

硬质相对 6061 铝合金异型散热型材表面质量的影响

罗 淞^{1,2}, 林高用¹, 曾菊花¹, 孙利平¹, 邹艳明¹, 周玉雄¹

(1. 中南大学 材料科学与工程学院, 长沙 410083; 2. 山西阳泉铝业股份有限公司, 阳泉 045003)

摘 要: 采用化学成分分析、金相分析、扫描电镜、力学性能测试、能谱分析及 PoDFA 杂质分析等技术对国产 6061 铝合金异型散热型材和进口同种优质 6061 铝型材进行对比分析。结果表明: 国产型材的杂质总含量为 0.195 mm²/kg, 明显高于进口型材的杂质总含量(0.016 mm²/kg), 且其中存在较多的 MgAl₂O₄ 尖晶石和 MgO 硬质杂质相, 这些物相具有特殊的形态和较高的硬度, 在加工过程中易划伤模具表面而降低型材的表面质量; 国产 6061 铝型材中 Mg 和 Si 元素的含量均高于进口试样的, 但由于形成了较多大块状、硬而脆的 Fe₂Si₂Al₉ 相, 导致国产型材的强度虽稍高于进口型材的, 但其伸长率却大幅度下降, 也影响型材的表面质量。

关键词: 6061 散热铝型材; 硬质相; 表面质量

中图分类号: TB31

文献标志码: A

Effect of hard phases on surface quality of 6061 special-shaped radiator aluminum profile

LUO Song^{1,2}, LIN Gao-yong¹, ZENG Ju-hua¹, SUN Li-ping¹, ZOU Yan-ming¹, ZHOU Yu-xiong¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;

2. Shanxi Yangquan Aluminium Industry Co., Ltd, Yangquan 045003, China)

Abstract: Contrastive analyses of two kinds of 6061 special-shaped radiator aluminum profiles produced at home and abroad were done by composition analyses, OM, SEM, mechanical tests, energy spectrum analyses and PoDFA inclusion analyses. The results show that the inclusion concentration of the domestic profile is 0.195 mm²/kg, which is obviously higher than that of the imported one (0.016 mm²/kg). There are more spinel MgAl₂O₄ and MgO inclusions with special shapes and high hardness in the domestic profile, which can scratch the surface of molds and worsen the surface quality of profiles. With higher contents of Mg and Si, the strength of the domestic profile is slightly higher than that of the imported one. However, due to the formation of massive, hard and brittle Fe₂Si₂Al₉ phases, its elongation is much lower than that of the imported one, and its surface quality is also affected.

Key words: 6061 radiator aluminum profile; hard phases; surface quality

铝型材以良好的导热性能和成形性能成为制造散热器的重要材料^[1]。作为散热器型材, 为了实现散热器热传导能力的最大化, 不仅要选用具有较高传热系数的材料, 还要保证热源与散热器底座的紧密结合, 因此, 对型材的表面质量有较高的要求^[2]。但是, 铝型材在生产过程中特别是挤压过程中因为工艺的复杂性以及型材质量对工艺的敏感性而容易形成一些表面

缺陷。缺陷的形成导致产品外观质量较差, 成材率下降, 影响企业的经济效益。

挤压型材常见的表面缺陷有夹渣、划痕、起皮、起泡、定径带条纹、组织条纹、停车痕和橘皮等^[3-4]。国内某企业生产的 6061 铝合金异型散热型材的表面存在较明显的划伤、划痕或毛刺。导致型材表面产生划伤、划痕或毛刺的主要原因有两个方面^[3]: 1) 模具

和挤压工艺,如模具定径带不光滑、挤压筒内壁或模具上存在未清理干净异物、挤压压余或脱皮过小;

2) 材料本身含有较多硬质杂质或其他硬质相,导致挤压模具表面损伤严重,进而使型材粘模几率增加。近年来,国内研究人员对这类表面质量问题进行了较多的探讨。王荣滨^[5]认为,产生表面划痕的根本原因在于模具的表面状况、工模具的装配及挤压筒内的异物。张金刚^[6]则将表面产生划、擦、碰伤的原因归结于铸锭内坚硬的金属颗粒、模具型腔和出料轨道上较硬的夹杂物以及模具工作带的硬度。他虽然提到铸锭中的坚硬颗粒会使型材表面产生划伤,但并未对其作用机理进行研究,国外也尚无相关报道。为此,本文作者研究型材中的硬质相对型材表面质量的影响。

1 实验

本实验的材料有两种,分别为国内某企业生产的 6061 铝合金异型散热型材和进口的同种优质 6061 铝型材。从两种型材的同一位置取样,通过钻削、机械加工或线切割,将其制成用于成分分析、金相、扫描电镜和拉伸测试的试样,进行相应检测。

采用 IRIS Advantage 1000 ICP-AES 型等离子体发射光谱仪进行成分检测;试样用 Keller 试剂(1.0%HF+1.5%HCl+2.5%HNO₃+95%H₂O)侵蚀,用 PLOMAR MET II 型金相显微镜观察合金的微观组织;用 Sirion 200 场发射扫描电镜和 Gensis 60 多功能电子能谱仪分别进行形貌观察及微区成分分析;在 MTS 810 材料试验机上进行力学性能测试,拉伸速率为 2 mm/min。

除以上常规检测外,采用 ABB 公司的 PoDFA 技术对杂质进行检测,具体过程如下:提取一定量两种型材的金属液,将其倒入专用坩埚中;真空促使金属流向微孔过滤器,熔体中的杂质集中在过滤器表面;待熔体基本过滤后(5 min),将过滤器连同残余金属及杂质一同剪下,制成样品,进行磨抛。样品在光学显微镜下观察,并用铝液杂质分析仪对杂质进行定性和定量分析。

2 结果与分析

2.1 表面宏观形貌

图 1 所示为国内某公司生产和进口的 6061 铝合金异型散热型材表面实物照片。由图 1 可见,国产 6061

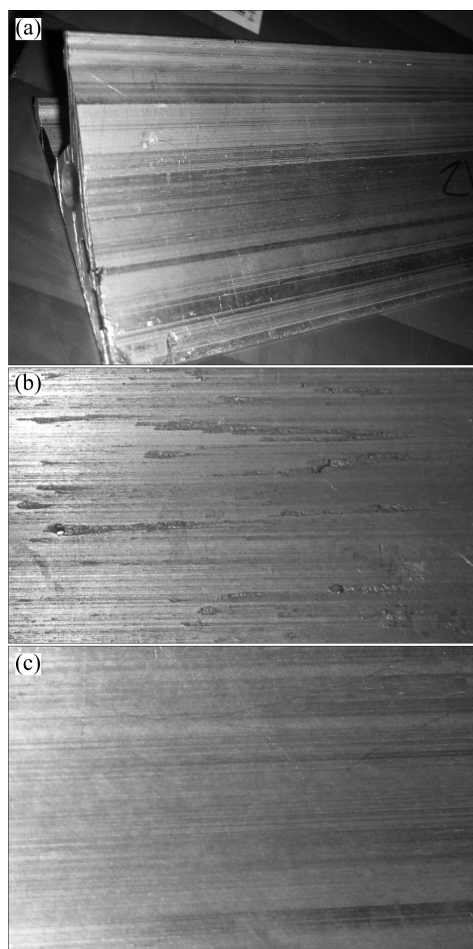


图 1 两种 6061 铝型材的外观及其表面实物照片

Fig.1 Physical pictures of two kinds of 6061 aluminum profiles: (a) Appearance of profiles; (b) Surface of domestic profile; (c) Surface of imported profile

铝合金型材的表面明显不光滑,存在较多的划痕和毛刺,其表面质量较差,而进口型材的表明平整,划痕很少,表面质量较好。

2.2 化学成分

对两种型材分别进行成分分析,结果如表 1 所列。由表 1 可知,与进口试样相比,国产试样中 Mg、Si、Cu 和 Cr 等元素含量均较高,但 Mg 与 Si 的质量比($m(\text{Mg})/m(\text{Si})$)相近,均大于 4。6061 铝合金中主要强化相 Mg₂Si 中 Mg 与 Si 的质量比为 1.73^[7],因此,两种型材中的 Mg 均有较多的剩余。6061 合金中 Mg 的存在形式有多种,除了形成 Mg₂Si 和 AlMgSi(Cu)等强化相以外,还可能因为被氧化而生成 MgO 和 MgAl₂O₄等化合物^[8-9]。两种型材中剩余的 Mg 在熔铸、后续加工及存放过程中都可能被氧化。国产试样中 Fe 等杂质的含量控制得较好,其含量较低。

表 1 两种 6061 铝型材的化学成分

Table 1 Chemical compositions of two kinds of 6061 aluminum profiles (mass fraction, %)

Sample	Mg	Si	Cu	Cr	Ti
Imported	0.93	0.22	0.19	0.15	0.01
Domestic	1.15	0.27	0.25	0.17	0.02

Sample	Zn	Fe	Mn	Ni	Al
Imported	0.01	0.20	0.12	0.004	Bal.
Domestic	0.02	0.15	0.11	0.004	Bal.

2.3 内部杂质

对两种 6061 铝型材中杂质的检测结果如表 2 所列。由表 2 可知, 两种试样中的主要杂质类型都是晶粒细化剂、(Ti, V)B₂、镁化合物(MgO、MgAl₂O₄ 立方晶和尖晶石)以及一些可能存在的氯化物。国产试样中杂质含量较高, 为 0.195 mm²/kg; 而进口试样较纯净, 其杂质含量仅为 0.016 mm²/kg。图 2 所示为两种型材杂质分析试样的金相组织。由图 2 可看出, 国产试样中杂质含量较高, 主要有镁化合物、晶粒细化剂以及 (Ti,V)B₂; 而进口试样较纯净, 只含有少量的氯化物和晶粒细化剂。

(Ti, V)B₂ 是在熔炼过程中对熔体进行硼化处理时形成的细小产物, 对材料的表面质量影响较小。MgAl₂O₄ 是 Mg 在高温重熔过程中与空气接触而形成的化合物。MgAl₂O₄ 杂质的硬度很高^[9], 当其以尖晶石形态存在时, 对材料的表面质量影响较大, 而以立

方晶形态存在时, 则影响较小。MgO 是 Mg 与空气接触而形成的化合物, 其硬度也较高^[9], 但尺寸很小, 然而, 当其聚集成块时, 由于也是在型材内部以尖晶石形态存在或存在于型材表面氧化薄膜中, 因而也影响材料的加工性能和表面质量。杂质中的氯化物大多是用氯气或者氯盐作为除气、除渣的精炼剂时带入的。氯化物通常较软, 对一般型材产品的表面质量无有害影响。

金属在挤压过程中发生较大程度的变形, 导致大部分金属在流出模口时形成型材的表面。原挤压铸锭内部的杂质相也随着基体金属的流动而流入型材表面。若基体中存在体积较大的硬质相, 则其会划伤模具的工作带, 导致工作带的内表面变得粗糙。粗糙的工作带不仅会划伤型材的表面, 而且会使粘铝现象加剧。粘在工作带上的铝若未及时清理, 会进一步划伤型材表面, 严重时还会在型材的表面沿挤压方向留下一道道凹槽。由表 2 可知, 国产试样内部存在较多的 MgAl₂O₄ 尖晶石和 MgO 硬质杂质相。这些硬质杂质相具有特殊的形态和较高的硬度, 导致其在挤压过程中易划伤模具工作带, 进而影响型材的表面质量。

2.4 组织分析

图 3 所示为国产和进口两种型材的背散射电子像。由图 3(a)可知, 国产试样中除基体外, 有两种很明显的特征相, 如 A 和 B 点所示。此外, 国产试样中还有少量呈弥散分布的细小颗粒物相。由于这些相面积太小, 在能谱仪上难以精确捕捉。由图 3(b)可知,

表 2 两种 6061 铝型材的杂质分析结果

Table 2 Results of inclusion analysis of two kinds of 6061 aluminum profiles

Inclusion type	Chemical component	Inclusion content/(mm ² ·kg ⁻¹)	
		Domestic profile	Imported profile
Carbide	Al ₄ C ₃ (>3 μm)	0.002	—
	MgO	0.010	—
Magnesium oxide	Cuboid MgAl ₂ O ₄	0.004	0.001
	Spinel MgAl ₂ O ₄	0.002	—
Addition	Spinel-like (Reacted)	0.002	—
	α-Al ₂ O ₃ , CaO, SiO(Unreacted)	—	—
Refractory material	Potential chloride(MgCl ₂ , NaCl, CaCl ₂)	—	0.009
	Flux/salt, bone ash	—	—
Metal treatment	Boron treatment(Ti, V)B ₂	0.029	0.002
	Grain refiner(TiB ₂ /TiC)	0.146	0.004
Total inclusion content		0.195	0.016
Total without grain refiner		0.049	0.011

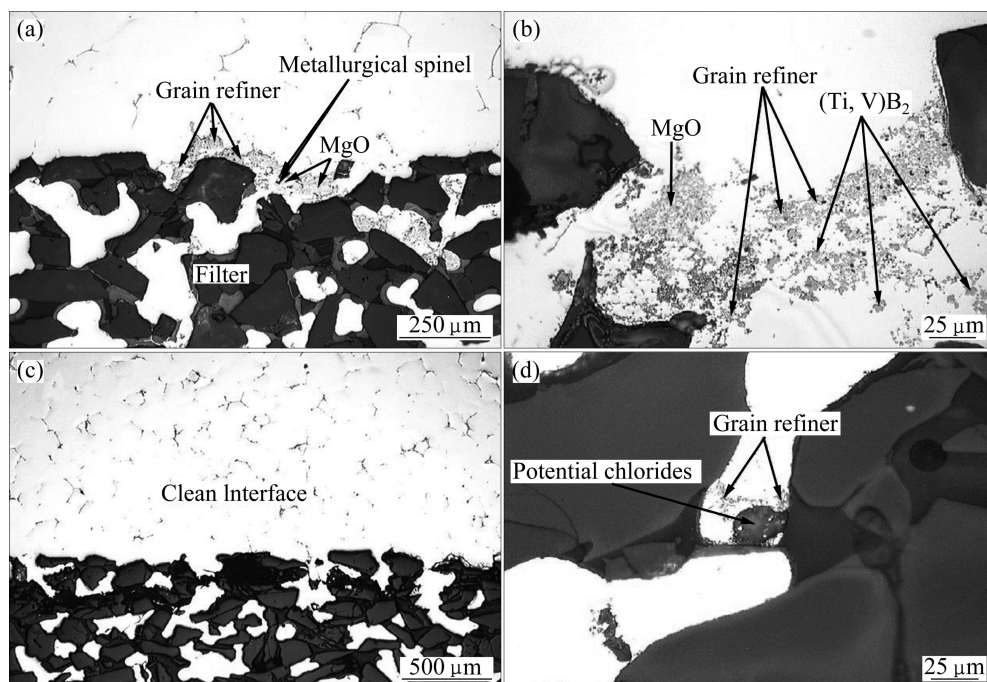


图 2 铝液杂质分析试样的微观组织

Fig.2 Microstructures of samples of aluminum liquid for inclusion analysis: (a), (b) Domestic sample; (c), (d) Imported sample

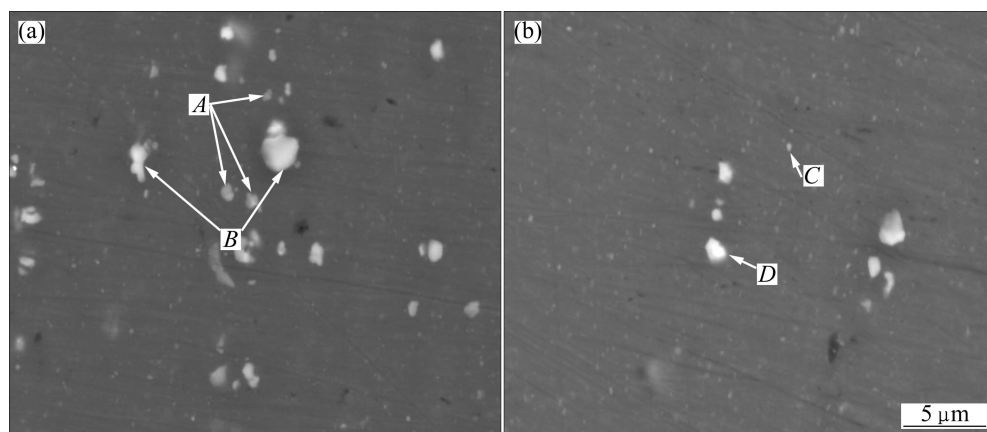


图 3 两种 6061 铝型材的背散射电子像(未腐蚀)

Fig.3 BSE images of two kinds of 6061 aluminum profiles (without corrosion): (a) Domestic sample; (b) Imported sample

进口试样中主要有大块状白色相和呈细小弥散分布的灰白色相,如 *D* 和 *C* 点所示。对 *A*、*B*、*C* 和 *D* 点进行能谱分析,其结果如表 3 所列。根据元素的摩尔比,同时参考文献[10–11]发现,除基体外,国产试样中的主要特征相是大块状的 $\text{Fe}_2\text{Si}_2\text{Al}_9$ 相和小块状的 Mg_2Si 相,而进口试样中主要有小块状 $\text{Fe}_2\text{Si}_2\text{Al}_9$ 相和呈细小弥散分布、以 MgCl_2 为代表的氯化物相。

对两种试样进行比较发现,两种试样中都存在块状 $\text{Fe}_2\text{Si}_2\text{Al}_9$ 相,但是国产试样中 $\text{Fe}_2\text{Si}_2\text{Al}_9$ 相的数量更多、更粗大,且不均匀。文献[10]结果显示,当 6000

系合金中 Si 含量高于 Fe 含量时,会生成针状 $\text{Fe}_2\text{Si}_2\text{Al}_9$ 相。该针状相硬而脆,显微硬度高达 578 HV,在加工过程中容易破碎成块状。块状 $\text{Fe}_2\text{Si}_2\text{Al}_9$ 虽然能够提高型材的抗拉强度和硬度,但由于该相质点粗大,且很硬,位错不易切割,因此,降低了合金的挤压性能,且容易拉伤或划伤型材表面以及模具的工作带,在变形中还易成为裂纹源,降低合金的断裂韧性^[11–12]。因此,国产试样中存在较多粗大且分布不均匀的 $\text{Fe}_2\text{Si}_2\text{Al}_9$ 硬质相也是造成国产型材表面质量不佳的重要原因。

表 3 图 3 所示特征点的能谱分析结果

Table 3 Energy spectrum analysis results of characteristic locations in Fig.3

Characteristic location	Mole fraction/%								Phase type
	Mg	Si	Cr	Mn	Fe	Cu	Cl	Al	
A	1.61	0.91	0.20	0.23	0.57	0.19	0.28	Bal.	Mg ₂ Si
B	1.50	3.82	0.39	0.84	3.42	0.43	0.08	Bal.	Fe ₂ Si ₂ Al ₉
C	1.46	1.13	0.23	0.32	0.76	0.23	2.56	Bal.	MgCl ₂
D	1.19	3.77	0.59	0.91	3.89	0.28	0.31	Bal.	Fe ₂ Si ₂ Al ₉

图 4 所示为两种型材的金相组织。由图 4 可看出, 两种型材中都存在较明显的相脱落, 根据文献[13–15], 可判断其为 Mg₂Si 相。结合图 3 所示型材的背散射电子像可知, Fe₂Si₂Al₉ 相的面积比 Mg₂Si 相的大, 由此可判断, 图 4 所示的粗大圆状相为 Fe₂Si₂Al₉ 相。对两种试样进行比较发现, 国产试样中的 Fe₂Si₂Al₉ 相更多、更粗大, 且分布不均匀, 这和扫描电镜分析得到的结果是一致的。

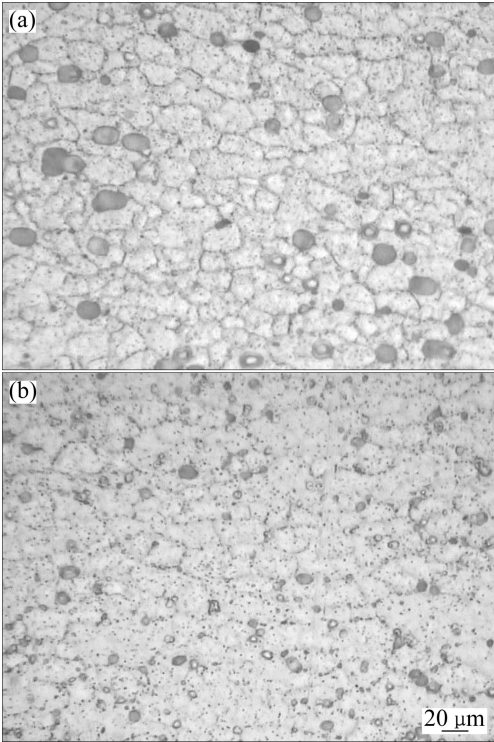


图 4 两种 6061 铝型材的金相组织

Fig.4 Metallographic structures of two kinds of 6061 aluminum profiles: (a) Domestic sample; (b) Imported sample

2.5 力学性能

对两种型材分别进行室温力学性能测试, 结果如表 4 所列。由表 4 可知, 与进口试样相比, 国产试样抗拉强度的增幅小于 10%, 而伸长率的降低幅度却大于 20%。这是因为国产试样中合金元素的含量较高,

合金元素之间及其与杂质之间形成的强化相提高了材料的抗拉强度, 但是, 这些强化相中部分相硬而脆, 且较粗大, 如 Fe₂Si₂Al₉ 相等, 在变形过程中容易成为裂纹源, 从而能大幅度降低型材的塑性。

表 4 两种 6061 铝型材的室温力学性能

Table 4 Mechanical properties of two kinds of 6061 aluminum profiles at room temperature

Sample	σ_b /MPa	δ /%
Domestic	329	11.85
Imported	308	15.10

3 结论

1) 国产试样中杂质的总含量(0.195 mm²/kg)高于进口试样的(0.016 mm²/kg)。两种试样中的主要杂质类型均为晶粒细化剂、镁化合物(MgO、MgAl₂O₄ 立方晶和尖晶石)以及氯化物, 但国产试样中存在较多的 MgAl₂O₄ 尖晶石和 MgO 硬质杂质相, 这些硬质杂质相具有特殊的形态和较高的硬度, 在加工过程中易划伤模具工作带而降低型材的表面质量。

2) 国产 6061 铝型材中的合金元素 Mg 和 Si 的含量高于进口试样的, 但由于形成了较多大块状、硬而脆的 Fe₂Si₂Al₉ 相, 因此, 国产型材的强度虽稍高于进口型材的, 但伸长率却较大幅度地下降, 也影响型材的表面质量。

REFERENCES

[1] 王伟东, 王祝堂, 梁世斌. 中国铝挤压材生产与市场[J]. 轻合金加工技术, 2008, 36(5): 5–8.
WANG Wei-dong, WANG Zhu-tang, LIANG Shi-bin. Production and market of the aluminum extruding products in China[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2008, 36(5): 5–8.
[2] 王钟柱. 车用散热器行业现状及发展趋势[J]. 汽车与配件,

- 2007(1): 121–124.
- WANG Zhong-zhu. Current situation and development tendency of car radiator[J]. *Automobile and Parts*, 2007(1): 121–124.
- [3] 肖亚庆, 谢水生, 刘静安, 王涛. 铝加工技术使用手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2005: 559–563.
- XIAO Ya-qing, XIE Shui-sheng, LIU Jing-an, WANG Tao. Practical directory of aluminium alloys technology[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2005: 559–563.
- [4] 周向阳, 杨建红, 李庆余. 建筑用铝合金型材缺陷的成因与对策[J]. *轻合金加工技术*, 2000, 28(4): 21–24.
- ZHOU Xiang-yang, YANG Jian-hong, LI Qing-yu. Causes of formation and countermeasures for defects of 6063 aluminium alloy profile[J]. *Light Alloy Fabrication Technology*, 2000, 28(4): 21–24.
- [5] 王荣滨. 铝合金挤压制品十种缺陷与消除措施[J]. *机械制造*, 2004, 42(3): 56–58.
- WANG Rong-bin. Ten defects of aluminum alloy extruded products and remedies[J]. *Machinery*, 2004, 42(3): 56–58.
- [6] 张金刚. 6063 铝合金挤压型材常见缺陷及其解决办法[J]. *有色金属加工*, 2004, 33(2): 27–30.
- ZHANG Jin-gang. Common defects of 6063 aluminum alloy extruded profile and corresponding solutions[J]. *Nonferrous Metals Processing*, 2004, 33(2): 27–30.
- [7] 李晶. 合金元素对 Al-Mg-Si 系铝合金组织及性能影响的研究[D]. 上海: 上海大学, 2006: 21–34.
- LI Jin. Effect of alloying elements on the microstructure and properties of Al-Mg-Si aluminum alloy[D]. Shanghai: Shanghai University, 2006: 21–34.
- [8] MA Z, SAMUEL A M, SAMUEL F H, DOTY H W, VALTIERRA S. A study of tensile properties in Al-Si-Cu and Al-Si-Mg alloys: Effect of β -iron intermetallics and porosity[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2008, 490(1/2): 36–51.
- [9] GAFFAR M A, GABER A, MOSTAFA M S. The effect of Cu addition on the thermoelectric power and electrical resistivity of Al-Mg-Si balanced alloy: A correlation study[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2008, 465(1/2): 274–282.
- [10] 杜鹏, 李彦利, 闰晓东, 沈健, 张智慧. 高品质 6061 铝合金均匀化工艺研究[J]. *中国有色金属学报*, 2005, 15(1): 107–111.
- DU Peng, LI Yan-li, GUI Xiao-dong, SHEN Jian, ZHANG Zhi-hui. A study of homogenization process for high quality 6061 aluminum alloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2005, 15(1): 107–111.
- [11] 张建新, 高爱华. 过剩 Si 对 6063 铝合金组织与性能的影响[J]. *特种铸造及有色合金*, 2008, 28(2): 148–152.
- ZHANG Jian-xin, GAO Ai-hua. Influence of surplus Si on microstructure and properties of 6063 aluminum alloy[J]. *Special Casting and Nonferrous Alloys*, 2008, 28(2): 148–152.
- [12] LIU Hong, ZHAO Gang, LIU Chun-ming, ZUO Liang. Effects of magnesium content on phase constituents of Al-Mg-Si-Cu alloys[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2006, 16(2): 376–381.
- [13] LIUA L, KANG B S B, KIM H W. The complex microstructures in an as-cast Al-Mg-Si alloy[J]. *Materials Letters*, 1999, 41(6): 267–272.
- [14] JOHN A, FRANCIS G M, DELPHINE C. The role of defects in the fracture of an Al-Si-Mg cast alloy[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2005, 407(1/2): 322–329.
- [15] AHMAD FAUZI M N, UDAYA M B, ZUHAILAWATI H, ISMAIL A B. Microstructure and mechanical properties of alumina-6061 aluminum alloy joined by friction welding[J]. *Materials and Design*, 2010, 31(2): 670–676.

(编辑 陈卫萍)