

文章编号:1000-582X(2011)01-047-06

铝合金薄壁矩形管绕弯成形起皱极限的预测

刘郁丽, 李佳佳, 赵刚要, 杨 合

(西北工业大学 材料学院, 陕西 西安 710072)

摘 要:失稳起皱是铝合金薄壁矩形波导管绕弯成形过程中的主要缺陷之一, 严重制约着薄壁矩形管绕弯成形极限的提高。笔者采用有限元数值模拟结合正交回归分析的方法, 建立了薄壁矩形管绕弯成形起皱波高度回归预测模型, 并通过实验验证了该模型的可靠性; 在此基础上推导出了基于失稳起皱成形极限的解析模型。研究获得了芯头个数、防皱块与管坯间隙及芯模与管坯间隙对起皱极限的影响规律, 并获得了铝合金薄壁矩形管绕弯成形起皱极限图。该研究为提高实际生产中薄壁矩形管绕弯成形质量提供了依据和指导。

关键词:铝合金; 薄壁矩形管; 绕弯成形; 有限元模拟; 失稳起皱; 成形极限

中图分类号: TG386

文献标志码: A

Wrinkling limit prediction of rotary-draw bending process for thin-walled rectangular aluminum alloy tube

LIU Yu-li, LI Jia-jia, ZHAO Gang-yao, YANG He

(College of Materials Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, P. R. China)

Abstract: Wrinkling is one of main forming defects of the rotary-draw bending process for thin-walled rectangular aluminium alloy tube, which severely restricts the improvement of the forming quality and forming limit. Therefore, a regression prediction model of the wrinkling wave height is built based on finite element(FE) simulation combined with orthogonal regression analysis, and its reliability is validated by experiments. Then the analytical model of forming limit without the occurrence of wrinkling is derived. The laws of the core number, the clearance between mandrel and tube and the clearance between wiper die and tube affecting wrinkling limit are obtained, and the wrinkling limit diagram for the rotary-draw process of thin-walled rectangular tube is obtained. This research provides basis and guidance for improving forming quality of the rotary-draw bending process for the rectangular tubes in production.

Key words: aluminum alloy; thin-walled rectangular tube; rotary-draw bending process; finite element simulation; wrinkling; forming limit

铝合金薄壁矩形波导管广泛应用于航天、航空和微波测量等高新技术领域中。失稳起皱是铝合金薄壁矩形波导管绕弯过程中的主要缺陷之一, 严重制

约着薄壁矩形管绕弯成形极限的提高。近年来, 随着微波通讯技术的发展, 迫切要求薄壁矩形波导管向小弯曲半径、高精度方向发展, 使得薄壁矩形管绕

收稿日期: 2010-08-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50575184; 50975235); 华中科技大学材料成形与模具技术国家重点实验室基金(08-3); 西北工业大学基础研究基金资助项目(NPU-FFR-200809)

作者简介: 刘郁丽(1965-), 女, 西北工业大学教授, 博士生导师, 从事材料塑性成形技术研究, (Tel) 029-88460212-803; (E-mail) lyl@nwpu.edu.cn。

弯成形起皱极限(薄壁矩形管绕弯时内侧不发生失稳起皱所允许的最小弯曲半径 R_{\min})的预测控制成为了薄壁矩形管弯曲精确成形亟待解决的关键性问题。

然而在该研究领域,国内外学者主要集中于对板料和圆管弯曲成形失稳起皱及起皱极限的研究。文献[1-3]通过试验研究了3种铝板的拉深过程,发现塑性应变增量之比可以预测起皱的发生。Correia和Ferron等^[4-5]利用分叉理论预测了板料深冲过程的失稳起皱现象,获得了相对于应力正交主轴不同方向的起皱极限曲线。Wang^[6]基于能量法和塑性弯曲理论建立了板料成形起皱的预测模型。文献[7]基于能量法建立了圆管弯曲成形过程预测起皱的理论模型,获得了起皱极限,并绘出了起皱极限图。文献[8-9]获得了薄壁圆管绕弯成形失稳起皱定量预测模型。而对薄壁矩形管弯曲成形失稳起皱及起皱极限的研究较少,在所查阅的文献中只有Plaulsen等^[10]基于塑性变形理论结合能量法获得了矩形管拉弯成形过程中起皱波纹形状函数,并得到了几何参数与起皱极限的关系,但该研究针对的是矩形管拉弯成形过程。坂木修次等^[11]对铝合金A6063S-O和A6061S-O方管绕弯过程进行了实验研究,主要分析了刚性弧式芯棒在抑制起皱以提高成形极限方面的作用。笔者所在实验室^[12-13]在研究工艺参数对失稳起皱影响规律的基础上,发现开展基于失稳起皱成形极限的研究是实现薄壁矩形管绕弯过程小弯曲半径和高精度迫切需要解决的关键问题。为此,笔者基于有限元数值模拟结合正交回归分析的方法,建立了薄壁矩形管绕弯成形起皱波纹度回归预测模型,推导出了基于失稳起皱的成形极限解析模型,并获得了起皱极限图。为提高实际生产中薄壁矩形管绕弯成形质量提供了依据和指导。

1 起皱波纹度回归预测模型

1.1 起皱波纹度的描述

为了描述薄壁矩形管绕弯后管坯内侧起皱波纹的大小,图1给出了薄壁矩形管失稳起皱波纹示意图,管坯截面*i*对称线上两点 A_i 、 B_i 间的距离即起皱波纹的相对高度 Δh_i 。取起皱波纹相邻波峰、波谷的相对高度差的最大值 Δh_{\max} 作为衡量起皱波纹大小的指标,称其为起皱波纹度,如式(1)所示。

$$\Delta h_{\max} = \max_{j,k} (|\Delta h_j - \Delta h_k|), \quad (1)$$

其中: Δh_j 、 Δh_k 为起皱波纹相邻波峰、波谷相对高度值;*i*、*j*、*k*分别为绕弯变形区不同的截面序号。

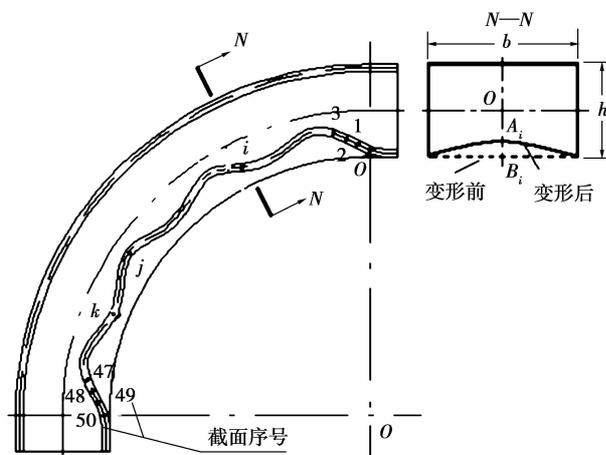


图1 失稳起皱波纹示意图

1.2 起皱波纹度回归预测模型建立

薄壁矩形管绕弯成形失稳起皱的影响因素众多且复杂,包括绕弯半径、芯头个数、各模具与管坯的间隙、各模具与管坯的摩擦系数等,各因素间又存在相互耦合作用,采用文献[12]所建立的经验证可靠的薄壁矩形管绕弯成形三维有限元模型(如图2所示),借助虚拟正交试验,经大量研究获得了对失稳起皱有显著影响的工艺参数为芯头个数 N ,防皱块与管坯间隙 δ_w ,芯模与管坯间隙 δ_m ,绕弯半径 R 。

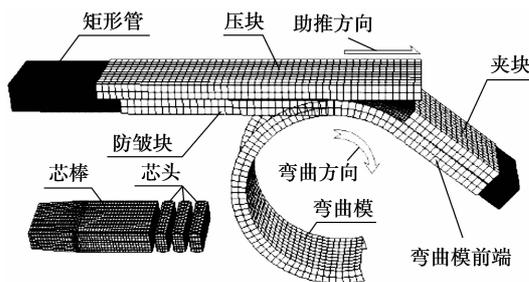


图2 铝合金薄壁矩形管绕弯成形三维有限元模型

然而,要找到上述4个工艺参数与起皱波纹度 Δh_{\max} 之间的确定关系是很困难的,而回归分析应用数学的方法考察变量之间的统计规律,可找出它们之间的近似关系,故采用回归分析的方法考察起皱波纹度与显著影响失稳起皱的工艺参数之间的关系。一般说来,用二次多项式逼近能够达到足够精度^[14],因此,采用二次多项式对起皱波纹度 Δh_{\max} 与各显著影响因素间的关系进行描述,如式(2)所示。

$$\Delta h_{\max} = a_0 + a_1 N + a_2 \delta_w + a_3 \delta_m + a_4 R + a_5 N \delta_w + a_6 N \delta_m + a_7 N R + a_8 \delta_w \delta_m + a_9 \delta_w R + a_{10} \delta_m R + a_{11} N^2 + a_{12} \delta_w^2 + a_{13} \delta_m^2 + a_{14} R^2, \quad (2)$$

式中 a_0, a_1, \dots, a_{14} 为回归系数。

为了确定回归系数 a_0, a_1, \dots, a_{14} , 采用图 2 所示的有限元模型及表 1、表 2 中的条件, 按所选择的二次回归正交试验表 3 中方案进行有限元模拟, 得到的起皱波纹度 Δh_{\max} 的模拟结果见表 3 中最后一列。

表 1 3A21 薄壁矩形管的基本力学性能参数

屈服极限 $\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	强度极限 σ_b/MPa	延伸率 $\delta/\%$	泊松比 ν	弹性模量 E/GPa
137.52	190	15	0.33	60.10

表 2 模拟过程中工艺参数

参数	数据
弯曲角度 $\theta/(\circ)$	90
弯曲速度 $\omega/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	0.5
侧推速度 $v/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	22.92
芯棒与管坯摩擦系数 μ_m	0.1
防皱块与管坯摩擦系数 μ_w	0.14
压块与管坯摩擦系数 μ_p	0.3
弯曲模与管坯摩擦系数 μ_b	0.14
夹块与管坯摩擦系数 μ_c	Rough
压块与管坯间隙 δ_p/mm	0
弯曲模与管坯间隙 δ_b/mm	0
夹块与管坯 δ_c 间隙/ mm	0
芯棒伸出量 e_m/mm	1.1 ^[13]

通过对表 3 的起皱波纹度 Δh_{\max} 根据式(2)进行四变量二次回归分析, 得到回归系数分别为:

$$a_0 = 1.046, a_1 = -0.277, a_2 = 1.494, a_3 = 0.794, a_4 = -0.010, a_5 = -0.059, a_6 = -0.248, a_7 = -0.004, a_8 = 0.293, a_9 = -0.001, a_{10} = 0.030, a_{11} = 0.074, a_{12} = 0.336, a_{13} = 0.880, a_{14} \approx 0.$$

将回归系数代入式(2)得到显著影响失稳起皱的工艺参数(芯头个数 N , 防皱块与管坯间隙 δ_w , 芯模与管坯间隙 δ_m , 绕弯半径 R)和起皱波纹度 Δh_{\max} 之间的关系, 如式(3)所示。

$$\Delta h_{\max} = 1.046 - 0.277N + 1.494\delta_w + 0.794\delta_m - 0.010R - 0.059N\delta_w - 0.248N\delta_m - 0.004NR + 0.293\delta_w\delta_m - 0.001\delta_wR + 0.030\delta_mR + 0.074N^2 + 0.336\delta_w^2 + 0.880\delta_m^2. \quad (3)$$

表 3 二次回归正交试验设计方案及试验结果

试验号	芯头个数 $N/\text{个}$	防皱块与管坯间隙 δ_w/mm	芯模与管坯间隙 δ_m/mm	绕弯半径 R/mm	模拟起皱波纹度 $\Delta h_{\max}/\text{mm}$
1	4	0.3	0.4	50	1.150
2	4	0.3	0.4	30	1.246
3	4	0.3	0.1	50	0.472
4	4	0.3	0.1	30	0.887
5	4	0	0.4	50	0.545
6	4	0	0.4	30	0.785
7	4	0	0.1	50	0.079
8	4	0	0.1	30	0.547
9	2	0.3	0.4	50	1.233
10	2	0.3	0.4	30	1.330
11	2	0.3	0.1	50	0.615
12	2	0.3	0.1	30	0.894
13	2	0	0.4	50	0.816
14	2	0	0.4	30	0.891
15	2	0	0.1	50	0.177
16	2	0	0.1	30	0.249
17	5	0.15	0.25	40	0.595
18	1	0.15	0.25	40	1.282
19	3	0.3	0.25	40	0.732
20	3	0	0.25	40	0.588
21	3	0.15	0.4	40	1.093
22	3	0.15	0.1	40	0.276
23	3	0.15	0.25	54.14	0.526
24	3	0.15	0.25	25.86	0.790
25	3	0.15	0.25	40	0.604

1.3 失稳起皱波纹度回归预测模型实验验证

1.3.1 实验条件及方案

为了验证失稳起皱波纹度回归预测模型式(3)的可靠性, 采用如图 3 所示的 W27YPC-63 数控弯管机和如图 4 所示模具进行了薄壁矩形管绕弯成形实验研究。

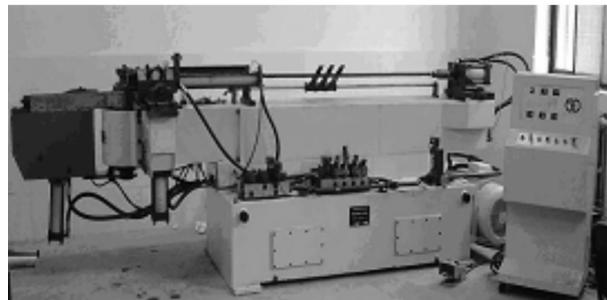


图 3 W27YPC-63 数控弯管机

实验条件: 管材与芯模间隙 $\delta_m = 0.1 \text{ mm}$, 芯头、芯棒与管材间均匀涂上航空润滑油, 防皱块与管材加少许航空润滑油, 其他接触为干摩擦, 其他实验条件同表 2, 实验方案如表 4 所示。

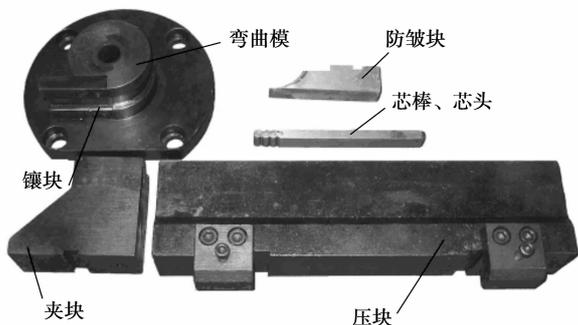


图4 薄壁矩形管绕弯成形模具

表4 实验方案

实验条件	方案1	方案2	方案3	方案4	方案5	方案6
芯头个数 N /个	2	3	4	3	3	3
防皱块与管坯间隙 δ_w /mm	0.1	0.1	0.1	0	0.2	0.3

1.3.2 失稳起皱波度回归预测模型可靠性验证

图5为采用表4的设定方案,按式(3)计算得到的 Δh_{\max} 值与实验值的对比。可以看出,两者的结果基本吻合,且最大误差为18.46%(方案5),因此基于正交回归试验建立的起皱波度回归预测模型能够描述 Δh_{\max} 关于 N 、 δ_m 、 δ_w 及 R 的变化规律。

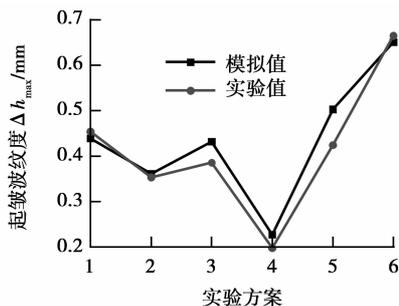


图5 起皱波度回归预测模型预测值与实验值的对比

2 起皱极限解析模型

基于验证的薄壁矩形管绕弯成形起皱波度回归预测模型式(3),当管材即将发生失稳起皱时,其 Δh_{\max} 近似为零,此时可得到起皱极限 R_{\min} ,如式(4)所示。

$$R_{\min} = (1.046 + 1.494\delta_w + 0.754\delta_m + 0.074N^2 + 0.336\delta_w^2 + 0.880\delta_m^2 + 0.293\delta_w\delta_m - 0.277N - 0.059N\delta_w - 0.248N\delta_m) / (0.010 + 0.004N + 0.001\delta_w - 0.030\delta_m) \quad (4)$$

3 结果与讨论

3.1 工艺参数对起皱极限的影响

图6(a)所示是由起皱极限解析式(4)计算得到的芯头个数 N 对起皱极限 R_{\min} 的影响规律。由图可知:随着 N 的增大, R_{\min} 逐渐减小而后变化不大,说明起皱极限随 N 的增大先增大后变化不大。这主要是因为随着 N 的增大,芯头对弯曲前端的支撑增大,矩形管的抗失稳起皱的能力增大,因此导致 R_{\min} 减小,起皱极限增大。当 N 达到4时起皱极限变化不大。

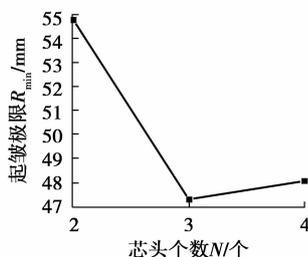
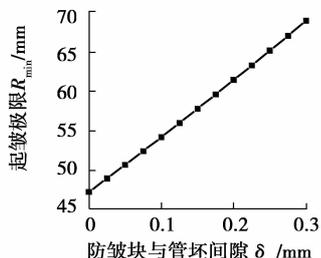
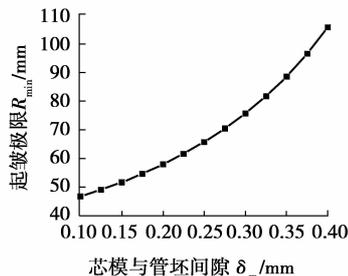
(a) 芯头个数 N 对起皱极限的影响(b) 防皱块与管坯间隙 δ_w 对起皱极限的影响(c) 芯模与管坯间隙 δ_m 对起皱极限的影响

图6 工艺参数对起皱极限的影响曲线

图6(b)是由起皱极限解析式(4)计算得到的防皱块与管坯间隙 δ_w 对起皱极限 R_{\min} 的影响规律。由图可知:随着 δ_w 的增大, R_{\min} 逐渐增大,说明起皱极限随 δ_w 的增大而减小。这主要是因为随着 δ_w 的增大,防皱块对管坯的约束效果减弱,矩形管的抗失稳起皱的能力减小,因此 R_{\min} 增大,起皱极限减小。

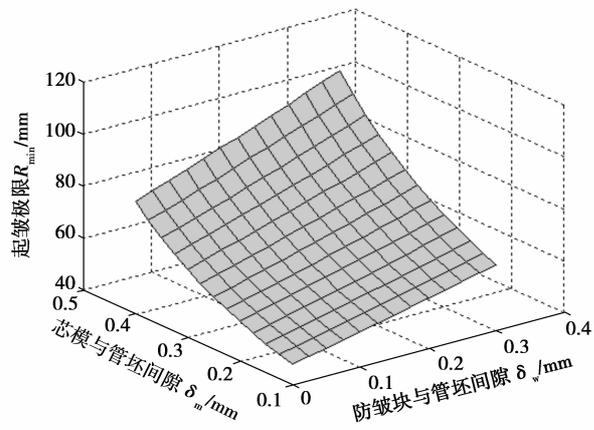
图6(c)是由起皱极限解析式(4)计算得到的芯模与管坯间隙 δ_m 对起皱极限 R_{\min} 的影响规律。由图可知:随着 δ_m 的增大, R_{\min} 增大,说明起皱极限随

δ_m 的增大而减小。这主要是因为随着 δ_m 的增大, 管坯与芯模的接触过程就变短, 变形受到芯棒的刚性约束也就较小, 芯棒抑制起皱所吸收的能量逐渐减少, 因此 R_{min} 增大, 起皱极限减小。

3.2 起皱极限图

基于以上分析结果, 建立了不同芯头个数下以防皱块与管坯间隙 δ_w 、芯模与管坯间隙 δ_m 及起皱极限 R_{min} 为坐标系的三维空间立体成形极限图, 如图 7 所示。由图可知, 以网格形式表示的面属于不起皱的临界面, 该面上侧为不起皱区, 下侧为起皱区。

在实际薄壁矩形管绕弯成形时, 在笔者给定的管坯几何尺寸情况下, 要确定其 R_{min} , 只要在图 7 中, 在不同的芯头个数下分别沿 δ_w 、 δ_m 的坐标轴, 找到以 δ_w 、 δ_m 为坐标的坐标平面上相对应的点, 该点对应的曲线上的点就是不发生起皱时的 R_{min} 。实际生产中弯曲模通常是给定的, 可以通过上述方法找到相应的一点, 如果该点在曲面下方, 该弯曲过程将会产生失稳起皱现象, 则需要修改弯曲工艺参数; 如果该点在曲面表面, 该弯曲过程处于失稳起皱的临界状态; 如果该点在曲面上方, 该弯曲过程不会产生失稳起皱。该起皱极限图对薄壁矩形管实际绕弯工艺的确定具有重要的参考价值。



(c) 芯头个数为 4

图 7 起皱极限图

4 结 论

1) 基于回归分析建立了薄壁矩形管起皱波纹度回归预测模型, 并通过实验验证了所建模型的可靠性, 进而推导出了起皱极限解析模型。

2) 研究了矩形管绕弯成形过程中芯头个数 N 、防皱块与管坯间隙 δ_w 及芯模与管坯间隙 δ_m 对起皱极限的影响规律, 发现起皱极限随 N 的增大先增大后减小, 随 δ_w 的增大而减小, 随 δ_m 的增大而减小。

3) 获得了薄壁矩形管绕弯成形过程不发生失稳起皱时的成形极限图, 可为实际生产中薄壁矩形管绕弯成形提供参考。

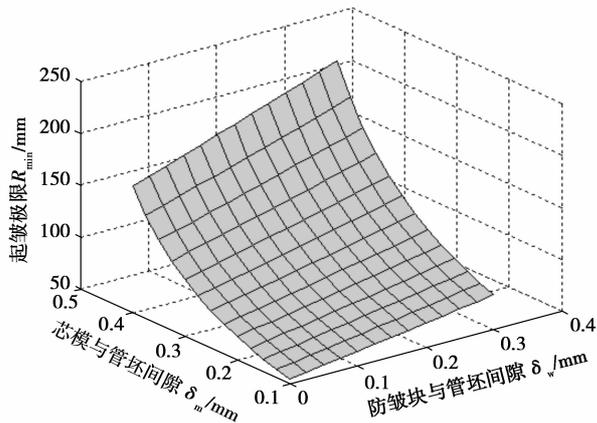
参考文献:

[1] LOGANATHAN C, NARAYANASAMY R. Effect of mechanical properties on the wrinkling behaviour of three different commercially pure aluminium grades when drawn through conical and tractrix dies [J]. Materials Science and Engineering: A, 2005, 406 (1/2): 229-253.

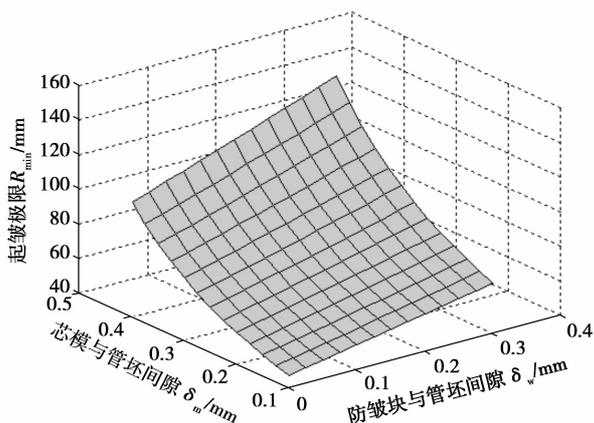
[2] NARAYANASAMY R, NARAYANAN C S. Forming, fracture and wrinkling limit diagram for steel sheets of different thickness [J]. Materials and Design, 2008, 29(7): 1467-1475.

[3] NARAYANASAMY R, LOGANATHAN C, SATHEESH J. Some study on wrinkling behaviour of commercially pure aluminum sheet metals of different grades when drawn through conical and tractrix dies [J]. Materials and Design, 2008, 29(8): 1654-1665.

[4] DE MAGALHÄES CORREA J P, FERRON G. Wrinkling of anisotropic metal sheets under deep-drawing: analytical and numerical study [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 155/156:



(a) 芯头个数为 2



(b) 芯头个数为 3

- 1604-1610.
- [5] DE MAGALHÃES CORREA J P, FERRON G. Wrinkling predictions in the deep-drawing process of anisotropic metal sheets [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, 128(1/3): 178-190.
- [6] WANG X. Stress-based wrinkling criteria and experimental verifications in sheet metal forming[D]. Xi'an: Northwestern University, 2000.
- [7] WANG X, CAO J. Wrinkling limit in tube bending[J]. *Journal of Engineering Materials and Technology*, *Transaction of the ASME*, 2001, 123: 430-435.
- [8] YANG H, LIN Y. Wrinkling analysis for forming limit of tube bending process [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 152(3): 363-369.
- [9] LI H, YANG H, ZHAN M, et al. A new method to accurately obtain wrinkling limit diagram in NC bending process of thin-walled tube with large diameter under different loading paths [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, 177(1/3): 192-196.
- [10] PAULESN F, WELO T. A design method for prediction of dimensions of rectangular hollow section formed in stretch bending [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, 128(1/3): 48-66.
- [11] 坂木修次, 藤院琢磨, 原岛寿和. 角管の回轉引き曲げ加工における変形と加限度[J]. *塑性と加工*, 1995, 36(414): 719-724.
- SAKAKI S, TOIN T, HARASHIMA T. Deformation and working limit of square tube in draw bending process[J]. *Journal of Japan Society for Technology of Plasticity*, 1995, 36(414): 719-724.
- [12] ZHAO G Y, LIU Y L, YANG H, et al. Three-dimensional finite-elements modeling and simulation of rotary-draw bending process for thin-walled rectangular tube[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2009, 499(1/2): 257-261.
- [13] ZHAO G Y, LIU Y L, YANG H. Numerical simulation on influence of clearance and friction on wrinkling in bending of aluminum alloy rectangular tubes[J]. *Materials Science Forum*, 2007, 546/549: 833-838.
- [14] 郑少华, 姜奉华. 试验设计与数据处理[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2004.

(编辑 王维朗)

(上接第 25 页)

- [6] FOGEL E, HALPERIN D. Exact and efficient construction of Minkowski sums of convex polyhedra with applications[J]. *Computer-Aided Design*, 2007, 39(11):929-940.
- [7] HACHENBERGER P. Exact Minkowski sums of polyhedra and exact and efficient decomposition of polyhedra in convex pieces [J]. *Algorithmica*, 2009, 55(2):329-345.
- [8] LARSSON T, AKENINE-M ÖLLER T, Y LARSSON T, et al. Collisions detection for continuously deforming bodies[C/OL]// In Proceedings of Eurographics'2001, Manchester, United Kingdom, September 3-7, 2001: 325-333. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.23.5176>.
- [9] TRENKEL S, WELLER R, ZACHMANN G. A benchmarking suite for static collision detection algorithms [C/OL] // International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision, Plzen, Czech Republic, 2007. http://wscg.zcu.cz/wscg2007/Papers_2007/full/F71-full.pdf.
- [10] HACHENBERGER P. Exact Minkowski sums of polyhedra and exact and efficient decomposition of polyhedra in convex pieces [J]. *Algorithmica*, 2009, 55(2):329-345.
- [11] JIMÉNEZ P, THOMAS F, TORRAS C. 3D collision detection: a survey [J]. *Computers and Graphics*, 2001,25(2): 269-285.
- [12] ZHANG X, KIM Y. Interactive collision detection for deform-able models using streaming AABBs [J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2007,13(2):318-329.
- [13] FRIEDMANN M, PETERSEN K, VON STRYK O. Adequate motion simulation and collision detection for soccer playing humanoid robots [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2009,57(8):786-795.
- [14] CHANG J W, WANG W P, KIM M S. Efficient collision detection using a dual OBB-sphere bounding volume hierarchy[J]. *Computer-Aided Design*, 2010, 42 (1): 50-57.
- [15] TROPP O, TAL A, SHIMSHONI I. A fast triangle to triangle intersection test for collision detection [J]. *Computer Animation and Virtual Worlds*, 2006, 17(5): 527-535.

(编辑 张 苹)