

晶粒细化剂对 PS 版用铝板基腐蚀性能的影响

Influence of Grain Refiner on Corrosion Properties of Aluminium Substrate Presensitized Plate

黄元春^{1,2}, 宋满新^{2,3}, 肖政兵^{2,3}, 张云崖^{2,3}

(1 中南大学 机电工程学院, 长沙 410083;

2 中南大学 轻合金研究院, 长沙 410083;

3 中南大学 材料科学与工程学院, 长沙 410083)

HUANG Yuan-chun^{1,2}, SONG Man-xin^{2,3}, XIAO Zheng-bing^{2,3}, ZHANG Yun-ya^{2,3}

(1 College of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University,

Changsha 410083, China; 2 Light Alloy Research Institute, Central South University,

Changsha 410083, China; 3 School of Materials Science and Engineering,

Central South University, Changsha 410083, China)

摘要: 采用电化学工作站, 扫描电镜(SEM), 透射电镜(TEM)等方法, 研究了 Al-5Ti-1B 与 Al-5Ti-0.2C 晶粒细化剂对预涂感光版(PS)用 1050 铝板基的微观组织及腐蚀性能的影响。结果表明: 采用 Al-5Ti-1B 细化剂的铸轧板中存在粗大的铁、硅第二相, PS 版铝板基中存在聚集第二相和位错缠结, 电解腐蚀时, 出现局部腐蚀严重, 腐蚀孔洞分布不均匀等现象; 添加 Al-5Ti-0.2C 晶粒细化剂的铸轧板中, 铁硅相相对细小, 分布也更加均匀, 无聚集现象, PS 版铝板基中第二相细小弥散, 分布均匀, 电解腐蚀时, 腐蚀速率快, 腐蚀均匀, 电解腐蚀性能得以改善。

关键词: 细化剂; PS 版; 电解腐蚀

doi: 10.3969/j.issn.1001-4381.2014.01.008

中图分类号: TG174.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2014)01-0041-06

Abstract: By using electrochemical workstations, scanning electron microscopy (SEM), transmission electron microscopy (TEM) and other means, the effects of two kinds of grain refiners, Al-5Ti-1B and Al-5Ti-0.2C, on microstructures and properties of 1050 aluminum presensitized plate were investigated. The results show that there are numerous coarse second-phase particles containing Fe and Si in the cast-rolling board added Al-5Ti-1B. There are second phase particles and tangled dislocations in presensitized plate, which result in strong local corrosion and ununiformity of corrosion holes. However, in the cast-rolling board added Al-5Ti-0.2C, the second-phase particles containing Fe and Si, are relatively smaller and more uniform, without aggregation. The second-phase particles in presensitized plate are in small dispersion and uniform distribution, which lead to the acceleration of electrochemical corrosion and more uniform corrosion. For the plate added Al-5Ti-0.2C, the properties of electrolytic corrosion were improved.

Key words: grain refiner; presensitized plate; electrolytic corrosion

预涂感光版(Presensitized Plate, PS)广泛应用于印刷产业, 而铝基 PS 版具有强度高、尺寸稳定性好、耐印力强等优点, 所以 PS 版大量采用铝板基^[1,2]。PS 版较强的吸附性和亲水性, 是保证印刷质量的关键, 这要求 PS 版铝板基表面形成的砂目均匀、致密。目前最常用且最有效的砂目制作方法是电化学腐蚀方法^[3,4], 在电化学腐蚀方法制备砂目的过程中, 铝板基腐

蚀速率的高低和腐蚀的均匀性相互影响^[5], PS 版铝板基的电化学腐蚀性能, 是能否形成均匀砂目的主要因素, 不仅影响生产效率, 更直接影响印刷版的质量^[2,6]。

细小均匀的晶粒组织不仅能够使板材具有良好的表面质量, 也是保证板材强度、塑性和韧性的重要因素。与此同时, 细小均匀的晶粒组织还能提高材料的电解腐蚀性能, 是生产优质 PS 版铝板基的基础。20

世纪 60 年代以来,Al-Ti-B 中间合金一直是铝工业中最重要的晶粒细化剂,然而其异质形核粒子 TiB_2 在使用过程中很容易出现团聚、沉淀现象,在 PS 版铝板基等板材的轧制过程中, TiB_2 粒子会损伤轧辊表面,引起裂纹、光亮带、孔洞等表面缺陷,而且高熔点的 TiB_2 粒子在 PS 版铝板基中的不均匀分布和不均一的晶粒细化效果^[7],使得 PS 版电解腐蚀不均匀,最终影响 PS 版的电解砂目质量。Banerji 等^[8,9]成功地制备出 Al-Ti-C,从而引起了人们研究 Al-Ti-C 晶粒细化剂的兴趣,但是由于制造技术和成本的制约,使得 Al-Ti-C 的应用远远落后于 Al-Ti-B。近年来,随着 Al-Ti-C 细化

剂制备技术的突破,Al-Ti-C 晶粒细化剂在铸造铝合金生产中的应用增多,然而关于 Al-Ti-C 晶粒细化剂在铝板带材铸轧生产应用中的报道还很少,本工作对比研究了 Al-Ti-C 与 Al-Ti-B 晶粒细化剂对 PS 版铝板基微观组织及性能的影响。

1 实验

1.1 实验材料

本实验所用 PS 版铝板基为 1050 铝合金,具体化学成分见表 1。

表 1 实验合金化学成分(质量分数/%)

Table 1 Chemical compositions of experimental alloys (mass fraction/%)

Material	Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Ti	Ni	Al
1050 Al alloy	<0.05	<0.05	<0.05	<0.40	<0.25	<0.05	<0.03	—	Bal
PS plate	<0.01	<0.01	<0.01	0.35	0.05	<0.01	<0.01	<0.01	Bal

实验材料分别采用 Al-5Ti-1B 或 Al-5Ti-0.2C 作为晶粒细化剂(添加量为 0.236%,质量分数)生产的铸轧板(6.95mm)以及最终成型 PS 版铝板基(0.27mm),板材的轧制生产流程如下(mm):6.95→3.4→1.8→1.1→0.78→0.43→0.27。

1.2 实验方法

采用 DDL100 电子拉伸机测试 PS 版铝板基的常温态,240℃模拟烤版 10min,260℃模拟烤版 4min 的拉伸性能;用 HV-5 型小负荷维氏硬度计测试其硬度(加载力为 9.8N,加载时间为 15s),用 FQR-7501 涡流导电仪测量常温态铝板基的电导率;采用 TR200 粗糙度仪测量常温态铝板基的粗糙度;试样经机械抛光、电解抛光后用配有能谱仪(EDS)的扫描电镜(SEM)观察不同细化剂的铸轧板、铝板基中第二相的成分、形态与分布和腐蚀后表面形貌,电解抛光液采用 10%(体

积分数,下同) $\text{HClO}_4 + 90\% \text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$,工作电压为 20V,时间为 10~60s;将试样打磨到厚度为 $80\mu\text{m}$ 的薄片,用双喷电解仪双喷减薄,双喷液为 $33\% \text{HNO}_3 + 67\% \text{CH}_3\text{OH}$,温度控制在 -25°C 左右,电压为 15~20V,电流为 50~100mA,然后将制好的试样在透射电镜(TEM)下观察其组织形貌;在 CHI660C 电化学工作站测试试样的电解腐蚀极化曲线,电解液采用 2.5%的 HCl 水溶液,参比电极为标准甘汞电极,辅助电极为 Pt 电极,扫描速率为 5mV/s。

2 结果与分析

2.1 PS 版铝板基的基本性能

PS 版铝板基在不同状态下的基本性能如表 2 所示。

表 2 PS 版铝板基的基本性能

Table 2 The basic properties of the PS plate

State	Sample	HV	$R_m/(\text{N} \cdot \text{mm}^{-2})$	$R_{p0.2}/(\text{N} \cdot \text{mm}^{-2})$	Conductivity/ $(\text{MS} \cdot \text{m}^{-1})$	$R_a/\mu\text{m}$
Cold rolling state	B	55.1	180.5	157.8	17.1	0.43
	C	56.6	183.3	167.7	20.3	0.34
240℃/10min ^[2]	B	54.2	154.7	147.4		
	C	55.1	163.4	155.3		
260℃/4min ^[2]	B	54.6	161.8	150.8		
	C	55.5	167.1	157.2		

Note: B representatives to PS plate added Al-5Ti-1B as grain refiner; C representatives to PS plate added Al-5Ti-0.2C as grain refiner.

从表 2 可以看出,添加不同晶粒细化剂的铝板基的硬度相差不大,且不同状态下试样的硬度也基本保

持不变;而添加 Al-5Ti-0.2C 作为细化剂的铝板基,在模拟烤版前后的屈服强度($R_{p0.2}$)、抗拉强度(R_m)均强

于以 Al-5Ti-1B 作为细化剂的铝板基;两组铝板基在 240℃ 模拟烤版 10min 和 260℃ 模拟烤版 4min 后,屈服强度、抗拉强度较冷轧态均有所下降;与 260℃ 模拟烤版 4min 相比,240℃ 模拟烤版 10min 时下降的幅度较大;两组铝板基在两种模拟烤版制度下,屈服强度、抗拉强度下降的幅度都相差不大;冷轧态试样,以 Al-5Ti-0.2C 作为细化剂的铝板基电导率较以 Al-5Ti-1B 作为细化剂的铝板基大,但是前者的表面粗糙度较后者低,且后者不同位置的粗糙度出现较大

幅度的波动。

2.2 组织结构分析

图 1 所示为铸轧板与铝板基的 SEM 像,从图 1(a),(c)可以看出,在采用 Al-5Ti-1B 细化剂的铸轧板和成形铝板基中,第二相都较为粗大,且分布杂乱,甚至出现了团聚的现象;而在采用 Al-5Ti-0.2C 晶粒细化剂的试样中,铸轧板以及成品铝板基中第二相粒子的分布更加均匀弥散,其尺寸也相对细小,更无团聚现象,如图 1(b),(d)所示。

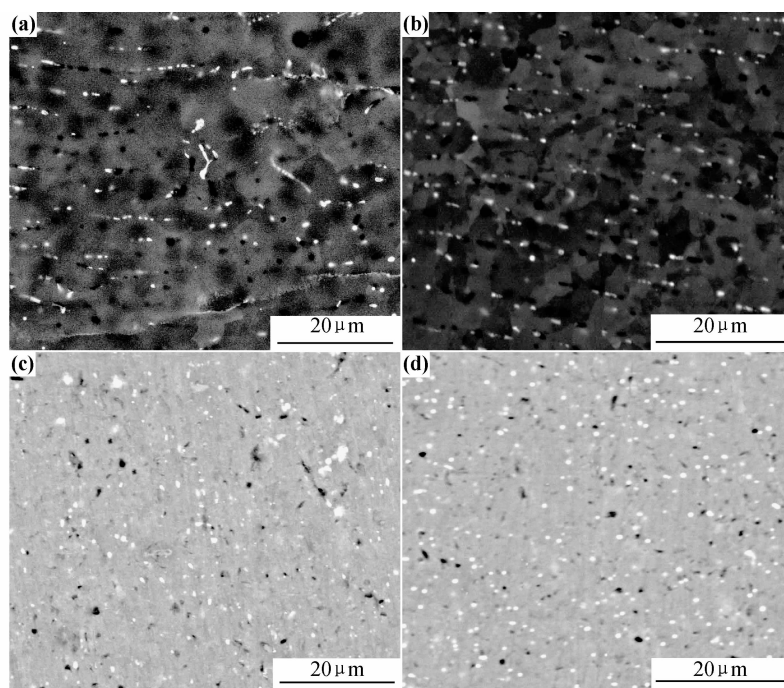


图 1 铸轧板与铝板基的 SEM 照片

(a) Al-5Ti-1B 作为细化剂的铸轧板; (b) Al-5Ti-0.2C 作为细化剂的铸轧板;
(c) Al-5Ti-1B 作为细化剂的铝板基; (d) Al-5Ti-0.2C 作为细化剂的铝板基

Fig. 1 SEM images of the cast-rolling plate and PS plate

(a) cast-rolling plate with Al-5Ti-1B; (b) cast-rolling plate with Al-5Ti-0.2C;
(c) PS plate with Al-5Ti-1B; (d) PS plate with Al-5Ti-0.2C

铸轧板与铝板基的 TEM 像如图 2 所示,从图 2(a)可以看出,在采用 Al-5Ti-1B 细化剂的铸轧板中,晶界处存在粗大第二相粒子(图 2(a)中 A 所示),铸轧板中聚集长大的粗大第二相,在冷加工过程中,会对加工变形产生一定的阻力,并产生大量位错,在后续变形中,第二相继续对位错产生钉扎作用,使得位错大量缠结,并与第二相共存,如图 2(c)所示,PS 版铝板基中存在的第二相与位错缠结的区域(图 2(c)中 C 所示);而以 Al-5Ti-0.2C 作为细化剂的铸轧板,如图 2(b)所示,第二相细小且均匀分布于晶界、晶内(图 2(b)中 B 所示),从而使得 PS 版铝板基晶粒尺寸较前者也略有减小,且大小较为均匀,并存在大量的亚晶,晶界比较干净,没有粗大的第二相存在,更没有出现位错缠结的情况(图 2(d))。

Al-Ti-B 晶粒细化剂中作为异质形核核心的 TiB_2 粒子具有很高的熔点(2970℃),而且很稳定,在铝合金熔炼过程中不会融化、分解,同时,它具有容易团聚的缺陷,在其使用过程中很容易团聚、沉淀^[10]。 TiB_2 粒子在熔体中的聚集,导致高凝固点的铁、硅二相在 TiB_2 粒子附近首先生成^[11],如图 1 所示,在铸轧板中存在铁、硅第二相的聚集分布,且由于 TiB_2 粒子团聚产生的不均匀细化效果,铸轧板中晶粒大小不均匀,铸轧组织变形不均匀;而采用 Al-Ti-C 作为细化剂时, TiC 粒子聚集倾向小,在熔体中均匀分布,导致形核中心多,形核均匀,且形核速率大,使得基体组织、晶粒大小和第二相分布趋于均匀^[10,12],铸轧后基体组织也细小均匀。PS 版要求铝板基第二相尺寸(1.0~4.0 μm)

细小均匀,否则会使晒版后 PS 版局部的耐印力下降。细小、均匀、弥散分布的第二相形成弥散强化,使得以 Al-5Ti-0.2C 作为细化剂的铝板基在常温态、模拟烤版状态,强度高于采用 Al-5Ti-1B 细化剂的铝板基,铸

轧板中均一大小的晶粒组织和细小均匀分布的第二相,使得冷轧过程变形均匀,冷轧后以 Al-5Ti-0.2C 作为细化剂的铝板基的表面粗糙度较有粗大第二相的铝板基小。

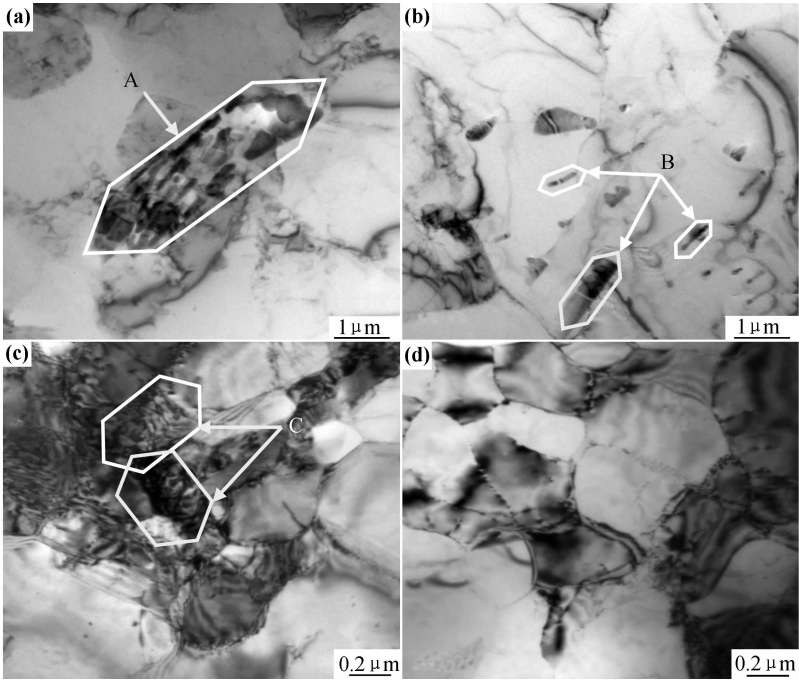


图 2 铸轧板与铝板基的 TEM 照片

(a) Al-5Ti-1B 作为细化剂的铸轧板; (b) Al-5Ti-0.2C 作为细化剂的铸轧板;
(c) Al-5Ti-1B 作为细化剂的铝板基; (d) Al-5Ti-0.2C 作为细化剂的铝板基

Fig. 2 TEM images of the cast-rolling plate and PS plate

(a) cast-rolling plate with Al-5Ti-1B; (b) cast-rolling plate with Al-5Ti-0.2C;
(c) PS plate with Al-5Ti-1B; (d) PS plate with Al-5Ti-0.2C

2.3 极化曲线分析

图 3 所示为 PS 版铝板基试样的电化学极化曲线(描述电极电势与通过电极的电流密度之间关系的曲线),在强极化区极化电流和过电位存在塔菲尔关系(对于 Al 等易钝化的金属,在出现 Tafel 直线段之前就有可能发生钝化,这时一般用阴极极化曲线的 Tafel 直线段外推求 I_{corr})^[13]:

$$\eta = a + b_c \log i \tag{1}$$

式中: a 为 Tafel 常数; b_c 为阴极 Tafel 斜率;通过塔菲尔关系外推出腐蚀电流密度 I_{corr} 和自腐蚀电位 E_{corr} ,结果如表 3 所示。

极化曲线的平滑度与其基体的腐蚀均匀性紧密联系,极化曲线的毛刺、波动段,可能是由于点蚀、晶间腐蚀、选择性腐蚀等局部腐蚀或样品表面腐蚀产物的剥落使得腐蚀电流、电位显著变化所引起,这种波动严重破坏了腐蚀的均匀性^[3]。从图 3 的极化曲线可以看出,相对于添加 Al-5Ti-1B 的铝板基,以 Al-5Ti-0.2C 作为晶粒细化剂的铝板基腐蚀过程中的极化曲线光

滑、波动也较小,从而可以推断:在基体的腐蚀过程中,采用 Al-5Ti-0.2C 晶粒细化剂的 PS 版铝板基,其腐蚀更加均匀。

表 3 试样在 2.5% HCl 水溶液中的腐蚀电流密度 I_{corr} 和自腐蚀电位 E_{corr}

Table 3 The corrosion current density I_{corr} and corrosion potential E_{corr} of the sample in 2.5% HCl aqueous solution		
Sample	$I_{corr}/(A \cdot cm^{-2})$	E_{corr}/V
B	4.527E-005	-0.780
C	1.175E-003	-0.788

由表 3 可见,以 Al-5Ti-0.2C 作为细化剂的铝板基的腐蚀电位与以 Al-5Ti-1B 作为细化剂的铝板基的电位相差不大,但是其腐蚀电流密度有较大的增加,可推断出,前者电解腐蚀性强,易发生腐蚀,其腐蚀速率较后者占明显优势。

2.4 腐蚀性能分析

图 4 为试样腐蚀后表面形貌的 SEM 照片。从图

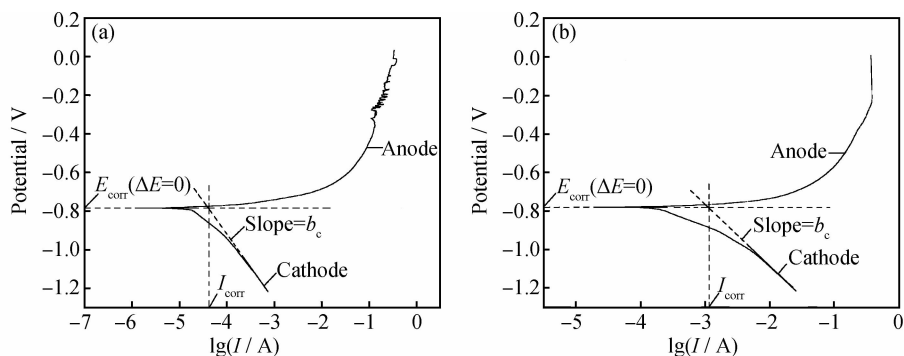


图3 试样在 2.5% HCl 水溶液中腐蚀极化曲线

(a) Al-5Ti-1B 作为细化剂的铝板基; (b) Al-5Ti-0.2C 作为细化剂的铝板基

Fig. 3 Polarization curves of the samples in 2.5% HCl aqueous solution

(a) PS plate with Al-5Ti-1B; (b) PS plate with Al-5Ti-0.2C

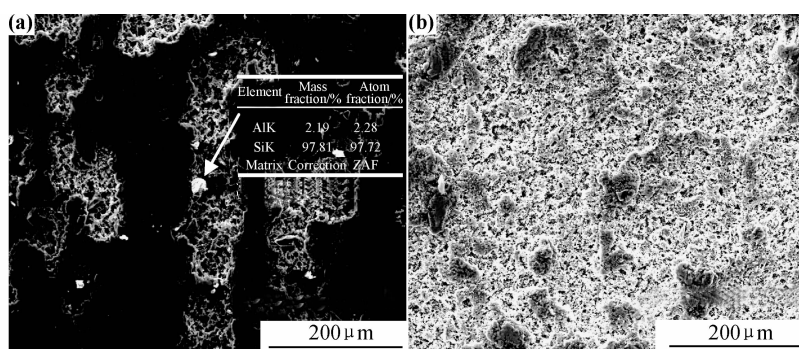


图4 铝板基腐蚀表面的 SEM 照片

(a) Al-5Ti-1B 作为细化剂的铝板基; (b) Al-5Ti-0.2C 作为细化剂的铝板基

Fig. 4 SEM images of corrosion surface of the PS plate

(a) PS plate with Al-5Ti-1B; (b) PS plate with Al-5Ti-0.2C

4(a)可以看出,以 Al-5Ti-1B 作为细化剂的铝板基,表面腐蚀不均匀,板面出现形状不规整的局部腐蚀孔洞,由自由焓准则^[13]可知: $\Delta G < 0$ 时, $|\Delta G|$ 越大,则腐蚀倾向越大,所以腐蚀通常发生在合金的高储能部位,如第二相与基体的交界处、晶界以及位错集中的区域;由图 2 可知,在采用 Al-5Ti-1B 作为晶粒细化剂的铝板基中,第二相质点富集于晶界处,基体中位错缠结,且分布不均匀,腐蚀最先在第二相质点和位错处萌发,而后腐蚀沿着第二相密集的晶界和位错缠结区域扩展,因而导致样品腐蚀点的分布也不均匀;从而出现如图 4(a)所示的表面不均匀的腐蚀孔洞,且腐蚀孔洞呈蜂窝状,腐蚀后显露出来的晶粒呈现出明显的棱角,且在孔洞处,存在抗腐蚀性较强的富硅第二相,其主要原因是铁、硅第二相在腐蚀过程中发生铁原子的氧化、流失,从而导致富硅杂质相的残存;而从图 4(b)可以看出,采用 Al-5Ti-0.2C 作为细化剂的铝板基,表面发生均匀腐蚀,显露出来的腐蚀面呈海绵状,没有明显的富集第二相出现。

基体中不均匀分布的粗大硬质相会在形变过程

中,对组织产生阻力,不仅会产生大量的位错,也会使得铝板基组织不均匀,出现第二相聚集的现象,且第二相粒子会与加工过程中产生的大量位错缠结在一起,局部的位错缠结和粗大第二相的出现是引起腐蚀不均匀的主要原因:一方面,大量位错的存在使得材料局部原子储能较高,这些具有高能量的原子电解腐蚀时,将较容易失去电子变成 Al^{3+} ,成为先腐蚀的区域,从而造成用 Al-5Ti-1B 作为细化剂的铝板基发生局部腐蚀的现象^[14];另一方面,第二相粒子与基体的电化学性能的差异,使得两者存在电位差,从而形成腐蚀微电池,加速自身及周围基体的腐蚀^[15]。以 Al-5Ti-1B 作为细化剂的铝板基的电导率较采用 Al-5Ti-0.2C 作为细化剂的铝板基低,前者粗大不均匀分布的第二相粒子、位错和基体组织之间存在的电位差较大,微电池电势差较大,但是微电池数量有所减少,从而导致局部腐蚀严重;用 Al-5Ti-0.2C 作为细化剂的铝板基,细小弥散的第二相均匀分布于晶界、亚晶界,使得微电池数量多且分布均匀,所以腐蚀速率有所提高,且腐蚀变得均匀。另外,以 Al-5Ti-0.2C 作为细化剂的铝板基,其晶

粒细小均匀,使得晶界增多,从而储存的界面能较多,这是以 Al-5Ti-0.2C 作为细化剂的铝板基的腐蚀速率提高,腐蚀变得均匀的另一个原因,这些都有利于 PS 版铝板基形成均匀的海绵状腐蚀表面,从而能够形成均匀致密的优质电解砂目。

3 结论

(1)采用 Al-5Ti-0.2C 作为 PS 版用铝板基生产的晶粒细化剂,会使得产品的微观组织有所改善,铝基体中的铁、硅第二相更加细小,分布更加均匀。

(2)细小、均匀分布的第二相,可以避免由于粗大第二相在轧制过程中造成第二相和位错的缠结,减少局部腐蚀的可能性。

(3)以 Al-5Ti-0.2C 作为晶粒细化剂的 PS 版铝板基腐蚀性能均匀,有利于 PS 版铝板基形成均匀的海绵状腐蚀表面,从而能够形成均匀致密的优质电解砂目。

参考文献

- [1] 王世勤.我国 PS 版的现状[J].印刷技术,2006,7(4):47—53.
WANG Shi-qin. Status quo of PS plate in China [J]. Printing Technology,2006,7(4):47—53.
- [2] 姚群,王世勤,王怀功. PS 版对铝板基的质量要求[J]. 轻合金加工技术,2006,34(9):30—33.
YAO Qun, WANG Shi-qin, WANG Huai-gong. Quality need of aluminium sheet used for presensitized plate[J]. Light Alloy Fabrication Technology,2006,34(9):30—33.
- [3] 李红英,王长建,丁常伟,等. 热处理对铝基 PS 版电解腐蚀性能的影响[J]. 金属热处理,2007,32(2):78—82.
LI Hong-ying, WANG Chang-jian, DING Chang-wei, et al. Effect of heat treatment on electrolytic corrosion properties of aluminium based PS plate[J]. Heat Treatment of Metals,2007,32(2):78—82.
- [4] 李红英,曾再德,王长建. 冷轧变形量对 PS 版电解腐蚀性能的影响[J]. 腐蚀与防护,2007,28(8):383—386.
LI Hong-ying, ZENG Zai-de, WANG Chang-jian, et al. Effects of cold deformation on electrolytic corrosion properties of PS plate [J]. Corrosion & Protection,2007,28(8):383—386.

- [5] KOROLEVA E V, THOMPSON G E, SKELDON P, et al. Tailored AA1050 alloy surfaces by electrograining[J]. Electrochimica Acta,2005, 50(10):2091—2106.
- [6] 卜柏林,陈小青. 铝合金 PS 版的生产工艺及发展趋势[J]. 铝加工,1994,17(4):30—36.
- [7] VAN P, WIGGEN S, BELGRAVER J. From Al-Ti-B to Al-Ti-C developments in aluminum grain refiners[J]. Aluminum,1999,75(11):989—994.
- [8] BANERJI A, REIF W. Grain refinement of aluminum by TiC[J]. Metallurgical and Materials Transactions A,1985,16(11):2065—2068.
- [9] BANERJI A, REIF W. Development of Al-Ti-C grain refiners containing TiC[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1986,17(12):2127—2137.
- [10] 高泽生. 新一代 Al-Ti-C 晶粒细化剂的研究与开发[J]. 轻合金加工技术,1999,27(3):8—11.
- [11] 王致国. 用铸轧铝板坯工业生产 PS 版基的研究[J]. 轻合金加工技术,1997,25(3):15—16.
- [12] 谭敦强,黎文献,余琨,等. 新一代铝合金晶粒细化剂 Al-Ti-C [J]. 铸造,2000,49(7):388—391.
TAN Dun-qiang, LI Wen-xian, YU Kun, et al. A new grain refiner Al-Ti-C of Al alloy[J]. Foundry,2000,49(7):388—391.
- [13] 王凤平,康万利,敬和民,等. 腐蚀电化学原理、方法及应用[M]. 北京:化学工业出版社,2008.
- [14] 巩运兰,王为,王慧. 位错对阳极氧化铝多孔薄膜纳米孔阵列结构的影响[J]. 应用化学,2002,19(11):1101—1105.
GONG Yun-lan, WANG Wei, WANG Hui. Effect of the dislocation on the nano-pore array structure of anodic alumina films [J]. Journal of Applied Chemistry,2002,19(11):1101—1105.
- [15] 李红英,王法云,曾再德,等. 1050 铝基 PS 版的热处理工艺[J]. 材料科学与工程学报,2008,26(3):416—421.
LI Hong-ying, WANG Fa-yun, ZENG Zai-de, et al. Effect of heat-treat on electrolysis properties of PS plate based on 1050 Al alloy [J]. Journal of Materials Science & Engineering, 2008,26(3):416—421.

基金项目:国家重点基础研究发展计划项目(2012CB619504)

收稿日期:2012-05-10;修订日期:2013-07-16

作者简介:黄元春(1966—),男,副教授,从事铝合金板带材加工工艺研究,联系地址:湖南省长沙市岳麓区中南大学轻合金研究院 204(410083), E-mail:huangyc6818@163.com

(上接第 40 页)

- CHEN Y Y, YANG F, KONG F T, et al. Effect of sintering temperature on microstructure and properties of TiAl bulk materials[J]. Journal of Materials Engineering, 2010, (4): 1—4.
- [14] KURZ W, FISHER D J, 李建国, 等. 凝固原理[M]. 北京:高等教育出版社, 2010. 76—79.
 - [15] 赵龙志,曹小明,田冲,等. 浇注温度对 SiC 泡沫/SiC_p/Al 混合复合材料力学性能的影响[J]. 金属学报,2006, 42(1):103—108.
ZHAO L Z, CAO X M, TIAN C, et al. Effect of casting temperature on mechanical properties of SiC foam/SiC_p/Al hybrid composites [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2006, 42(1):

103—108.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51001047,51165008);江西省教育厅科研资助项目(GJJ11096,GJJ12282);载运工具与装备教育部重点实验室基金资助项目(11JD05)

收稿日期:2012-09-06;修订日期:2012-12-21

作者简介:赵龙志(1977—),男,博士,副教授,主要从事金属基复合材料和激光成形研究,联系地址:江西省南昌市双港路 808 号华东交通大学机电工程学院(330013), E-mail:zhaolongzhi@163.com