

## 铜合金表面织构冷压成形实验研究

高 壮<sup>1</sup>, 刘志奇<sup>1</sup>, 陈东良<sup>1</sup>, 陈浩飞<sup>1</sup>, 王文安<sup>1</sup>, 宋建丽<sup>2</sup>

(1. 太原科技大学 机械工程学院, 山西 太原 030024; 2. 北京信息科技大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100192)

**摘要:** 研究了一种高效低成本的表面织构加工方法——表面织构冷压成形工艺, 并验证了其制备功能性表面织构的可行性。将铜合金在不同温度下退火制备不同晶粒尺寸的试样, 通过自行开发的表面织构冷压成形系统, 对铜合金进行圆形凹坑表面织构冷压成形实验。使用超景深三维显微镜对织构形貌进行分析, 并研究了不同载荷、晶粒尺寸对单点表面织构冷压成形结果的影响, 以及不同凹坑间距对两点织构冷压成形结果的影响。通过表面织构冷压成形实验在 H62 铜合金表面制造了变形影响区中直径为  $\Phi 336.0 \sim \Phi 720.6 \mu\text{m}$ 、深度为  $27.33 \sim 110.10 \mu\text{m}$  的圆形凹坑织构。研究结果表明, 载荷、晶粒尺寸、凹坑间距对表面织构的成形结果有显著影响。实验确定了冷压成形表面织构的工艺参数, 验证了冷压成形制备表面织构的可行性。

**关键词:** 铜合金; 表面织构; 微成形; 冷压成形; 晶粒尺寸

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.01.028

**中图分类号:** GT306

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2022) 01-0196-07

## Experimental research on cold press forming for copper alloy surface texture

Gao Zhuang<sup>1</sup>, Liu Zhiqi<sup>1</sup>, Chen Dongliang<sup>1</sup>, Chen Haoifei<sup>1</sup>, Wang Wenan<sup>1</sup>, Song Jianli<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China; 2. School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China)

**Abstract:** A high-efficiency and low-cost surface texture processing method, namely, surface texture cold press forming process was studied, and the feasibility of preparing functional surface textures was verified. Then, the copper alloy was annealed at different temperatures to prepare samples with different grain sizes, and the cold press forming experiment of the circular pit surface texture for copper alloy was conducted by the self-developed surface texture cold press forming system. Furthermore, the texture topography was analyzed by a three-dimensional microscope with ultra-depth of field, and the influences of different loads and grain sizes on the cold press forming results of single-point surface texture and the influence of different pit spacings on the cold press forming results of two-point texture were studied. Finally, through cold press forming experiments of surface texture, the circular pit textures with the diameter of  $\Phi 336.0 \sim \Phi 720.6 \mu\text{m}$  and the depth of  $27.33 \sim 110.10 \mu\text{m}$  for deformation affected zone were fabricated on the surface of H62 copper alloy. The research results show that the load, grain size and pit spacing have a significant effect on the surface texture structure. The experiment determines the process parameters of the cold press forming for surface texture and verifies the feasibility of cold press forming to prepare the surface texture.

**Key words:** copper alloy; surface texture; microforming; cold press forming; grain size

表面织构是指通过主动设计和制造, 产生了按一定规则排布的微米或亚毫米级结构, 从而获得特定功能的表面<sup>[1]</sup>。现代工业技术提供了多种加工方法来构建不同的表面织构, 如激光表面微造型技

术<sup>[2]</sup>、表面喷丸处理技术<sup>[3]</sup>、离子刻蚀技术<sup>[4]</sup>、微细电火花加工<sup>[5]</sup>、光刻技术<sup>[6]</sup>、磨料射流加工<sup>[7]</sup>、磨削加工<sup>[8]</sup>、聚焦离子束加工<sup>[9]</sup>、激光冲击压印<sup>[10]</sup>等。然而传统的加工技术存在许多局限, 如激光表面微造型技术, 其设备昂贵、加工烧蚀严重, 在微沟槽周围会形成大量的熔融物, 造成沟槽边缘凸起<sup>[11]</sup>。此外, 由于材料、成本、加工时间、方法和化学处理的严格限制, 这些技术并不总是适用的。

冷压成形主要利用材料的塑性性质进行加工, 在常温下通过对材料施加外力, 使之产生不可恢复的永久性塑性变形。该工艺成形精度高、工艺简单、生产效率高<sup>[12]</sup>、材料利用率高<sup>[13]</sup>, 并且在冷压成

收稿日期: 2021-09-27; 修订日期: 2021-12-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51975396); 山西省留学人员科技活动择优资助项目 (20200023); 山西省回国留学人员科研经费资助项目 (2021-138)

作者简介: 高 壮 (1997-), 男, 硕士研究生

E-mail: 1056840225@qq.com

通信作者: 刘志奇 (1972-), 男, 博士, 教授

E-mail: liuzhiqi@tyust.edu.cn

形过程中,零件表面会产生大量的孪晶和位错,提高表面硬度,实现表面强化<sup>[14]</sup>。所以,冷压成形是一种高效、低成本制造表面织构的方法。然而,由于所需表面织构为微米及亚毫米级尺度,这种微细结构的成形质量受到晶粒尺寸的影响,其成形机理及金属流动规律不同于传统的宏观塑性成形,不能简单地将宏观塑性成形工艺按几何比例缩小后应用到表面微织构的成形中<sup>[15]</sup>。目前,有关表面织构的冷压塑性成形工艺的相关研究还很有限。

针对传统的表面织构加工方法存在的成本高、效率低等问题,本文研究了一种高效、低成本的表面织构加工方法——表面织构冷压成形工艺。采用H62铜合金材料在不同温度下退火制备了5种晶粒尺寸的试样,并使用直径为 $\Phi 800\ \mu\text{m}$ 的氧化锆球进行圆形凹坑织构冷压成形实验,研究了不同载荷、晶粒尺寸对圆形凹坑织构成形性的影响。实验确定了冷压成形表面织构的工艺参数,验证了微凹坑织构冷压成形制备功能性表面织构的可行性。

## 1 实验

摩擦副材料主要用铜合金作为配对材料之一,本文选择H62黄铜作为实验材料,试样直径为 $\Phi 20\ \text{mm}$ 、厚度为 $10\ \text{mm}$ ,试样经砂纸打磨,表面粗糙度为 $Ra0.2\ \mu\text{m}$ 。将其分别在 $300$ 、 $400$ 、 $500$ 、 $600$ 和 $700\ ^\circ\text{C}$ 下退火 $1\ \text{h}$ 后炉冷,得到不同晶粒尺寸

的试样,具体如表1所示<sup>[16]</sup>。

表1 不同退火温度下试样的平均晶粒尺寸  
Table 1 Average grain sizes of samples at different annealing temperatures

温度/ $^\circ\text{C}$	300	400	500	600	700
晶粒尺寸/ $\mu\text{m}$	7.04	10.36	37.24	42.62	58.20

使用莫氏硬度为9级、洛氏硬度 $\text{HRA} \geq 87$ 、直径为 $\Phi 800\ \mu\text{m}$ 的氧化锆球(氧化锆95%,氧化钇5%)作为压头对H62黄铜试样进行压印。由于氧化锆球的硬度高、耐磨性好,因此,在压印过程中的磨损量可以忽略不计。

图1为圆形凹坑织构冷压成形原理。其中, $F$ 为压印载荷。采用冷压成形方法加工凹坑形成表面微织构,具有成形效率和精度高、工艺简单、适合工业大批量生产的特点。冷塑性成形时零件表面会产生大量的孪晶和位错,在制造功能化表面织构的同时,还可提高零件表面硬度,实现表面强化,从而提高零件的抗应力腐蚀能力和疲劳寿命。在压印过程中,压头竖直向下运动,直至与试样表面接触,然后根据实验参数进行压印,当达到所需载荷时,保持载荷一段时间后将压头从试样表面收回,至此完成单点压印。在两点冷压成形过程中,首先进行单点压印,随后控制移动平台将试样移动一段距离,到达下一个压印位置再进行一次压印。

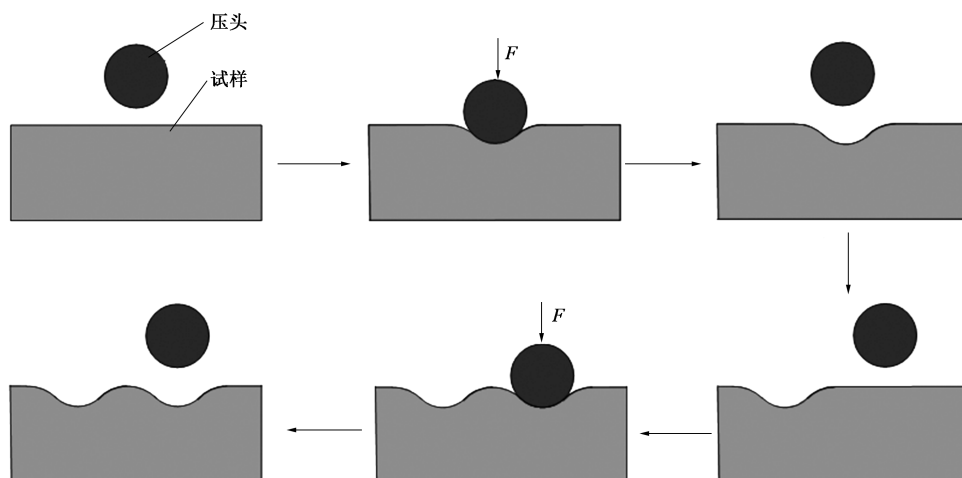


图1 圆形凹坑织构冷压成形原理  
Fig. 1 Cold press forming principle of circular pit texture

图2为圆形凹坑织构冷压成形结果示意图。图2a为铜合金单点冷压成形结果示意图,其中 $H$ 为压痕深度,在压印卸载后,球形压头在材料表面留下的凹坑并不是压头与试样的接触部分,在试样与压

头接触部分边缘的材料发生了下沉,导致其低于原始平面,将压印后圆形凹坑整体低于原始平面的部分称为变形影响区,其直径称为变形影响区直径,如图2a中的A所示。图2b为两点冷压成形结果示

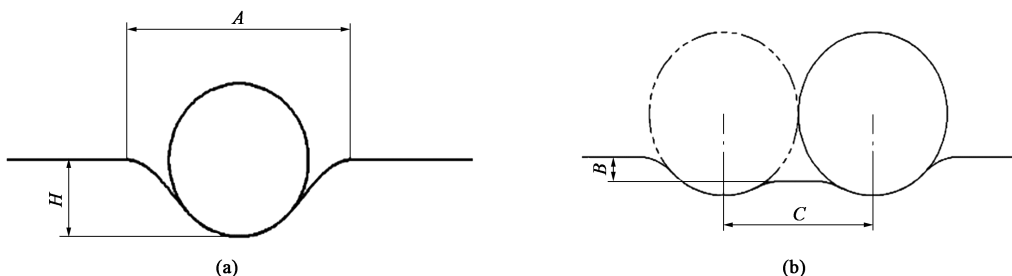


图 2 圆形凹坑织构冷压成形结果

(a) 单点 (b) 两点

Fig. 2 Results of cold press forming for circular pit texture

(a) Single point (b) Two points

意图, 其中  $B$  为两凹坑间所形成的脊距原始平面的距离,  $C$  为两凹坑的间距。

实验装置是太原科技大学金属材料成形理论与技术课题组自行开发的表面织构冷压成形系统, 如图 3 所示, 由微压印单元和数据采集单元组成。试样放置在移动平台上, 氧化铝压头通过胶水粘附在加载平台上, 试样和压头表面不涂覆任何润滑剂, 在压印过程中, 通过调节加载螺母使加载弹簧压缩, 加载弹簧的另一端连接加载平台, 将载荷传递到加载平台上的氧化铝球形压头上, 对试样进行压印。压印载荷  $F$  分别为 100、150、200、250、300 和 350 N, 载荷保持时间为 30 s。压印载荷和压痕深度分别用称重传感器和位移传感器检测。使用基恩士 VHX-2000 超景深三维显微镜测量试样表面三维形貌及其表面轮廓, 为确保准确性, 进行 3 次重复实验后取平均值。

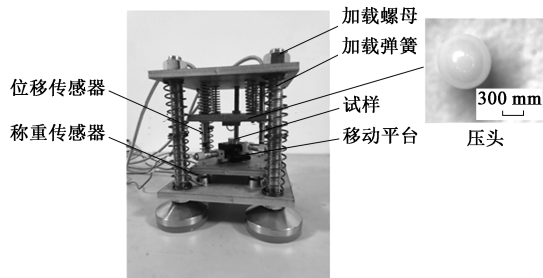


图 3 表面织构冷压成形实验装置

Fig. 3 Experimental device of cold press forming for surface texture

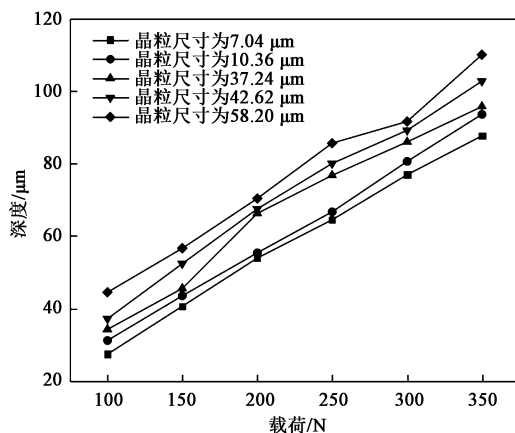


图 4 不同晶粒尺寸的 H62 黄铜试样的压印载荷和压痕深度关系曲线

Fig. 4 Relationship curves between impressing load and impression depth of H62 brass specimens with different grain sizes

形凹坑。图 5 为晶粒尺寸为 42.62  $\mu\text{m}$  的 H62 黄铜在不同压印载荷下冷压成形圆形凹坑的三维形貌。实验结果表明, 压印载荷和晶粒尺寸的变化对压痕深度的影响很大, 对于同一晶粒尺寸的试样, 圆形凹坑深度随着载荷的增加而增大。金属材料的塑性成形是指通过施加外力, 利用金属自身的塑性, 使其产生塑性变形, 进而加工成为所需形状和尺寸的加工方法<sup>[17]</sup>。流动应力泛指屈服应力, 又称真实应力, 是金属塑性加工变形抗力的指标, 各种变形条件下的流动应力的变化规律表达为真实应力-真实应变关系。大多数金属的真实应力-真实应变关系可使用指数方程表达, 如式 (1) 所示<sup>[18]</sup>。

$$Y = K\varepsilon^n \quad (1)$$

式中:  $Y$  为真实应力;  $K$  为强度系数;  $n$  为硬化指数;  $\varepsilon$  为真实应变。

当压印载荷增大时, 真实应力随之增大, 导致真实应变增大, 表现为冷压成形压痕深度的增加。所以, 在同一晶粒尺寸下, 载荷越大, 冷压成形的压痕深度越大。

## 2 结果及分析

### 2.1 载荷、晶粒尺寸对冷压成形织构深度和变形影响区直径的影响

图 4 为不同晶粒尺寸的 H62 黄铜试样的压印载荷和压痕深度关系曲线。数据显示, 实验成功在 H62 黄铜表面制造了深度为 27.33~110.1  $\mu\text{m}$  的圆

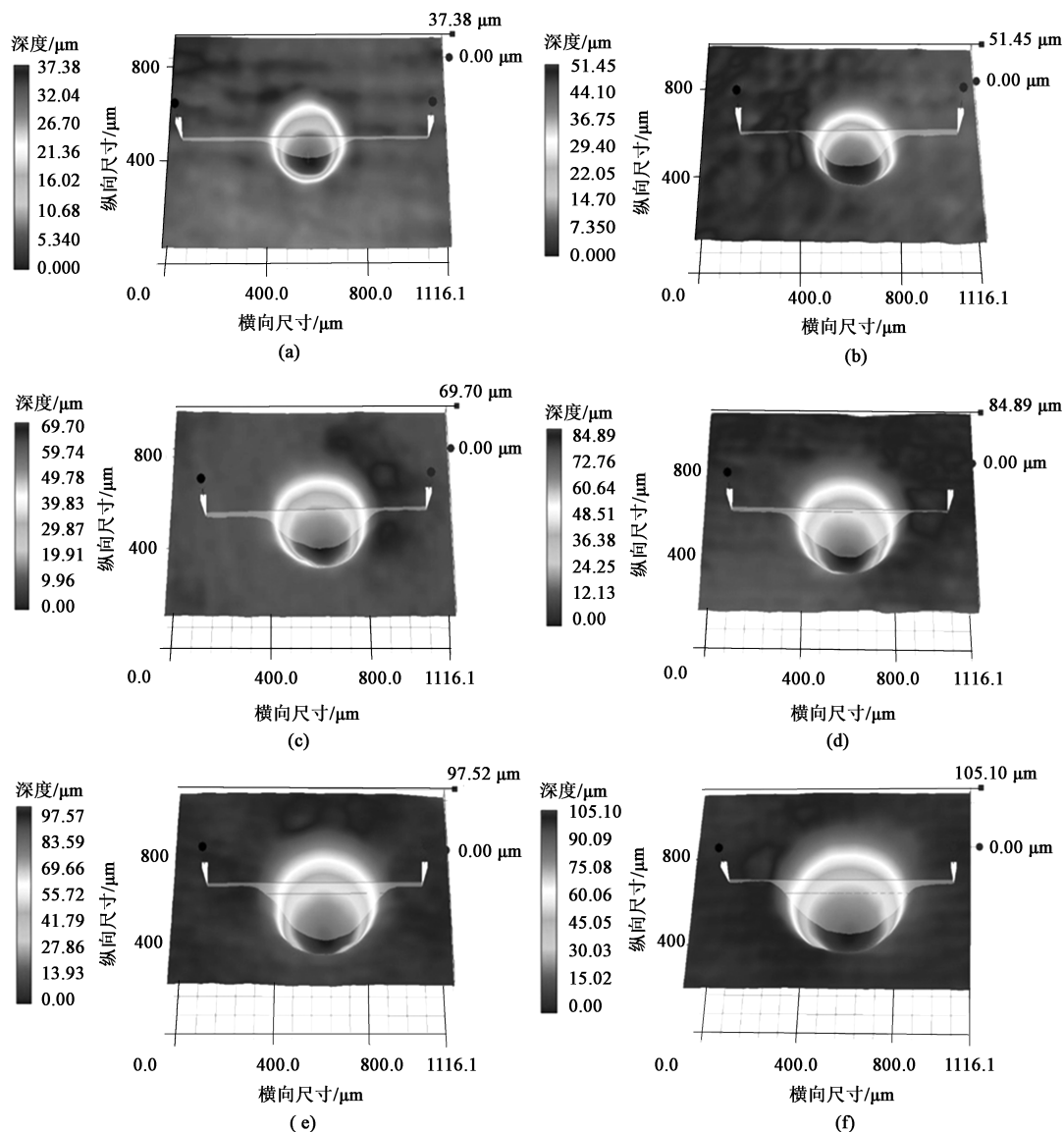


图5 晶粒尺寸为42.62  $\mu\text{m}$  的H62黄铜在不同压印载荷下冷压成形圆形凹坑织构的三维形貌

(a) 100 N (b) 150 N (c) 200 N (d) 250 N (e) 300 N (f) 350 N

Fig. 5 Three-dimensional morphologies of circular pit texture formed by cold press forming of H62 brass with a grain size of 42.62  $\mu\text{m}$  under different impressing loads

图6为晶粒尺寸对压痕深度的影响曲线,从中可以看出,晶粒尺寸的变化会影响圆形凹坑的深度,在同一压印载荷下,随着晶粒尺寸的增大,圆形凹坑的深度增加。这表明不同晶粒尺寸的材料在材料性能上也存在差异,会影响材料微细成形流动行为,表现为圆形凹坑深度的显著差异。晶粒尺寸越小,就会有越多的晶粒来承受球形压头对金属表面的压印载荷,则表现出较大的流动应力,导致压痕深度较小;而随着晶粒尺寸的增大,晶界表面积随之增大,晶界表面积增大会使材料在成形过程中的流动应力升高<sup>[15]</sup>,所以,在相同的压印载荷下,晶粒尺寸越大的材料的压痕深度就越大。

在冷压成形过程中,球形压头在材料表面留下的凹坑并不是压头与试样的接触部分,在试样与压头接触部分边缘的材料下沉,导致其低于原始平面,如图2圆形凹坑冷压成形结果所示,同样的结果也可以从图5中看出。这是由于压头在压入试样的过程中,通常会在压头与试样接触周围的材料形成凸起或下沉现象。崔航等<sup>[19]</sup>采用球形压头对不同弹塑性材料的压入过程进行数值模拟研究,结果表明,当材料的应变硬化指数 $n$ 大于0.23时,试样与压头接触部分边缘的材料均下沉。实验采用的铜合金的应变硬化指数 $n$ 为0.36<sup>[20]</sup>,所以,在冷压成形过程中,在试样与压头接触部分周围的材料下沉,导致

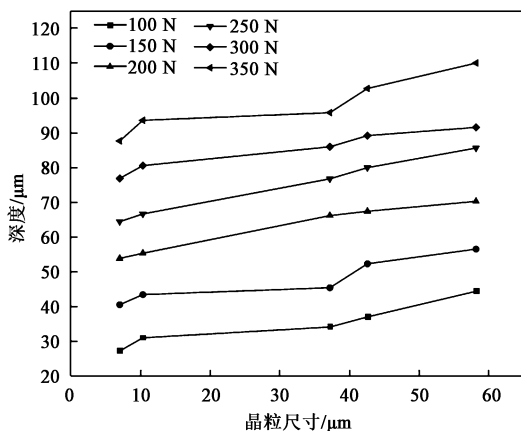


图 6 晶粒尺寸对压痕深度的影响曲线

Fig. 6 Effect curves of grain size on impression depth

其低于原始平面。

图 7 为压印载荷对变形影响区直径的影响曲线。结果表明,同一晶粒尺寸试样的变形影响区直径随着压印载荷的增大而增大,直径为  $\Phi 336.0 \sim 720.6 \mu\text{m}$ 。这是由于冷压成形凹坑的深度随着压印载荷的增大而增大,而压头为球体,即凹坑的直径会随着压印深度的增大而增大,所以,当载荷增大时,变形影响区直径随之增大。

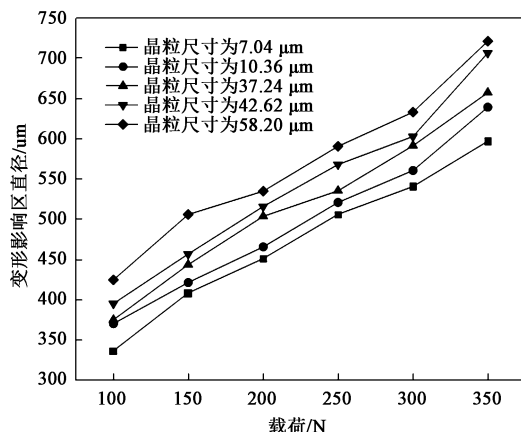


图 7 压印载荷对变形影响区直径的影响曲线

Fig. 7 Effect curves of impressing load on diameter of zone affected by deformation

图 8 为晶粒尺寸对变形影响区直径的影响曲线,结果表明,在相同的压印载荷下,变形影响区直径随着晶粒尺寸的增大而增大。这是由于在相同载荷下晶粒尺寸越大,织构的成形深度就越大。同样,由于压头是球体,所以当晶粒尺寸增大时变形影响区直径随之增大。

## 2.2 凹坑间距对冷压成形织构成形结果的影响

为了研究微压印凹坑之间的影响,进行了两点

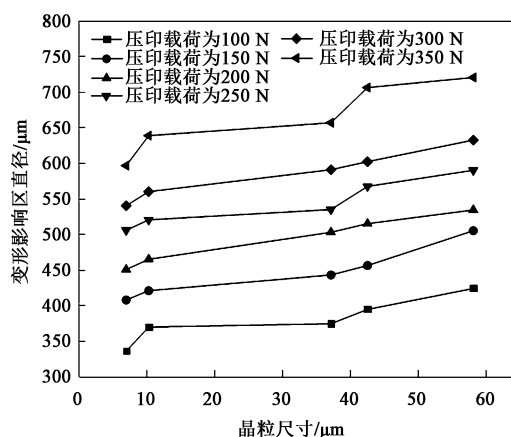


图 8 晶粒尺寸对变形影响区直径的影响曲线

Fig. 8 Effect curves of grain size on diameter of zone affected by deformation

压印实验,试样为  $500^\circ\text{C}$  退火后的 H62 黄铜,压印载荷为 200 N,两凹坑间距分别为 400、500、600 和  $700 \mu\text{m}$ 。图 9 为两点压印实验结果。

如图 9 所示,当两圆形凹坑间距较近时,两凹坑间的金属材料会向下凹陷形成脊,并且所形成的脊的顶端低于原始平面,图 10 为两凹坑间距对两凹坑间所形成的脊与原始平面高度差的影响,使用超景深三维显微镜测量了所形成脊与试样原始平面之间的高度差。结果表明:随着两个凹坑间距的增加,影响减小,表现为两凹坑间所形成脊相对原始平面高度差的减小;两凹坑间距为  $700 \mu\text{m}$  时,高度差减小到 0。在单点压印实验中,对于  $500^\circ\text{C}$  下退火后的 H62 黄铜,在压印载荷为 200 N 时,凹坑织构的变形影响区范围为  $500 \mu\text{m}$ ;然而在两点压印实验中,两凹坑间距在  $500 \mu\text{m}$  时,两凹坑间仍然存在凹陷,直到两凹坑间距为  $700 \mu\text{m}$  时,两凹坑间的材料才没有凹陷。这说明两个微压印凹坑的金属流动会互相影响,随着凹坑间距的增大,影响减小。

## 3 结论

(1) 铜合金冷压成形凹坑过程中的金属流动局限在微压印凹坑附近,并且周围材料形成下沉。

(2) 晶粒尺寸对表面织构冷压成形的深度和变形影响区直径范围存在明显影响,在相同的压印载荷下,随着晶粒尺寸的增大,凹坑的深度和变形影响区直径也随之增大。

(3) 两点冷压成形凹坑之间的金属流动会互相影响,随着凹坑间距的增大,影响减小。

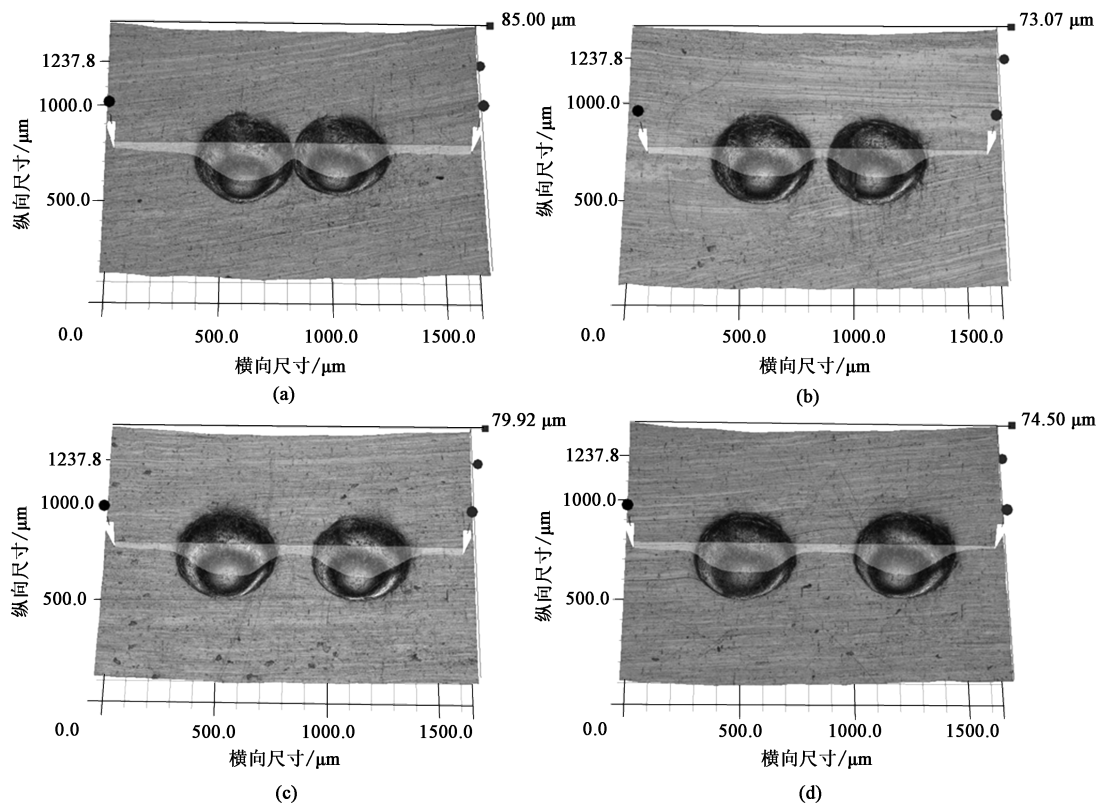


图9 两点冷压成形实验结果

(a) 凹坑间距为 400  $\mu\text{m}$  (b) 凹坑间距为 500  $\mu\text{m}$  (c) 凹坑间距为 600  $\mu\text{m}$  (d) 凹坑间距为 700  $\mu\text{m}$ 

Fig. 9 Experiment results of two-point cold press forming

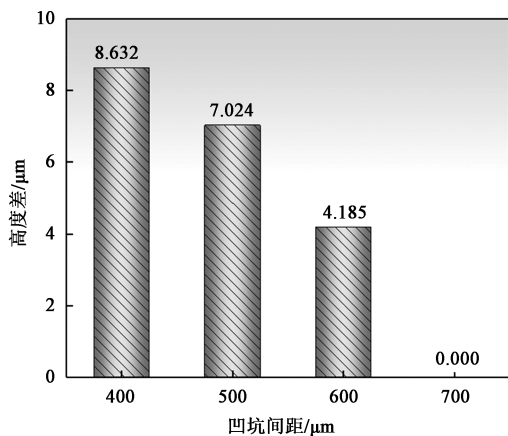
(a) Pit distance of 400  $\mu\text{m}$  (b) Pit distance of 500  $\mu\text{m}$  (c) Pit distance of 600  $\mu\text{m}$  (d) Pit distance of 700  $\mu\text{m}$ 

图10 凹坑间距对两凹坑间所形成的脊与原始平面高度差的影响

Fig. 10 Effect of pit distance on height difference between ridge formed between two pits and original plane

(4) 实验验证了冷压成形制备表面织构的可行性。

## 参考文献:

[1] 王静秋, 王晓雷. 表面织构创新设计的研究回顾及展望

[J]. 机械工程学报, 2015, 51 (23): 84-95.

Wang J Q, Wang X L. Review and prospect of research on innovative design of surface texture [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51 (23): 84-95.

[2] 李亚军, 逢显娟, 孙乐民, 等. 激光表面织构化对45钢摩擦磨损性能的影响 [J]. 表面技术, 2018, 47 (8): 147-154.

Li Y J, Pang X J, Sun L M, et al. The effect of laser surface texture on the friction and wear properties of 45 steel [J]. Surface Technology, 2018, 47 (8): 147-154.

[3] Wakuda M, Yamauchi Y, Kanzaki S. Effect of workpiece properties on machinability in abrasive jet machining of ceramic materials [J]. Precision Engineering, 2002, 26 (2): 193-198.

[4] 历建全, 朱华. 表面织构及其对摩擦学性能的影响 [J]. 润滑与密封, 2009, 34 (2): 94-97, 103.

Li J Q, Zhu H. Surface texture and its influence on tribological properties [J]. Lubrication Engineering, 2009, 34 (2): 94-97, 103.

[5] Deng J, Song W, Hui Z. Design, fabrication and properties of a self-lubricated tool in dry cutting [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2009, 49 (1): 66-72.

[6] Suh M S, Chae Y H, Kim S S, et al. Effect of geometrical parameters in micro-grooved crosshatch pattern under lubricated sliding friction [J]. Tribology International, 2010, 43 (8): 1508-

- 1517.
- [7] Wakuda M, Yamauchi Y, Kanzaki S, et al. Effect of surface texturing on friction reduction between ceramic and steel materials under lubricated sliding contact [J]. *Wear*, 2003, 254 (3-4): 356-363.
- [8] Xie J, Luo M J, Wu K K, et al. Experimental study on cutting temperature and cutting force in dry turning of titanium alloy using a non-coated micro-grooved tool [J]. *Industrial Engineering & Management*, 2013, 73 (1): 25-36.
- [9] Martin Walbrühl, David Linder, John Ågren, et al. Alternative Ni-based cemented carbide binder-Hardness characterization by nano-indentation and focused ion beam [J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2018, 73: 204-209.
- [10] 刘坤. 激光冲击压印诱导微结构高精度成型过程及特性研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- Lui K. Research on the High-precision Forming Process and Characteristics of Laser Shock Imprint-induced Microstructures [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- [11] 郭江, 王兴宇, 赵勇, 等. 微织构刀具制备技术及加工性能研究新进展 [J]. *机械工程学报*, 2021, 57 (13): 172-200.
- Guo J, Wang X Y, Zhao Y, et al. New progress in research on preparation technology and processing performance of micro-textured tools [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 57 (13): 172-200.
- [12] 杜忠民, 肖凡, 刘维, 等. 船用双曲率板件冷压成形回弹模拟与实验 [J]. *锻压技术*, 2021, 46 (5): 34-38.
- Du Z M, Xiao F, Liu W, et al. Simulation and test of springback of double-curvature plates for marine cold press forming [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2021, 46 (5): 34-38.
- [13] 余林峰, 徐晓, 夏琴香, 等. 薄壁内外齿形件旋压成形机理 [J]. *锻压技术*, 2021, 46 (5): 86-93.
- Yu L F, Xu X, Xia Q X, et al. The spinning forming mechanism of thin-walled internal and external tooth-shaped parts [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2021, 46 (5): 86-93.
- [14] 刘志奇, 宋建丽, 李占龙, 等. 一种用于柱塞泵配流盘的织构制备方法及其装置 [P]. 中国: CN201910593394.9, 2019-10-01.
- Liu Z Q, Song J L, Li Z L, et al. A texture preparation method and device for the valve plate of a plunger pump [P]. China: CN201910593394.9, 2019-10-01.
- [15] 高照阳, 彭林法, 易培云, 等. 微细辊对平板辊压成形工艺建模与尺度效应分析 [J]. *机械工程学报*, 2013, 49 (6): 179-186.
- Gao Z Y, Peng L F, Yi P Y, et al. Modeling and size effect analysis of micro-roll-to-plate roll forming process [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49 (6): 179-186.
- [16] 李萍, 赵宾, 薛克敏. 铜合金微塑性成形力学性能及其本构关系 [J]. *固体力学学报*, 2015, 36 (5): 401-409.
- Li P, Zhao B, Xue K M. Mechanical properties and constitutive relationship of copper alloy microplastic forming [J]. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2015, 36 (5): 401-409.
- [17] 运新兵. 金属塑性成形原理 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2012.
- Yun X B. Principles of Metal Plastic Forming [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2012.
- [18] 俞汉清, 陈金德. 金属塑性成形原理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2018.
- Yu H Q, Chen J D. Principles of Metal Plastic Forming [M]. Beijing: China Machine Press, 2018.
- [19] 崔航, 陈怀宁, 陈静, 等. 球形压痕的凸起凹陷行为及其对硬度测量的影响 [J]. *材料研究学报*, 2009, 23 (1): 54-58.
- Cui H, Chen H N, Chen J, et al. The convex and concave behavior of spherical indentation and its influence on hardness measurement [J]. *Chinese Journal of Materials Research*, 2009, 23 (1): 54-58.
- [20] Xu B, Chen X. Determining engineering stress-strain curve directly from the load-depth curve of spherical indentation test [J]. *Journal of Materials Research*, 2010, 25 (12): 2297-2307.

(上接第 184 页)

- [11] 孙吉宝. 非调质钢曲轴锻件正火冷却系统及应用 [J]. *锻压装备与制造技术*, 2003, 28(5): 31-32.
- Sun J B. Design & application of controlled cooling system of non-hardend-tempered steel crankshaft [J]. *China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology*, 2003, 28 (5): 31-32.
- [12] 徐皓, 刘江. 高强度精密钢质活塞锻造预锻模具设计及加工关键点实践研究 [J]. *塑性工程学报*, 2021, 28 (5): 31-32.
- Xu H, Liu J. Research on the key points of pre-forging die design and machining for high strength precision steel piston forging [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2021, 28 (5): 31-32.
- [13] 唐新民, 陈建业, 赵九根, 等. 非调质钢弯、直臂的开发与应用 [J]. *金属热处理*, 2001, 26 (1): 43-45.
- Tang X M, Chen J Y, Zhao J G, et al. Development and application of non-quenched and tempered steels of bending and extending arms [J]. *Heat Treatment of Metals*, 2001, 26 (1): 43-45.
- [14] 刘江, 徐皓. 基于 Deform 的长杆类汽车转向节锻模设计及锻造工艺生产验证 [J]. *锻压技术*, 2021, 46 (2): 9-13.
- Liu J, Xu H. Forging die design and forging process production verification of long rod steering knuckle based on deform [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2021, 46 (2): 9-13.
- [15] 徐皓, 刘江. 长城 2020 转向节锻模设计及其锻造工艺生产验证 [J]. *锻压技术*, 2020, 46 (1): 24-28.
- Xu H, Liu J. Great Wall 2020 steering knuckle forging die design and forging process production verification [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2020, 46 (1): 24-28.