合金的力学性能得到大幅度提高,极限抗拉强度达到了 239.6MPa,比金属型铸造合金提高了 117.4%;伸长率达到了 2.0%,提高了 300%。随着挤压比的增加,抗拉强度和伸长率越高。
- (3) 150℃干磨擦条件下,Al-17Si-5Fe-3Mn-4Cu-1Mg 合金随着挤压比的增加,失重量越来越小,挤压比为 10:1 的合金失重仅为同样条件下 390 铝合金的 30.78%。
- (4) 150℃润滑条件下,Al-17Si-5Fe-3Mn-4Cu-1Mg 合金不同挤压比的磨损失重较小,相比而言,挤压比为 6:1 的磨损失重稍微大。挤压比为 10:1 的合金磨损失重为 1.77mg,仅是 390 铝合金的 3.09%。

参考文献

[1] 刘昌明,何乃军. 过共晶铝硅合金半固态挤压铸造近终成型技术研究[J]. 金属成型工艺, 2000, 18(1): 38- 41.

[2] YU G G. Particulate silicon mitered-based composites[J]. J. Mater Sci, 1994, 29(10): 2541- 2556.

[3] 张金山,许春香,韩富银,等. 复合变质对过共晶高硅铝合金组织和性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2002, (1): 107- 114.

[4] 张大童,李元元,罗宗强. 快速凝固过共晶铝硅合金材料的研究进展[J]. 轻合金加工技术, 2001, 29(2): 1- 6.

[5] CREPEAU P N . Effect of iron in Al-Si casting alloy. A critical review[J]. AFS Transactions , 1995 , 110: 361- 366.

[6] WARD P J, ATKINSON H V, ANDERSON P R G, et al. Semi-solid processing of novel MMCs based on hypereutectic aluminium-silicon alloys[J]. Acta Mater, 1996, 44(5): 1717.

[7] 孙业赞,于敞,励松春,等. 铁在铝硅合金中存在的型态及其作用分析[J]. 铸造, 1998, (7): 42- 46.

[8] 关绍康,王利国,朱世杰. 快速凝固合金的研究发展趋势[J]. 现代铸铁, 2004, (4): 22- 26.

[9] 张存信,高娃. 金属半固态成型技术的研究及应用进展[J]. 产业论坛, 2003, 117(8): 32- 36.

[10] 赵树国,袁晓光,张维维,等. 铁锰比对铝硅铁合金微观组织的影响[J]. 沈阳工业大学学报, 2005, (2): 143- 147.

基金项目: 辽宁省科学技术基金资助项目(20022034); 辽宁省教育厅科技基金资助项目(202063284)

收稿日期: 2006-02-27; 修订日期: 2006-07-20

作者简介: 赵树国(1963-),男,副教授,博士生,研究方向为轻质耐磨合金及成形技术,联系地址: 沈阳工业大学材料科学与工程学院(110023)。

- (上接第 33 页)
- 360℃固气反应 3h 可获得 Fe₄N 比例含量较高的产物,Fe₄N 质量分数可达到 45%。
- (2) 在 12h 反应时间,320~ 400℃反应温度范围内,反应温度升高产物介电常数增加磁导率降低;在 360℃反应温度,3~ 12h 反应时间范围内,反应时间增加产物磁导率降低。
- (3) 产物分散处理后制得吸波材料(吸收剂体积比 33.5%,厚度 1mm)反射率优于处理前,在 11.67GHz 处,反射率可达到- 11.18dB。

参考文献

[1] 罗发,周万城,焦恒,等. 高温吸波材料研究现状[J]. 宇航材料工艺, 2002, (1): 8- 11.

[2] 邢丽英. 隐身材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.

[3] 佐藤敏郎. Basic investigation of a magnetic/ dielectric multilayered transmission-line device[J]. 日本应用磁气学会志, 1998, 22(3): 133- 138.

[4] JACK K H. The iron-nitrogen system: the preparation and the

crystal structures of nitrogen-austenite and nitrogen-martensite [J]. Proc Roy Soc A, 1951, (8): 200- 204.

[5] WU X L, ZHONG W, JIANG H Y, et al. Magnetic properties and thermal stability of Y'-Fe₄N nanoparticles prepared by a combined method of reduction and nitriding[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2004, 281: 77- 81.

[6] AKIMASA SAKUMA. Electronic and magnetic structure of iron nitride, Fe₁₆N₂(invited)[J]. Applied Physics, 1996, 79(8): 5570- 5575.

[7] 周桂琴,连法增,高强. 体状 Fe₃N 和 Fe₂N 化合物合成及其磁性研究[J]. 金属功能材料, 1998, 5(8): 158- 160.

[8] LIU Jun-you, ZHANG Qi, YU Hang-jiang, et al. Magnetic properties of the ising ferromagnetic iron nitride system[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2004, 288: 48- 53.

收稿日期: 2005-11-28; 修订日期: 2006-04-20

作者简介: 刘志伟(1981-),女,硕士,主要从事吸波材料的研究,联系地址: 中国矿业大学(北京)机电学院(100083)。