文章编号: 1004-0609(2014)03-0606-09

电磁-超声能场对 1060 铝板带再结晶组织与织构的影响

石 琛^{1,2}, 毛大恒^{1,2}, 黄长清^{1,2}

(1. 中南大学 高性能复杂制造国家重点实验室,长沙 410083;2. 中南大学 机电工程学院,长沙 410083)

摘 要:在双辊连续铸轧过程中施加电磁-超声能场制备出 1060 铝合金铸轧板坯,经不同冷轧变形量的冷轧后退 火,制备出系列铝板带,从晶粒大小、形态和取向等方面分析电磁-超声能场对铝板带再结晶组织与织构的影响。 结果表明:电磁-超声能场可使铝合金铸轧板坯的平均晶粒尺寸减小 50%,使第二相均匀弥散分布在晶内和晶界 上,并能降低织构取向密度,使织构组分漫散分布;电磁-超声能场可加大铝合金铸轧板在冷轧-退火过程中的再 结晶程度,并获得更加细小均匀的再结晶组织;电磁-超声能场还可降低铝合金铸轧板冷轧-退火后的再结晶织构 强度,抑制晶粒的择优取向,提高铝合金铸轧板的深冲成型性能。

关键词: 1060 铝合金; 电磁-超声铸轧; 冷轧; 退火; 织构

中图分类号: TG146.21 文献标志码: A

Effect of electromagnetic-ultrasonic energy field on recrystallization microstructure and texture of 1060 aluminum alloy plate

SHI Chen^{1, 2}, MAO Da-heng^{1, 2}, HUANG Chang-qing^{1, 2}

State Key Laboratory of High Performance and Complex Manufacturing, Central South University, Changsha 410083, China;
 School of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: 1060 aluminum alloy cast-rolling slab was prepared by electromagnetic-ultrasonic cast-rolling, then series of aluminum alloy plates were prepared through cold rolling and annealing. The effects of electromagnetic-ultrasonic energy field on the recrystallization microstructure and texture of 1060 aluminum alloy plates were researched through the analysis of grain size, form and orientation. The results show that electromagnetic-ultrasonic energy field can decrease the average grain size of aluminum alloy cast-rolling slab by 50%, make the precipitated phase distribute on the intracrystalline and grain boundary in homogeneous dispersion state, and reduce texture orientation density, making texture component distribute dispersively. Electromagnetic-ultrasonic energy field can enhance the recrystallization during cold-rolling and annealing of aluminum alloy cast-rolling plate, and obtain more uniform recrystallized structure with smaller grain size. Electromagnetic-ultrasonic energy field can reduce the recrystallization texture intensity of aluminum alloy cast-rolling and annealing, and inhibit preferred orientation, thus improving the deep drawing forming performances of aluminum alloy cast-rolling plate.

Key words: 1060 aluminum alloy; electromagnetic-ultrasonic cast-rolling; cold rolling; annealing; texture

铝合金具有质轻、韧性好、易加工成型和耐腐蚀 性能优良等优点,使其成为最受欢迎的冲压材料^[1-2]。 连续铸轧具有流程短、成本低、产量高等优点,目前 已成为铝带坯的主要生产方法之一^[3-4],但常规连续铸 轧板坯经冷轧制得的成品板带各向异性明显,深冲性 能比铸锭--热轧--冷轧板带差,限制了铸轧板在冲压成

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2014CB046702); 国家自然科学基金资助项目(51275533); 中南大学博士后基金资助项目 收稿日期: 2013-07-01; 修订日期: 2013-09-16

通信作者: 石 琛, 讲师, 博士; 电话: 0731-88879044; E-mail: shichen@csu.edu.cn

型中的应用^[5-6],因此,有待改进连续铸轧方法以提高 铝合金铸轧板的深冲成型性能。

EI-BASSYOUNI^[7]研究表明,交变电流产生的磁 场能明显细化晶粒, 当磁感应强度为 0.027~0.037 T 时 晶粒细化效果最佳; METAN 等^[8-9]研究了 Al-Si 合金 在电磁搅拌作用下的凝固组织,结果表明,电磁场能 够增加晶粒的形核数量,抑制晶粒的长大速度,促进 均匀细小等轴晶组织的形成: 李金涛等^[10]认为电磁场 的搅拌作用能加速铝熔体的对流传热,使温度场分布 更均匀,抑制合金定向生长;赵啸林等^[11]认为电磁搅 拌作用能破碎晶粒、剥落初生枝晶,被打碎的枝晶再 次融入到铝合金熔体中成为新的晶核,从而提高合金 的形核率,细化晶粒; ESKIN 等^[12-13]研究发现,在连 续铸造高纯 Al 过程中施加功率超声波,有助于提高形 核率,打断和切碎枝晶,最终细化晶粒; MAO 等^[14] 研究发现,施加超声波能场后,铝合金铸轧带坯的偏 析明显改善, 晶粒大小更均匀, 力学性能得到提高。 由此表明,在铸轧过程中施加电磁场、超声波等能场 可细化晶粒,使组织更加均匀,力学性能得到提高。

但对于深冲用铝合金来说,其最大特点是在冷轧 或退火状态下要经过冲压成型,因此要求铝板带必须 具有优良的深冲成型性能(良好的塑性加工性能和较 低的平面塑性各项异性),而铝合金成品板带的各向异 性与带坯的原始织构以及在冷轧、退火过程中的织构 演变密切相关^[15-16]。因此,本文作者通过系列实验对 比分析电磁-超声铸轧板与常规铸轧板经冷轧、退火 后的再结晶组织和织构,研究电磁-超声复合能场对 铝合金板带再结晶组织和织构的形成、演变的影响机 理,对于调控铝板带的织构组态和提高铝合金铸轧板 深冲成型性能有着重要的意义,也将为实现深冲用铝 合金板材的高效节能制备奠定理论基础。

1 实验

1.1 实验材料

选用 1060 铝合金为实验材料,其化学成分如表 1 所列。

表1 1060 铝合金的化学组成

Table 1Chemical composition of 1060 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 实验过程

铸轧实验在 d 400 mm×500 mm 水平式双辊连续 铸轧机上进行(见图 1)。铸轧机辊缝为 4.7 mm,铸轧 区长度为 60 mm,铸轧速度为 1.4 m/min,倒炉温度为 715 ℃,前箱温度为 685 ℃,冷却水温度为 15 ℃,冷 却水流量为 80 L/min,励磁电流为 10 A,电磁场中心 频率为(13±1) Hz,超声波功率为 200 W,超声波频率 为(20±0.2) kHz。制备出宽度为 200 mm、厚度为 5.0 mm 的 1060 铝合金铸轧板坯。



图1 电磁-超声铸轧示意图

Fig. 1 Schematic diagram of electromagnetic-ultrasonic cast-rolling

冷轧实验在 d 320 mm×500 mm 双辊冷轧机上进行,冷轧速度为 2.5 m/min,将铸轧板坯冷轧 8 道次,各道次铸轧铝板厚度及冷轧变形量如表 2 所列。

表2 铸轧板的冷轧各道次板厚及冷轧变形量

 Table 2
 Thickness and cold rolling reduction of cast-rolling plates

Rolling pass	Thickness/mm	Cold rolling reduction/%
0	5	0
1	4	20
2	3.2	36
3	2.6	48
4	2.2	56
5	1.8	64
6	1.5	70
7	1.2	76
8	1	80

退火实验在 KSW-4D-C 电炉内进行,退火温度 为 400 ℃,保温时间为 2 h,出炉后空冷。

1.3 测试方法

分别对冷轧退火后的电磁-超声铸轧板与常规铸 轧板(未施加电磁-超声能场)进行显微组织与织构分 析。

铝板经镶样、粗磨、细磨、电解抛光、浸蚀后, 通过 Leica DMI 5000M 金相显微镜观察显微组织,并 在配有能谱仪(EDS)的扫描电子显微镜(SEM)上观察 第二相粒子大小、形貌及分布。

织构测定在 Bruker D8 Discover 型 X 射线衍射仪 上进行,管电压为 40 kV,管电流为 40 mA,采用 Cu K_a 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 法计算取向分布函数(ODF),结果用恒 $\varphi_2(\Delta \varphi_2 = 5^\circ)$ 截面 图表示(Bunge 符号系统),采用 Texture Calc 软件^[17] 计算织构的体积分数。

2 结果与讨论

2.1 铝铸轧板坯的金相组织与织构

图 2 所示为电磁-超声铸轧和常规铸轧 1060 铝板 坯纵截面的金相组织。由图 2 可知,电磁-超声铸轧



图 2 铸轧板坯的金相组织

Fig. 2 Metallographs of cast-rolling slab: (a) Electromagneticultrasonic; (b) Traditional 板坯的晶粒组织为明显的等轴晶组织,晶粒细小,组 织均匀,晶界结构规则,平均晶粒度为 30~40 μm。而 常规铸轧板坯的金相组织中含大量的柱状晶组织,枝 晶网胞发达,晶粒大小不均匀,晶界粗糙不规则,平 均晶粒度为 70~80 μm。由此可见,在铸轧区凝固前沿 施加电磁-超声能场,电磁场产生的垂直于熔体流动 方向的横向剪切力和超声波空化效应产生的微射流作 用,可使生长中的或已经长大的枝晶及柱状晶断碎、 脱落,弥散分布在亚稳态熔体中,加速非均质形核, 显著提高形核率并抑制柱状晶的形成,而且还能加强 熔体之间及熔体与铸嘴、侧耳、轧辊及空气间的换热 强度,明显减小熔体温度梯度,使凝固前沿较大范围 的熔体温度分布均匀,晶粒长大速度沿各个方向趋于 一致,最终获得均匀细小的等轴晶组织。

铸轧板坯的第二相(析出相)分布如图 3 所示。常 规铸轧板坯的第二相分布不均匀,在部分区域大量富 集,微观偏析严重。而施加了电磁-超声能场后,铝 板坯的第二相大多弥散分布在基体中,少量沿晶界均 匀分布,这些分布均匀的第二相可作为强化相起到"钉 扎"晶界的作用,从而提高铝合金板坯的力学性能。由 此可见,电磁-超声能场的搅拌作用加速了溶质元素 在铝熔体中的扩散,使其在晶内和晶界上呈均匀弥散 分布。

图 4 所示为电磁-超声铸轧板坯和常规铸轧板坯的 ODF 截面图。对比分析织构组分可知,在电磁-超



图 3 铸轧板坯的第二相分布

Fig. 3 Second phase distribution of cast-rolling slab:(a) Electromagnetic-ultrasonic; (b) Traditional

声能场的作用下,铸轧板坯的织构组分漫散,存在较弱的 Cube{001}(110)织构、RC{001}(110)织构和 {110}(113)织构组分,织构的取向密度很低,峰值仅为 2.1。常规铸轧板坯的织构除含有较强的旋转立方 RC 织构组分外,还有较弱的 Brass {110}(112)织构组分和 Copper {112}(111)织构组分,具有热轧织构的特点,取向密度峰值达到 3.3,织构取向密度明显高于电磁-超声铸轧板坯的织构取向密度。

由此可见, 电磁-超声能场对柱状晶或树枝晶的



冲刷和剪切作用,使枝晶断裂、脱落,随熔体翻滚, 不断改变自身的位向,有效抑制晶体在凝固过程中的 定向生长,最终使得铸轧板坯的晶粒无明显择优取向, 织构组分漫散。

2.2 不同冷轧变形量下铝铸轧板的再结晶组织

电磁-超声铸轧板和常规铸轧板经冷轧后在 400 ℃进行 2 h 的退火,金相组织分别如图 5 和 6 所示。 由图 5 和 6 可看出,退火后,不同变形量的铸轧



图 4 铸轧板坯的 ODF 图

Fig. 4 ODF diagrams of cast-rolling slab: (a) Electromagnetic-ultrasonic; (b) Traditional



图 5 400 ℃、不同冷轧变形量下电磁--超声铸轧板的退火金相组织

Fig. 5 Metallographs of electromagnetic-ultrasonic cast-rolling plate with different cold rolling reductions after annealing at 400 °C: (a) 36%; (b) 56%; (c) 70%; (d) 80%



图 6 400 ℃、不同冷轧变形量下常规铸轧板的退火金相组织 **Fig. 6** Metallographs of traditional cast-rolling plate with different cold rolling reductions after annealing at 400 ℃: (a) 36%; (b) 56%; (c) 70%; (d) 80%

板均发生了再结晶,等轴晶粒的数量、尺寸和形状随 着变形量的不同而有所差异。当变形量为36%时,电 磁-超声铸轧板内已出现大量再结晶晶粒,但仍存在 少量被压扁的长条状变形组织(见图 5(a)),而常规铸轧 板的晶粒组织几乎全为粗大的长条状变形组织,只在 部分区域出现少量再结晶晶粒(见图 6(a)); 当变形量增 加到56%时,电磁--超声铸轧板中已看不到变形组织, 在整个区域内形成了均匀的等轴再结晶组织, 表明再 结晶已完成(见图 5(b)),而此时常规铸轧板的变形组 织开始逐步消失,也形成了大量等轴晶晶粒,但大小 极不均匀,部分晶粒尺寸达 70 µm 以上(见图 6(b)); 当变形量增加到 70%时,两种铸轧板的等轴再结晶晶 粒尺寸均明显减小,其中电磁-超声铸轧板组织更加 细小均匀,平均晶粒尺寸仅为 10~15 µm(见图 5(c)和 6(c)); 当变形量达到 80%时, 电磁-超声铸轧板内出 现晶粒相互并吞的现象,再结晶晶粒逐渐粗化(见图 5(d)), 而常规铸轧板再结晶晶粒尺寸则相对较小, 粗 化不明显(见图 6(d))。

由此可见,随着冷轧变形量的加大,铸轧板的位 错密度不断上升,退火后铸轧板的再结晶驱动力增加, 电磁-超声铸轧板比常规铸轧板的晶粒更细小,晶粒 界面能更多,晶粒再结晶的驱动能量更高,致使相同 条件下其再结晶程度更大,而且电磁-超声铸轧板细 小均匀的晶粒在被压扁、拉长过程中变形更均匀,位 错分布更均匀,各区域的大角度晶界迁移速度相近, 故再结晶晶粒大小也更均匀。

2.3 不同冷轧变形量下铝铸轧板的再结晶织构

不同冷轧变形量的常规铸轧板经400℃退火后的 恒 φ_2 ODF 截面图如图 7 所示。由图 7 可见,常规铸 轧板退火后,冷轧织构强度减弱,并形成较强的再结 晶织构,主要织构组分为再结晶 Cube{001}(100)和 R{124}(211)织构。当变形量为36%时,铸轧板主要织 构为 Cube 织构,同时还保留着较多的冷轧织构组分 (见图 7(a)); 当冷轧变形量增加到 56%时,铸轧板主 要织构为再结晶 Cube 织构和 R 织构,其取向密度分 别为 7.1 和 4.8, 此外还保留了一定的冷轧 Copper 织 构和 S 织构, 织构强度分别为 3.2 和 3.5(见图 7(b)); 随着变形量的增加,Cube 织构和 R 织构取向密度逐渐 增强,当变形量为70%时,它们的取向密度分别升高 到 11.3 和 8, 但仍有一定的冷轧 Copper 织构和 S 织构 组分(见图 7(c))。当变形量增大到 80%时,织构组分 较 70%变形量的退火板没有明显差别,只是 Cube 织 构、R 织构以及冷轧 Copper 织构和 S 织构强度均略



图 7 400 ℃、同冷轧变形量下常规铸轧板等温退火后的 ODF 图

Fig. 7 ODF diagrams of traditional cast-rolling plate with different cold rolling reductions after annealing at 400 °C: (a) 36%; (b) 56%; (c) 70%; (d) 80%

有加强,它们的取向密度分别为12.5、8.7、5.1和5.6 (见图 7(d))。

图 8 所示为常规铸轧板在 400 ℃退火后各主要织 构的体积分数与冷轧变形量之间的关系。可以看出, 常规铸轧板退火后,各织构的体积分数随冷轧变形量 的增加而变化比较明显: Brass 织构体积分数连续降 低; Copper 和 S 织构则先下降,到 70%变形量后又有 所增加; 再结晶 R 织构的体积分数呈不断上升趋势, 由 6.5%上升到 17%; 再结晶 Cube 织构体积分数先增 加后略有降低,在变形量为 76%时达到最高,其体积 分数为 23.5%。

图 9 所示为不同冷轧变形量的电磁--超声铸轧板 经 400 ℃退火后的恒 φ₂ ODF 截面图。由图 9 可看出, 退火后电磁--超声铸轧板均形成了以再结晶织构为主 的织构类型, 只是不同冷轧变形量下的各织构组分及 其强度有所不同: 当变形量为 36%时, 电磁--超声铸



图 8 常规铸轧板退火后主要织构体积分数随冷轧变形量的变化

Fig. 8 Variation of main texture's volume fraction of traditional cast-rolling plate after annealing with cold rolling reduction







轧板各织构组分强度均较低,最高取向密度仅为 3.4,除形成了再结晶 Cube 织构外,还保留着较弱的 Brass、Copper 及 S 冷轧织构组分(见图 9(a));当变形量增加 到 56%时,电磁-超声铸轧板仍以 Cube 织构为主,强度有所提高,其取向密度为 5.1,冷轧 Brass 织构变化 不大,而 Copper 和 S 织构强度有所下降,分别下降到 1.5 和 1.7(见图 9(b));当变形量为 70%时,电磁-超声铸轧板再结晶 Cube 织构强度比 36%和 56%变形量的 Cube 织构都高,取向密度升高到 6.9,此外还有较强的再结晶 R 织构出现,其取向密度为 3.2(见图 9(c));当变形量增大到 80%时,Cube 织构和 R 织构取向密度稍有增强,但其强度也仅为 8.2 和 4.5,同时织构组分中还保留了较强的 Brass 织构及较弱的 S 织构(见图

9(d))∘

图 10 所示为电磁-超声铸轧板各织构组分的体积 分数随冷轧变形量的变化。可以看出,电磁-超声铸 轧板经退火后其织构组分的体积分数明显低于常规铸 轧板的,随着变形量增加,Brass、S 和 Copper 这 3 种冷轧织构均呈现先下降后升高的变化趋势,但体积 分数始终维持在较低水平;再结晶 Cube 织构体积分 数随变形量的增加而增加,再结晶 R 织构体积分数增 加的趋势较平缓。

综上分析可知,不同冷轧变形量下的电磁-超声 铸轧板和常规铸轧板在 400 ℃等温退火后,再结晶 Cube 和 R 织构成为主要的织构组分,同时还保留了少 量的轧制织构。然而在相同条件下,电磁-超声铸轧 板的 Cube 织构和 R 织构取向密度明显低于常规铸轧 板的,并且常规铸轧板的残留冷轧织构以 Copper 织构 为主, Copper 织构在退火再结晶时易于转变为 Cube 织构,而电磁-超声铸轧板中残留冷轧织构以 Brass 织 构为主,这是由于铸轧板坯成形过程中电磁-超声复 合能场的搅拌作用改变了晶体的取向,朝 Brass 取向 方向的改变在多道次冷轧过程中被强化^[18]并遗传下 来, Brass 织构的存在阻碍了 Cube 和 R 取向晶粒的形 核和长大。由此可见,电磁-超声能场可使铸轧板冷 轧-退火后的再结晶织构强度降低,从而抑制晶粒的 择优取向,有利于铝板带的深冲成型。



图 10 电磁-超声铸轧板退火后主要织构体积分数随冷轧 变形量的变化

Fig. 10 Variation of main texture's volume fraction of electromagnetic-ultrasonic cast-rolling plate after annealing with cold rolling reduction

3 结论

 1) 电磁-超声能场可使铝合金铸轧板坯的平均晶 粒尺寸减小 50%,使第二相均匀弥散分布在晶内和晶 界上,并能降低织构取向密度,减弱晶粒择优取向, 获得漫散的织构组分。

 2) 电磁-超声能场能加大铝合金铸轧板冷轧-退 火过程中再结晶程度,并获得更加细小、均匀的再结 晶组织。

3) 电磁-超声能场可使铝合金铸轧板冷轧-退火 后的再结晶织构强度降低,抑制晶粒的择优取向,提 高铝合金铸轧板的深冲成型性能。

REFERENCES

[1] 潘复生, 张丁非. 铝合金及应用[M]. 北京: 化学工业出版社,

2007: 70-79.

PAN Fu-sheng, ZHANG Ding-fei. Aluminum alloy and application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007: 70–79.

[2] 肖亚庆. 铝加工技术实用手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2005:13-27.

XIAO Ya-qing. User manual of aluminum processing technology[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2005: 13–27.

[3] 程 杰. 铝及铝合金连续铸轧带坯生产[M]. 长沙: 中南大学 出版社, 2010: 5-6.

CHENG Jie. Aluminum and aluminum alloy continuous cast-rolling strip production[M]. Changsha: Central South University Press, 2010: 5–6.

- CHEN Shou-dong, CHEN Jing-chao. Simulation of microstructures in solidification of aluminum twin-roll casting[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(6): 1452–1456.
- [5] LI Z J, WINTHER G, HANSEN N. Anisotropy of plastic deformation in rolled aluminum[J]. Materials Science and Engineering A, 2004, 387/389(1/2): 199–202.
- [6] 屈 平,向 群. 我国铝板带市场发展综述[J]. 铝加工, 2006, 31(1): 18-20.

QU Ping, XIANG Qun. Development of aluminum plate and strip market in China[J]. Aluminium Fabrication, 2006, 31(1): 18-20.

- [7] EI-BASSYOUNI T A. Effect of electromagnetic forces on aluminum cast structure[J]. Light Metals, 1983, 33(12): 733-742.
- [8] METAN V, EIGENFELD K, RABIGER D. Grain size control in Al-Si alloys by grain refinement and electromagnetic stirring[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 487(1/2): 163–172.
- [9] METAN V, EIGENFELD K. Controlling mechanical and physical properties of Al-Si alloys by controlling grain size through grain refinement and electromagnetic stirring[J]. The European Physical Journal Special Topics, 2013, 220(1): 139–150.
- [10] 李金涛, 许光明, 崔建忠, 雷 鹏. 电磁场对 5082 铝合金铸 轧板材组织的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2012, 41(2): 558-560.

LI Jin-tao, XU Guang-ming, CUI Jian-zhong, LEI Peng. Effect of electromagnetic field on microstructure of 5082 aluminum alloy sheet by roll-casting[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2012, 41(2): 558–560.

- [11] 赵啸林,毛大恒,陈欠根.将电磁场引入连续铸轧的新技术 探讨[J].中国有色金属学报,1995,5(4):145-149.
 ZHAO Xiao-lin, MAO Da-heng, CHEN Qian-gen. A new technique of introducing electromagnetic field to continuous cast rolling[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1995, 5(4): 145-149.
- [12] ESKIN G I. Broad prospects for commercial application of the

ultrasonic (cavitation) melt treatment of light alloys[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2001, 8(3): 319–325.

- [13] ESKIN G I, ESKIN D G. Production of natural and synthesized aluminum-based composite materials with the aid of ultrasonic (cavitation) treatment of the melt[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2003, 10(4/5): 297–301.
- [14] MAO Da-heng, ZHANG Yun-fang, NIE Zhao-hui, LIU Qiao-hong, ZHONG Jue. Effects of ultrasonic treatment on structure of roll casting aluminum strip[J]. Journal of Central South University of Technology, 2007, 14(3): 363–369.
- [15] 潘秋红,黄瑶,温晓静,王雷刚,刘 囝. 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, WANG Lei-gang, LIU Jian. Anisotropy of deep drawing commercial pure aluminum sheet[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2008, 28(2):87-90.

- [16] MISZCZYK M, PAUL H, DRIVER J H. Microstructure and texture evolution during annealing of plane strain compressed Al and Al-1%Mn alloy single crystals[J]. Archives of Metallurgy and Materials, 2011, 56(4): 933–938.
- [17] TANG Jian-guo, ZHANG Xin-ming, DENG Yun-lai, DU Yu-xuan, CHEN Zhi-yong. Texture decomposition with particle swarm optimization method[J]. Computational Material Science, 2006, 38(2): 395–399.
- [18] 毛大恒,赵苏琨,李建平,扶宗礼,石 琛. 冷轧变形量对电磁-超声铸轧铝板织构和性能的影响[J]. 材料工程, 2013, 58(6):12-17.

MAO Da-heng, ZHAO Su-kun, LI Jian-pin, FU Zong-li, SHI Chen. Effect of cold rolling reduction on text and properties of cast-rolled aluminum strip under electromagnetic and ultrasonic field[J]. Journal of Materials Engineering, 2013, 58(6): 12–17.

(编辑 陈卫萍)