

文章编号: 1001-4322(2006)01-0081-04

多辊轧机冷轧技术在靶材料制备中的应用*

李朝阳, 谢 军, 吴卫东, 唐永建, 陆晓明, 杜 凯, 郑凤成

(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 叙述了多辊轧机轧制金属薄膜原理, 以 Ti 膜制备为例, 借助多辊轧机冷轧技术进行 1.5 μm 厚钛薄带的制备工艺研究。对薄膜的特性测试结果表明: 工作辊的表面粗糙度对于轧制薄膜的表面粗糙度的影响很大, 降低工作辊表面的粗糙度可以得到粗糙度为 25.2 nm 的金属薄膜。

关键词: 多辊轧机; 冷轧; 表面粗糙度; 惯性约束聚变(ICF)

中图分类号: TG33 **文献标识码:** A

在惯性约束聚变(ICF)物理实验中经常要使用到从低原子序数(低 Z)到高原子序数(高 Z)的金属薄膜材料, 例如低 Z 的铝、中 Z 的钼以及高 Z 的钽等金属的薄膜材料。尤其是研究金属材料在高温高压下的状态方程中^[1-4], 需要使用厚度只有几至几十 μm , 密度达到晶体理论密度, 且具有极高表面质量(表面粗糙度小于 50 nm, 厚度一致性好于 99%)的金属薄膜。常用的金属薄膜的制备方法包括蒸发镀膜、磁控溅射沉积、脉冲激光气相沉积(PLD)、电镀、化学镀等^[5]。这些方法得到的金属薄膜密度最高可以达到晶体理论密度的 90%, 无法满足物理实验的需要。采用精密的车削加工以及机械研磨方法加工金属薄膜, 可以获得具有晶体密度的金属薄膜, 但精密的车削技术如单点金刚石车削^[6](single point diamond turning, SPDT)在车削大面积的厚度小于 10 μm 的金属薄膜时存在着厚度一致性难以得到保证、加工应力大等困难。采用冷轧技术制备金属薄膜是目前晶态理论密度薄膜制备的一个发展方向。轧制是使材料在旋转着的圆柱状上下轧辊之间通过并减少厚度的金属加工方法^[9]。轧制前后材料的密度、纯度以及化学成分不发生变化。轧制加工的优点是可以加工较大面积的厚几 μm 的金属薄膜, 其效率高, 并能获得很好的尺寸精度和面形精度, 是一种有效的高质量的晶体密度金属薄膜制备手段。

本工作借助于多辊轧机冷轧技术进行金属薄膜的制备工艺研究, 以 Ti 膜制备为例, 获得了满足实验要求的厚度在 μm 级、低粗糙度的 Ti 金属薄膜, 并对薄膜的物性进行了测量。

1 多辊轧机轧制金属薄膜的原理及其特点

1.1 轧制的基本原理以及多辊轧机的发展过程

接近轧件头尾端的变形是非稳定变形, 而在其他部分, 沿轧件前进方向上条件没有急剧的变化, 变形条件不随时间而改变, 故为稳定状态。大致稳定地塑性加工金属的方法还包括拉拔和挤压, 但轧制时由于加工材料的工具(轧辊)旋转, 工具与材料间相对滑动显著减小, 且摩擦产生的热可以被有效地冷却, 所以可以进行极高速的加工, 也是适于大量生产的方法。

较厚的板材在轧制的过程中轧制金属的前后两端可以不施加张力就可以进行稳定的轧制, 但是随着金属板材继续变薄需要在轧制金属箔带材的前后两端加上一定的张力来保持轧制过程的稳定。冷轧最初就是在简单的 2 辊、4 辊轧机上进行的, 对于极薄带材(也即箔材)需要越来越大的需求, 但是原有的轧机不能满足。这样便出现了新型结构的轧机——多辊轧机^[8]。开始是 6 辊轧机, 但由于工作辊径的减小受到两支撑辊间隙尺寸的限制, 以及操作不方便而未被推广。之后发展为 12 辊与 20 辊轧机以及具有更多轧辊的多辊轧机。

本研究中使用的多辊轧机是一套具有 32 辊辊系, 其辊系排布示意图如图 1 所示。图中最大两根轧辊为主传动辊, 辊径为 $\phi 65$ mm, 辊面宽度为 60 mm; 最小的两根轧辊为工作辊, 辊径为 $\phi 2.2$ mm, 辊面宽度为 70 mm; 两个工作辊之间为所轧制的金属薄膜。32 辊冷轧机所使用的工作辊辊径范围为 3.5~2.0 mm, 辊面宽度为 70 mm, 原料厚度要小于 50 μm , 宽度不大于 45 mm。32 辊冷轧机进行金属薄膜轧制时, 需要对轧制张力进行精确控制, 本轧机的设计轧制极限为 1.5 μm 。

* 收稿日期: 2005-09-05; 修订日期: 2005-11-30

基金项目: 国家 863 计划项目资助课题

作者简介: 李朝阳(1975—), 男, 硕士, 助研, 主要从事 ICF 靶材料研究; lizhaoyng@yahoo.com.cn.

1.2 多辊轧机的特点

多辊轧机最大的特点之一就是使用小直径的工作辊。辊径与带材厚度的关系式^[8]为

$$D = \frac{0.28Eh_{\min}}{\mu(K - \sigma)} \quad (1)$$

式中： D 为工作辊径，mm； E 为轧辊弹性模量，kg/mm²； h_{\min} 为带材最小厚度，mm； μ 为带材与轧辊之间的摩擦系数； $K = 1.15\sigma_s$ ，kg/mm²， σ_s 为轧制带材的屈服强度； σ 为带材张力产生的应力， $\sigma = (\sigma_0 + \sigma_1)/2$ ，kg/mm²， σ_0 为后张力， σ_1 为前张力。由(1)式可以看出，允许轧制带材的最小厚度与轧辊的直径成正比。这样就可以用多辊轧机轧制出 4 辊轧机轧制不出来的更薄的带材。工作辊径小，总的轧制力就小。轧辊的弹性压扁减小，因而每个轧程的总压下量可以增大。此外，当轧制力相同时，与 4 辊轧机相比，用小辊径的多辊轧机的道次压下量增加，最大可达 80%。由于多辊轧机具有塔形的支撑辊系，具有整体铸造机架，刚性很好。一般冷轧机的轧辊仅通过辊颈传递轧制力，而多辊轧机最外层支持辊(轴承)通过鞍座把轧制力均匀地传递给机架，轧辊整个长度上都承受轧制力，加之有特殊的辊型调整系统，轧辊挠度很小，因而可获得高精度的成品。由于变形区小，摩擦阻力小，带材的宽展也随之减小，便会减少某些材料裂边的趋势。轧机体积小，重量轻。

1.3 多辊轧机轧制中影响轧制薄膜厚度和表面质量的因素

轧制力以及轧制的前后张力和轧制速度对于所轧制金属薄膜的厚度都有较大影响，其中前后张力的大小对于轧制过程的稳定程度以及薄膜的板形影响较大。后张力如果太小，金属薄膜在通过轧辊时就会碎裂掉，尤其是在使用小直径的工作辊进行轧制的情况下碎裂现象更加严重。前张力如果太小则会使轧制薄膜的两边出现波浪，前张力如果太大则会在轧制的过程中将金属薄带拉断。

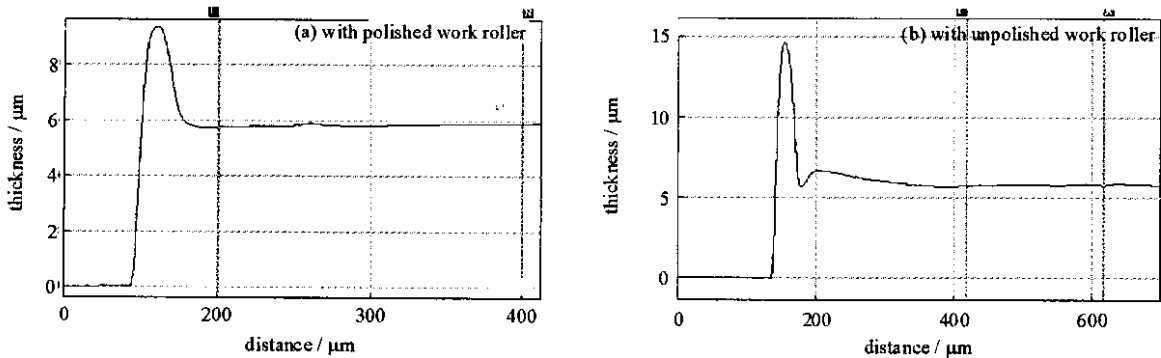


Fig. 2 Roughness of rolled Ta film along rolling direction

图 2 轧制钽箔沿轧制方向的表面粗糙度

多辊轧机轧制金属薄膜的过程中对于金属薄膜表面质量影响较大的因素有轧辊的表面质量、导辊的表面质量、两端张力卷筒的表面质量以及轧制润滑油的清洁程度和整个轧制环境的清洁程度等等。在金属薄膜的后续热处理过程中，退火工艺对轧制薄膜的表面质量的影响也较大。

在影响薄膜表面粗糙度的诸多因素中，工作辊表面的粗糙度对于轧制金属薄膜的表面粗糙度的影响最大，其中对于垂直于轧制方向的金属薄膜表面粗糙度影响明显。如图 2 所示是使用 Alpha-step500 台阶仪测量的厚度为 6 μm 左右钽箔沿轧制方向的表面粗糙度情况。图(a)是使用抛光过的工作辊轧制出的钽箔，其平均厚度为 5.82 μm ，均方根粗糙度为 25.2 nm，面上峰谷极差 T_{ir} 为 167.5 nm(测量范围 200 μm)；图(b)是使用未抛光的工作辊轧制出的钽箔，其平均厚度为 5.78 μm ，均方根粗糙度为 33.1 nm，面上峰谷极差 T_{ir} 为 112.5 nm(测量范围 200 μm)。可以看出使用抛光过的工作辊和未抛光的工作辊轧制出来的钽箔在沿轧制方向上的表面粗糙度差别不大。

图 3 所示为使用 Alpha-step500 台阶仪测量的厚度为 6 μm 左右钽箔垂直轧制方向的表面粗糙度情况。图 3(c)是使用抛光过的工作辊轧制出的钽箔，其平均厚度为 5.53 μm ，均方根粗糙度为 62.3 nm，面上峰谷极差 T_{ir} 为 275 nm(测量范围 200 μm)；图(b)是使用未抛光的工作辊轧制出的钽箔，其平均厚度为 5.84 μm ，均方

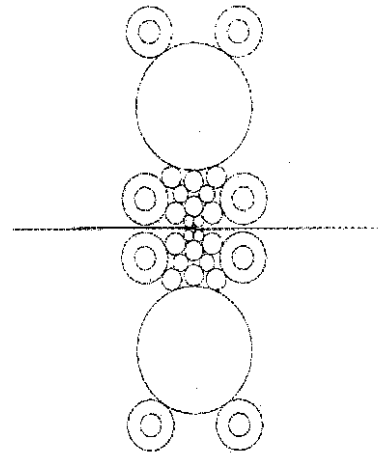


Fig. 1 Roller system of 32 high rolling mill

图 1 32 辊轧机辊系排布示意图

根粗糙度为 169.8 nm, 面上峰谷极差 T_{ir} 为 632.5 nm (测量范围 200 μm)。可以看出使用抛光过的工作辊比使用未抛光过的工作辊轧制出来的钽金属膜在垂直轧制方向的粗糙度明显要小很多。这说明轧辊的表面粗糙度对于轧制出的金属薄膜的表面粗糙度有很大的影响。

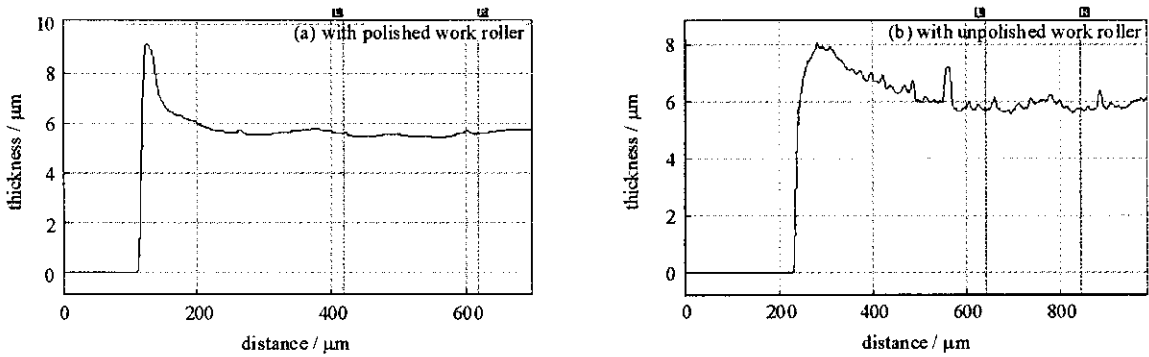


Fig. 3 Roughness of rolled Ta intercepting rolling direction

图 3 轧制钽箔垂直轧制方向表面粗糙度

2 多辊轧机轧制技术在 ICF 靶材料制备中的应用

2.1 轧制金属铜箔

作为中 Z 的铜, 其薄膜材料在 ICF 靶制备中应用较多。铜具有良好的延展性能, 但是它的强度相对较低, 在很薄的时候对于轧机的张力稳定性要求很高。通过多辊轧机的轧制, 可以将原料厚度为 50 μm 的无氧铜箔轧制到 2.34 μm 的厚度。现今已经轧制出了厚度值在 2.34 ~ 50 μm 范围内的多种规格厚度的金属铜薄膜。图 4 是向上海激光等离子体研究所提供的厚度为 15 μm 左右的金属铜膜的表面粗糙度的台阶仪测量值, 所使用的台阶仪为 Alpha-step500 台阶仪。台阶仪测量铜薄膜的厚度平均值为 14.46 μm , 均方根粗糙度为 58.8 nm, 面上峰谷极差 T_{ir} 为 402.5 nm (测量范围 200 μm)。

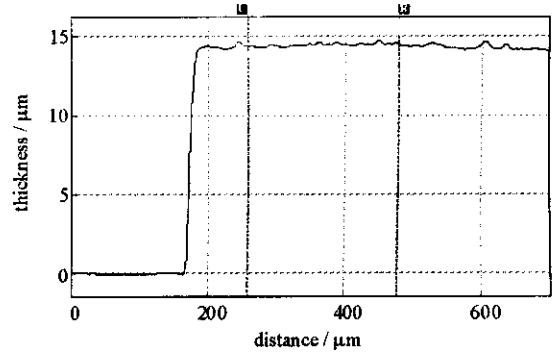


Fig. 4 Roughness of rolled Cu film

图 4 轧制铜膜的表面粗糙度

2.2 轧制金属铝薄膜

金属铝薄膜在 ICF 靶材料中也得到了广泛的应用。铝的延展性也很好, 但是铝的强度很低, 厚度在 5 μm 时, 在前后张力的作用下, 铝薄膜就很容易断裂而不能继续轧薄。已经用原料厚度为 115 μm 的高纯铝薄膜轧制出了最薄为 5 μm 的铝薄膜。厚度范围在 5 ~ 80 μm 的多种规格厚度的铝薄膜已经被轧制出来并用于实验中。

图 5 是使用 Alpha-step500 台阶仪测量的轧制铝薄膜的表面粗糙度情况。测量结果显示铝薄膜的平均厚度为 7.6 μm , 其均方根粗糙度为 28.4 nm, 面上峰谷极差 T_{ir} 为 190 nm (测量范围 460 μm)。

2.3 轧制的其它金属材料薄膜

使用多辊轧机已经轧制出了最薄为 6 μm 的钼薄膜、厚度为 1.5 μm 的钛薄膜和厚度小于 5 μm 的钨薄膜。这些薄膜已经用于相应的 ICF 靶的制备工作中, 其中由于钼材料的硬度较高, 轧制出来的表面粗糙度较大, 还需要进一步摸索其轧制工艺、退火工艺和轧辊的表面质量, 以便改善钼薄膜的表面粗糙度情况。

可以将某些金属材料轧制到 1.5 μm 厚度, 我们可以轧制钛箔厚度达到 1.5 μm 以下, 图 6 是轧制的厚度小于 1.5 μm 的钛箔 Alpha-step500 台阶仪测得的厚度和表面粗糙度结果, 其平均厚度约为 1.43 μm , 均方根粗糙度约为 38.2 nm, 面上峰谷极差 T_{ir} 约为 184.6 nm (测量范围 250 μm)。

3 结 语

多辊轧机冷轧技术在金属薄膜的制备中有着独特的优点, 能够很好地控制轧制出薄膜的厚度和表面粗糙度, 在 ICF 靶制备中具有重要的作用, 已经轧制的铜、铝等材料能很好地满足 ICF 物理实验的需要。还有很多

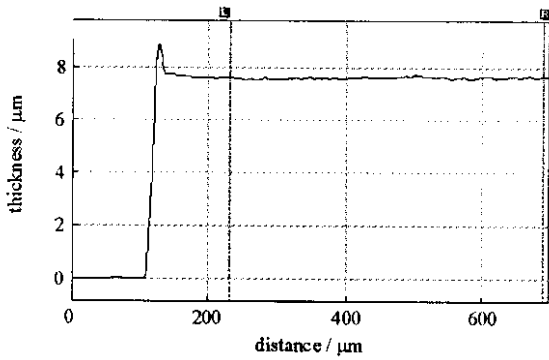


Fig. 5 Roughness of rolled Al film

图 5 轧制铝膜的表面粗糙度

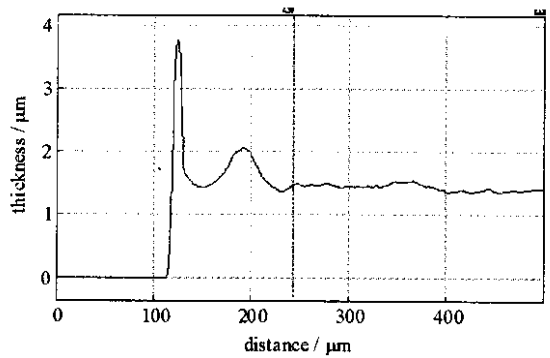


Fig. 6 Roughness of rolled Ti film

图 6 轧制钛膜的表面粗糙度

种金属薄膜材料的轧制工艺以及相应的热处理工艺还有待我们进一步摸索,努力拓展多辊轧机在 ICF 金属靶材料制备中的应用范围。

参考文献:

- [1] Godwal B K, Kaushik T C, Sikka S K. Equations of state in laser shock simulations[J]. *Laser and Particle Beams*, 1997, **15**(3): 353-365.
- [2] Batani D, Bossi S, Benuzzi A, et al. Optical smoothing for shock-wave generation: application to the measurement of equations of state[J]. *Laser and Particle Beams*, 1996, **14**(2): 211-223.
- [3] Koenig M, Faral B, Boudenne J M, et al. Relative consistency of equations of state by laser driven shock waves[J]. *Phys Rev Lett*, 1995, **74**(12): 2260-2263.
- [4] Evans A M, Freeman N J, Graham P, et al. Hugoniot EOS measurements at Mbar pressures[J]. *Laser and Particle Beams*, 1996, **14**(2): 113-123.
- [5] 杜凯, 郑凤成, 谢军. 机械研磨法制备晶体密度钼膜技术研究[J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17**(6): 879-882. (Du K, Zheng F C, Xie J. Preparation of Mo film with theoretical density by lapping. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(6): 879-882)
- [6] 谢军, 黄燕华, 吴卫东, 等. 单点金刚石切削技术在 ICF 靶制备中的应用[J]. *原子能科学技术*, 2005, **39**(3): 274-277. (Xie J, Huang Y H, Wu W D, et al. Application of single point diamond turning technology in the field of ICF target fabrication. *Atomic Energy Science and Technology*, 2005, **39**(3): 274-277)
- [7] 王国栋, 吴国良. 板带轧制理论与实践[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1990. (Wang G D, Wu G L. Theory and practice in plate rolling. Beijing: China Railway Publishing House, 1990)
- [8] 李耀群, 佟大瑞. 多辊轧机冷轧技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1978. (Li Y Q, Tong D R. Technology of cold rolling in multi-high mill. Beijing: Metallurgical Industrial Press, 1978)

Application of multi-high cold-rolling mill in the target materials fabrication

LI Zhao-yang, XIE Jun, WU Wei-dong, TANG Yong-jian,
LU Xiao-ming, DU Kai, ZHENG Feng-cheng

(Research Center of Laser Fusion, CAEP, P. O. Box 919-987, Mianyang 621900, China)

Abstract: Principles of cold rolling with multi-high cold-rolling mill are introduced in this text and Titanium film with thickness less than $1.5 \mu\text{m}$ has been made with the 32-high cold-rolling mill. The roughness of the rolled film is closely associated with the roughness of the work roller. Thin film with roughness of 25.2 nm has been made with the roughness lower of the work roller. The technology of cold-rolling with multi-roller mill has been used in the fabrication of target materials as Cu, Al, etc.

Key words: Multi-high cold-rolling mill; Cold-rolling; Surface roughness; Inertial confinement fusion