

冷轧变形量对电磁/超声铸轧铝板 织构和性能的影响

Effect of Cold Rolling Reduction on Texture and
Properties of Cast-rolled Aluminum Strip Under
Electromagnetic and Ultrasonic Field

毛大恒, 赵苏琨, 李建平, 扶宗礼, 石 琛

(中南大学 高性能复杂制造国家重点实验室, 长沙 410083)

MAO Da-heng, ZHAO Su-kun, LI Jian-ping, FU Zong-li, SHI Chen

(State Key Laboratory of High Performance Complex Manufacturing,

Central South University, Changsha 410083, China)

摘要: 在电磁和超声外场下成功制备铸轧铝带坯, 并对其进行冷轧实验, 研究了冷轧变形量对复合能场铸轧铝板的微观组织、力学性能和织构的影响, 并与相同道次的普通铸轧铝板进行对比。研究表明: 随着冷轧变形量的增加, 两种铸轧铝板的晶粒逐渐被压扁和拉长, 最终获得明显的纤维组织, 其中复合能场铸轧板的组织更加均匀; 复合能场铸轧板各道次的抗拉强度 σ_b 和伸长率 δ 均高于同道次的普通铸轧板, 各向异性指数 (IPA) 明显小于普通铸轧板; 随着冷轧变形量的增加, 两种铸轧板的黄铜 (B)、S 及铜 (C) 织构的密度出现不同程度的增加, 而高斯织构 (G) 先增后减, 旋转立方织构 (RC) 逐渐减少, 其中复合能场铸轧板的原始织构较漫散, 相同道次的各织构密度较低。冲杯实验结果表明: 复合能场铸轧板的深冲性能明显优于普通铝板, 其制耳率仅为 1.7%。

关键词: 铝合金; 超声/电磁复合能场; 冷轧变形量; 织构

doi: 10.3969/j.issn.1001-4381.2013.06.003

中图分类号: TG146.21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2013)06-0012-06

Abstract: Cast-rolled aluminum strip stock had been successfully prepared under electromagnetic and ultrasonic field, and cold rolling experiment was conducted for the strip stock. The effect of cold rolling reduction on the microstructure, mechanical properties and texture of cast-rolled aluminum strip under composite energy field was investigated, and compared with general cast-rolled aluminum strip of the same pass. The results show that: With the increase of cold rolling reduction, the two kind of cast-rolled aluminum strip was gradually flattened and elongated, and eventually the apparent fibrous tissue was obtained. And the fibrous tissue of cast-rolled strip under composite energy field was more uniform. The tensile strength σ_b and elongation δ of each pass of cast-rolled strip under composite energy field were both higher than the general cast-rolled strip at the same pass, and the anisotropy index (IPA) was significantly lower than the general one. With the increase of cold rolling reduction, the density of Brass (B), S and Copper (C) texture of the two kind of cast-rolled aluminum strip was increased at different degrees, while the Goss (G) texture first increased and then decreased, the rotated-cube (RC) texture gradually decreased. The original texture of cast-rolled strip under composite energy field was diffused and the density of all kinds of texture with the same pass was lower than the general one. The drawing experimental results show that the draw ability of cast-rolled strip under composite energy field was obviously better than the general one, and the earing ratio was only 1.7%.

Key words: aluminum alloy; ultrasonic/electromagnetic composite energy field; cold rolling reduction; texture

随着全球经济的发展, 国内外对深冲用铝合金板材的需求量不断增大, 同时对铝合金板材质量和性能

的要求也不断提高^[1]。目前连续铸轧已成为铝带坯的主要生产方法之一, 但用连续铸轧带坯生产的成品板

带各向异性明显,其深冲性能比热轧带坯生产的成品板带差,因而限制了铸轧带坯在冲压制品中的应用^[2]。铝合金成品板带的各向异性与带坯的原始组织以及在冷轧和退火过程中的组织演变密切相关,不同起始晶粒取向和晶粒尺寸均会导致变形、退火组织产生差异^[3-6]。蔡春波等研究了不同轧制工艺参数对 1050 铝合金组织和组织的影响,指出在较大的热轧变形量下铝合金的二次再结晶晶粒细小,初始组织取向密度较低,冷轧后具有较好的深冲性能^[7]。潘秋红等认为,合理的中间均匀化退火有利于降低 1100 铝合金冷轧板材的各向异性^[8]。Vladimir Sima 等认为,在铝铸轧过程中施加超声波能使晶粒得到细化,柱状晶被打碎,组织更加均匀^[9]。毛大恒等认为,施加电磁场的铸轧铝带坯与通常添加铝-钛-硼变质剂的铸轧带坯间存在一定的组织差异,其深拉性能明显优于添加铝-钛-硼丝的铸轧板^[10,11]。虽然国内外学者对铝合金板带在轧制变形过程中的组织演变进行了大量研究,但对有关电磁/超声复合能场铸轧板在后续轧制形变中的组织性能变化鲜见报道,因此通过改变铸轧板原始组织状态、冷轧和退火工艺来控制成品板带的最终组织组分,获得最佳的组织组配,从而控制板材的各向异性,这对材料的制备和应用有重要的意义^[12-14]。

1 实验

1.1 实验设备及材料

铸轧实验在中南大学 $\phi 400\text{mm} \times 500\text{mm}$ 水平式双辊连续铸轧机上进行。分别采用外加电磁/超声外场的非对称下沉式铸轧法和普通对称式铸轧法制备了两种宽为 200mm、厚为 5.0mm 的 1060 铝合金带坯,然后将铸轧得到的铝合金带坯在室温下进行八道次冷轧变形。复合能场铸轧板记为 F,普通铸轧板记为 P。第一至第八道次的冷轧变形量分别为:20%,36%,48%,56%,64%,70%,76%,80%。所用铝合金的化学组成如表 1 所示。

表 1 铝合金的化学成分(质量分数/%)

Table 1 The chemical composition of aluminum alloy
(mass fraction/%)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Al
0.25	0.35	0.05	<0.03	<0.03	<0.05	<0.03	Bal

1.2 实验步骤及方法

分别对变形量为 0%,36%,64%和 80%的两种铸轧铝板截取试样,经镶样、粗磨、细磨、电解抛光、浸蚀

后,在 Leica DMI 5000M 金相显微镜下进行观察。

拉伸实验在 CSS-44100 电子万能试验机上进行,按照 GB/T 228-2002 截取拉伸试样,每种状态均按横向(TD)、纵向(RD)以及斜向(45°方向)截取(每个方向取三个试样求平均值)。根据(1)式计算平面异性指数 IPA:

$$IPA = \frac{2X_{\max} - X_{\text{mid}} - X_{\min}}{2X_{\max}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: X 表示抗拉强度(MPa)或伸长率(%)的测量值。

组织测定在 Bruker D8 Discover 型 X 射线衍射仪上进行,管电压为 40kV,管电流为 40mA,采用 $\text{CuK}\alpha$ 辐射,用 Schulz 背反射法测量 {111}, {200} 和 {220} 3 张不完整极图,测得的极图经修正后,采用级数展开法计算取向分布(ODF)函数,结果用恒 φ_2 ($\Delta\varphi_2 = 5^\circ$) 截面图表示(Bunge 符号系统)。

选取第八道次的两种铸轧铝板进行冲杯实验。用线切割将这两种板都加工成 $\phi 55\text{mm}$ 圆片试样,然后在万能试验机上用自制模具进行冲杯,最后对圆杯进行制耳率测量。执行标准:GB5125-2008 有色金属冲杯试验方法。

2 实验结果与分析

2.1 金相组织

图 1 为不同冷轧变形量的铸轧铝板纵截面观察的金相组织。从该组织可以看出,随着冷轧变形量的增加,铝板的金相组织不断发生变化。变形量为 0%时,电磁/超声铸轧板为细小的等轴晶,晶界结构规则,平均晶粒度为 $30 \sim 40\mu\text{m}$;普通铸轧板的枝晶网胞发达,晶粒粗大。变形量为 36%时,由于轧制力的作用,使材料内部的晶粒发生剪切变形,晶粒被剪切,逐步细化,同时晶粒在高度方向被压扁而在轧制方向被延长。变形量增加到 64%时,晶粒进一步被压扁、拉长,晶粒的滑移系逐渐转到与外力相适应的方向上来,细长晶粒明显增加,并且出现纤维状组织,晶粒分布具有较强的方向性;在普通铸轧板的金相中出现厚度较大的晶界聚集,形成平滑晶界区。变形量增加到 80%时,变形组织已被拉长或拉碎成链条状排列的纤维组织,并且复合能场铝板的纤维组织细小、均匀;虽然普通板带最终也出现了链条状的纤维组织,但晶粒粗大,晶界上析出物多且不均匀。

2.2 力学性能

铸轧 1060 铝合金板的力学性能与冷轧变形量的关系如图 2 所示。从图 2(a)可以看出,随着轧制变形量的增加,复合能场铸轧板三个方向的抗拉强度 σ_b 均

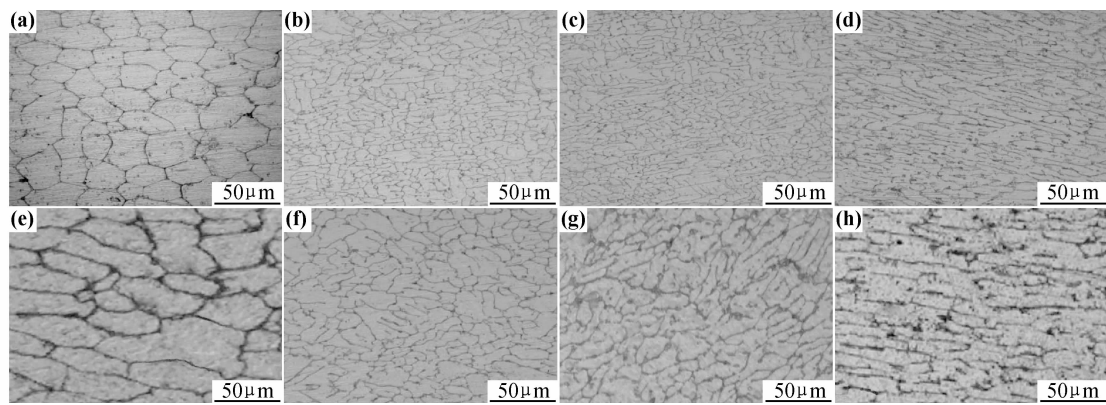


图 1 不同冷轧变形量的铸轧铝板金相组织

F: (a)0%; (b)36%; (c)64%; (d)80% P: (e)0%; (f)36%; (g)64%; (h)80%

Fig. 1 Microstructure of cast-rolled aluminum strip of various cold rolling reduction

F: (a)0%; (b)36%; (c)64%; (d)80% P: (e)0%; (f)36%; (g)64%; (h)80%

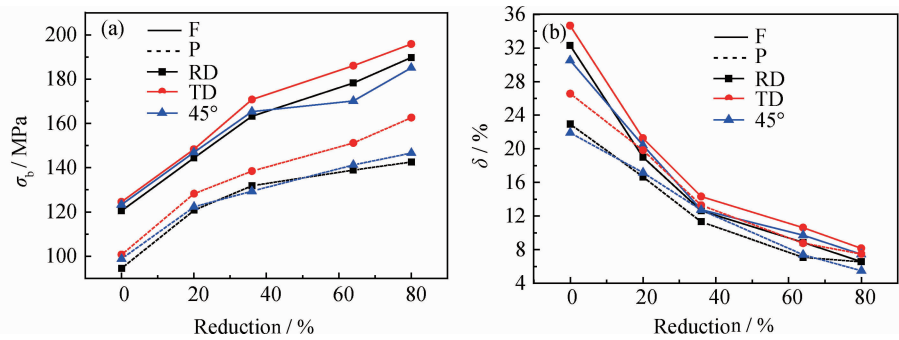


图 2 铸轧铝板的力学性能随冷轧变形量的变化

(a)抗拉强度; (b)伸长率

Fig. 2 The variation of mechanical properties of cast-rolled aluminum strip with reduction

(a) σ_b ; (b) δ

有不同程度提高,其中抗拉强度在变形量为 0~36% 之间时增幅最大,平均增加了 43.7MPa。在随后的道次中,抗拉强度增幅趋于平缓,当变形量为 80% 时平均抗拉强度达到 190.3MPa。普通铸轧板的抗拉强度的变化趋势与复合能场铸轧板相似,但普通铸轧板各道次的抗拉强度都要明显低于复合能场铸轧板,在变形量为 80% 时,普通铸轧板的平均抗拉强度比复合能场铸轧板小 39.6MPa。从图 2(b)可以看出,两种铸轧板的伸长率 δ 随着冷轧变形量的增加而降低,且在前两个道次下降剧烈,随后降速减缓,其中复合能场铸轧板伸长率的平均值由轧制前的 32.49% 下降到 7.39%。冷轧前普通铸轧板的平均伸长率比复合能场铸轧板小 8.71%,但经过多道次轧制后其伸长率与复合能场铸轧板基本持平。

铸轧铝板的各向异性指数(IPA)如表 2 所示。从表 2 可以看出,随着冷轧变形量的增加,两种铝板的抗拉强度 IPA 指数和伸长率 IPA 指数出现不同程度的增加,其中复合能场铸轧板各道次的 IPA 指数明显低

于普通板,在变形量为 80% 时,抗拉强度 IPA 和伸长率 IPA 分别比普通板降低了 2.69 和 8.24。

表 2 铸轧铝板带的各向异性指数

Table 2 Anisotropy index of cast-rolled aluminum strip

Reduction/%	F		P	
	IPA(σ_b)	IPA(δ)	IPA(σ_b)	IPA(δ)
0	2.17	9.33	4.07	16.19
20	2.60	9.65	5.23	17.42
36	3.89	10.02	5.67	19.93
64	6.37	12.39	7.31	21.03
80	8.41	14.05	11.10	22.29

在低变形量变形过程中,由于在试样中产生大量的位错,位错密度增加较快,位错间的缠结和相互作用使材料的内应力和加工硬化变化明显,抗拉强度快速升高,伸长率下降剧烈。当变形量继续增加,晶体发生交滑移,位错密度达到饱和,抗拉强度和伸长率变化平缓,晶粒沿轧制方向拉长,晶粒择优取向增加,但复合

能场铸轧板的力学性能优于各道次的普通铸轧板。

2.3 织构

2.3.1 铸轧带坯原始织构

图 3 为普通铸轧带坯和复合能场铸轧带坯的 ODF 截面图。从图 3(a)可看出,普通铸轧铝板的原始织构除了含有较强的旋转立方 $RC\{001\}\langle 110\rangle$ 组分外,还有非常弱的 B 组分 $\{110\}\langle 112\rangle$ 和 C 组分 $\{112\}\langle 111\rangle$,具有热轧织构的特点。图 3(b)为复合能场铸轧带坯的原始织构,该织构组分漫散,有较弱的 RC 织构和 $\{110\}\langle 113\rangle$ 织构组分,织构的取向密度峰值明显低于普通铸轧带坯,取向密度峰值仅为 2.1。由于

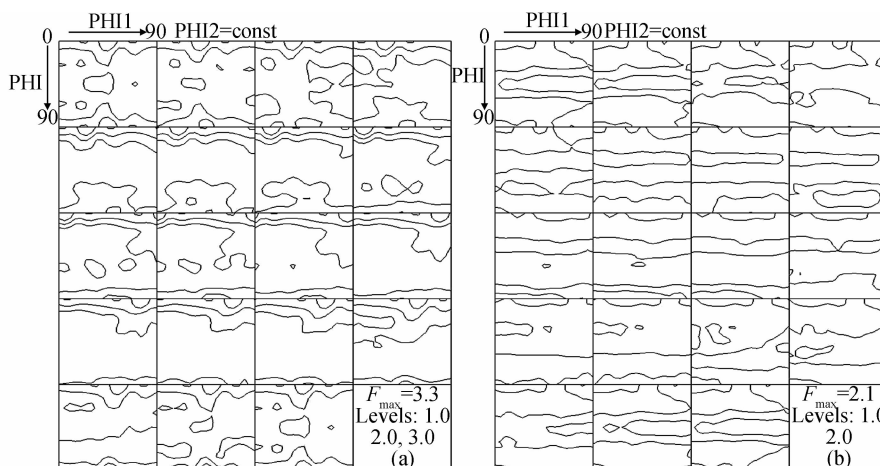


图 3 铸轧铝带坯的 ODF 图 (a)P;(b)F

Fig. 3 ODF sections of cast-rolled aluminum strip stock (a)P;(b)F

2.3.2 铸轧带坯经冷轧后的织构变化

铸轧带坯经冷轧后的织构组分与冷轧变形量的关系曲线如图 4 所示。从图 4(a)可以看出,普通铸轧板在 $0\%\sim 36\%$ 变形量范围内,铜 C 织构、黄铜 B 织构和 S 织构组分的体积分数均略有增加,但增加幅度不大,在 $36\%\sim 80\%$ 变形量时,这三种织构的体积分数均迅速增加,只是增加速率有所不同,其中 S 织构体积分数始终高于铜 C 织构和黄铜 B 织构。随着冷轧变形量的增加,旋转立方 RC 织构的体积分数不断下降,最终趋于消失,而高斯 G 织构呈先增加后减少的变化趋势,在冷轧变形量为 36% 时达最大值。从图 4(b)可以看出,复合能场铸轧板的各织构组分体积分数的变化趋势与普通铸轧板基本类似,但相同冷轧变形量的织构强度都明显低于普通铸轧板。在变形量为 $36\%\sim 80\%$ 时,黄铜 B 织构的体积分数增加较快,并超过了铜 C 织构。

图 5 为铸轧带坯经 80% 冷轧变形量后的 ODF 图。从图 5(a)中发现,普通铸轧带坯冷轧后产生的形变织构表现为典型的“铜式”织构特征,有强的 C, B 和

铸轧带坯具有铸造和热轧的双重性,铸轧带坯既不是完整的铸态组织,也不是完全的变形组织,而是铸态组织经一定热变形后发生动态回复和少量再结晶的组织,因此普通铸轧带坯表现出了较强的 RC 织构和较弱的轧制织构。而在复合能场的作用下,由于电磁感应力在凝固前沿产生的搅拌作用和超声波的声流效应,对柱状晶或树枝晶上产生冲刷和剪切,使枝晶断裂、脱落,随熔体翻滚,不断改变自身的位向,从而抑制了晶粒的定向长大,故复合能场下的晶粒择优取向不明显,织构组分漫散,织构取向密度很低。

S 组分,最高取向密度以 C 组分最高 ($F_{\max} = 10.2$)。从图 5(b)可看出,复合能场带坯经 80% 的冷轧变形后最终获得不同于普通铸轧板的黄铜型织构,织构组分为强的 B 组分及较弱的 S 和 C 组分,最高取向密度也仅为 6.4,远低于普通铸轧板。

以往的研究表明,FCC 金属的轧制织构主要聚集在取向空间的 α 取向线和 β 取向线附近。在变形量很小的情况下,各取向在 α, β 取向线上较均匀地分布,随着变形量的增加会向 β 取向线上的 B 取向、S 取向和 C 取向位置迅速聚集起来。G 取向是一个亚稳取向,许多晶粒的取向尽管在低轧制变形量时流向 G 取向,但随变形量的升高又逐渐沿 α 线流向 B 取向,因此 G 取向呈现先上升后下降的趋势。铸轧过程中剪切应力的存在导致了铸轧带坯内产生旋转立方织构^[15]。而随着冷轧变形量的增加,铸轧板的厚度不断减小,铸轧板的变形不均匀性减弱,板内的剪切应力减小。这样,旋转立方 RC 织构不再稳定,最后基本消失。

金属塑性变形一般通过位错滑移和孪生切变实现,但有时当正常的位错滑移受到较大妨碍,加上晶粒

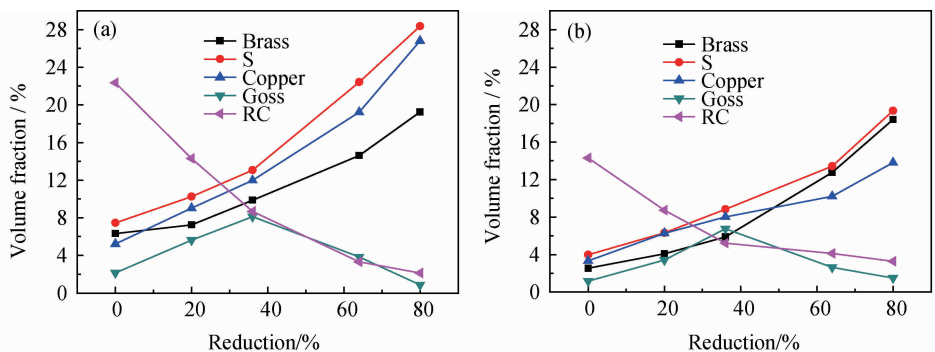


图 4 铸轧板的组织组分与冷轧变形量的关系 (a)P;(b)F

Fig. 4 The relation between texture component of cast-rolled aluminum strip and reduction (a)P;(b)F

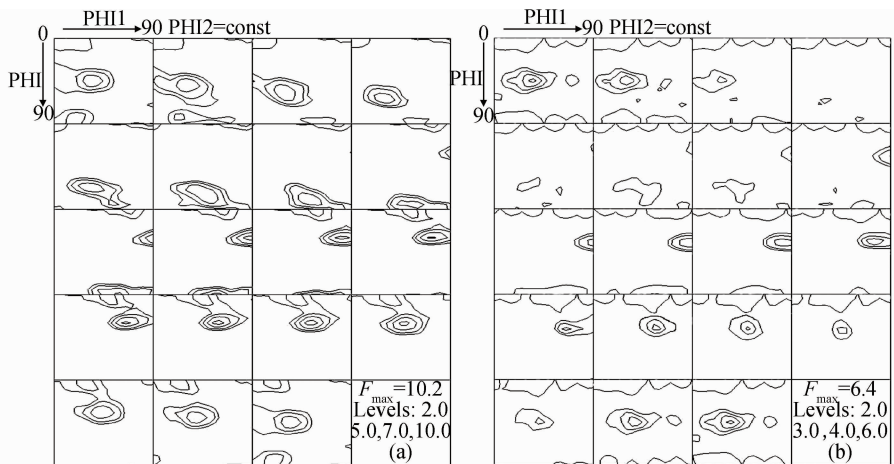


图 5 铸轧带坯经 80% 冷轧变形量后的 ODF 图 (a)P;(b)F

Fig. 5 ODF sections of cast-rolled aluminum strip with 80% cold rolling reduction (a)P;(b)F

特殊的取向关系会造成剪切带变形。在面心立方金属的变形过程中,这 3 种变形机制所起作用的大小与金属的层错能密切相关。纯铝具有很高的层错能,变形基本上靠位错滑移完成。当变形仅以位错滑移进行时,晶粒取向在轧制过程中会不断流向 B 和 C 两个取向。但由于晶粒向 B 取向流动时会造成较大的绕法向的切应变,在轧制的几何条件下,这种切变较难实现,所以晶粒较难达到 B 取向,而较多流向 C 取向,使 C 取向密度达到最大值,这是普通铸轧板呈现铜型组织特征的主要原因。而复合能场铸轧带坯由于晶粒细小,原始组织分布慢散且有{110}<113>组织组分,在冷轧变形过程中使其在 C 取向上的聚集受到干扰,从而 C 组分增加减缓,B 组分增多,逐渐形成较强的黄铜型特征。

2.4 冲杯结果分析

从图 6 实验结果可以看出,普通铝板和复合能场铝板都产生了 45°方向制耳,其中普通铝板的制耳率 e 为 4.4%,而复合能场铝板的制耳率 e 仅为 1.7%。如前所述,两种铸轧铝板在冷轧过程中随着冷轧变形量

的增加,逐渐形成以 S,C 和 B 组织组分为主的形变组织,而轧制组织中的 B,S 和 C 组织是产生 45°方向制耳的重要原因。板材组织组分的不同会影响深冲制耳率的高低,同时,组织强度也会影响制耳率的大小。对比图 5(a)和图 5(b),容易发现,复合能场铝板各组织组分强度低于普通铝板,从而使其深冲制耳率低于后者。

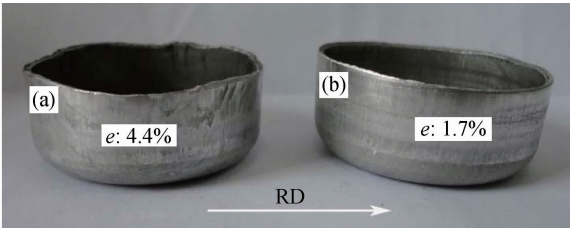


图 6 铸轧铝板冲杯样品 (a)P;(b)F

Fig. 6 Drawing samples of cast-rolled aluminum

(a)P;(b)F

3 结论

(1)普通铸轧带坯原始晶粒为粗大的柱状晶且不

均匀,而复合能场铸轧带坯原始晶粒为均匀细小的等轴晶;随着冷轧变形量的增加,两种铸轧板晶粒逐渐被压扁和拉长,最终获得明显的链状排列的纤维组织,其中复合能场铸轧板的组织更加细小、均匀。

(2)复合能场铸轧铝板各道次的抗拉强度 σ_b 和伸长率 δ 高于同道次的普通铸轧板,各向异性指数(IPA)明显小于普通铸轧板。

(3)随着冷轧变形量的增加,两种铸轧板的 B、S 及 C 组分取向密度出现不同程度的增加, G 组分先增后减, RC 组分逐渐减少,其中复合能场铸轧板的原始织构较漫散,相同道次的各织构密度较低。

(4)复合能场铸轧铝板的深冲性能明显优于普通铸轧板,其制耳率仅为 1.7%。

参考文献

- [1] 屈平,向群. 我国铝板带市场发展综述[J]. 铝加工, 2006, 166(1): 18—20.
QU Ping, XIANG Qun. Development of aluminum plate and strip market in China [J]. Aluminium Fabrication, 2006, 166(1): 18—20.
- [2] LI Z J, WINTHER G, HANSEN N. Anisotropy of plastic deformation in rolled aluminum [J]. Mater Sci Engi, 2004, 387—389(1—2): 199—202.
- [3] CHENG X M. Earing behavior and crystallographic texture of aluminum alloys during cold rolling [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2001, 10(4): 399—404.
- [4] 毛卫民. 金属材料的晶体学织构与各向异性[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [5] 崔丽,李晓延,贺定勇,等. Nd: YAG 激光焊接对铝锂合金组织和织构的影响[J]. 材料工程, 2012, (5): 6—9.
CUI Li, LI Xiao-yan, HE Ding-yong, et al. Effects of Nd: YAG laser welding on microstructure and texture of aluminum-lithium alloys[J]. Journal of Materials Engineering, 2012, (5): 6—9.
- [6] LIU Q, JENSEN J D, HENSEN N. Effect of grain orientation on deformation structure in cold-rolled polycrystalline aluminum [J]. Acta Materialia, 1998, 46(16): 5819—5838.
- [7] 蔡春波. 1050 铝合金形变和再结晶过程中的织构演变研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2009.
- [8] 潘秋红,黄瑶,温晓静,等. 深冲用工业纯铝板材的各向异性研究[J]. 矿冶工程, 2008, 28(2): 87—90.
PAN Qiu-hong, HUANG Yao, WEN Xiao-jing, et al. Anisotropy of deep drawing commercial pure aluminum sheet [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2008, 28(2): 87—90.
- [9] SIMA V, MALEK P. Ultrasonic vacuum chill casting and hot rolling of FeAl-based alloys [J]. Materials Research Society Symposium Proceedings, 2009, 1128: 71—76.
- [10] 毛大恒,肖立隆,丁道廉. 电磁场对铸轧板织构和力学性能的影响[J]. 中南大学学报:自然科学版, 1998, 29(6): 573—576.
MAO Da-heng, XIAO Li-long, DING Dao-lian. Effect of electromagnetic field on texture and mechanical properties of casting and rolling plate [J]. Journal of Central South University of Technology: Natural Science, 1998, 29(6): 573—576.
- [11] 毛大恒,钟掘,赵啸林,等. 铝及铝合金电磁连铸轧新技术——电磁场对金属凝固的作用机理[J]. 矿冶工程, 1996, 16(2): 68—71.
MAO Da-heng, ZHONG Jue, ZHAO Xiao-lin, et al. The new technology of continuous cast rolling under electromagnetic field of aluminum alloys—mechanism of electromagnetic field on metal solidification [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 1996, 16(2): 68—71.
- [12] NES E, SOLBERG J K. Growth of cube grain during recrystallization in aluminum [J]. Material Science and Technology, 1996, 2(1): 19—21.
- [13] 陈军洲,黄敏,戴圣龙. Al-Zn-Mg-Cu 系铝合金厚板冷轧过程中的织构演变[J]. 材料工程, 2011, (5): 1—6.
CHEN Jun-zhou, HUANG Min, DAI Sheng-long. Texture evolution of Al-Zn-Mg-Cu aluminum alloy plate during cold rolling [J]. Journal of Materials Engineering, 2011, (5): 1—6.
- [14] LIU W C, MORRIS J G. Effect of initial texture on the recrystallization texture of cold rolled AA 5182 aluminum alloy [J]. Materials Science and Engineering A, 2005, 402(1—2): 215—227.
- [15] 邓运来,张新明,唐建国,等. 剪切变形方向特征对高纯铝箔轧制织构的影响[J]. 中国有色金属学报, 2005, 15(6): 830—834.
DENG Yun-lai, ZHANG Xin-ming, TANG Jian-guo, et al. Effect of direction change of shear deformation on rolling textures in high purity Al foils [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2005, 15(6): 830—834.

收稿日期:2012-07-20;修订日期:2012-10-19

作者简介:毛大恒(1946—),男,教授,博士生导师,主要从事材料成型工艺及装备研究,联系地址:湖南省长沙市麓山南路中南大学机电工程学院(410083),E-mail: mdh@csu.edu.cn

通讯作者:赵苏琨(1988—),男,硕士研究生,从事电磁/超声铸轧铝合金形变和再结晶组织和性能研究,联系地址:湖南省长沙市麓山南路中南大学机电工程学院(410083),E-mail:466637404@qq.com