

Mg 元素对强流脉冲电子束改性后 Al-20Si 合金表面微观组织及性能的影响

李魁, 高波, 徐宁, 任娅维, 邢鹏飞

(东北大学 冶金学院, 沈阳 110819)

摘要: **目的** 通过添加 Mg 元素改善 Al-20Si 合金的组织, 提升其表面力学性能。**方法** 运用场发射扫描电镜 (FESEM)、显微硬度计及多功能材料表面性能测试仪等一系列检测手段, 考察 Mg 元素对强流脉冲电子束改性 Al-20Si 合金表面效果的影响, 及合金表面微观组织和表面力学性能的变化。**结果** Mg 元素能与硅相形成更细小的 Mg_2Si 相来细化初生硅相, 同时可改善强流脉冲电子束处理后铝硅合金表面产生的微裂纹。材料表面经强流脉冲电子束改性后, 所有的衍射峰发生了宽化及偏移。两组合金铝基体的显微硬度随着脉冲数的增加而逐渐递增, Al-20Si 合金铝基体的显微硬度由 745.5 MPa 增加到 2170.7 MPa, Al-20Si-5Mg 合金的铝基体显微硬度由 1061.3 MPa 增加到 2403.6 MPa, Mg 元素的添加可提高 Al-20Si 合金的硬度。另外, 通过往复摩擦试验发现, Mg 元素及强流脉冲电子束都能提高材料的耐磨性。**结论** Mg 元素能改善强流脉冲电子束处理后 Al-20Si 合金表面的微观组织, 添加 Mg 元素后, Al-20Si 合金表面的力学性能得到提高。

关键词: 强流脉冲电子束; 过共晶铝硅合金; 镁元素; 微裂纹; 显微硬度; 耐磨性

中图分类号: TG178 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)01-0213-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.01.025

Effects of Mg on Surface Microstructure and Mechanical Properties of HCPEB Treated Al-20Si Alloy

LI Kui, GAO Bo, XU Ning, REN Ya-wei, XING Peng-fei

(School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

ABSTRACT: The paper aims to improve the structure of Al-20Si alloy by adding Mg to improve its surface mechanical properties. In this experiment, a series of tests were carried out with field emission scanning electron microscopy (FESEM), microhardness tester, and a multi-functional surface property tester to study the surface microstructure and surface mechanical properties of Al-20Si alloy surface treated by HCPEB modified by adding Mg element. The Mg could refine the primary silicon phase by forming finer Mg_2Si phase with the Silicon phase, while Mg element could eliminate the microcracks on the Al-Si alloy surface which formed after HCPEB treatment. All the diffraction peaks were broadened and shifted after the material

收稿日期: 2019-04-28; 修订日期: 2019-07-07

Received: 2019-04-28; Revised: 2019-07-07

基金项目: 国家自然科学基金 (51671052); 中央高校基本科研业务费专项资金 (N182502042)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51671052) and the Central University Basic Scientific Research Business Expenses Special Funds (N182502042)

作者简介: 李魁 (1995—), 男, 硕士, 主要研究方向为材料表面处理。

Biography: LI Kui (1995—), Male, Master, Research focus: material surface treatment.

通讯作者: 高波 (1976—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为材料表面处理。邮箱: gaob@smm.neu.edu.cn。

Corresponding author: GAO Bo (1976—), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: material surface treatment. E-mail: gaob@smm.neu.edu.cn.

surface was modified by HCPEB treatment. The Al matrix microhardness of these two alloys gradually increased with the increase of the pulse number. The microhardness of Al-20Si alloy Al substrate increased from 745.5 MPa (for initial sample) to 2170.7 MPa (sample treated with 25 pulses), the microhardness of Al-20Si-5Mg alloy Al substrate increased from 1061.3 MPa (for initial sample) to 2403.6 MPa (sample treated with 25 pulses). Meanwhile, the addition of Mg improved the hardness of Al-20Si alloy. In addition, reciprocate fraction test showed that both Mg and HCPEB could improve the wear resistance of material. It can be summarized that adding Mg element can modify the microstructure of the Al-20Si alloy after HCPEB treatment, and improved the surface mechanical properties of Al-20Si alloy treated by HCPEB.

KEY WORDS: HCPEB; hypereutectic Al-Si alloy; magnesium; microcracks; microhardness; wear resistance

铝硅合金作为典型的铸造合金,以其优异的力学性能,成为了制造发动机活塞首选的金属材料,因而被广泛应用于汽车制造业。铸造的铝硅合金通常采用添加少量的 Mg 和 Fe 来提高材料的强度及韧性^[1-4],然而添加 Mg 元素对铝硅合金组织中初生硅的细化能力有限,限制了材料应用范围。因此,如何通过细化初生硅拓展铝硅合金的应用领域,成为一些学者研究的重点^[5-6]。对于初生硅,常用的细化方法有半固态搅拌、快速凝固、变质处理及高能束表面处理,但对于初生硅的复合改性研究较少。

作为新兴的表面改性技术,强流脉冲电子束以其操作简单、工艺可控性强、高效、无污染、低能耗、重复性能好以及效率高等优点,成为国内外一些研究学者的研究重点,并在各种工业常用材料的表面改性领域得到了广泛的应用^[7-11]。强流脉冲电子束在处理脆性材料时,易导致材料表面大量熔坑及微裂纹的产生,严重恶化其表面力学性能。在强流脉冲电子束的微裂纹消除方面,目前只有胡亮等人^[12]利用稀土 Nd 消除了强流脉冲电子束处理后 Al-17.5Si 合金表面的微裂纹,但是稀土是一种比较稀缺的资源。本文重点研究了添加常见金属元素 Mg 对于经强流脉冲电子束处理后 Al-20Si 合金表面微裂纹的消除作用,并通过对比维氏显微硬度及材料耐磨性的测量,研究了 Mg 元素的添加对于 Al-20Si 合金表面显微硬度及耐磨性的影响。同时运用扫描电镜考察了改性前后材料表面的组织形貌,揭示了合金的表面力学性能与其表面微观组织的内在联系。通过前期探索发现,添加 5% 的 Mg 对于合金组织中的初生硅细化最佳。

1 实验

1.1 原料及合金的制备

实验所选用的原料为铝锭 (Al 99.79%)、2202 硅 (Si 99.4%) 及镁锭 (Mg 99.90%)。将原料切成小块,按一定的比例在井式加热炉中加热熔炼、除气,随后在 $\phi 15\text{ mm} \times 80\text{ mm}$ 的 304 不锈钢模具中进行浇铸,其合金的化学成分见表 1。然后对铸锭进行线切割,制成 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 的块状。先后使用不同粗糙程度的砂纸对切割好的样品进行粗抛,再使用

粒度为 $2.5\text{ }\mu\text{m}$ 的金刚石研磨膏进行精抛,直到表面光亮无划痕。最后用无水乙醇对抛光好的样品表面进行清洗、快速吹干、密封保存,待电子束处理。

表 1 合金的化学成分
Tab.1 Chemical compositions of alloy

wt. %			
Alloy composition	Si	Mg	Al
Al-20Si	20	0	80
Al-20Si-5Mg	20	5	75

1.2 强流脉冲电子束处理

采用“MMLAB-HOPE-I”型电子束装置对材料进行表面改性。其相应的工艺参数:真空室的真空度为 $\sim 6 \times 10^{-3}\text{ Pa}$,加速电压为 27 kV ,能量密度为 $\sim 5\text{ J/cm}^2$,脉冲频率为 0.2 Hz ,脉冲持续时间为 $\sim 3\text{ }\mu\text{s}$,靶距为 10 cm ,脉冲处理次数为 5、15、25 次。

1.3 表面微观组织及性能分析

使用 Hitachi S-4800 型场发射扫描电子显微镜及仪器配备的 EDS 能谱仪,观察了改性前后铝硅合金表面的微观组织形貌及 25 次脉冲后合金表面的元素分布。利用 PW3040/60 型 X 射线衍射仪对材料表面改性前后的物相组成进行了分析。采用 LM247AT 型维氏硬度计对改性前后样品表面 $\alpha(\text{Al})$ 硬度进行测量,在每个样品表面随机选取 5 个点进行测量,测量时载荷为 10 g ,加载时间为 15 s ,取平均值。最后,用 MFT-4000 多功能材料表面性能试验仪进行往复摩擦试验,测量强流脉冲电子束改性前后的摩擦系数。摩擦系数检测参数:载荷为 10 g ,摩擦副为 $\phi 6\text{ mm}$ 的 Si_3N_4 球,往复长度为 7 mm ,往复时间为 20 min 。

2 结果及分析

2.1 扫描电镜 (SEM) 分析

强流脉冲电子束改性前后 Al-20Si 合金的微观组织与形貌如图 1 所示。从图 1a 可以看出,未处理合金表面由粗大的板块状初生硅、弥散分布的针状共晶硅和铝基体组成,这些微观组织在铝硅合金组织中十

分常见^[13-14]。由图 1b—d 可以发现,材料表面经电子束轰击后,有明显的微裂纹。文献[15-16]报道了电子束处理过程中微裂纹形成的机理:在电子束轰击后,冷却的过程中,合金的表面发生体积收缩,重熔层下的过冷基体抑制体积收缩,从而使合金表面产生了超过材料抗拉强度的拉应力,导致材料熔坑底部产生了

微裂纹,严重影响了合金表面的力学性能^[17]。由于合金在冷却的过程中容易产生很高的拉应力,因此微裂纹易产生在脆性相中,而初生硅具有高脆性,所以微裂纹较易出现在初生硅相中^[18]。

强流脉冲电子束改性前后 Al-20Si-5Mg 合金表面微观组织及形貌如图 2 所示。通过与图 1a 未添加

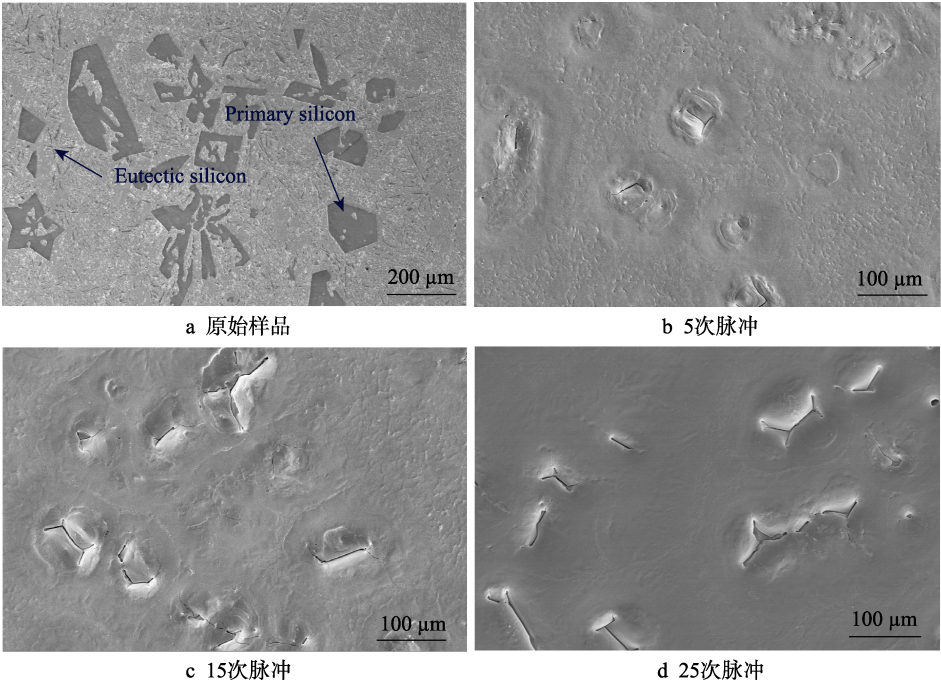


图 1 强流脉冲电子束处理前后 Al-20Si 合金表面微观 SEM 形貌 (27 kV)
Fig.1 SEM morphology images of Al-20Si alloy surface before and after HCPEB treatment (27 kV):
a) initial sample; b) 5 pulses; c) 15 pulses; d) 25 pulses

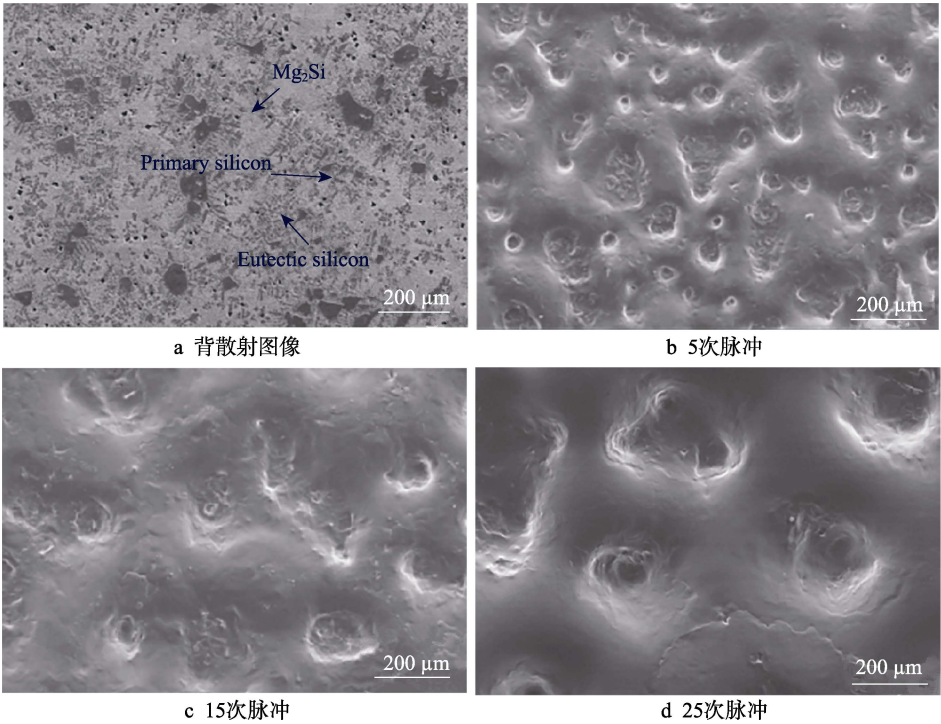


图 2 强流脉冲电子束处理前后 Al-20Si-5Mg 合金表面微观 SEM 形貌 (27 kV)
Fig.2 SEM morphology images of Al-20Si-5Mg alloy surface before and after HCPEB treatment (27 kV):
a) BSE image; b) 5 pulses; c) 15 pulses; d) 25 pulses

Mg 元素的原始样品对比,发现添加 Mg 元素的合金中产生了 Mg_2Si 相,同时还可以看出,初生硅明显得到了细化。对比图 2b—d,发现添加 Mg 元素的合金表面经电子束处理后,无微裂纹产生。这是因为在添加 Mg 元素的合金中,熔坑结构产生在 Mg_2Si 相中,且细化了初生硅,在其表面超快冷过程中,微裂纹在熔坑底部的扩展受到极大地抑制^[18]。这说明添加 Mg 元素能够达到如添加稀土 Nd 消除微裂纹的效果。除了上述现象外,从图 2 还可以发现,随着脉冲次数的逐渐递增,熔坑结构的密度减小,说明电子束对合金表面有着抛光作用^[19-20]。

Al-20Si-5Mg 经过 25 次强流脉冲处理后,合金表

面形成的“晕圈”结构微观 SEM 形貌及相应区域的元素分布如图 3 所示。由图 3a 可以看出,强流脉冲电子束处理后,Al-20Si-5Mg 合金表面形成了常见的“晕圈”组织。图 3b—d 为相应区域的 Al、Si、Mg 元素面扫分布图。从图 3 可以明显发现,强流脉冲电子束处理后,“晕圈”结构组织内部的 Al、Si、Mg 元素发生了相互扩散。在强流脉冲电子束对 Al-20Si-5Mg 表面进行轰击的过程中,由于电子束在极短的时间使得样品表面发生熔化,同时 Mg_2Si 相与铝基之间存在 Mg 元素和 Si 元素化学梯度,导致了熔化的 Si 原子与 Mg 原子持续地向铝基体扩散,直到合金的表面各元素呈现均匀分布^[16-17]。

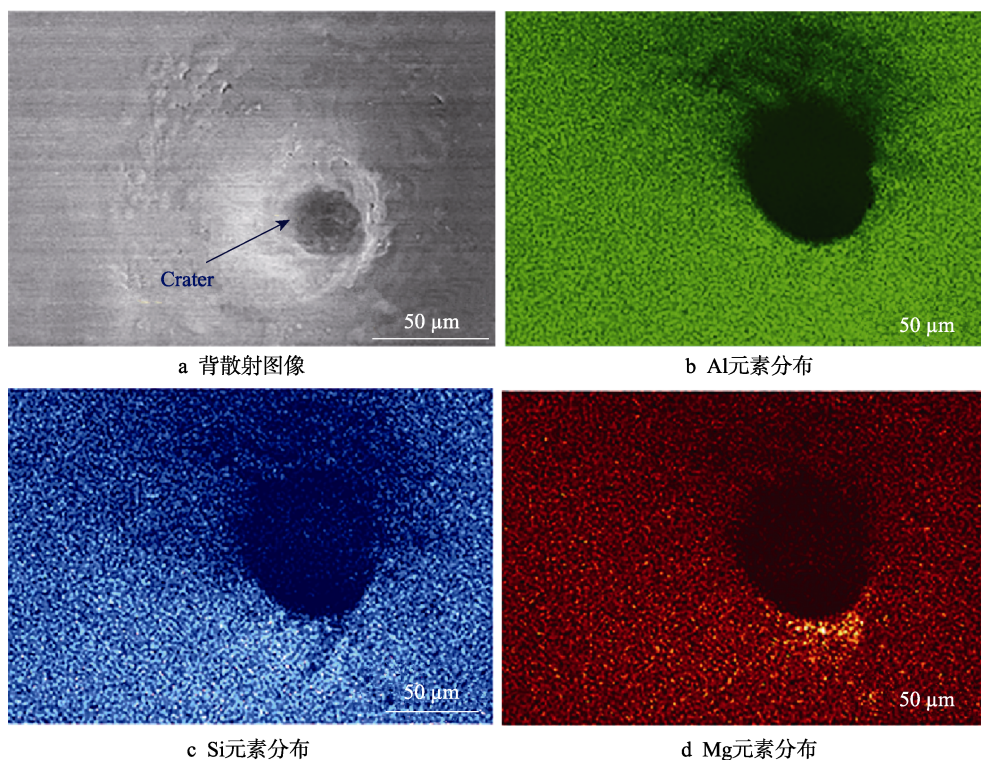


图 3 Al-20Si-5Mg 合金表面经过 25 次脉冲后“晕圈”结构微观 SEM 形貌及元素分布
Fig.3 SEM morphology images and element distribution maps of “halo” structure for Al-20Si-5Mg alloy surface after HCPEB treatment with 25 pulses: a) BSE image; b) element distribution of Al; c) element distribution of Si; d) element distribution of Mg

2.2 TEM 分析

Al-20Si-5Mg 合金经过 25 次脉冲处理后,表面形成了大量的纳米初生硅相。从图 4a 可以发现,样品被轰击后,样品表面分布着大量游离纳米初生硅相,其晶粒尺寸为 10~200 nm。图 4b 为相应选区的电子衍射花纹 (SAED)。郝仪等^[16]认为这些纳米初生硅相属于晕圈组织 (初生硅) 的一部分。这些纳米初生硅相形成的原因可以作出如下解释:强流脉冲电子束能对于样品表面进行快速加热,使得样品表面快速熔化,大量的液态硅原子存在于熔化的样品表面。这些液态硅原子以一定的扩散速度连续不断地向硅晶核迁移,并聚集在硅晶核上,集聚的硅晶核形成了硅晶

粒。由于强流脉冲电子束的快速冷却效应,硅晶粒没有进一步长大就发生了凝固,因此合金表面形成了大量的纳米硅晶粒。同时由于晶核位向各不相同,形成了不同位向的晶粒,从而在样品的表面产生了多晶纳米硅,图 4b 中的多晶衍射环可以验证这一点。

2.3 XRD 分析

强流脉冲电子束改性前后 Al-20Si-5Mg 合金表面的 XRD 图如图 5 所示。从图 5a 可以发现,施加电子束后,Al-20Si-5Mg 合金表面无新的相产生。随后,以 $2\theta=37^\circ$ 附近的 Si(222)衍射峰作为研究对象,对其进行放大,发现电子束使 Si(222)衍射峰产生了宽化及偏移。

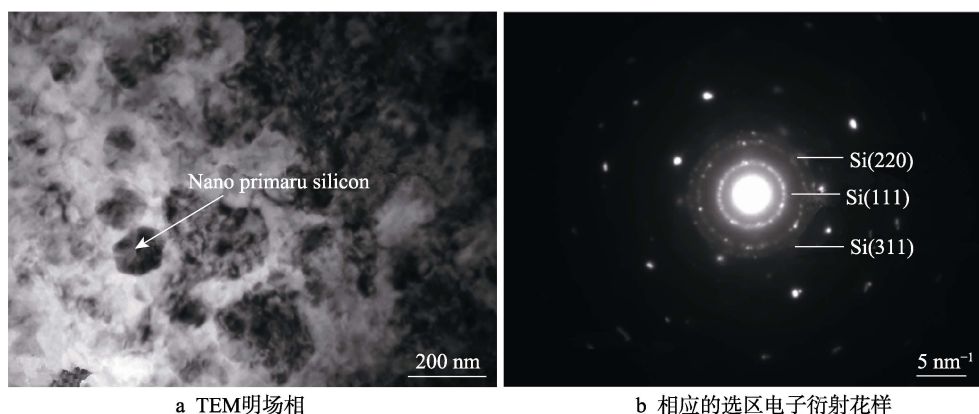


图 4 强流脉冲电子束 25 次轰击后 Al-20Si-5Mg 合金表面纳米初生硅的形成
Fig.4 Formation of nano primary silicon on the Al-20Si-5Mg alloy surface after HCPEB treatment with 25 pulses: a) TEM bright-field image; b) corresponding SAED pattern

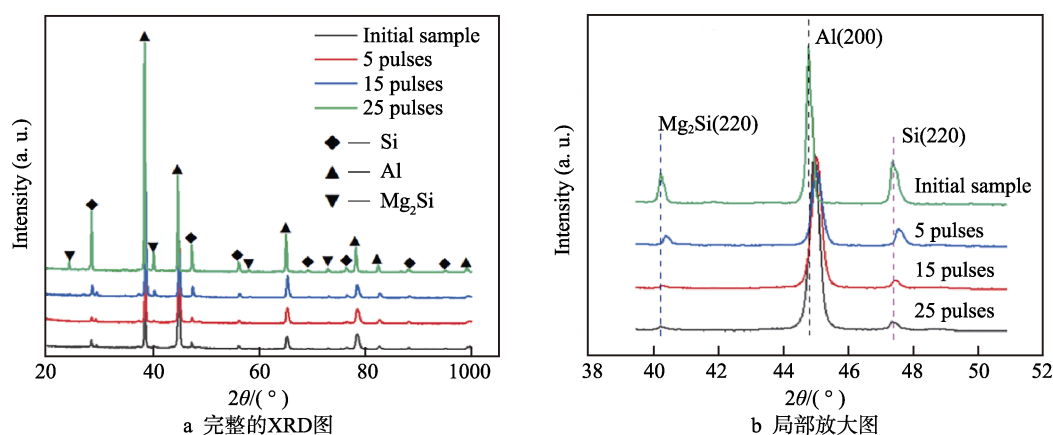


图 5 强流脉冲电子束改性前后 Al-17.5Si-0.3Nd 合金表面的 XRD 图
Fig.5 XRD pattern of Al-17.5Si-0.3Nd alloy surface before and after HCPEB treatment:
a) complete XRD pattern; b) local enlargement of (a)

在强流脉冲电子束处理过程中,衍射峰宽化和偏移的现象十分常见,许多有关强流脉冲电子束处理的文献中都对其进行了阐述。郝仪等^[16]对铝硅合金进行强流脉冲电子束改性后发现,XRD 图谱中, Si 相和 Al 相衍射峰均呈现宽化现象,且宽化现象随着脉冲次数增加而更加明显,并指出这是由于在电子束处理过程中,超快速凝固使得合金表面晶粒得到细化,生成了细晶甚至超细晶组织。高波等^[21-22]认为衍射峰向高角度偏移的原因归咎于以下两点:一是材料表面产生了大量残余应力;二是 Al 元素固溶于 Mg 相中形成过饱和固溶体时,造成 Mg 晶格常数发生了畸变。胡亮等^[17]对 Al-17.5Si-0.3Nd 合金进行研究发现,随着脉冲次数的增加,XRD 图谱中 Si 相和 Al 相的衍射峰都会从高角度向低角度逐渐偏移。这是因为脉冲次数的逐渐递增可以使得合金表面承受的外界拉应力逐渐增大,逐渐超过了向高角度偏移的压应力的影响,使得 Si 相和 Al 相的衍射峰在拉应力的作用下逐渐向低角度方向偏移。

2.4 显微硬度分析

强流脉冲电子束对 Al-20Si 和 Al-20Si-5Mg 合金

表面轰击后,材料表面 $\alpha(\text{Al})$ 显微硬度的变化情况如图 6 所示。通过对比发现,电子束处理能极大提高材料表面 $\alpha(\text{Al})$ 的硬度, Al-20Si 合金显微硬度由未轰击样品的 745.5 MPa 增加到 25 次改性后的 2170.6 MPa, Al-20Si-5Mg 合金的显微硬度由未轰击样品的 1061.3 MPa 增加到 25 次改性后的 2403.6 MPa。胡亮等^[17]对 Al-17.5Si-0.3Nd 合金进行电子束处理后发现,合金表面 $\alpha(\text{Al})$ 的显微硬度得到提高。其原因归咎于以下三点:第一,强流脉冲电子束能细化材料表面的 $\alpha(\text{Al})$ 晶粒,使得合金表面组织含有较多的晶界,这些晶界能阻碍硬度产生的滑移变形,从而提高材料表面 $\alpha(\text{Al})$ 的硬度;第二,强流脉冲电子束轰击铝硅合金表面后,一些细小的溶质硅原子固溶于铝晶格中,形成了过饱和铝基固溶体,使得表面产生了畸变的铝晶格,位错的滑移受到阻碍,从而提高了合金表面 $\alpha(\text{Al})$ 的硬度;第三,强流脉冲电子束还诱发合金表面产生了大量的位错缠结,阻碍后续位错运动,从而提高表面 $\alpha(\text{Al})$ 的硬度。综上所述,强流脉冲电子束轰击材料表面后,材料表面 $\alpha(\text{Al})$ 的硬度提高主要是由细晶强化、固溶强化及位错强化等因素共同作用引起的。

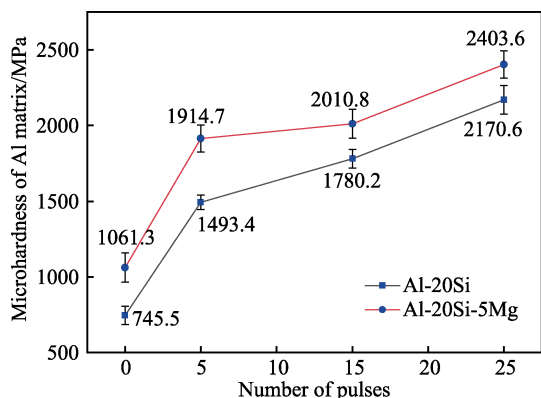


图6 强流脉冲电子束处理前后 Al-20Si 和 Al-20Si-5Mg 合金表面 $\alpha(\text{Al})$ 硬度变化

Fig.6 Variation trend of hardness in $\alpha(\text{Al})$ for Al-20Si and Al-20Si-5Mg alloy surface before and after HCPEB treatment

同时,对比添加与未添加 Mg 元素的铝硅合金表面 $\alpha(\text{Al})$ 的显微硬度可以发现,在相同脉冲次数下,Al-20Si-5Mg 合金表面 $\alpha(\text{Al})$ 的显微硬度比 Al-20Si 合金高。添加 Mg 元素后,未轰击合金样品的显微硬度由 745.5 MPa 增加到 1061.3 MPa。25 次脉冲后,显微硬度由 2170.6 MPa 提高到 2403.6 MPa。添加 Mg 元素后,硬度提高的原因是由于粗大的初生硅被 Mg 元素细化,形成了较小的 Mg_2Si 颗粒,弥散分布在样品表面,使得基体铝晶格中溶入了更多 Mg_2Si 颗粒,导致了更多的铝晶格发生畸变,引起位错滑移阻力的增大,从而使得合金表面 $\alpha(\text{Al})$ 的硬度得到提高^[16,23-24]。

2.5 耐磨性分析

强流脉冲电子束对 Al-20Si 和 Al-20Si-5Mg 合金表面轰击后,合金表面耐磨性的变化如图 7 所示。两组体系中,未改性合金表面的摩擦系数最大,且合金表面的摩擦系数随着脉冲次数的增加而逐渐减小。Al-20Si 合金的摩擦系数由未改性的 0.511 减小到 25 次脉冲后的 0.329,Al-20Si-5Mg 合金的摩擦系数由未

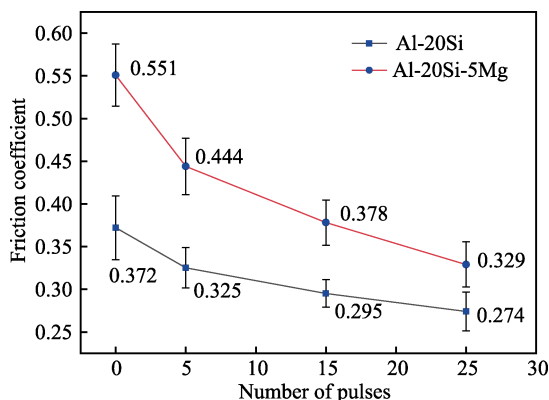


图7 强流脉冲电子束处理前后 Al-20Si 和 Al-20Si-5Mg 合金表面耐磨性变化

Fig.7 Variation trend of wear resistance for Al-20Si and Al-20Si-5Mg alloy surface before and after HCPEB treatment

改性的 0.372 减小到 25 次脉冲后的 0.274,说明改性后材料表面的耐磨性得到提高。这是因为强流脉冲电子束使合金的表面发生了细晶强化和固溶强化^[25-27]。

同时发现,在相同脉冲次数下,Al-20Si-5Mg 合金表面 $\alpha(\text{Al})$ 的摩擦系数比 Al-20Si 合金低。添加 Mg 元素后,Al-20Si 合金摩擦系数由未轰击样品的 0.551 减小到 0.372。25 次脉冲后,摩擦系数由 0.329 减小到 0.274。这说明 Mg 元素能显著增加材料的耐磨性。其原因可归结于以下两点:一是因为在表层弥散分布着初生硅及 Mg_2Si 小颗粒,提高了材料的表面硬度,降低了摩擦副与合金之间的粘着力,从而增强了材料的表面耐磨性;二是由于细小的硬质相 Mg_2Si 颗粒与 $\alpha(\text{Al})$ 基体结合得更加紧密,能有效地减少磨损过程中硬质相 Mg_2Si 颗粒从 $\alpha(\text{Al})$ 基体上的剥落,强化了铝硅合金抵抗粘着和变形的能力^[28-30]。

3 结论

1) 通过 SEM 图像发现, Mg 元素的添加对强流脉冲电子束改性造成的铝硅合金表面微裂纹有明显的降低作用。

2) 硬度检测说明,强流脉冲电子束处理可明显提高合金表面 $\alpha(\text{Al})$ 基体的硬度。同时,在相同脉冲次数的情况下, Mg 元素的添加能提高 $\alpha(\text{Al})$ 基体的硬度。

3) 耐磨性检测说明,在相同脉冲次数的情况下,添加 Mg 元素的铝硅合金的摩擦系数比未添加 Mg 元素时要低,说明 Mg 元素能提高合金的耐磨性。

参考文献:

- [1] CHANG J, MOON I, CHOI C. Refinement of cast microstructure of hypereutectic Al-Si alloys through the addition of rare earth metals[J]. Journal of materials science, 1998, 33(20): 5015-5023.
- [2] 杨琳, 崔中凯. 汽车发动机用铝硅合金的半固态成形工艺[J]. 锻压技术, 2016(2): 73-76.
YANG Lin, CUI Zhong-kai. Semi-solid forming technology of aluminum silicon alloy for automobile engine[J]. Forging & stamping technology, 2016(2): 73-76.
- [3] MURRAY J L, MCALISTER A J. The Al-Si (aluminum-silicon) system[J]. Bulletin of alloy phase diagrams, 1984, 5(1): 74.
- [4] 郑宇希, 马爱斌, 江静华, 等. 等通道转角挤压对铝硅合金的硅形态及力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2016, 26(12): 2506-2515.
ZHENG Yu-xi, MA Ai-bin, JIANG Jing-hua, et al. Effect of equal channel angular extrusion on silicon morphology and mechanical properties of Al-Si alloys[J]. Chinese journal of nonferrous metals, 2016, 26(12): 2506-2515.
- [5] 葛良琦. Al-20%Si 中初生硅形态控制技术[D]. 南

- 京: 南京理工大学, 2007.
- GE Liang-qi. Research on primary silicon morphology control technology in Al-20% Si[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2007.
- [6] 杨泽栋. 不同硅含量的高硅铝合金中初生硅形态控制技术[D]. 南京: 南京理工大学, 2009.
- YANG Ze-dong. Research on morphology control of primary silicon in high-silicon aluminum alloys with different silicon contents[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2009.
- [7] HAO Y, GAO B, TU G F, et al. Effect of HCPEB treatment on microstructure and microhardness of hypereutectic Al-20Si alloy[J]. Transactions of materials & heat treatment, 2010, 31(9): 142-145.
- [8] GAO Y K. Surface modification of TC4 titanium alloy by high current pulsed electron beam (HCPEB) with different pulsed energy densities[J]. Journal of alloys & compounds, 2013, 572(17): 180-185.
- [9] 宋小放, 周志明, 王祥, 等. 强流脉冲电子束表面改性 1.2344 钢的显微组织和性能[J]. 表面技术, 2014, 43(6): 75-78.
- SONG Xiao-fang, ZHOU Zhi-ming, WANG Xiang, et al. Microstructure and properties of surface modified 1.2344 steel by high pulsed electron beam[J]. Surface technology, 2014, 43(6): 75-78.
- [10] GROSDIDIER T, ZOU J X, BOLLE B, et al. Grain refinement, hardening and metastable phase formation by high current pulsed electron beam (HCPEB) treatment under heating and melting modes[J]. Journal of alloys & compounds, 2010, 504(8): 508-511.
- [11] ZHANG K M, ZOU J, GROSDIDIER T, et al. Improved pitting corrosion resistance of AISI316L stainless steel treated by HCPEB[J]. Surface & coatings technology, 2006, 201(3/4): 1393-1400.
- [12] HU L, GAO B, ZHU G, et al. The effect of neodymium on the microcracks generated on the Al-17.5Si alloy surface treated by high current pulsed electron beam[J]. Applied surface science, 2016, 364: 490-497.
- [13] 贾海龙, 张海涛, 左克生, 等. Al-20%Si 合金初生硅宏观偏聚和细化的试验研究[J]. 铸造, 2013, 62(9): 865-869.
- JIA Hai-long, ZHANG Hai-tao, ZOU Ke-sheng, et al. Experimental study on macro-segregation and refinement of primary Si in Al-20%Si alloy[J]. Foundry, 2013, 62(9): 865-869.
- [14] GUSTAFSSON G, THORVALDSSON T, DUNLOP G L. The influence of Fe and Cr on the microstructure of cast Al-Si-Mg alloys[J]. Metallurgical transactions A, 1986, 17(1): 45-52.
- [15] LI C L, MURRAY J W, VOISEY K T, et al. Amorphous layer formation in $\text{Al}_{86.0}\text{Co}_{7.6}\text{Ce}_{6.4}$ glass-forming alloy by large-area electron beam irradiation[J]. Applied surface science, 2013, 280(8): 431-438.
- [16] 郝仪. 强流脉冲电子束处理对过共晶铝硅合金表面微观组织及性能影响研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2012.
- HAO Yi. Study on surface microstructure and properties of hypereutectic Al-Si alloy after high current pulsed electron beam treatment[D]. Shenyang: Northeastern University, 2012.
- [17] 胡亮. 过共晶铝硅合金的(电子束+稀土 Nd) 复合表面改性研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2016.
- HU Liang. Study on compound surface modification of hypereutectic Al-Si alloy by adding neodymium and high current pulsed electron beam treatment[D]. Shenyang: Northeastern University, 2016.
- [18] 何吉东, 高波, 胡亮, 等. 电子束对稀土铝硅合金表面形貌及硬度的影响[J]. 表面技术, 2017, 46(8): 153-158.
- HE Ji-dong, GAO Bo, HU Liang, et al. Effects of HCPEB on morphology and hardness of Al-Si alloy with rare earth element[J]. Surface technology, 2017, 46(8): 153-158.
- [19] 魏德强, 李新凯, 任旭隆. 电子束表面改性研究进展[J]. 热加工工艺, 2016(18): 19-23.
- WEI De-qiang, LI Xin-kai, REN Xu-long. Research progress surface modification of electron beam[J]. Hot working technology, 2016(18): 19-23.
- [20] 戴伟, 郑志镇, 李建军, 等. 金属材料表面的电子束抛光研究进展[J]. 真空科学与技术学报, 2016, 36(5): 582-596.
- DAI Wei, ZHENG Zhi-zhen, LI Jian-jun, et al. Latest development of metal surface polishing and surface modification with electron beam, 2016, 36(5): 582-596.
- [21] GAO B, HAO Y, TU G F, et al. Compounded surface modification of ZK60 Mg alloy by high current pulsed electron beam+micro-plasma oxidation[J]. Plasma science and technology, 2010, 12(1): 67-70.
- [22] GAO B, HAO S, ZOU J, et al. Effect of high current pulsed electron beam treatment on surface microstructure and wear and corrosion resistance of an AZ91HP magnesium alloy[J]. Surface & coatings technology, 2007, 201(14): 6297-6303.
- [23] 刘萍, 刘政, 胥锴. Mg 量对过共晶 Al-18%Si 合金组织与性能的影响[J]. 热加工工艺: 铸锻版, 2006, 35(2): 8-10.
- LIU Ping, LIU Zheng, XU Kai. Effect of Mg content on microstructure and properties of hypereutectic Al-18%Si alloy[J]. Hot working technology: forging and rolling, 2006, 35(2): 8-10.
- [24] 黄治黎, 王开, 张志明, 等. Mg 含量对过共晶 Al-Si 合金中初生 Mg_2Si 相的影响[J]. 中国有色金属学报(英文版), 2015(10): 3197-3203.
- HUANG Zhi-li, WANG Kai, ZHANG Zhi-ming, et al. Effects of Mg content on primary Mg_2Si phase in hypereutectic Al-Si alloys[J]. Chinese journal of nonferrous metals, 2015(10): 3197-3203.

- [25] 陈光海, 周志明, 宋小放, 等. 强流脉冲电子束表面改性 30SiMn2MoVA 钢的耐磨性能[J]. 表面技术, 2017, 46(3): 107-112.
CHEN Guang-hai, ZHOU Zhi-ming, SONG Xiao-fang, et al. Wear resistance of 30SiMn2MoVA steel modified by high current pulsed electron beam[J]. Surface technology, 2017, 46(3): 107-112.
- [26] 陈亚茹, 李晖. 旋耕刀表面强流脉冲电子束改性后的耐磨性研究[J]. 材料保护, 2017, 50(8): 84-88.
CHEN Ya-ru, LI Hui. Wear resistance of rotary tiller blades treated by high current pulsed electron beam[J]. Material protection, 2017, 50(8): 84-88.
- [27] 任鑫, 曹丹凤, 徐洋, 等. 强流脉冲电子束处理对 WC-Co 硬质合金耐磨性的影响[J]. 金属热处理, 2015(10): 132-135.
REN Xin, CAO Dan-feng, XU Yang, et al. Effect of high current pulsed electron beam treatment on wear resistance of WC-Co hard alloys[J]. Heat treatment of metals, 2015 (10): 132-135.
- [28] 刘政, 刘小梅, 陈明, 等. Mg_2Si 含量对过共晶 Al-Si 复合材料组织及性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2011, 31(10): 899-903.
LIU Zheng, LIU Xiao-mei, CHEN Ming, et al. Effect of Mg_2Si contents on the morphology of Mg_2Si particle reinforced hypereutectic Al-Si alloys[J]. Special casting and nonferrous alloys, 2011, 31(10): 899-903.
- [29] 霍晓阳. 原位合成耐热耐磨高硅铝基复合材料的研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2007.
HUO Xiao-yang. Study on in-situ synthesis of heat-resistant, wear-resistant and high-silica-aluminum matrix composites[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2007.
- [30] 胥锴, 刘徽平, 王甫, 等. 镁含量对过共晶铝硅合金自生复合 Mg_2Si 组织形貌的影响[J]. 矿冶工程, 2008, 28(6): 109-111.
XU Kai, LIU Hui-ping, WANG Fu, et al. Effect of magnesium content on morphology of in-situ Mg_2Si composites in hypereutectic Al-Si alloys[J]. Mining and metallur, 2008, 28(6): 109-111.

(上接第 193 页)

- [17] GOMES K K, MAR W, KO W, et al. Designer dirac fermions and topological phases in molecular graphene[J]. Nature, 2012, 483(7389): 306-310.
- [18] LI H, ZHANG Q, YAP C C R, et al. From bulk to monolayer MoS_2 : Evolution of Raman scattering[J]. Advanced functional materials, 2012, 22(7): 1385-1390.
- [19] LEE C, YAN H, BRUS L E, et al. Anomalous lattice vibrations of single-and few-layer MoS_2 [J]. ACS nano, 2010, 4(5): 2695-2700.
- [20] HUANG Xiao, ZENG Zhi-yuan, ZHANG Hua. Metal dichalcogenide nanosheets: preparation, properties and applications[J]. Chemical society reviews, 2013, 42(5): 1934-1946.
- [21] ZHU C R, WANG G, LIU B L, et al. Strain tuning of optical emission energy and polarization in monolayer and bilayer MoS_2 [J]. Physical review B, 2013, 88(12): 121301.
- [22] ZHANG Xin, QIAO Xiao-fen, SHI Wei, et al. Phonon and Raman scattering of two-dimensional transition metal dichalcogenides from monolayer, multilayer to bulk material[J]. Chemical society reviews, 2015, 44(9): 2757-2785.
- [23] BONACCORSO F, TAN P H, FERRARI A C. Multiwall nanotubes, multilayers, and hybrid nanostructures: New frontiers for technology and Raman spectroscopy[J]. ACS nano, 2013, 7(3): 1838-1844.
- [24] CONLEY H J, WANG B, ZIEGLER J I, et al. Bandgap engineering of strained monolayer and bilayer MoS_2 [J]. Nano letters, 2013, 13(8): 3626-3630.
- [25] MOHIUDDIN T M G, LOMBARDO A, NAIR R R, et al. Uniaxial strain in graphene by Raman spectroscopy: G peak splitting, Grüneisen parameters, and sample orientation[J]. Physical review B, 2009, 79(20): 205433.
- [26] DONG Y L, VADAKKEPATT A, MARTINI A. Analytical models for atomic friction[J]. Tribology letters, 2011, 44: 367-386.
- [27] 王子建. 原子尺度摩擦能量耗散研究[D]. 北京: 清华大学, 2015.
WANG Zi-jian. Research on energy dissipation in atomic-scale friction[D]. Beijing: Tsinghua University, 2015.
- [28] MATE C M, MCCLELLAND G M, ERLANDSSON R, et al. Atomic-scale friction of a tungsten tip on a graphite surface[J]. Physical review letters, 1987, 59(17): 1942-1945.
- [29] MEDYANIK S N, LIU W K, SUNG I H, et al. Predictions and observations of multiple slip modes in atomic-scale friction[J]. Physical review letters, 2006, 97(13): 136106.