

非均匀轧制铝板中的织构^①

毛卫民^②

(北京科技大学)

摘 要

分析了在大压下量冷轧变形时铝板中应力状态的变化规律,多滑移系组合启动的过程以及随之引起的剪切结构的形成原因。研究表明,大压下量使冷轧铝板在承受正常轧制应力的同时又承受了明显的切应力。随着附加切应力的增加,正常轧制织构即 $\{112\}\langle 111 \rangle$, $\{123\}\langle 634 \rangle$, $\{110\}\langle 112 \rangle$ 和 $\{110\}\langle 001 \rangle$ 逐渐减弱;而剪切结构,即 $\{000\}\langle 110 \rangle$ 以及 $\{111\}$ 纤维织构不断增强。还讨论了这两种结构的内在联系。

关键词: 非均匀变形, 铝, 织构

早就知道,在不同变形几何条件下冷轧铝板时织构状态也会随之发生变化。很多研究表明铝板在轧制过程中存在不同程度的不均匀变形^[1, 2],这种不均匀变形主要表现为随着向板心靠拢而发生重大变化。因此有人主张利用轧制几何参数,例如 l/h 关系来表述不均匀变形的程度^[1, 2]。但这些研究都没有清楚地解释不均匀变形的更详尽的规律和物理原因。

研究变形过程中晶粒取向的变化及织构的形成是揭示变形不均匀性的一个重要方法,而取向分布函数(ODF),即取向密度分布则是分析织构最有力的手段。这一方法尚很少用于研究变形的不均匀性。理论分析表明^[3,4,5],均匀变形的冷轧铝板中,所形成的正常织构是 $\{110\}\langle 112 \rangle$, $\{123\}\langle 634 \rangle$, $\{112\}\langle 111 \rangle$ 和 $\{110\}\langle 001 \rangle$ 等,而非均匀变形铝板中会出现的织构为 $\{001\}\langle 110 \rangle$ 以及 $\{111\}$ 晶面平行于轧面的纤维织构^[2]。织构组分的改变会对铝板及铝箔的性能产生很大影响,本文将分析大压下量变形的冷轧铝板中各种结构的形成以及

相互关系。

1 实验

具有工业纯度的铝锭(99.9%Al)热轧后取样。两次循环分别从三个方向对试样镦压25%,500℃10min中间退火。然后再循环分别从三个方向对试样依次镦压25%,15%,10%,5%,使变形量渐低并进行500℃15min最终退火。这一处理的目地首先是希望得到细晶组织,其次是希望得到无初始结构的轧制试样。处理后测得平均晶粒尺寸约为96μm,而且试样中无明显的初始结构。3.63mm厚的试样在机油润滑的条件下经三道次冷轧后板厚为0.46mm,其压下量分别为1.59mm,1.02mm和0.56mm。用 S 值表示至试样中心的距离,当 $S=1$ 时为试样表面层,当 $S=0$ 时为试样中心层。将冷轧试样放入50℃的NaOH溶液中逐层侵蚀,并逐层测量试样的 $\{111\}$, $\{200\}$, $\{220\}$ 和 $\{113\}$ 极图,然后由此用

①于1991年9月20日收到;

②副教授

Bunge 级数展开法计算取向分布函数, 同时修正可能出现的误差^[7]。

2 结果

图1给出了表达冷轧铝板各层织构的取向分布函数 $\varphi=45^\circ$ 截面图。图1a还标出了一些重要取向的位置。由图1可以看出, 随着S值的升高, 铝板中正常的冷轧织构 $\{112\}<111>$, $\{110\}<112>$ 和 $\{110\}<001>$ 不断减少, 而 $\{001\}<110>$ 织构以及由 $\{111\}<110>$ 和 $\{111\}<112>$ 为代表的 $\{111\}$ 纤维织构逐渐增多, 说明铝板轧制过程中存在着明显的不均匀变形。图2所示取向线 ($\varphi_1=90^\circ$, $\varphi_2=45^\circ$, $\Phi=0\sim90^\circ$ 称为 τ 取向线) 上的取向密度更清楚地显示了铝板中织构由中心至表面的上述变化规律。图2中 Φ 角的变化表示该取向线上晶粒取向绕轧板横向的转动。铝板中如 $\{123\}<634>$ 等其它织构组分的变化规律也和 $\{112\}<111>$ 相同。

3 讨论

在正常轧制过程中轧缝中的铝板主要承受三向压应力。去除对塑性变形没有影响的静水压力后, 则铝板所受主应力状态可简化表示成

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix}$$

其中 $\sigma_1>0$ 为轧向拉应力, $\sigma_3<0$ 为板法向压应力。在这种应力状态下多晶铝板中会生成 $\{112\}<111>$, $\{123\}<634>$, $\{110\}<112>$ 以及 $\{110\}<001>$ 织构组分。在压下量很大的轧制变形过程中, 轧辊把轧板带入辊缝时会对轧板表面施加一个很大的切应力。铝板变形抗力低, 容易实现高压下量轧制, 轧板表面强烈切应力的作用将明显改变晶粒的变形行为。图1c所示的织构也可以称为剪切织构, 因为在剪应力作用下的扭转变形实验中生成的织构也

属于这种类型^[2]。

铝是高层错能面心立方金属, 其塑性变形的机制是位错滑移。图3给出了图2所示 τ 取向线上各取向在正常轧制应力作用下最容易启动的8个滑移系的取向因子。由于这个取向线在取向空间的对称性^[6], 这8个滑移系的取向因子两两相等。图3中A、B、C和D所示曲线分别代表两个滑移系取向因子的变化情况, 因此轧制变形时滑移系也往往是成对启动。图3还注明各滑移系启动时晶体取向变化的方向, 从中可以看出 $\Phi=35^\circ$, 即 $\{112\}<111>$ 处由于B、C四个滑移系的交替启动造成了晶粒取向的稳定。多晶铝冷轧量 τ 取向线上实际的稳定取向并不在 $\Phi=35^\circ$ 处, 而是偏向 $\Phi=30^\circ$ 附近(图2)^[3, 4]。细致计算表明, B滑移系启动时造成的取向变化较小, 但却产生一定的切应变^[8], 这种切应变会受到近邻其它取向晶粒的阻碍, 如果这时的取向变化称为正向变化, 其相应的切应变称为正切应变, 则C滑移系启动时会造成较大的负取向变化和相应的负切应变。当晶粒取向偏向 $\Phi=30^\circ$ 时(图3), B滑移系因其取向因子较高而承受比取向因子小的C滑移系更高的滑移量。这样两类滑移系交替启动使总切应变明显降低, 同时也造成了正负取向变化大致抵消, 从而使晶粒取向在 $\Phi=30^\circ$ 附近稳定下来。这一解释也被理论模拟所证实^[3]。出于这个原因, 图2, 3所示的 τ 取向线上正常轧制条件下实际稳定的晶粒取向 ($\Phi\approx30^\circ$), 与取向 $\{001\}<110>$ 和 $\{111\}<112>$ 之间的距离已接近相等, 约为绕横向转 $\pm30^\circ$ 。

大压下量轧制变形时铝板不仅承受通常的 σ_1 和 σ_3 两个应力, 而且同时会承受一个轧面上沿轧向附加的切应力。这个切应力促使通常的主应力状态绕横向转动, 这时如仍想观察主应力状态下的织构则需将轧板绕横向转一定的角度再测其织构。这当然比较困难。分析图3可知, 根据晶粒取向相对于轧向不同的方位附加的切应力会促成晶粒变形过程的两种取向变化。一方面它会促使C滑移系启动而造成晶

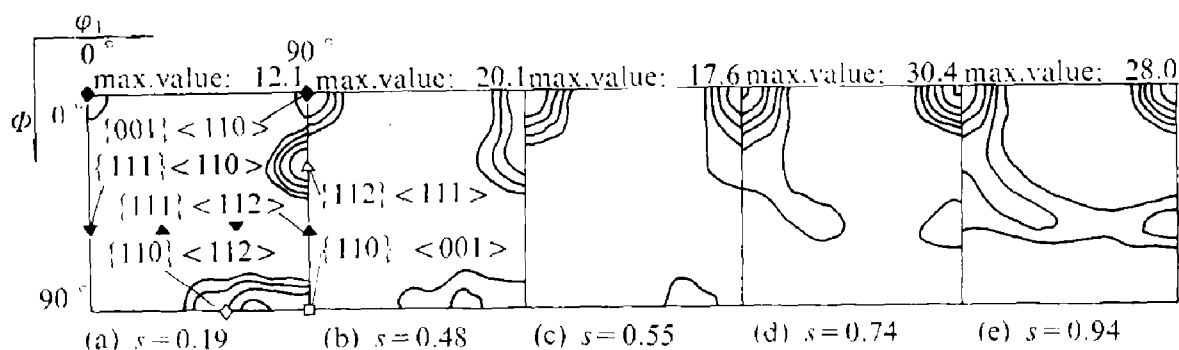


图1 非均匀变形铝板的冷轧组织(取向分布函数 $\phi_2 = 45^\circ$ 截面)

密度水平: 2, 4, 7, 12, 20, 30.

粒取向转向低 ϕ 角处, 以至引起 A 滑移系猛然启动使晶粒取向到达 $\{001\} \langle 110 \rangle$ (图 2); 另一方面它也会促使 B 滑移系多启动而造成晶粒取向转向高 ϕ 角处, 以至引起 D 滑移系猛然启动使晶粒取向很快到达 $\{111\} \langle 112 \rangle$ (图 2)。这样就形成了实际观察到的剪切结构, 其中 $\{001\} \langle 110 \rangle$ 织构较强而 $\{111\} \langle 112 \rangle$ 织构较弱 (图 1e)。这可能是因为 A 滑移系取向因子比 D 滑移系高 (图 3), 易于被切应力激活所致。进一步分析表明, 大压下量不均匀轧制时其它正常织构组分也会发生类似的分解现象。

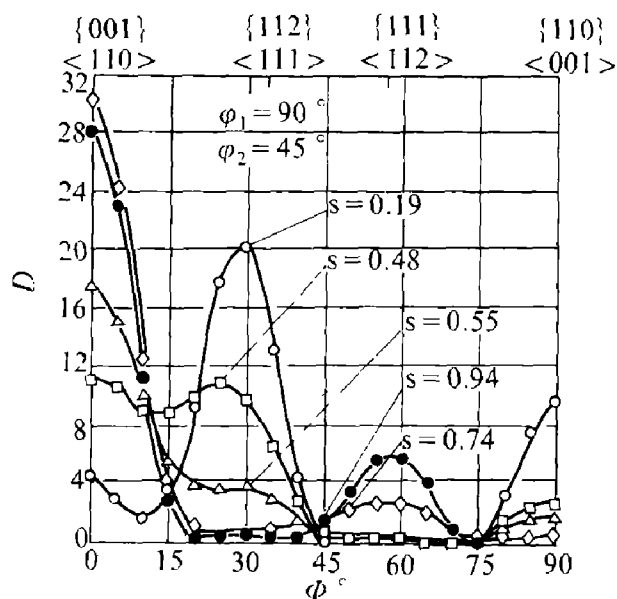


图2 τ 取向线上的取向密度 D

基于上述设想, 将铝板中心附近 $s = 0.19$ 处正常的 $\{112\} \langle 111 \rangle$, $\{123\} \langle 634 \rangle$, $\{110\} \langle 112 \rangle$, $\{110\} \langle 001 \rangle$ 等各织构组分的 75% 绕横向转 -30° (如 $\{112\} \langle 111 \rangle$ 转至 $\{001\} \langle 110 \rangle$ 附近), 将其余的 25% 绕横向转 $+30^\circ$ (如 $\{112\} \langle 111 \rangle$ 转至 $\{111\} \langle 112 \rangle$ 附近, 参见图 3)。然后根据这些转动的织构组分, 借助高斯模型^[7, 9]计算出理论取向分布函数, 最后将算出的取向分布函数与轧制铝板表面附近 $S = 0.94$ 处的织构比较。图 4 给出了轧板 $S = 0.94$ 处取向分布函数的 ϕ_2 截面图组 (图 4a), 参见^[10]及由 $S = 0.19$ 处织构如上转动 $\pm 30^\circ$ 后计算出来的取向分布函数的 ϕ_2 截面图组 (图 4b)。由图 4 的比较可见二者几乎完全一致, 这说明上述分析基本合理。

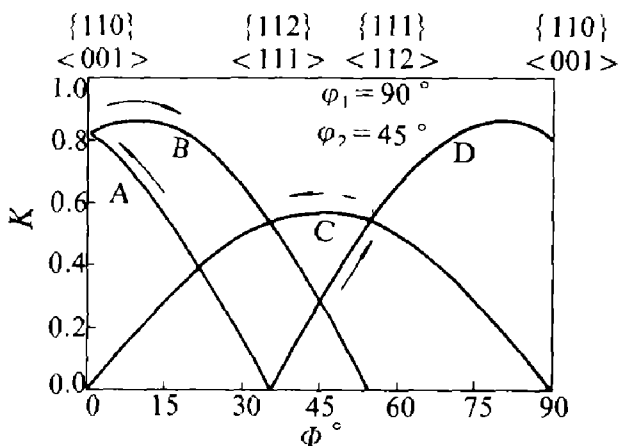


图3 τ 取向线上各滑移系的取向因子 K

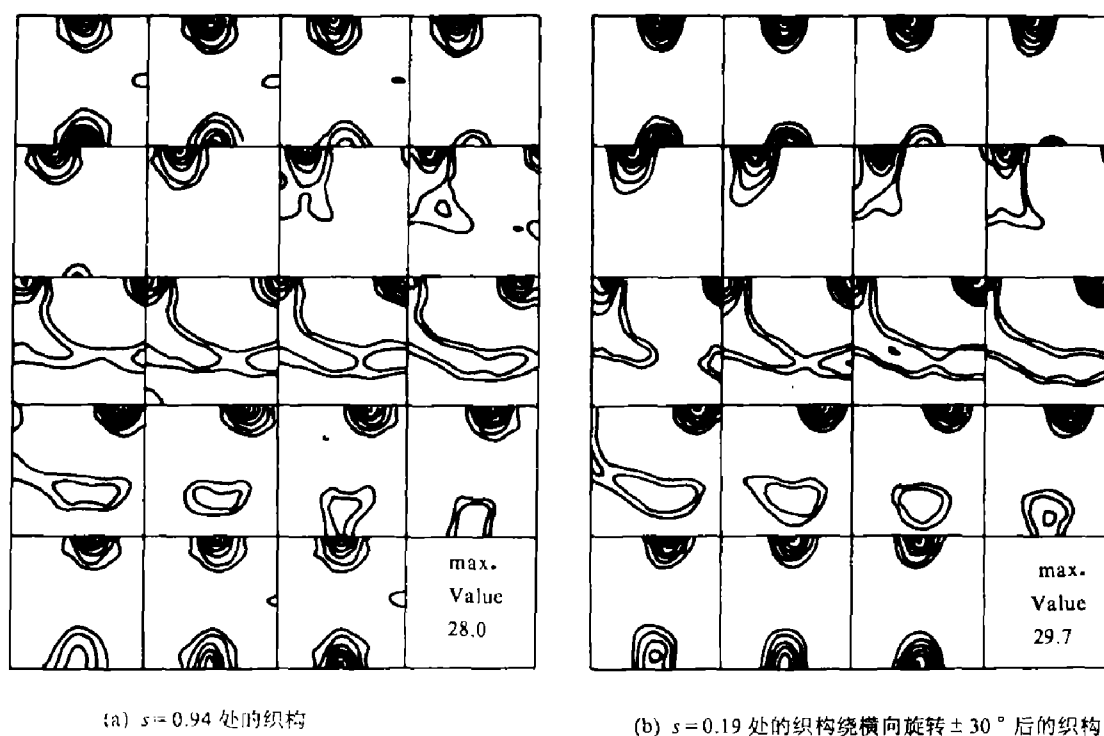


图4 正常冷轧织构与剪切织构关系(取向分布函数 φ_2 截面图组)

密度水平: 1.5, 3, 9, 15, 20, 26

图2所示的取向密度变化表明轧板表面附近切应力最大, 并在轧板中心附近基本消失。图3所示 τ 取向线上滑移系启动所引起的取向因子变化及晶粒取向的变化表明, 除了 $\{112\} \langle 111 \rangle$ 之外, 在 $\{001\} \langle 110 \rangle$ 处A与B滑移系的取向因子一样大, 但取向变化相反, 因而它们的启动会使晶粒取向在 $\{001\} \langle 110 \rangle$ 处呈现某种稳定性。同样C、D滑移系也会在 $\{111\} \langle 112 \rangle$ 附近造成类似的稳定性。这一分析与图2所示的取向密度变化相符。另外当切应力增加(即S值升高时), $\{112\} \langle 111 \rangle$ 上的取向密度不是逐渐沿 τ 取向线向两侧移动, 而是在 $\{001\} \langle 110 \rangle$ 以及 $\{111\} \langle 112 \rangle$ 附近取向密度上升的同时逐渐消失(图2)。这说明大压下量轧制变形时 $\{001\} \langle 110 \rangle$ 与 $\{111\} \langle 112 \rangle$ 之间的其它取向没有很高的稳定性。

4 总结

本文研究了大压下量不均匀轧制时铝板内

的应力状态及织构组态。结果表明, 大压下量造成的附加切应力沿板法线向轧板中心层递减。切应力使轧板内主应力状态绕横向转动, 促使塑性变形时启动的滑移系也作相应的调整, 从而使正常的具有 $\{112\} \langle 111 \rangle$, $\{123\} \langle 634 \rangle$, $\{110\} \langle 112 \rangle$ 和 $\{110\} \langle 001 \rangle$ 等稳定取向的晶粒绕横向转至 $\{001\} \langle 110 \rangle$, 或者绕横向转动使其 $\{111\}$ 面趋向平行于轧面。这就是剪切织构的形成过程。这一过程是不连续的, 即在 $\{001\} \langle 110 \rangle$ 及 $\{111\}$ 纤维织构增强的同时, 其它正常的冷轧织构在原位逐渐减弱, 这标志着上述两类织构是由非常不同的滑移系组合启动所造成的。切应力很大的轧板表面只生成由 $\{001\} \langle 110 \rangle$ 和 $\{111\}$ 纤维织构组成的剪切织构。

参考文献

- 1 Asbeck H O, Mecking H. Met. Sci. Eng., 1978, 34 (1): 111

(下转 P93)

连铸连轧、多线、高速、连续退火等技术正在推广应用。还有生产冷凝管、空洞管、水箱管、大管棒等专业化生产线。天线管已全部使用焊管法生产。焊接管具有成本低、壁厚均匀、同心度好、周期短、成品率高等特点。焊管机配有纵切剪、园盘拉伸机和精整设备等,可生产 $d3-d25$ mm 焊接管。改革开放以来各工厂还引进了油压机、盘管拉伸机、联合拉拔机、焊管机列、光亮退火炉等先进设备。

5 发展趋势

我国铜加工技术发展的总趋势是: 在坚持独立自主、自力更生的基础上, 注意引进和消化国外的先进生产技术, 不断推进技术进步, 生产更多质量更好的产品, 满足国内外市场需求, 提高企业的经济效益和社会效益。

1 继续扩大品种、提高产品质量

90 年代的铜加工工业, 将以扩大品种、提高产品质量并扩大出口为主要目标。重点发展电站用冷凝管, 建筑用铜材和水道管, 汽

车、拖拉机用超薄水箱袋, 电子工业用高精度带材及高技术发展的各种高精尖产品; 同时, 注意发展国内外市场所需要的量大、面广的铜加工材。注意引进和消化国外先进技术, 开发新型合金品种, 提高产品和尺寸精度、表面质量和使用性能, 不断地扩大出口, 开发国际市场;

2 合理利用资源、发展深度加工制品。充分利用各种再生金属及残次料, 提高再生铜在铜消耗中的比例, 降低金属原料的耗损率。利用生产中的边角料, 生产适合国内外市场需求的深度加工制品;

3 提高铜加工企业的经营管理水平, 推广适合国情的行之有效的各种现代化管理方法。使用微机进行企业经营活动的分析, 使企业管理水平不断提高。铜加工企业将更加重视对国内外铜材市场的调查, 为用户提供优良的服务条件; 还应结合我国的实际情况, 吸收国外先进的企业管理经验, 使铜加工业继续地向前发展。

(上接 P89)

- 2 Trszkowski W, Krol J, Major B. Met. Trans., 1980, 11A: 749
- 3 Hirsch J, Mao W, Lücke K. Aluminium Technology 3. London: Institute of Metals, 1986, 70
- 4 毛卫民, 北京科技大学学报, 1990, 12(1): 32
- 5 Mao W, Chin J. Met. Sci. Technol., 1991, 7 (2): 101
- 6 Bunge H J. Quantitative Texture Analysis, Oberursel:

DGM-Informationsgesellschaft, 1981, 1

- 7 Lücke K, Pospiech J, Virnich K H, Jura J. Acta. Metall., 1981, 29: 167
- 8 Hirsch J, Lücke K. Acta. Metall., 1988, 36, 2883
- 9 Mao W, Chin J. Met. Sci. Technol, 1981, 7(4): 296
- 10 Gottstein G. Rekristallisation metallischer Werkstoffe. Oberursel: DGM-Informationsgesellschaft, 1984, 174