

文章编号: 1004 - 0609(2006)07 - 1149 - 06

冲压铝板塑性应变比的在线检测技术^①

毛卫民¹, 马全仓¹, 冯惠平¹, 陈昌云², 李吉彬²

(1. 北京科技大学 材料学系 新金属材料国家重点实验室, 北京 100083;

2. 西南铝业(集团)公司 技术质量部, 重庆 401326)

摘 要: 采用 X 射线衍射法研究一种快速而准确地测定 3104 冲压铝板塑性应变比 r 值的技术。根据铝板的织构组分和极图的对称性可以大幅度地减少极图数据的检测量, 利用 X 射线面探测可以快速记录所需织构组分的关键数据, 进而计算出正态分布各织构组分的体积分数。利用初始单系滑移模型和 {123} <634> 织构组分体积分数可以快速而准确地计算出 3104 铝合金板的应变比(r) 值, 并兼顾到非织构因素的影响。

关键词: 冲压铝板; 织构; 塑性应变比 r 值; 在线检测

中图分类号: TG 113. 26

文献标识码: A

On-line determination technology on Lankford parameter of deep drawing aluminum sheets

MAO Wei-min¹, MA Quan-cang¹, FENG Hui-ping¹, CHEN Chang-yun², LI Ji-bin²

(1. State Key Laboratory for Advanced Metals and Materials, Department of Materials, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. Department for Technology and Quality, Southwest Aluminum (Group) Co. Ltd., Chongqing 401326, China)

Abstract: A rapid and accurate determination technology on Lankford parameter r of deep drawing 3104 aluminum sheets was investigated. The amount of pole figure data measured reduced drastically because of the pole figure symmetry. The necessary pole figure data were collected fleetly by the X-ray area detectors, the volume fraction of the texture components in Gaussian forms were obtained. According to the volume fraction of the {123} <634> texture, the r value of the 3104 aluminum sheets was calculated rapidly and accurately based on the initial single slip model, while some other effect factors beside texture were also included.

Key words: deep drawing aluminum sheet; texture; Lankford r value; on-line determination

铝板是被大量用以制造冲压构件的重要工程板材。有多种描述铝板冲压性能的技术指标, 其中铝板的塑性应变比 r 值是反映其深冲压性能的关键因素之一。在大规模自动化连续生产的冲压线上, 铝板冲压性能的好坏不仅影响到冲压构件的质量, 而且也直接影响冲压生产的效率。如果在生产效率极高的冲压线上因冲压件质量问题发生冲坏、报废并

卡住生产流程, 自动生产线就会被迫停机, 并需清障、维修。此时构件冲坏报废所造成的损失远远低于自动生产线被迫停机造成的经济损失。因此铝板冲压生产企业要求现代铝板加工企业能够全程地确保铝板的冲压性能。常规的离线、破坏式实验室检测铝板冲压性能的方法已经无法满足上述要求。如果能在生产线上快速、连续、无损地检测冲压铝板

① 基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(2003AA331080); 国家自然科学基金资助项目(50171014)

收稿日期: 2005 - 12 - 27; 修订日期: 2006 - 03 - 06

通讯作者: 毛卫民, 教授; 电话: 010-62333600; E-mail: wmmao@mater.ustb.edu.cn

诸如塑性应变比 r 值等技术参数,就可以在某种程度上发挥对铝板产品冲压性能的全程保障作用,因此此相关技术一直是人们努力探索和开发的内容。

研究表明,由于铝的冲压性能会受到铝板内织构的影响^[1, 2],尤其是其塑性应变比各向异性在很大程度上受制于铝板织构^[3]。因此铝板 r 值在线检测技术可以体现为织构的快速检测技术,以及根据检测到的织构数据来计算铝板 r 值的技术^[4]。在线检测织构以及在线计算 r 值的关键均在于同时实现高测算精度和速度。早期的织构在线检测技术主要注重提高测量的速度,所采用的半导体 X 射线探测器技术只能同时探测十几个衍射数据^[5, 6],因此不可能实现在线测量所需要的高精度^[7]。在 r 值计算方面,现有的诸如利用 Taylor 和 Sachs 塑性变形理论^[8, 9]以及各种修正理论均可用来计算板材的 r 值^[8, 10]。各种理论有各自的适用范围,目前人们并不清楚哪一种理论更适用于用作冲压铝板 r 值的计算与预测。

最近对退火薄铝板织构测量技术的研究表明,如果能够掌握所测板材的织构类型,并采用二维 X 射线探测系统,则有可能在确保测量精度的前提下,大幅度缩减必要的检测数据量和检测时间,满足在线织构检测技术对精度和速度的要求^[11]。如果能够选择适当的塑性变形模型^[8, 10, 12],就可以做到以实测织构为基础快速而准确地计算 r 值。

1 实验

选用国产及进口 3104 成品铝板,检测板面上与轧向夹角分别为 0° 、 45° 和 90° 时的 r_0 、 r_{45} 和 r_{90} 值,表1所列为国产及进口 3104 成品铝板 r 值的测量结果。测量各铝板 $\{111\}$ 、 $\{200\}$ 、 $\{220\}$ 不完整

表 1 3104 铝板 r 值的测量结果

Table 1 Measured r values of 3104 aluminum sheets

Sheet	r_0		r_{45}		r_{90}	
	Measured	Average	Measured	Average	Measured	Average
Domestic	0.493	0.486	0.956	0.965	1.043	1.075
	0.479		0.890		1.187	
			1.048		0.996	
Imported 1	0.511	0.475	1.169	1.154	1.451	1.300
	0.440		1.174		1.169	
			1.121		1.280	
Imported 2	0.489	0.415	0.914	0.862	1.258	1.214
	0.341		0.895		1.170	
			0.776			

极图,并计算其取向分布函数和反算完整极图。图 1 所示为国产铝板织构的取向分布函数 $\gamma_2 = 45^\circ$ 截面图及该截面图上重要取向的位置。由图 1 可看出,铝板中主要的织构组分为立方织构 $\{001\} \langle 100 \rangle$ 、黄铜织构 $\{011\} \langle 211 \rangle$ 、铜型织构 $\{112\} \langle 111 \rangle$; 另外板中还有 S 织构 $\{123\} \langle 634 \rangle$ 。图 2(a) 所示为国产 3104 成品铝板的 $\{200\}$ 、 $\{111\}$ 反算完整极图。图 2(a) 中以符号标出了各织构组分的位置。

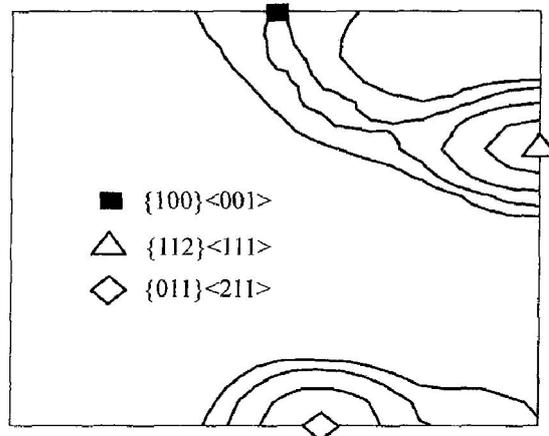


图 1 国产 3104 铝板织构的取向分布函数 $\gamma_2 = 45^\circ$ 截面图

Fig. 1 Section diagram of ODF of domestic 3104Al sheet at $\gamma_2 = 45^\circ$
(Density level: 1, 2, 4, 8)

2 3104 冲压铝板织构的快速测算

获得一张极图通常需要测量一千多个衍射数据,计算一个取向分布函数则需要几千个衍射数据。因此实验室测量铝板织构是非常耗时的过程。图 2 所示为国产铝板的反算完整极图及各织构组分位置。由图 2 可看出,由于金属晶体和轧板自身的对称性^[11],诸多织构组分的密度会在极图内多次

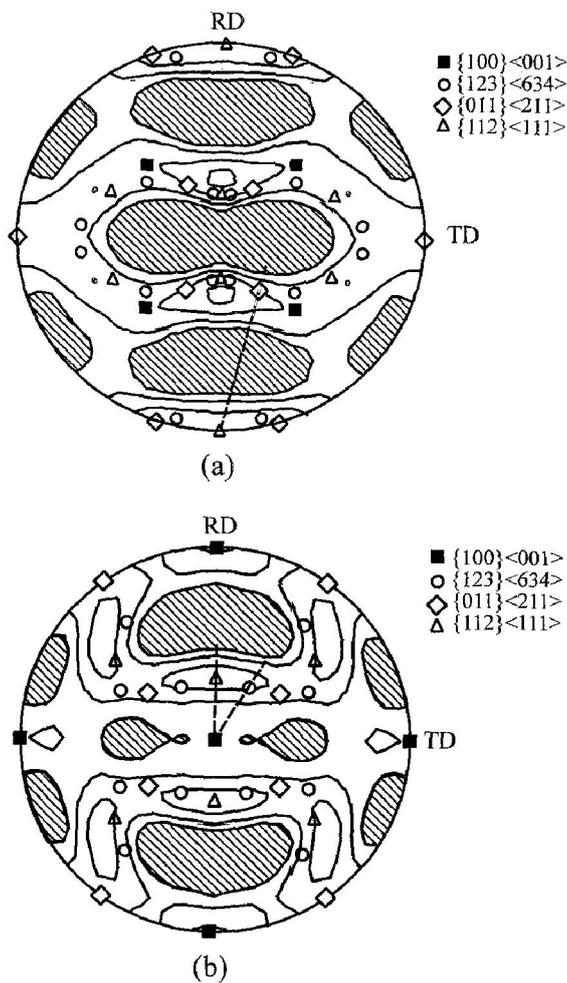


图 2 国产铝板的反算完整极图及各织构组分位置
Fig. 2 Re-computed pole figures and positions of texture components of domestic sheet
 (Density level: 0.5, 1, 2, 4)
 (a) $\{111\}$ pole figure; (b) $\{200\}$ pole figure

重复出现。如果按照各织构组分在极图内的对称性, 只测量一组密度分布数据, 就可以减少检测数据量, 加快检测速度, 进而在确保测量精度的情况下大幅度降低检测数据量^[11]。由图 2(b) 可看出, 极图中心到轧向 (RD) 所连接的虚线正好跨越了冲压板 $\{100\} \langle 001 \rangle$ 和 $\{112\} \langle 111 \rangle$ 织构组分的一个密度分布峰。若使图 2(b) 所示极图中心到轧向 (RD) 所连接的虚线绕极图中心向横向 (TD) 偏转 30° 角后, 可获得 $\{100\} \langle 001 \rangle$ 和 $\{123\} \langle 634 \rangle$ 织构组分的一个密度分布峰。同理, 沿图 2(a) 所示的 $\{111\}$ 极图中的虚线用 X 射线透射法可测得 $\{112\} \langle 111 \rangle$ 和 $\{011\} \langle 211 \rangle$ 织构组分的一个密度分布峰。图 3 所示为图 2(b) 所示极图中心到自 RD 向 TD 偏转 30° 角方向连线上的极图密度分布 (空心符号)。设各织构组分的密度围绕其中心位置呈正态分布, 分布函数 f 为:

$$f = f_0 \cdot \exp \left[-\frac{(\alpha - \alpha_0)^2}{\phi_0^2} \right] \quad (1)$$

式中 f_0 为织构组分中心位置的密度分布函数值, α 为偏离极图中心的偏转角; α_0 表示织构组分中心位置的偏转角; ϕ_0 表示正态分布函数的散布宽度。如图 3 虚线所示, 可用正态分布函数拟合出各织构组分的相对密度分布, 且使得表示各拟合分布值之和的实线尽可能接近实际的极图密度分布。根据这种方法分别对国产及进口 3104 成品铝板沿图 2 所示各虚线上的密度分布作各织构组分正态分布拟合计算, 其中国产铝板的结果列于表 2。对各织构组分的正态分布函数在图 2 所示的极图范围内进行积分, 并作归一化处理。同时考虑到各织构组分的分布峰在图 2 所示极图中出现的次数^[11], 进而可以求出各织构组分的体积分数 φ , 列于表 2。

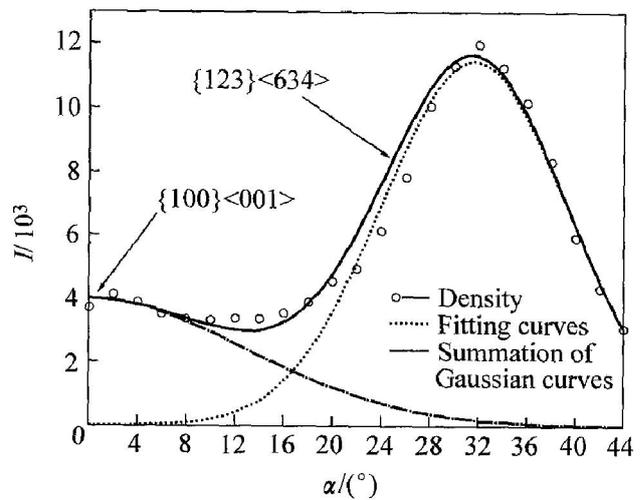


图 3 图 2(b) 中立方-S 织构连线的极图密度分布及拟合的正态分布曲线

Fig. 3 Density and fitting Gaussian curves along line of cube-S texture in Fig. 2(b)

考虑各织构组分的分布峰在图 2 所示极图中出现的次数以及各分布峰形如式(1)的正态分布形式, 可根据表 2 中各织构组分的 ϕ_0 和 φ 值叠加计算出相应的理论极图。图 4 所示为对国产 3104 成品铝板计算的 $\{111\}$ 和 $\{200\}$ 极图。根据类似原理也可以同时计算出试样的其他 $\{hkl\}$ 极图并计算相应的取向分布函数。对比图 2 和 4 可以发现, 二者的主要特征相同。在细节上二者虽有一些差别, 但图 4 仅用了表 2 中 ϕ_0 和 φ 值共 8 个参数就计算出了通常需要测量几千个数据才能获得的完整极图, 并获得了织构的主要特征, 说明在确保较高精度的前提下可以实现织构的快速检测。

表2 对3104铝板各织构组分的正态分布拟合计算结果

Table 2 Calculated results of texture components of 3104 sheet

Texture component	α_0	I_0	ϕ_0	φ %
{100} <001>	0°	4 174.99	14.90	10.60
{123} <634>	31.60°	11 435.41	10.77	42.38
{011} <211>	60.66°	14 768.04	12.16	20.89
{112} <111>	29.94°	11 531.70	9.95	26.13

I_0 —Value at center position; α_0 —Center position; ϕ_0 —Scattering width of distribution; φ —Volume fractions of components.

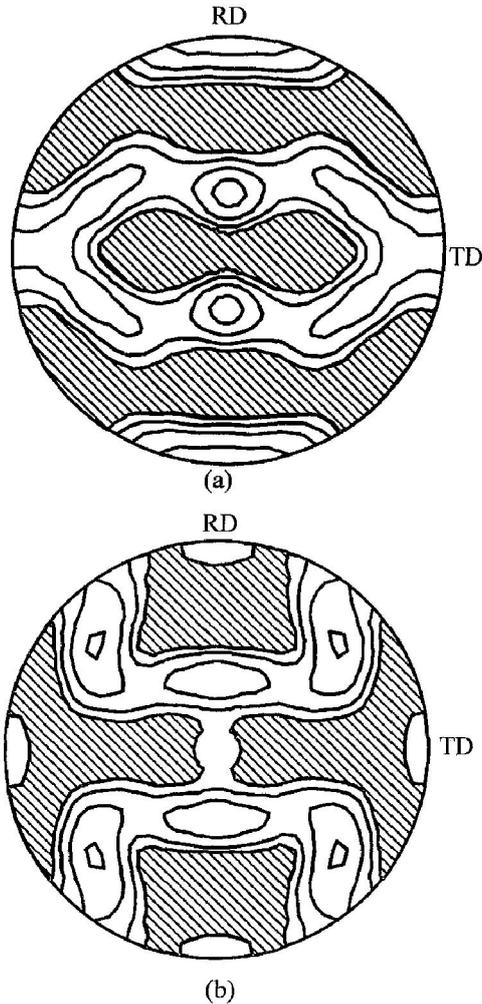


图4 国产铝板的快速测算完整极图

Fig. 4 Rapidly reproduced pole figures of domestic aluminum sheet (Level: 0.5, 1, 2, 4)

(a) —{111} pole figure; (b) —{200} pole figure

按照上述原则,实现织构的快速检测的关键在于快速获得沿图2虚线的分布密度值。研究表明^[11],X射线二维面探测器刚好可以同时记录到沿极图一条线上的密度值,如果设置三个面探测器就可以同步获得如图2所示3条虚线上的密度值。如此只需几秒钟就可以完成面探测器检测,并拟合计算出 ϕ_0 、 φ 等参数。

3 3104 冲压铝板 r 值的快速计算及相应在线检测技术

在利用铝板织构计算 r 值的过程中除了各织构组分的体积分数之外,还需要运用适当的塑性变形理论。3104 成品板的拉伸延伸率很低,因此需采用初始单系滑移模型^[13]以计算各织构取向的初始正应变分量,进而得出不同方向的理论 r 值,记为 R_{ij} 。其中下标 $i=1$ 表示 r_0 、 $i=2$ 表示 r_{45} 、 $i=3$ 表示 r_{90} ;下标 j 则表示不同织构组分的序号, $j=1$ 表示 {001} <110>、 $j=2$ 表示 {123} <634>。表3所列 {001} <100>和 {123} <634>织构组分对 r 值贡献的初始单系滑移模型计算值,同时也给出了各3104成品铝板中各 {001} <100>和 {123} <634>织构组分的体积量。其中,表3中的织构组分的体积分数 φ 只检测了如图3中的一条线,计算出了结果,并针对这两个织构组分进行了归一化处理。对比理论 r 值和实测 r 值(表1)发现, {123} <634>织构组分是影响 r 值各向异性的主要织构组分,而 {001} <100>织构则会降低 r 值。分析与计算表明,其他织构组分对3104铝板 r 值的影响近似随机取向的影响。

如表3所列,按图3方式检测时 {123} <634>织构组分的散布宽度很大,其密度分布也较多地涉及了远离该织构中心位置的密度分布。{001} <100>织构的散布宽度更大(见图3和表3),接近随机取向分布。这些远离中心的密度分布对 r 值的贡献会明显偏离中心处密度对 r 值的贡献,大体应呈随机取向的特征。由此可见,在各织构组分体积分数中应划出远离中心的一部分,按随机取向处理。设各织构组分体积分数 φ 中有 $\phi_{0j}k_j$ 的分量($\phi_{0j}k_j = 0 \sim 1$)保持该织构组分的特征,而其余 $1 - \phi_{0j}k_j$ 的分量呈现随机取向的特征,则铝板各方向塑性应变比的计算值 r_i 应为

$$r_i = \sum_{j=1}^4 R_{ij} \varphi_j \phi_{0j} k_j + \sum_{j=1}^4 \varphi_j (1 - \phi_{0j} k_j) = 1 + \sum_{j=1}^4 (R_{ij} - 1) \varphi_j \phi_{0j} k_j \quad (2)$$

式中 $i=1$ 为 r_0 ; $i=2$ 为 r_{45} ; $i=3$ 为 r_{90} 。

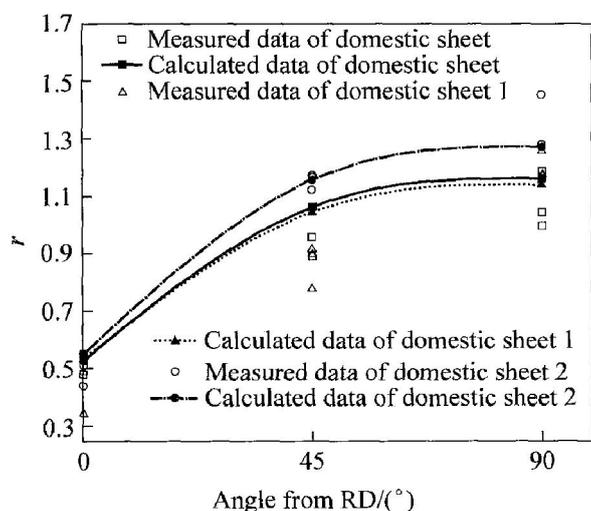
如果确定了各织构组分的 k_j 值,就可以参照表3的数据和式(2)计算出铝板的塑性应变比 r 值。目前,从理论确定 k_j 值仍是一个比较复杂的问题。实际上,铝板的 r 值不仅取决于铝板织构,而且也会受到一些非织构的其它冶金因素的影响;同时

表 3 3104 铝板主要织构组分体积分数及其对 r 值贡献的初始单系滑移模型计算值Table 3 Volume fractions of texture components and their contributions to r value based on initial single slip model

j	Component	R_{1j} (r_0)	R_{2j} (r_{45})	R_{3j} (r_{90})	Domestic sheet			Imported sheet 1			Imported sheet 2		
					φ_j	k_j	$\phi_{0j}/(^{\circ})$	φ_j	k_j	$\phi_{0j}/(^{\circ})$	φ_j	k_j	$\phi_{0j}/(^{\circ})$
1	{001} <100>	0	0	0	0.20	0	18.26	0.21	0	19.18	0.14	0	14.56
2	{123} <634>	0.18	1.80	2.10	0.80	0.061	10.77	0.79	0.053	11.07	0.86	0.051	10.29

实际的检测设备和检测条件也会影响所检测织构量的精度。因此可以采用回归统计计算 k_j 值的办法避开理论计算的复杂性, 并大概计算了 r 值过程中不确定非织构因素的影响。由此看来, 在实施冲压铝板 r 值在线检测操作之前需要有一个 k_j 值的预先确定步骤。该步骤包括预先测定所需在线检测的冲压铝板若干塑性应变比的实测值, 并参照式(2)回归计算出 k_j 值。根据各 3104 铝板的实测 r 值(表 1)和试样的织构数据, 参照式(2)所回归计算出的 k_j 值列于表 3。可以发现用不同 3104 铝板回归计算出{001} <100>织构的 k_1 值均为 0, 表明{001} <100>织构的作用也接近与随机取向晶粒的作用; 而{123} <634>织构的各 k_2 值非常接近。

如果把{001} <100>织构的 k_1 值确定为 0, 把{123} <634>织构的 k_2 值确定为 0.055, 即可参照本文方式实现同类待测 3104 冲压铝板 r 值的在线检测。图 5 所示为实验 3104 冲压铝板塑性应变比 r 的实测值, 以及所确定的 k_j 值(0、0.055)和式(2)快速计算出的 r 值。由此可以看出, 尽管各 3104 铝板的实测 r 值与快速测算的 r 值有一定差异, 但所有快速计算的 r 值大体落入实测值的波动范围, 说

图 5 3104 铝板塑性应变比 r 的实测值与快速计算值Fig. 5 Measured and rapidly calculated r values of 3104 aluminum sheets

明所回归的 k_j 值较好地包容了不确定的非织构因素对 r 值的影响。在 k_j 值的预先确定过程中, 如果增加实测 r 值及实测织构的数量及统计性, 则有利于提高 k_j 值的可信度和对 r 值测算的精度。有了高可信度的 k_j 值就可以在无 r 值实验室检测的情况下, 对同类冲压铝板产品实施在线检测。

4 结论

根据 3104 冲压铝板成品以{123} <634>织构组分为影响冲压 r 值各向异性关键因素的特点, 以及各织构组分在极图上多次重复出现的规则, 可以在保证极图精度的基础上大幅度地减少极图数据的检测量。同时利用二维面探测器记录极图数据量大及其记录数据的 X 射线衍射几何特点, 可一次性记录到确定 3104 冲压铝板极图所需的关键数据, 并利用正态分布函数模型换算成{123} <634>织构组分的体积分数。

利用金属塑性变形的初始单系滑移模型可以根据所检测到的{123} <634>织构组分体积量快速而准确地计算出相应铝板的 r 值, 计算值可完全落入实测值的波动范围, 相关的计算也可以兼顾到一些非织构因素对铝板 r 值的影响。

REFERENCES

- [1] Blade J C. The cube texture in aluminum and its roles in the control of earing[J]. J Australian Institute of Metals, 1967, 12(1): 55 - 63.
- [2] 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.
MAO Weimin. Crystallographic Texture and Anisotropy of Metal Materials[M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [3] Rodrigues P M B, Bichel H, Furrer P. Cube Texture in Aluminum Sheet and Foil Products[M]. Warrendale, Pennsylvania, USA: The Metallurgical Society, 1984. 45 - 59.

- [4] 马全仓, 毛卫民, 冯惠平. 工业铝板的低应变量拉伸变形行为[J]. 塑性工程学报, 2005, 12(6): 89-93.
MA Quar cang, MAO Wei min, FENG Hui ping. Tensile behavior of commercial aluminum sheets at low deformation degree[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2005, 12(6): 89-93.
- [5] Böttcher W, Kopineck H J. Über ein Röntgentexturmeßverfahren zur Zerströpfungsfreien on-line Bestimmung Technologischer Kennwerte von Kaltgewalzten Stahlbändern[J]. Stahl u. Eisen, 1985, 105: 509-516.
- [6] Kopineck H J, Löffel R, Otten H B. Industrial on-line texture determination in rolled sheet strips[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 1993, 12(1): 13-19.
- [7] 毛卫民, 余永宁, 李波涛. 极图数据与板材织构信息[J]. 北京科技大学学报, 1995, 17(5): 434-438.
MAO Wei min, YU Yong-ning, LI Bo-tao. Pole figure data and the texture information of sheets[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 1995, 17(5): 434-438.
- [8] Hirsch J, Lücke K. Mechanism of deformation and development of rolling texture in polycrystalline FCC metals[J]. Acta Metallurgica, 1988, 36: 2863-2927.
- [9] Ma Q C, Mao W M, Feng H P. Tensile behavior of AA3104 aluminum sheets at low deformation degree[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2005, 12(5): 422-426.
- [10] Mao W M. Modeling of rolling texture in aluminum[J]. Materials Science & Engineering, 1998, A257: 171-177.
- [11] 毛卫民, 陈冷, 杨平, 等. 退火铝板织构 X 射线快速检测原理[J]. 科学通报, 2004, 49(20): 2128-2129.
MAO Wei min, CHEN Leng, YANG Ping, et al. Rapid texture measurement of annealed aluminum sheet based on X-ray diffraction[J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(20): 2128-2129.
- [12] Mao W M, Yu Y N. Effect of elastic reaction stress on plastic behavior of grains in polycrystalline aggregate during tensile deformation[J]. Materials Science & Engineering, 2004, A367: 277-281.
- [13] 马全仓, 毛卫民, 冯惠平. 3104 深冲铝板织构对初始 R 值的影响[J]. 北京科技大学学报, 2004, 26(1): 78-81.
MA Quar cang, MAO Wei min, FENG Hui ping. Influence of texture on initial r -values of deep drawing 3104 aluminum sheet[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2004, 26(1): 78-81.

(编辑 李艳红)