

DOI: 10.3901/JME.2011.16.035

柱形件在边角受压下的三向起皱行为*

何伶俐^{1,2} 张 坤¹ 王明星¹ 陈光南¹

(1. 中国科学院力学研究所先进制造工艺力学重点实验室 北京 100190;
2. 中国科学院研究生院 北京 100190)

摘要: 塑性失稳、分叉引起的起皱是材料加工和成形工艺中的常见现象,起皱的出现将影响零部件的成形质量和性能。已有的工作主要集中在一维和二维的起皱行为,为对开模挤压成形初期以及某些低刚度零件的装配过程中出现的三向起皱现象有更深入的认识,设计一种通过改变锥模角度以获得皱曲特征的试验方案,得到局部应力集中下的三向皱曲形貌,描述各个方向起皱的特点,系统地分析锥模角度和试样晶粒大小对皱曲的影响。结果表明:柱面凸起高度、凸起距离和起皱波延伸距离随挤压角度的增大而增大;端面凸起高度和起皱波长、延伸距离均随着挤压角度的增大先增加后减小,凸起距离随角度增大单调减小;波长越长时对应起皱延伸越远;试样表面层晶粒越大,起皱波长和延伸距离越大,起皱形貌越明显。

关键词: 柱形件 挤压 应力集中 塑性变形 起皱

中图分类号: TB125

Three-dimensional Wrinkling of Cylinders under Edge Compression

HE Lingrong^{1,2} ZHANG Kun¹ WANG Mingxing¹ CHEN Guangnan¹

(1. Key Lab of Mechanics in Advanced Manufacturing, Institute of Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190;
2. Graduate University, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

Abstract: Wrinkling caused by plastic instability and bifurcation is a common phenomenon in the material forming process, which can affect the forming quality and performance of the parts. Existing work mainly focuses on one or two dimensional wrinkling. Actually, three dimensional wrinkling will be found in the early stage of open extrusion process or assembling process for some low-stiffness materials. Combining the feature of drawing and extrusion, a new experiment program is proposed to detect wrinkling characteristic through changing the mould angle. The wrinkling features in each direction are described and the influences of the angle of conical die and the grain size of specimen on the wrinkling are analyzed systematically. The result shows that the height and distance of protrusion on the cylindrical surface and the extension length of wrinkling wave all increase with the increase of extrusion angle. Different from that, when the angle goes up, the height of protrusion, the wavelength and the extension length of the wrinkling on the bottom surface first increase and then decrease, and the protrusion distance on that surface only decreases. The longer the wavelength is, the farther the corresponding wrinkling extension will be. The larger the grain size of specimen surface is, the greater the wrinkling wavelength and the extension distance, and the more obvious the wrinkling morphology will be.

Key words: Cylinders Extrusion Stress concentration Plastic deformation Wrinkling

0 前言

在材料加工和成形工艺中存在塑性失稳现象,即当材料所载荷达到某一临界值后,即使载荷下降,塑性变形还会继续。压缩引起的塑性失稳主要表现为坯料的弯曲和起皱。起皱的出现将影响零部件的残余应力分布,从而影响其成形质量和性能。

许多学者对成形过程中的起皱现象进行了研

究^[1-4]。李恒等^[1]总结了薄壁件在塑性成形过程中常见的起皱现象,DE MAGALHÃES 等^[2-4]分别研究了深拉成形、板带受压、内高压成形时构件的整体起皱现象。已有研究表明起皱特征的影响因素是多方面的,如几何参数、边界条件、材料的刚度参数、弹性模量和屈服强度等。

除了试验研究,还可以通过数值计算方法建立合理的有限元模型,有效地模拟起皱行为^[5-7]。在理论分析方面,黄涛等^[8]指出,韧性材料在大塑性变形后出现的起皱现象是由于材料发生分叉导致的。此外,CERDA 等^[9]从能量的角度统一分析了自然界

* 国家自然科学基金(50901084)和中国博士后科学基金(20090460537)资助项目。20100929 收到初稿,20110331 收到修改稿

中常见的起皱现象,包括塑性成形中板料、管材等薄壁结构的整体起皱,以及热障涂层粘结层的皱曲^[10]、苹果表面由于果肉干燥引起的皱缩、皮肤的皱褶^[9]等当基体厚度较大时只发生在表面的起皱现象,给出了起皱波长、振幅与有效弹性基体刚度的关系。

已有的研究工作主要集中在一维应力场的皱曲如板料单向压缩引起的起皱以及剪切等二维应力场引起的起皱现象^[9]。事实上,在开模挤压成形^[11]初期以及某些低刚度零件的装配过程中,在边角处都有可能发生较大塑性变形和三向皱曲。而这种特征有可能被随后的材料流动大变形所掩盖,在挤压工艺初期,起皱还可能出现在死区且受临界锥角的影响^[11]。因此,为了对三向起皱的特点有更清晰的认识,本文通过试验考察了圆柱形样件在三向压应力状态下,圆周边角由于应力集中引起的变形特征,分析了在特定压入距离和不同锥模角度下的三向皱曲现象。

1 试验方法

试验装置如图1所示,基座为硬质合金的锥模,锥角 2α 的值从 30° 到 150° 变化。锥模上方的圆盘起固定作用,以免试样在受载时滑动。圆柱试样为半径8 mm,高12 mm的LY12铝合金,底面圆周与锥模接触。

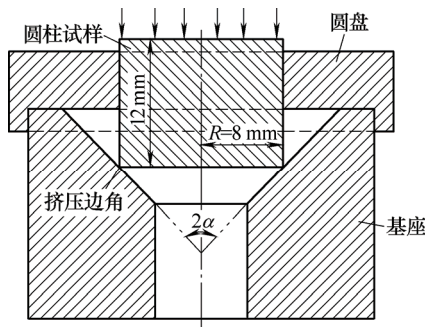


图1 试验装置示意图

采用材料表面形貌性能联合测试系统进行挤压试验,以 0.05 mm/min 的速度加载至位移为 $500\text{ }\mu\text{m}$,保持20 s,然后以 0.01 mm/min 的速度卸载。考察在圆柱上表面受均匀压力、压入深度 $500\text{ }\mu\text{m}$ 的情况下挤压边角的变形特征以及锥模角度和晶粒大小对变形的影响。

典型的载荷位移曲线如图2所示。当锥角为 30° 时,残余深度最大,这是因为角度越小,塑性变形行为更接近于塑性成形的挤压现象。随角度增加,残余深度变小。当锥角为 180° 时,为墩粗行为,最

大载荷达到 20 kN 时残余塑性变形仍然很小。

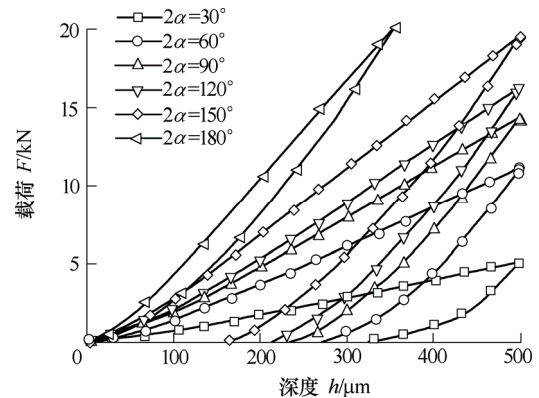
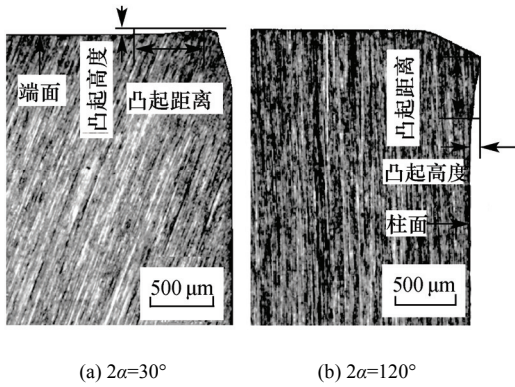


图2 不同挤压角下压入载荷 F 与深度 h 关系的试验曲线

2 凸起形貌

试样在受压后局部起皱形貌的出现与试样端面和柱面的凸起特征密不可分,试验观察得知,皱曲均发生在凸起区域,当柱面或端面内凹时没有明显起皱特征。这是因为当柱面凸起时,凸起局部区域在 y 向受到的压应力远大于当其内凹时受到的作用力;端面凸起时, r 向压应力亦远大于当其内凹时的力。而起皱是局部压应力作用下产生屈曲并出现后屈曲大变形的宏观表现^[1],只有压应力达到塑性失稳临界值才可能出现,因此当应力集中的边角内凹时压应力较小,起皱特征不明显。

如图3所示,定义在卸载以后试样柱面或端面被挤出的最高点相对于平面部分的高度为凸起高度,从最高点到平面与凸起的过渡点的距离为凸起距离。试验结果显示,试样端面凸起高度随着挤压角度的增大先增加后减小,柱面则是单调增加后趋向于平衡。这是因为对于试样端面,当挤压角度较小时,接触面与柱面接近平行,端面上的局部应力集中效应不明显;随着角度的增大,挤压力在端面半径 r 方向的分量先增大后减小;锥角为 60° 时试样端面产生了明显的塑性凸起;当角度大于 75° 时,随着压入的深入,试样端部与模具接触面积增大,凸起因受到抑制而减弱;锥角为 180° 时试样端面与模具密实接触,接触端部不会有凸起形貌。对于试样的柱面,同样随着挤压角度的增大柱面的接触面逐渐减小,材料在柱面的塑性流动得到逐步的释放,凸起幅度增大;当挤压角度为 60° 时,试样柱面也会出现明显的塑性凸起;锥角为 180° 时短柱整体受压,为墩粗行为,试样中间鼓肚,因此柱面凸起不会随着挤压角度的增大而无限增加,最后将趋于平衡。



(a) $2\alpha=30^\circ$ (b) $2\alpha=120^\circ$

图 3 试样端面与柱面的凸起形貌

从图 4 可以看出，试样端面的凸起距离随着挤压角度的增大而减小；柱面凸起距离随着挤压角度单调增加。当挤压角度 $2\alpha=30^\circ$ 时，柱面不再突出；角度增大到 90° 以上时，端面不再有向外凸起的形貌。

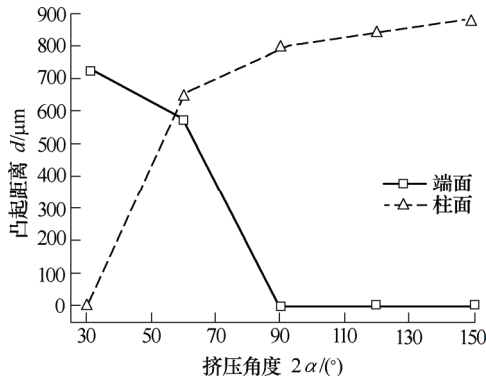


图 4 试样端面和柱面的凸起距离 d 随挤压角度 2α 的变化

3 三向起皱现象

试验中在试样的凸起部位出现了三个方向的起皱特征，波长方向分别为试样端面半径 r 方向、柱面环向(θ)以及柱面轴向(y)，而皱曲延伸方向与之垂直，如图 5 所示，左侧为试样端部受压边角所取的单元体，图 5 中 l_{Pr} 、 $l_{P\theta}$ 、 l_{Py} 分别为各方向起皱特征的延伸长度。

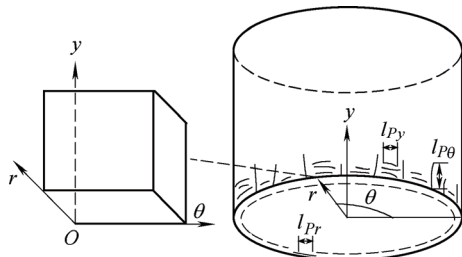
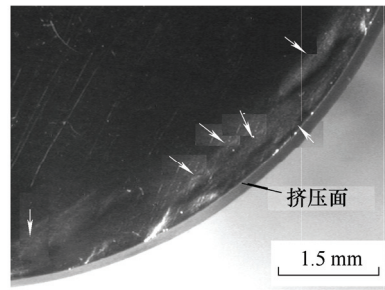


图 5 圆柱试样三向起皱及边角处单元体示意图

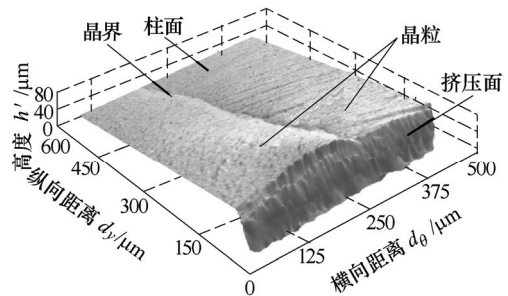
3.1 挤压角度的影响规律

试验发现，当压入深度 $500 \mu\text{m}$ 再卸载以后，出现了与凸起形貌对应的皱曲行为，三个方向的典型皱曲特征如图 6 所示，其中图 6a 为体式显微镜照

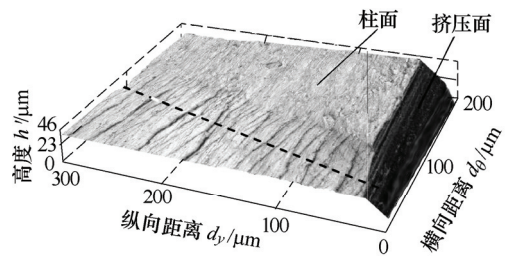
片，图 6b、6c 为激光显微镜照片。当挤压角度为 30° 和 60° 时在圆柱试样端面出现了波长方向与半径方向一致的平滑的皱曲现象，如图 6a 所示，箭头所指为起皱形貌；当挤压角度为 60° 、 90° 、 120° 和 150° 时在试样柱面出现明显起皱，挤压角度为 30° 时柱面内缩。柱面周向皱曲突变明显，受制于晶粒晶界的变动，出现了晶界凹陷(图 6b)、晶界凸起、波长长短不一的晶粒起伏等多种方式；而从图 6c 可知，除了在端面半径方向和柱面环向的皱曲以外，柱面轴向也有出现在晶粒内部的皱曲行为，其起皱形貌较小且受初始表面粗糙度影响明显。端面半径方向以及柱面环向皱曲波长在 $50\sim 340 \mu\text{m}$ ，而柱面轴向皱曲波长均在 $10 \mu\text{m}$ 以内。另外，皱曲延伸距离随锥模挤压角度和波长的增大均增加。



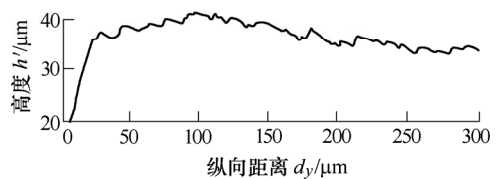
(a) 端面半径方向的起皱($2\alpha=30^\circ$)



(b) 柱面环向的起皱 ($2\alpha=90^\circ$)



(c) 柱面轴向的起皱($2\alpha=90^\circ$)

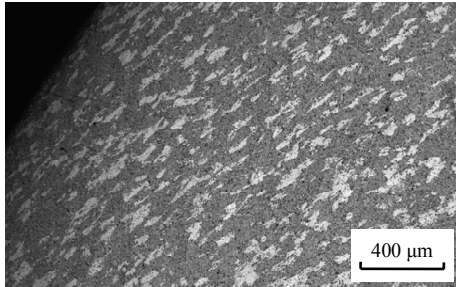


(d) 柱面轴向起皱的轮廓线(图6c中虚线所示)

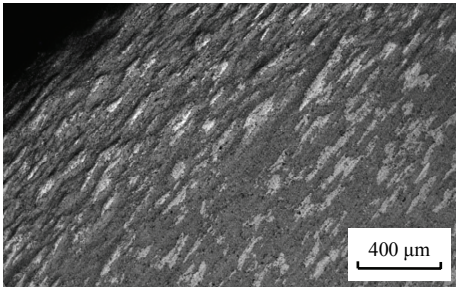
图 6 试样各方向典型的起皱形貌

3.2 晶粒大小的影响

采用晶粒从大到小的 A、B、C 三组试样, 其端面外围晶粒平均直径分别约为 2 041 μm 、230 μm 和 97 μm 。对于 C 组试样, 挤压锥角为 60° 时, 其端面起皱前后的激光显微镜照片如图 7 所示(图 6 为 A 组试样的变形图)。从图 7 中可以看出端面的皱曲受制于晶粒的起伏。



(a) 试样端面挤压前的形貌



(b) 试样端面挤压后的形貌

图 7 试样端面挤压起皱前后的激光显微镜照片

图 8 为材料晶粒大小对起皱形貌影响的分布情况, 对每组试样分别提取了挤压角度为 30° 和 60° 时的 5 组数值。起皱波长 λ 通过测量表面起皱宽度获得, l_p 为起皱波在端面的传播或渗透长度。从图 8 中的结果可以看出, 起皱波的形貌大小不一, 但是从整体上看, 试样表面晶粒越大, 波长与渗透长度均增加, 起皱形貌越明显。

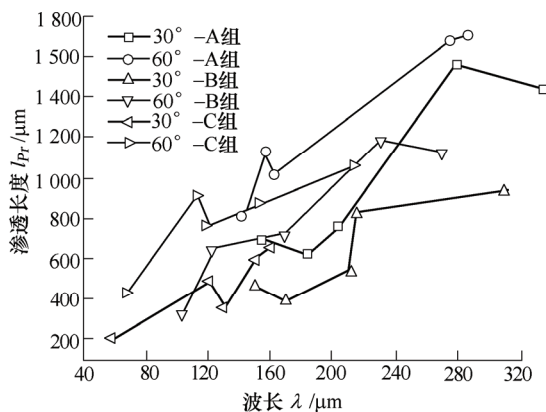


图 8 挤压角度为 30° 和 60° 时试样晶粒大小对端面皱曲特征的影响

采用拉格朗日乘子考虑约束的影响^[9]

$$F = E_B + E_C - \Gamma \quad (1)$$

式中, F 为求极值的函数, E_B 、 E_C 分别为弯曲应变能和压缩应变能, Γ 为与约束有关的函数。在图 5 所示的三向起皱下

$$E_B = E_{B_r} + E_{B_\theta} + E_{B_y} \quad (2)$$

$$E_C = E_{C_r} + E_{C_\theta} + E_{C_y} \quad (3)$$

式中, E_{B_r} 、 E_{B_θ} 、 E_{B_y} 以及 E_{C_r} 、 E_{C_θ} 、 E_{C_y} 分别为弯曲应变能和压缩应变能在三个方向上的分量。假设在应力集中区域微小单元体内各方向受力均匀, 对 F 取极值得到皱曲后的平衡特征。当试样在一个方向起皱时, 推导得到波长 $\lambda \sim (k/k_1)^{1/4}$, 振幅 $A \sim (\Delta/l_w)^{1/2} \lambda$ ^[9]。其中 k 为弯曲刚度, k_1 有效弹性基体的刚度, Δ 为与条状波垂直方向的位移, l_w 为垂直方向起皱前的长度。

设试样晶粒大小尺度为 s , 单层晶粒形成的表层的弹性模量为 E_g ; 基体弹性模量为 E_s , 则 $E_g/E_s \sim 1$ 。对于不可压缩基体 $K \sim E_s \lambda^2 / l_p^3$, l_p 为起皱波传播或渗透长度。基体厚度很大时, $l_p \sim \lambda$, 所以有 $\lambda \sim (E_g s^3 \lambda / E_s)^{1/4}$, $\lambda \sim s$, 即试样晶粒大小直接影响皱曲的大小。

4 结论

(1) 材料在三向受力状态下会出现端面半径方向、柱面环向和柱面轴向的起皱特征, 而利用改变角度的锥模挤压有利于获得这种现象;

(2) 同样的压入深度下, 当挤压角度增大时, 柱面凸起高度和凸起距离都增大, 起皱波长延伸越远。波长越长时对应起皱延伸距离也越大。试样端面凸起高度和起皱波长、延伸距离均随着挤压角度的增大先增加后减小, 凸起距离随角度增大而减小。锥模挤压角度为 60° 时, 在试样的端面和柱面都存在凸起和起皱特征。

(3) 试样表面层晶粒大小对皱曲形貌的影响明显, 波长 $\lambda \sim s$ 。表面晶粒越大, 波长和延伸距离越大, 起皱形貌越明显。

参 考 文 献

- [1] 李恒, 杨合, 詹梅, 等. 薄壁件塑性成形失稳起皱的国内外研究进展[J]. 机械科学与技术, 2004, 23(7): 827-842.

- LI Heng, YANG He, ZHAN Mei, et al. A review of the research on wrinkling in thin-walled parts plastic forming processes [J]. *Mechanical Science and Technology*, 2004, 23(7): 827-842.
- [2] CORREIA J P D M, FERRON G. Wrinkling of anisotropic metal sheets under deep-drawing: Analytical and numerical study [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 155-156: 1604-1610.
- [3] 冯桐, 杨合, 孙朝阳, 等. 板带不均匀压下内弯曲过程失稳起皱的研究[J]. *机械工程学报*, 2005, 41(4): 189-194.
- FENG Lü, YANG He, SUN Chaoyang, et al. Research on a unified criterion of internal and external wrinkling of strip metal in-plane bending under unequal compressing [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2005, 41(4): 189-194.
- [4] 汤泽军, 何祝斌, 苑世剑. 内高压成形过程塑性失稳起皱分析[J]. *机械工程学报*, 2008, 44(5): 34-38.
- TANG Zejun, HE Zhubin, YUAN Shijian. Analysis of plastic wrinkling behavior in tube hydroforming process [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2008, 44(5): 34-38.
- [5] 邢忠文, 赵立红, 杨玉英. 回弹对柱面扁壳类覆盖件刚度的影响机制[J]. *机械工程学报*, 2008, 44(5): 226-230.
- XING Zhongwen, ZHAO Lihong, YANG Yuying. Mechanism of springback influence on stiffness of automotive cylindrical shallow panels [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2008, 44(5): 226-230.
- [6] 夏琴香, 尚越, 张帅斌, 等. 倾斜管件多道次缩径旋压成形的数值模拟及试验[J]. *机械工程学报*, 2008, 44(8): 78-84.
- XIA Qinxiang, SHANG Yue, ZHANG Shuaibin, et al. Numerical simulation and experimental investigation on the multi-pass neck-spinning of non-axisymmetric oblique tube [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2008, 44(8): 78-84.
- [7] 孙刚, 李明哲, 邓玉山, 等. 柔性压边和刚性压边技术在薄板类件多点成形中的对比分析[J]. *机械工程学报*, 2008, 44(5): 147-151.
- SUN Gang, LI Mingzhe, DENG Yushan, et al. Analysis on flexible and rigid blank-holders technology applying on thin sheet metal in multi-point forming [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2008, 44(5): 147-151.
- [8] 黄涛, 李国琛, 洪友士, 等. 材料分叉的数值分析[J]. *力学学报*, 1996, 28(2): 164-170.
- HUANG Tao, LI Guochen, HONG Youshi, et al. Numerical analysis for material bifurcation [J]. *Acta Mechanica Sinica*, 1996, 28(2): 164-170.
- [9] CERDA E, MAHADEVAN L. Geometry and physics of wrinkling [J]. *Physical Review Letters*, 2003, 90: 074302.
- [10] 何伶俐, 张坤, 陈光南. EB-PVD 热障涂层皱曲问题研究进展[J]. *新技术新工艺*, 2010(4): 67-71.
- HE Lingrong, ZHANG Kun, CHEN Guangnan. Investigation and development of rumpling of EB-PVD thermal barrier coatings [J]. *New Technology & New Process*, 2010(4): 67-71.
- [11] 艾维超 B. 金属成形工艺与分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 1988.
- AVITZUR B. *Metal forming: Processes and analysis* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1988.

作者简介: 何伶俐, 女, 1985 年出生。主要研究方向为工艺力学。

E-mail: hlr_133@163.com

张坤(通信作者), 男, 1968 年出生, 博士, 硕士研究生导师。主要研究方向为工艺力学。

E-mail: kzhang@imech.ac.cn