

超声振动辅助微成形工艺及现状分析

查长礼, 陈 伟, 徐 庆

(江苏大学 机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘 要:对超声振动近几年在微成形工艺中的研究与应用进行了阐述,分析了超声振动塑性成形的机理。并在此基础上,结合典型应用研究剖析了超声振动对微成形的影响。探讨了目前在超声振动辅助微成形工艺中的问题。

关键词:超声振动;微成形;机理;尺寸效应

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.2017.09.005

中图分类号: TG301

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2017)09-0018-05

Ultrasonic Vibration Assisted Micro-forming Process and Its Current Situation Analysis

ZHA Changli, CHEN Wei, XU Qing

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: The research and application of ultrasonic vibration in micro-forming process were described in recent years. The mechanism of ultrasonic vibration plastic forming was analyzed. And on this basis, the influence of ultrasonic vibration on micro-forming was analyzed combined with typical application. The problems in the ultrasonic vibration assisted micro-forming process were discussed.

Key words: ultrasonic vibration; micro-forming; mechanism; size effect

微成形是指以塑性加工的方法生产至少在二维方向上尺寸处于亚毫米级的零件或结构的技术^[1]。随着成形件尺寸的减小使得表面积与体积比增大,微成形工艺中的流变应力、成形性能和摩擦系数等相关的成形参数呈现出与常规尺寸工件的成形机理的不同特征,即所谓的尺寸效应或尺度效应^[2]。通过压缩、挤压和拉深等微成形试验表明,随着试样尺寸的减小,不同的润滑条件对摩擦因子影响显著^[3-9]。

金属塑性成形过程中引入超声振动技术是一种能有效提高金属成形性能和精度的途径。一些学者对此进行了大量研究与试验验证。1955年,Blaha和Langenecker在对施加了超声波的单晶锌试样进行静态拉伸试验时,观察到材料屈服应力和流动应力降低的现象^[9-11],也称为“Blaha效应”。此后,国内外的许多学者针对这一效应及其在金属塑性成形中的应用展开了广泛深入的理论与实验研究。Möllers等研究了超声振动对拉深工艺的影响,得出优化拉深

和振动加载方向能获得较大的超声振动效应^[12]; Winsper等提出了超声振动效应分为影响力学性能的体积效应与影响滑动摩擦的表面效应^[13]等。虽然超声振动金属塑性成形历经了近60多年的发展,取得了一些有益的成果,并成功应用于拉深^[14-17]、弯曲、挤压及拉拔^[18]等塑性成形,但在微型件塑性成形工艺方面的研究开展得较晚。鉴于超声振动金属塑性成形的优点,将超声振动与微成形工艺相结合,探索超声振动对微成形工艺中存在的尺寸效应与摩擦效应的影响;如何提高微成形件的表面质量与精度,降低成形力,延长模具寿命等方面的问题已逐渐引起国内外一些学者的广泛关注。如德国、日本、美国以及国内的如上海交通大学、深圳大学及台湾大学等高校在这方面开展了相关研究。本文首先对超声振动微成形的机理与研究进行了阐述,结合一些典型的应用研究剖析了超声振动对微成形的影响,并探讨了该领域目前存在和有待解决的问题。

1 超声振动微成形的机理及研究

目前,有关振动对塑性加工材料的内部和表面影响的理论都是基于两大基本效应即影响力学性能的体积效应和影响滑动摩擦的表面效应^[19-21]。体积效

收稿日期:2016-05-24

基金项目:高校博士学科点专项科研基金项目(20133227110013)

作者简介:查长礼(1980-),男,安徽安庆人,博士研究生,主要研究方向为微成形理论和技术、特种成形工艺及设备;
电话:0556-5675916; E-mail:zhachangli@126.com

应通常理解为金属材料内部晶粒产生转动后,材料活性增大、温度升高,出现与晶体位错有关的热效应软化,致使金属材料的动态变形阻力降低;表面效应普遍解释为超声振动对模具与工件之间的摩擦影响,表现为模具与工件之间的粘滑减少、成形件的表面质量和几何精度提高、模具的磨损消耗低、工具的寿命延长。对于表面效应产生的原因可能为:模具与加工工件之间由于振动而产生的瞬间分离,利于润滑油进入摩擦区;振动周期中存在的摩擦力矢量反向有利于变形加工;局部热效应能改善局部粘焊现象。

Yao 等^[22]在研究高频振动辅助介观尺度成形时,发现成形性能受应力叠加、声波软化及摩擦力降低三个方面的影响,其中声波软化占主导因素;Aziz and Lucas^[23]建立了一种基于超声振动辅助的金属板料成形模具及装置,探究了振动幅值和材料对成形力的影响,得出大振动幅值和易于软化的材料的成形力降低更为显著;Hung and Tsai^[24]对黄铜进行超声振动辅助微锻粗试验时,以获取相同的应力减小率为标准,超声振动产生的热效应温度升高 3.5℃,而要获得同样的应力减小率需要加热到 100℃,表明了热效应软化对应力减小率影响不大。

由于超声振动对金属塑性成形过程中影响的复杂性和微成形工艺中的尺寸效应^[2],使得基于超声振动的微成形理论都存在一定的局限性,对超声振动效应的机理尚无完整的理论阐述和定性的分析,需要进一步深入研究和探讨。近几十年来,很多学者探索了在金属成形工艺中施加超声振动而产生的力学行为变化的机理,但其精确的机理仍不清楚。

2 应用研究

2.1 微锻粗

Huang 等在对铜材进行微锻粗试验中引入超声振动,发现超声振动对材料的流变应力下降有着很大影响,并进一步得出流变应力的下降与振动幅值存在线性关系^[25];Hung and Tsai^[24]对黄铜试样进行超声振动微锻粗,以直径为 3mm,高度为 4.5mm 的黄铜试样尺寸作为标准尺寸,引入描述几何尺寸变化的比例因子 λ ,即 $\lambda=1$ 表示试样尺寸为 $\phi 3\text{mm}\times 4.5\text{mm}$,其它试样比例因子 $\lambda=0.67$ 和 $\lambda=0.33$ 对应的试样尺寸分别为 $\phi 2\text{mm}\times 3\text{mm}$ 和 $\phi 1\text{mm}\times 1.5\text{mm}$;选用三种不同尺寸和晶粒尺寸的试样进行常规与超声振动辅助微锻粗试验,具体试验情况见表 1。

表 1 材料与微锻粗条件

Tab.1 Material and micro-upsetting conditions

试样材料	黄铜(C2600)
工具材料	合金钢(SKD11)
比例因子 λ	1, 0.67, 0.33
试样尺寸 /mm	$\phi 3\times 4.5, \phi 2\times 3, \phi 1\times 1.5$
晶粒尺寸 / μm	12, 44, 90
凸模速度 /($\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$)	1, 0.6, 0.3
压缩量(%)	50
润滑	蓝色钼级润滑脂

将常规微锻粗和超声振动微锻粗试验后的数据进行统计,分析流变应力与试验方案和尺寸参数的关系,试验结果见表 2。

表 2 两种试验方案的最大流变应力测量值

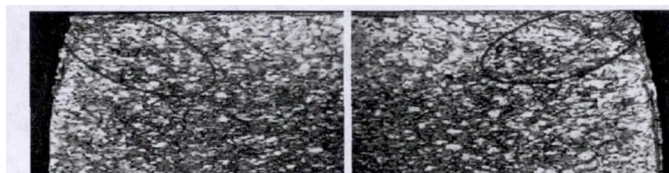
Tab.2 Maximum flow stress measurement of two kinds of experimental schemes

比例因子		1		0.67		0.33	
试验方案		常规	超声振动	常规	超声振动	常规	超声振动
流变应力最大值($\varepsilon=0.7$) /MPa	晶粒尺寸 / μm	12	673	19.91	649	25.83	594
		44	651	19.78	625	26.76	582
		90	940	21.58	615	28.40	573

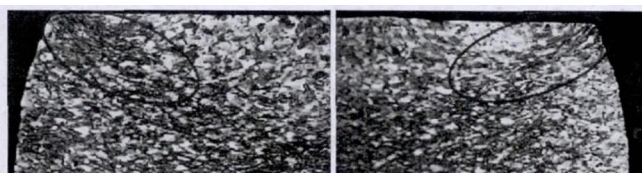
由表 2 可知,在常规微锻粗试验中随着比例因子的减小和晶粒尺寸的增大,材料的流变应力均表现出减小趋势。在超声振动微锻粗试验中,与常规试验同样的条件下,流变应力呈现出了大幅下降;而对相同比例因子与不同晶粒尺寸的试样试验时,流变应力与晶粒尺寸的变化成正比的关系。一些学者分析造成这种体积效应现象的原因可能是超声能量被高度集中的区域如位错、空穴和晶界吸收,加快了位错在滑移面的运动速度^[26-28]。通过对常规微锻粗和超声振动微锻粗试验后的试样金相显微组织观察,超声振动微锻粗试验后的试样剪切滑移带区域明显要大于常规微锻粗,这也进一步表明超声产生的能量在该区域被吸收,加快了位错运动速度,使得超声振动微锻粗具有较小的流变应力和较大的塑性应变;至于晶粒尺寸对流变应力的影响,由于不同晶粒尺寸对剪切滑移区域及量级影响不大,所以晶粒尺寸引起流变应力的变化不大,这与试验结果比较吻合。常规微锻粗和超声振动微锻粗试验后的试样金相显微组织分别如图 1、2 所示。

2.2 微拉深

极限拉延比是表征板料拉延成形时的极限变形程度,为评定板料成形性能的主要指标之一,也是进行板料拉延成形工艺及模具设计的重要依据。



(a) 试样左上角 (b) 试样右上角

图1 常规微锻粗($\lambda=0.67$, 晶粒尺寸=90 μm)Fig.1 Conventional micro-upsetting ($\lambda=0.67$, grain size=90 μm)

(a) 试样左上角 (b) 试样右上角

图2 超声振动微锻粗($\lambda=0.67$, 晶粒尺寸=90 μm)Fig.2 Ultrasonic vibration-assisted micro-upsetting ($\lambda=0.67$, grain size=90 μm)

Mostafapur A 等开发了一种基于脉动式压边圈的拉深成形工艺,对厚度为 1mm 的 1050 铝合金薄板进行拉深成形,与常规的静态压边圈相比较其极限拉延比提高了 8%^[29];A Pasierb 等^[30]利用厚度为 0.5mm 的不锈钢 304 薄板进行超声振动拉深成形试验,压边圈的振动频率范围 20~21kHz,结果显示极限拉延比由 2.38 提高到 2.77。Huang Y M 等^[31]开发一套基于超声振动的拉深装置,对不锈钢 304 薄板进行微筒形件拉深成形试验,试验材料力学性能见表 3。

表3 试验材料的力学性能

Tab.3 Mechanical properties of experimental materials

厚度 $t/\mu\text{m}$	100	75	50
屈服强度 /MPa	623.4	950.3	1040.5
抗拉强度 /MPa	1028.6	1330.3	1349.1

拉深试验的超声振动频率范围 20~21kHz,纵向加载 2.1、4.1、8.6 μm 三种振动幅值,拉深板料直径为 $\phi 10$ 、 $\phi 10.5$ 、 $\phi 11$ 、 $\phi 11.5$ 、 $\phi 12$ 、 $\phi 12.5$ mm,采用 0.2mm/s 的拉深速度,试验结果见表 4。

表4 极限拉延比试验结果

Tab.4 Experiments result of the limit drawing ratios

厚度 / μm	无润滑	植物油润滑	振幅 / μm		
			2.1	4.1	8.6
100	1.83	1.83	2.0	2.0	1.83
75	1.75	1.75	1.83	1.92	1.67
50	1.67	1.75	1.83	1.75	-

利用超声振动进行拉深时,相比较润滑条件下成形力下降的幅度明显增大,并且随着振幅的增大而增大。

2.3 微挤压

微成形中试样尺寸的微型化对摩擦力有着较大的影响,CBunget 在基于超声振动的微成形一文中,研究了试样微型化对摩擦力的影响^[32];GNgale 等^[33]关于超声振动对微成形的影响研究中,利用有限元法模拟反向杯形挤压试验,在考虑变形能与金属塑性成形的关联性,比较宏观成形与微成形变形的摩

擦能 Π ,并建立函数式:

$$\Pi = I_1 + I_2 - I_3 = \int_V \bar{\sigma} \delta \bar{\epsilon} dV + k \int_V \dot{\bar{\epsilon}}_V \delta \dot{\bar{\epsilon}}_V dV - \int_{SF} F_i \delta u_i ds \quad (1)$$

式中: k 为惩罚常数; $\dot{\bar{\epsilon}}_V$ 为体积应变率; $\bar{\sigma}$ 为等效应力; $\bar{\epsilon}$ 为等效应变; $\dot{\bar{\epsilon}}$ 为等效应变率; F_i 为拉力; I_1 为形变能; I_2 为体积应变能; I_3 为摩擦能。

试验得出宏观成形中摩擦能占据的比例较小,而微成形中比重较大,进一步表明摩擦效应对微成形影响较大,表面效应突出。

CristinaBunget 等^[34]在超声振动对微挤压成形的影响的研究中,选用铝(AA1100)和黄铜作为试验材料,对不同尺寸、不同挤压方式和不同润滑方式的试样进行微挤压成形。通过对微挤压成形后的试样表面形貌观察与挤压载荷的测量,在超声振动辅助下的微挤压获得的表面质量明显高于其它方式;在对黄铜试样进行微挤压时,通过对比成形过程中的挤压载荷,发现在超声振动条件的最大挤压载荷减小约 25%。

2.4 微锻压

常规表面修整的方法多采用研磨、抛光、激光照射及精密加工等,但也存在加工效率、工具磨损、环境污染等问题。针对微成形板料的微细化特点,很难用常规方法实现表面修整加工,而超声振动辅助表面修整加工如高频冲击、超声振动微锻压等工艺能减小成形力、延长工具寿命、提高表面质量和精度,尤其是对于一些难加工材料提供了很好的解决途径^[35]。Ming 等^[36]利用金刚石刀具对基于超声振动辅助下的黑色金属材料进行高质量和高精度切削加工,结果表明在超声振动辅助下的车削加工时的刀具寿命、表面光洁度及切削力明显优于常规车削;Brehl and Dow^[37]提出一种通用能力的综合评定和振动辅助成形的边界,推断出超声振动辅助成形比传统的成形方法在减小成形力、延长刀具寿命、获取较大切削深度、较高表面光洁度与成形精度方面有更

大优势。

Yang Bai 等^[39]采用超声振动辅助微锻压的方法对金属薄板进行表面修整试验,通过在不同条件和表层晶粒模型下的试验,获得超声振动对表面粗糙度的影响关系,以阐明超声强化机理,结果显示表面粗糙度的减小与超声振动幅值和静态应力成线性关系,如图3、4所示。

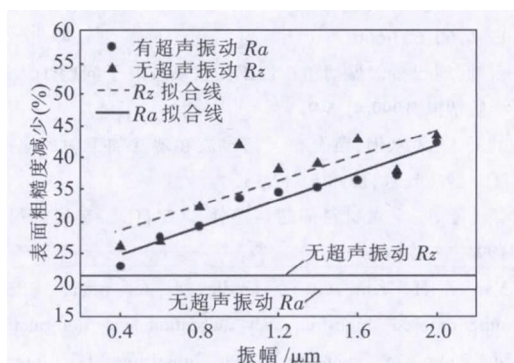


图3 不同振幅与相同静态应力下的表面粗糙度减少
Fig.3 Surface roughness reduction at different amplitudes with the same static stress

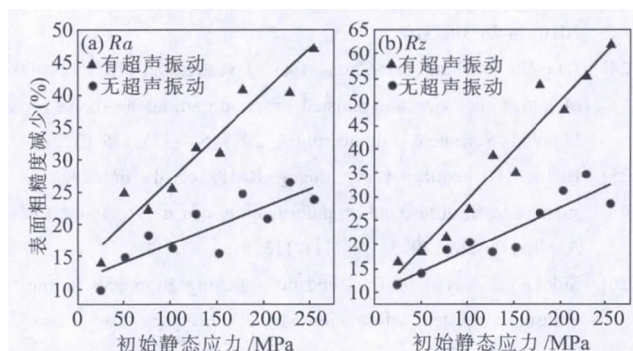


图4 不同静态应力下的表面粗糙度减少
Fig.4 Surface roughness reduction under different static stresses

在超声振动辅助下的微锻压, R_a 的减小率在振幅为 $0.4 \sim 2.0 \mu\text{m}$ 区间由 23.1% 上升到 41.6% , R_z 的减小率在振幅为 $0.4 \sim 2.0 \mu\text{m}$ 区间由 26.4% 上升到 42.8% , 如图3; 对比有无超声振动下的初始静态应力与表面粗糙度的减小率, 发现在超声振动下的表面粗糙度减小率的增量约为无超声振动下的两倍, 如图4所示。

3 有待解决的问题和解决思路

行业产品发展的微型化、精密化及智能化, 使得以电子工业和精密机械为代表的通讯、电子、微机电系统(MEMS)、微系统技术(MST)等领域对微细化的产品需求日益旺盛^[39-41], 同时, 对微型化零件的精

度、表面质量、复杂性等方面也提出了更高的要求。超声振动微成形能有效提高微成形件的表面质量与精度、降低模具损耗、扩大塑性成形范围、减小模具与微成形件的摩擦等优点, 鉴于此, 近几年来, 在微成形工艺中引入超声振动辅助成形的研究已引起塑性成形领域学者的广泛关注, 并取得了一定的成果, 但尚存在以下问题:

(1) 研究主要集中在简单的试验研究, 如超声振动对微成形件的表面质量、成形力、热效应、摩擦力等方面, 而就超声振动对微成形材料的性能、失效形式与特点、微观组织及变形规律的机理等, 缺乏系统、深入、细致研究。

(2) 对金属超声振动微成形过程中的体积效应和表面效应未形成定量描述性的模型, 尚未解决超声振动对金属微成形过程中的影响与作用机理的本质等, 理论研究相对滞后。

(3) 微成形工艺中存在尺寸效应和摩擦效应, 未能定性地描述超声振动效应与尺寸效应和摩擦效应的关联性。

(4) 超声振动金属微成形工艺的合理设计, 模具设计及成形装置, 振动加载方式、传输及控制系统等问题。这些都未能系统地研究。

针对上述问题, 首先思考的是在微成形和材料领域寻求最新的线索, 为超声振动微成形提供工艺和材料的理论基础, 采用试验、理论模型及数值模拟相结合的方法, 系统研究超声振动微成形中的尺寸效应和材料行为, 揭示超声振动对微成形中的尺寸效应、材料力学性能、屈服及失稳准则、微观组织和位错等机理; 此外, 引入弹塑性波动理论、摩擦理论、塑性成形理论、超声振动在塑性变形体中传播的理论等, 定性描述超声振动微成形中的体积效应和表面效应的机理。

4 结语

随着微型件尺寸的进一步减小, 需要更高的模具制造及安装精度, 才能满足微成形工艺的要求, 这给微成形的设备及模具制造带来了极大的挑战; 此外, 材料特性、尺寸效应、摩擦效应使得微成形与传统成形方式存在很大差异, 如流动应力随尺寸减小而减小, 摩擦效应在微成形中成为主导因素, 表面润滑膜的厚度直接影响微成形后的精度。在微成形过程中叠加超声振动能有效降低流动应力、减小工件

与模具之间的摩擦力、提高表面质量以及极限拉延比。因此,超声振动塑性成形技术为微成形工艺提供了良好的方案,同时,为拓展超声振动塑性成形领域、成形理论以及促进超声振动塑性成形技术的应用,具有重要的理论意义与工程应用价值。可以预见,超声振动微成形技术将具有广阔的市场前景。

参考文献:

- [1] Geiger M, Kleiner M, Eckstein R. Microforming. *Annals of the CIRP*[J]. 2001,50(2):445-462.
- [2] Tiesler N, Engel U, Geiger M. Basic research on cold forging of micro parts [C]//Proc of the 7th ICTP. Rotterdam,2003: 379-384.
- [3] Tiesler N, Engel U, Geiger M. Forming of micro parts effects of miniaturization on friction [C]//Proceedings of the 6th ICTP. Nuremberg,1999:889-894.
- [4] Tiesler N, Engel. Microforming-effects of miniaturization[C]//Metal Forming 2000. Rotterdam,2000:355-360.
- [5] Engel U, Eckstein R. Microforming-from basic research to its realization [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002,125-126,35-44.
- [6] 赵亚西. H62 黄铜微挤压成形及其尺寸效应研究[D]. 南京: 南京航空航天大学,2007:55-58.
- [7] Vollertsen F, Hu Z, Schulze Niehoff H, et al. State of the art in micro forming and investigations into micro deep drawing [J]. *Journal of Materials Processing Technology*,2004,151: 70-79.
- [8] Neil Krishnan, Jian Cao, Kuniaki Dohda. Study of the size effects on friction conditions in microextrusion-part1:micro extrusion experiments and analysis [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*,2007,129:669-676.
- [9] Blaha F, Langenecker B. Dehnung von zink-kristallen unter ultraschalleinwirkung [J]. *Die Naturwissenschaften*,1955,42 (20):556-560.
- [10] Langenecker B. Work-softening of metal crystals by alternating the rate of glide strain[J]. *Acta Metallurgica*,1961,9:937-940.
- [11] Langenecker B. Effects of ultrasound on deformation characteristics of metals [J]. *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*,1966,SU-13:1-8.
- [12] Möllers J, Fischer F. über den Einfluß von Ultraschall auf die Reibung beim Tiefziehen [J]. *Bänder Bleche Rohre*,1975,11: 457-460.
- [13] Winsper C E, Sansome D H. An introduction to the mechanics of oscillatory metalworking[J]. *Metals and Materials*,1970(4): 158-162.
- [14] Buckley J T, Freeman M K. Ultrasonic Tube drawing [J]. *Ultrasonics*,1970,8:152-158.
- [15] Siegert K. Wire drawing with ultrasonically oscillating dies [J]. *J. Mater. Process. Tech.*,1996,60:657-660.
- [16] Jimma T. An application of ultrasonic vibration to the deep drawing process [J]. *J. Mater. Process. Tech.*,1998,80-81: 406-412.
- [17] Murakawa M, Jin M. The utility of radially and ultrasonically vibrated dies in the wire drawing process[J]. *J. Mater. Process. Tech.*,2011,113:81-86.
- [18] Siegert K, Mock A. Wire drawing with ultrasonically oscillating dies [J]. *Journal of Material Processing Technology*, 1996,60:657-660.
- [19] 何勃, 闻邦椿. 振动塑性加工的进展及若干问题[J]. *辽宁工学院学报*,1999(4):5-9.
- [20] 刘新忠, 孟永钢, 苗金鱼. 超声波在塑性加工中的应用研究 [J]. *锻压技术*,1998(5):12-15.
- [21] 张士宏. 金属材料的超声塑性加工 [J]. *金属成形工艺*, 1994,12(3):102-106.
- [22] Yao Z H, Kim G Y, Faidley L A, et al. Effects of superimposed high-frequency vibration on deformation of aluminum in micro/meso-scale upsetting [J]. *Journal of Materials Processing Technology*,2012,212:640-646.
- [23] Aziz S A, Lucas M. The effect of ultrasonic excitation in metal forming tests [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2010,24-25:311-316.
- [24] Jung-Chung Hung, Yu-Chung Tsai. Investigation of the effects of ultrasonic vibration-assisted micro-upsetting on brass [J]. *Materials Science & Engineering A*,2013,580(15):125-132.
- [25] Huang H, Pequegnat A, Chang B H, et al. Influence of superimposed ultrasound on deformability of Cu [J]. *Journal of Applied Physics*,2009,160 (11):11354.
- [26] Siddiq A, Sayed T E. Acoustic softening in metals during ultrasonic assisted deformation via CP-FEM [J]. *Mater. Lett.*, 2011,65:356-359.
- [27] Gilman J J. Contraction of extended dislocations at high speeds [J]. *Mat. Sci. Eng. A*,2001,319-321:84-86.
- [28] Yao Z, Kim G Y, Faidley L, et al. Effects of superimposed high-frequency vibration on deformation of aluminum in micro/meso-scale upsetting [J]. *Journal of Materials Processing Technology*,2012,212(3):640-646.
- [29] Mostafapur A, Ahangar S, Dadkhah R. Numerical and experimental investigation of pulsating blank holder effect on drawing of cylindrical part of aluminum alloy in deep drawing process[J]. *Int J Adv Manuf Technol.*,2013,69:1113-1121.
- [30] Jimma T, Kasuga Y, Iwaki N, et al. An application of ultrasonic vibration to the deep drawing process [J]. *J Mater Process Tech.*,1998,80-81:406-412.
- [31] Huang Y M, Wu Y S, Yuang J K. The influence of ultrasonic vibration-assisted micro-deep drawing process [J]. *Int J Adv Manuf Technol.*,2014,71:1455-1461.
- [32] Bunget C. Microforming and ultrasonic forming [D]. North Carolina:North Carolina State University,2006.(下转第 27 页)

- [3] 蔡开科. 连铸坯质量控制[M]. 北京:冶金工业出版社,2010:289-290.
- [4] Isobe Kohichi. The realities of V segregation and the formation mechanism of V segregation of continuously cast blooms[J]. *Camp-ISIJ*,2008,21:102-105.
- [5] 林启勇. 连铸过程铸坯动态轻压下压下模型的研究与应用[D]. 沈阳:东北大学,2008:5-6.
- [6] 曹学欠. 280×325 大方坯连铸动态轻压下压下模型的研究与应用[D]. 沈阳:东北大学,2009:4-5.
- [7] 魏勇,倪红卫,罗传清,等. 轻压下技术在连铸中的应用及研究[J]. *武汉科技大学学报:自然科学版*,2007(4):346-349.
- [8] 廖永松. 轻压下技术在高碳钢方坯连铸中的应用[J]. *炼钢*,2002,18(5):35-39.
- [9] 孙蓟泉,周华勤. 高效连铸及轻压下[J]. *技术机械工程与自动化*,2004(1):4-5.
- [10] 朱苗勇,林启勇. 连铸坯的轻压下技术[J]. *鞍钢技术*,2004(1):1-6.
- [11] Clyne T W, Wolf M, Kurz W. The effect of melt composition on solidification cracking of steel with particular reference to continuous casting[J]. *Metall. Trans. B*,1982,13(2):259-266.
- [12] Young Mok Won, Heung Nam Han, Tae-jung Yeo, et al. Analysis of solidification cracking using the specific crack susceptibility [J]. *ISIJ International*,2000,40(2):129-136.
- [13] Kuyng Shik Oh. Development of soft reduction for the bloom caster at pohang works of POSCO [C]//*Steelmaking Conference Proceeding*. Pittsburgh USA:Iron and Steel Society,1995:301-308.
- [14] 干勇,倪满森,余志祥. 现代连铸炼钢使用手册[M]. 北京:冶金工业出版社,2010:364-365.
- [15] 谢长川,张炯明,王新华,等. 动态轻压下技术的研发及运用[J]. *钢铁*,2009,44(12):100-104.
- [16] 阎朝红. 凝固末端轻压下技术在连铸中的应用[J]. *宝钢技术*,2001(5):51-55.
- [17] Hiebler H, Zirngas J, Bernhard Ch, et al. Inner crack formation in continous casting: stress or strain criterion[C]//*Steelmaking Conference Proceedings*. Pittsburgh USA:Iron and Steel Society,1994:405-416.
- [18] Tadao Watanabe, Mikio Yamashita. Influence of liquid flow at the final solidification stage on centerline segregation in continuously cast slab[J]. *Sumitomo Metals*,1993,45(3):26-39.
- [19] Perking A, Brooks M G, Haleem R S. Roll performance in continuous slab casting machines [J]. *Ironmaking and Steelmaking*,1985,6(12):276-283.
- [20] Irving W R, Perkins A, Brooks M G. Effect of chemical operational, and engineering factors on segregation in continuously cast slabs [J]. *Ironmaking and Steelmaking*,1984,3(11):152-162.
- [21] Shigeaki Ogibayshi, Masayuki Kobayashi, Mamoru Yamada, et al. Influence of soft reduction with one-piece rolls on center segregation in continuously cast slabs [J]. *ISIJ International*,1991,31(12):1400-1407.
- [22] Ogibayashi S, Yamada M, Yoshida Y, et al. Influence of roll bending on center segregation in continuously cast slabs [J]. *ISIJ International*,1991,31(12):1408-1415.
- [23] Masaoka T, Mizuoka S, Kobayashi H, et al. Improvement of centerline segregation in continuously cast slab with soft reduction technique [C]//*Steelmaking Conference Proceedings*. Pittsburgh USA:Iron and Steel Society,1989:63-69.
- [24] Okimori M,西原良治,福永新一, et al. Development of soft reduction techniques for preventing center porosity occurrence in large size bloom[J]. *Tetsu-to-Hagane*,1994,80:T120-T123.
- [25] 祭程,朱苗勇,程乃良. 板坯连铸机动态轻压下过程控制系统的研究与实现[J]. *冶金自动化*,2007,31(1):51-65.
- [26] 田新中,朱荣,祭程,等. 动态轻压下技术在 SWRH82B 大方坯连铸中的应用 [J]. *计算机与应用化学*,2010,27(12):1707-1710.
- [27] 王捷,杨拉道. 连铸轻压下技术的最新发展[J]. *重型机械*,2001(6):1-3.
- [28] 冯科. 板坯连铸机轻压下扇形段的设计特点 [J]. *炼钢*,2006,22(2):53-56.
- [29] 路勇强. 浅析连铸 CyberLink 技术的优越性[J]. *金属世界*,2007(6):56-58.
- [30] 宣守蓉,汪洪峰. 板坯连铸机高精度扇形段的应用与发展[J]. *梅山科技*,2010(5):53-58. 田

(上接第 22 页)

- [33] Ngaile G, Bunget C. Influence of ultrasonic vibration on microforming [J]. *Transaction of NAMRI/SME*,2008,36:137-144.
- [34] Cristina Bunget,Gracious Ngaile. Influence of ultrasonic vibration on micro-extrusion[J]. *Ultrasonic*,2011,51:606-616.
- [35] Yang Bai, Ming Yang. Investigation on mechanism of metal foil surface finishing with vibration-assisted micro-forging [J]. *Journal of Material Processing Technology*,2013,213:330-336.
- [36] Ming Z, Eow Y T, Ngoi B, et al. Vibration-assisted precision machining of steel with PCD tools [J]. *Materials and Manufacturing Processes*,2003,18:825-834.
- [37] Brehl D E, Dow T A. Review of vibration-assisted machining [J]. *Precision Engineering*,2008,32:153-172.
- [38] Yang Bai, Ming Yang. Influence of ultrasonic vibration on metal foil surface finishing with micro-forging [J]. *Procedie Engineer*,2014,81:1475-1480.
- [39] Tairan Hsu. MEMS 和微系统设计与制造[M]. 北京:机械工业出版社,2004:2-10.
- [40] 孙友松,章争荣,刘明俊. 跨入新世纪的塑性加工技术[J]. *锻压技术*,2003,28(1):35-37.
- [41] Craihead H G. Nanoelect romechanical Systems[J]. *Science*,2000,290(24):1532-1535. 田