

# 织构化冲压模具的应力数值模拟分析

刘晓杰, 金康宁, 单斌, 陈平

(北京科技大学 机械工程学院, 北京 100083)

**摘要:** **目的** 研究不同形状织构化模具在冲压后的应力大小和分布情况, 从织构化模具应力集中角度, 为改善模具寿命提供理论指导。**方法** 利用 SolidWorks 建立冲压模具三维模型, 并且在模具的凹模圆角区域设置三角形、圆形以及二者复合图形, 来模拟模具表面的三角形微织构、圆形微织构和复合织构。利用 HyperMesh 进行网格划分, 并在 ABAQUS 中对冲压过程进行仿真分析, 研究表面微织构对冲压模具凹模应力的影响。**结果** 加工织构的模具, 在织构周围出现了应力集中, 应力集中主要存在于模具表层很小的范围内, 没有延伸至深处。当摩擦系数为 0.1 时, 三角形和圆形复合织构化模具最大应力为 1520 MPa, 相对于单一的三角形织构化模具, 最大应力减小了 3.5%, 相对于圆形织构化模具, 最大应力增加了 13.6%。随着摩擦系数的增加, 织构化模具在织构处的最大应力均表现出减小的趋势, 而单一的三角形和圆形织构化模具在摩擦系数较大时, 板料会发生断裂。织构化模具最大应力数值由大到小依次为: 三角形织构化模具>三角形和圆形复合织构化模具>圆形织构化模具。**结论** 表面织构化会造成模具在织构处的应力集中, 而且不同形状的织构产生应力集中的程度不同。因此, 考虑从改善摩擦学性能的角度提高冲压成形件的成形质量时, 需要兼顾考虑模具因表面微织构而产生应力集中, 影响其寿命的问题。

**关键词:** 数值模拟; 表面微织构; 冲压模具; 应力集中; 摩擦系数

**中图分类号:** TH117 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)08-0009-07

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.08.002

## Numerical Simulation Analysis of Stress in Textured Stamping Die

LIU Xiao-jie, JIN Kang-ning, SHAN Bin, CHEN Ping

(School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study the stress magnitude and distribution of textured dies in different shapes after stamping, and then provide guidance for improving the life of the die from the perspective of stress concentration of the textured die. A three-dimensional model of stamping die was set in the SolidWorks, and the triangular micro-texture, circular micro-texture and composite micro-texture of the die surface were simulated by setting triangle, circle and composite pattern in the fillet area of the dies. The mesh of textured stamping die was divided by HyperMesh, and the stamping process was established in ABAQUS for numerical simulation. Finally, the effect of surface micro-texture on the stress of stamping die was studied. The stress concentration appeared around the texture of the textured die, but the stress concentration mainly existed in a small range of the

收稿日期: 2019-02-28; 修订日期: 2019-04-27

Received: 2019-02-28; Revised: 2019-04-27

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFC0810500, 2017YB0603500); 国家自然科学基金 (51305023)

Fund: Supported by the National Key Research and Development Program of China (2018YFC0810500, 2017YB0603500) and the National Natural Science Foundation of China (51305023)

作者简介: 刘晓杰 (1994—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为表面织构及其摩擦学效应。

Biography: LIU Xiao-jie (1994—), Female, Master student, Research focus: surface texture and its tribological effect.

通讯作者: 陈平 (1973—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为表面织构及其摩擦学效应。邮箱: chenp@ustb.edu.cn

Corresponding author: CHEN Ping (1973—), Female, Doctor, Professor, Research focus: surface texture and its tribological effect. E-mail: chenp@ustb.edu.cn

surface layer of the die and did not extend to the inside of the die. When the coefficient of friction was 0.1, the maximum stress of the composite textured die was 1520 MPa. Compared to the single triangular textured die, the maximum stress was reduced by 3.5%. Compared to the circular textured die, the maximum stress was increased by 13.6%. With the increase of the friction coefficient, the maximum stress of the textured die at the texture showed a tendency of decrease. The blank of triangular texture die and circular texture die with larger friction coefficient would break during stamping. At the same time, the relationship of the maximum stress of different textured dies was: triangular textured die > triangular and circular composite textured die > circular textured die. Therefore, surface texturing causes stress concentration at the texture of the die, and the textures in different shapes induce a different degree of stress concentration. When the texture is introduced on the die surface to improve the forming quality of the formed part, it is necessary to consider the problem that the stress concentration of the die due to the surface micro-texture affects the life of the die.

**KEY WORDS:** numerical simulation; surface micro-texture; stamping die; stress concentration; friction coefficient

表面微结构是一种在零件表面按照特定形状(如三角形、圆形、沟槽以及复合形状等)、尺寸和排列加工的微纳米级别的凹槽或者凸起。大量研究表明,表面微结构应用到金属表面可以改善表面润滑<sup>[1-2]</sup>,起到抗磨减阻<sup>[3-6]</sup>的作用。如 ZHANG 等<sup>[6]</sup>研究相同面积的正方形织构、三角形织构和圆形织构的摩擦学性能发现,沿着三角形织构的等边到对角的方向滑动时,三角形织构化试样相对于圆形织构和正方形织构化试样产生了明显的流体动压润滑,从而增加了配合间隙,降低了粗糙接触的可能,这使得三角形织构化试样表现出最好的摩擦学性能。同时研究人员发现,相对于单一形状织构,复合形状织构应用到金属表面,能更好地改善摩擦学性能。SEGU 等<sup>[7]</sup>对比研究织构化和无织构化试样在干摩擦和油润滑条件下的摩擦学性能,结果表明,三角形和圆形复合织构化试样在实验时具有更低且相对稳定的摩擦系数,并且在较高的滑动速度下,复合织构减小摩擦系数的优势更加明显。

板料冲压成形技术是先进制造技术的重要组成部分,而其所依托的模具工业作为现代化工业生产的基础,在制造业市场上占据着不可或缺的地位<sup>[8]</sup>。据统计,全世界超过一半的零部件都需要依靠模具进行成形加工<sup>[9]</sup>。随着模具技术的不断发展,对于模具的质量要求日益提高,如光洁度高、耐磨损和抗疲劳等。然而,由于在生产过程中高速重载等高强度的生产条件,使得模具的失效防护成为一个热点研究问题。冲压模具上常见的破坏包括疲劳破坏和磨损破坏,为此,研究人员将织构应用到模具表面,减小摩擦磨损,提高模具的使用寿命<sup>[10-12]</sup>。符永宏等<sup>[10]</sup>通过将圆形织构应用到冲压模具凹模的圆角处,减小凹模圆角处的摩擦系数,使得成形件的厚度变化均匀,成形质量得到了很大的提高。陈平等<sup>[11-12]</sup>通过仿真和冲压实验研究三角形织构对冲压模具性能的影响,结果发现三角形织构的存在可以显著减小模具表面的摩擦磨损,从而有利于提高模具的寿命以及冲压成形件的质量<sup>[11-12]</sup>。然而,目前将织构引入模具的研究主要是通过改善摩擦学性能,提高冲压件成形质量以及减小模具的磨损

破坏,对于织构化模具的疲劳破坏方面研究较少。根据疲劳理论,疲劳破坏起源于高应力或高应变的局部,特别是产生应力集中的构件表面。在高频重载条件下,当零件表面受到微小的损伤(如小凹坑、划痕等),会造成零件由于损伤的几何形状引起的应力集中<sup>[13-14]</sup>和变形引起的微观结构变化,导致零件的疲劳强度降低,寿命受到严重的影响<sup>[15]</sup>。因此,当光滑的模具表面出现微观织构时,必然会造成较大的应力集中现象。对于不同形状织构应用到冲压模具,目前缺乏从应力集中角度分析模具寿命的研究。因此本文选用典型的织构形状(三角形和圆形织构),将其按照一定的排列分布在冲压模具的凹模圆角上,通过数值模拟分析织构对模具应力大小和分布的影响规律,为织构在模具上的应用提供指导。

## 1 实验

### 1.1 材料选用

高强度模具钢 Cr12MoV 具有淬透性高,强度、硬度、耐磨性好等优势,被广泛应用于冲压模具材料。本文选用模具钢 Cr12MoV 作为模具材料,选用常用的铝合金作为冲压件材料,主要性能参数如表 1 所示。

表 1 材料性能参数  
Tab.1 Property parameters of materials

| Key parameters                | Cr12MoV | Aluminium alloy |
|-------------------------------|---------|-----------------|
| Density/(kg·m <sup>-3</sup> ) | 7850    | 2700            |
| Young modulus/MPa             | 218 000 | 70 000          |
| Poisson's ratio               | 0.28    | 0.33            |
| Yield strength/MPa            | 450     | 311             |
| Dimension/mm                  |         | φ50×0.8         |

### 1.2 织构设置

本文参照文献<sup>[11]</sup>设置正三角形织构参数:边长 550 μm,深度 40 μm,面积率 15%。为了进行对比,

根据织构面积率相同的原则，圆形织构直径确定为 408  $\mu\text{m}$ ，织构深度和面积率分别为 40  $\mu\text{m}$  和 15%。三角形织构、圆形织构以及三角形和圆形复合织构的分布如图 1 所示。

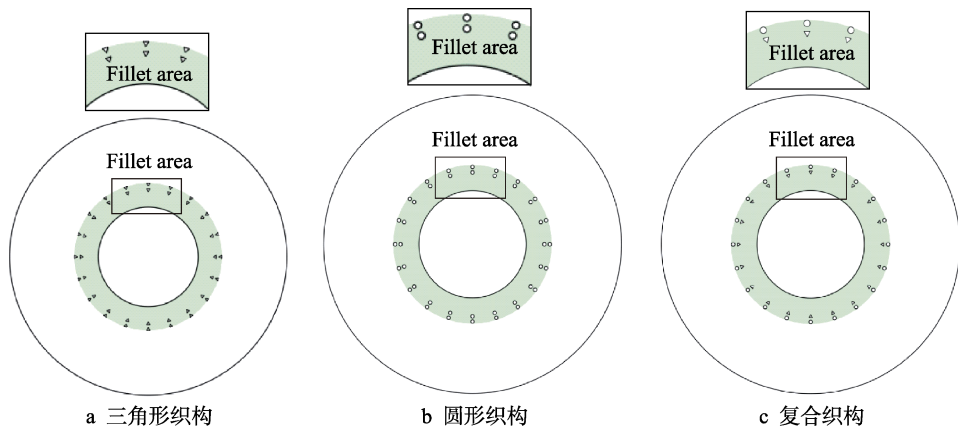


图 1 织构分布示意图  
Fig.1 Schematic diagram of texture arrangement: a) triangular texture; b) circular texture; c) composite texture

1.3 冲压建模

首先，采用经典的圆筒件拉深过程作为冲压原型，在 SolidWorks 三维软件中建立冲压模型，冲压模型为轴对称，取其 1/4 进行建模即可。冲压过程及冲压件的主要尺寸如图 2 所示，其中，R4 所指的区域为模具凹模圆角区。利用专业的网格划分工具 HyperMesh 进行网格划分，并将网格零件导入到 ABAQUS/Standard 模块，通过动力显式算法进行冲压

仿真的数值计算。通过改变摩擦系数模拟不同的冲压工况，经过有限元分析计算后，得到不同摩擦条件、不同形状织构下的模具应力（以 Mises 等效应力表示）。

在不影响结果的情况下，本文简化分析过程如下：1）凹模和毛坯件设置为弹塑性变形体，其他部件均设置成刚体；2）设置压边圈分别关于  $x$ - $z$  平面和  $y$ - $z$  平面对称，同时压边圈在整个过程中保持固定；3）设置凹模分别关于  $x$ - $z$  平面和  $y$ - $z$  平面对称，底边在整个冲压过程中固定；4）设置总冲压时间为 0.01 s，且凸模沿着  $z$  轴负向移动 9 mm，使得板料底部和凹模刚好接触。

在仿真过程中，计算结果的精度取决于建模的合理性和网格的质量。由于织构的尺寸相对于模具来说非常小，所以在网格划分的过程中，需要进行局部细化。这样不仅可以提高分析结果的精度，同时也避免了网格统一采用较小的尺寸导致的占用内存过大、计算时间太长等问题，从而提高了计算效率。本文利用专业的网格软件 HyperMesh 进行网格划分，其中，由于凹模结构化部位为圆角区，且织构为微米级，不便于采用六面体单元划分，故采用四面体单元。冲压模具各零部件的网格划分参数如表 2 所示。图 3 为三

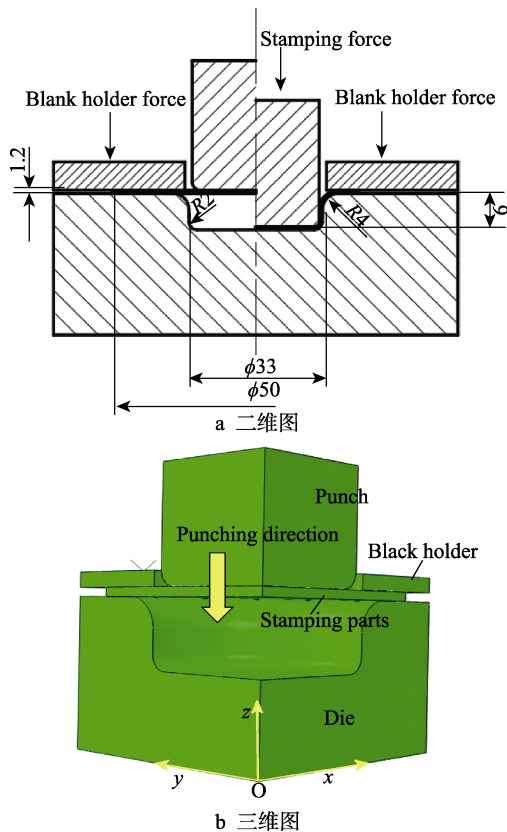


图 2 冲压过程示意图

Fig.2 Schematic diagram of stamping process: a) 2D; b) 3D

表 2 网格参数  
Tab.2 Mesh parameters

| Parts   | Element type | Element size/mm                           | Element number                   |
|---------|--------------|---|----------------------------------|
| Bank    | Hex          | 0.5                                       | 4780                             |
| Blinder | Hex          | 1   | 1036                             |
| Punch   | Hex          | 1   | 3276                             |
| Die     | Tet          | 0.3<br>(textured mesh refined to 0.15 mm) | Triangular textured die: 674 773 |
|         |              |   | Circular textured die: 624 806   |
|         |              |   | Composite textured die: 659 071  |

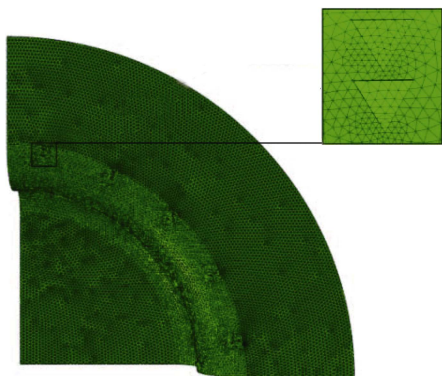


图3 三角形织构化模具的局部网格划分示意图  
Fig.3 Schematic diagram of local mesh division of triangular textured die

角形织构化模具的网格划分结果图。

## 2 结果与讨论

相对于铝合金, 模具钢 Cr12MoV 具有硬度高、刚性好、不易变形等特点, 因此在冲压过程中, 变形程度相对于毛坯件较小。目前对于冲压成形主要是从成形件的质量上来考虑, 往往忽略了对冲压模具应力的分析。本文首先进行无织构模具的冲压过程仿真, 旨在分析冲压过程中模具应力的分布情况。从图 4a 凹模截面变形图可以看出, 凹模的圆角区域在冲压过程中发生较大的变形, 沿着模具圆角区表面到内部, 变形量逐渐递减。由图 4b 可见, 凹模的应力主要分布在圆角区域, 应力变化范围为 58.61~681.3 MPa, 且最大应力发生在圆角区较下处。这是因为在冲压过

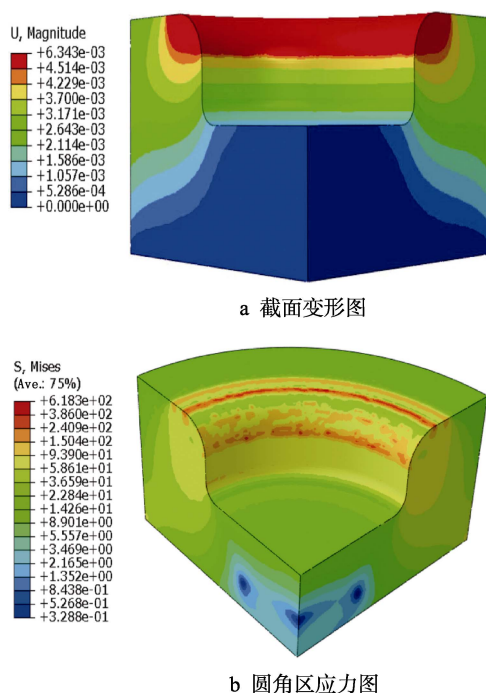


图4 无织构凹模的变形与圆角区应力

Fig.4 Displacement of non-textured die and stress in the fillet:  
a) displacement of cross section; b) stress in the fillet

程中, 该区域受到接触力、摩擦力以及板材流动和挤压等多重作用<sup>[16]</sup>, 使得圆角区下方的变形增加, 产生了应力增大的现象。而模具的其他区域, 尤其是底部, 是小变形区, 冲压过程对其影响较小, 因此, 本文主要从织构所处的圆角区附近进行应力分析。

### 2.1 三角形织构对应力的影响

三角形织构应用到冲压模具上, 会提高模具的摩擦学性能和成形件的成形质量<sup>[3]</sup>, 本文通过数值模拟分析三角形微织构单元对模具应力大小及分布的影响。在凹模圆角区设置如图 1a 所示的三角形织构, 保持冲压条件一致, 进行冲压模拟, 图 5 为三角形织构化模具冲压后凹模的应力图。研究表明, 当形状发生不连续变化时, 会造成局部应力迅速增大的情况<sup>[17]</sup>。从图 5a 可以看到, 在织构附近, 三角形织构的存在导致原来光滑的圆角区域出现了不连续的现象, 从而在织构周围区域出现了小范围的应力集中情况。在高速重载的冲压条件下, 由于凹模圆角区域织构的存在, 会产生边缘效应<sup>[18]</sup>, 从而使织构边缘部分产生较明显的应力集中。同时, 由于沿着冲压方向, 织构之间的形状突变最大, 使该区域应力达到最大值 1575 MPa。由图 5b 可以看出, 织构处的最大应力只集中在表层很小的范围内, 远离织构区域的应力迅速降低并趋于平稳<sup>[17]</sup>, 并没有向内部沿伸, 说明三角形织构在单次冲压过程中造成影响的范围有限, 且集中

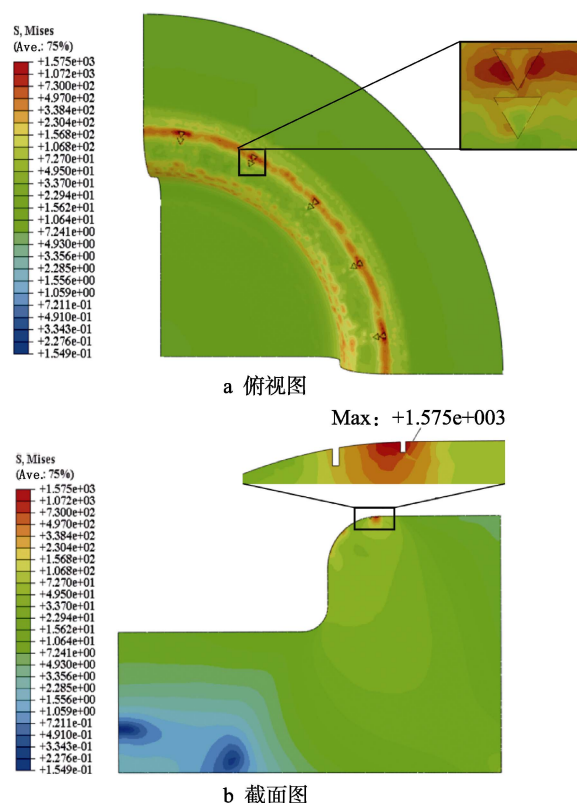


图5 三角形织构化凹模的应力分布图

Fig.5 Stress distribution diagram of triangular textured die:  
a) top view; b) sectional view



于模具的表面区域。

## 2.2 圆形织构对应力的影响

光滑平面在受到径向载荷时, 多边形缺口的存在会对材料的应力场造成不利影响。尖锐的边缘往往存在应力集中尖峰<sup>[19-20]</sup>, 这种较大的应力集中会对零件性能造成严重的影响。此外, 随着多边形尖角数量的增加, 缺口形状变得圆滑, 应力集中现象可以得到缓解。由于三角形三个角最尖锐, 其应力集中情况最明显<sup>[21]</sup>, 因此为了改善应力集中, 本文通过仿真分析圆形微织构对模具应力大小及分布的影响。

图 6 为凹模圆角区处为如图 1b 设置的圆形织构的冲压仿真结果, 可以看出, 模具的最大应力同样发生在织构处, 但是相比三角形织构, 最大应力的数值明显减小, 其值为 1338 MPa。这主要归因于三角形织构的尖端更容易出现位错, 位错又因边界处的约束塞积, 从而使得尖端出现较大的应力集中<sup>[22]</sup>。而圆形的织构为光滑的边缘, 降低了应力集中的程度。从图 6b 的最大应力深度可以看到, 圆形织构最大应力向内部的影响区较三角形织构的小, 且在表面 50  $\mu\text{m}$  处, 应力降低到 715 MPa。相对于三角形织构来说, 圆形

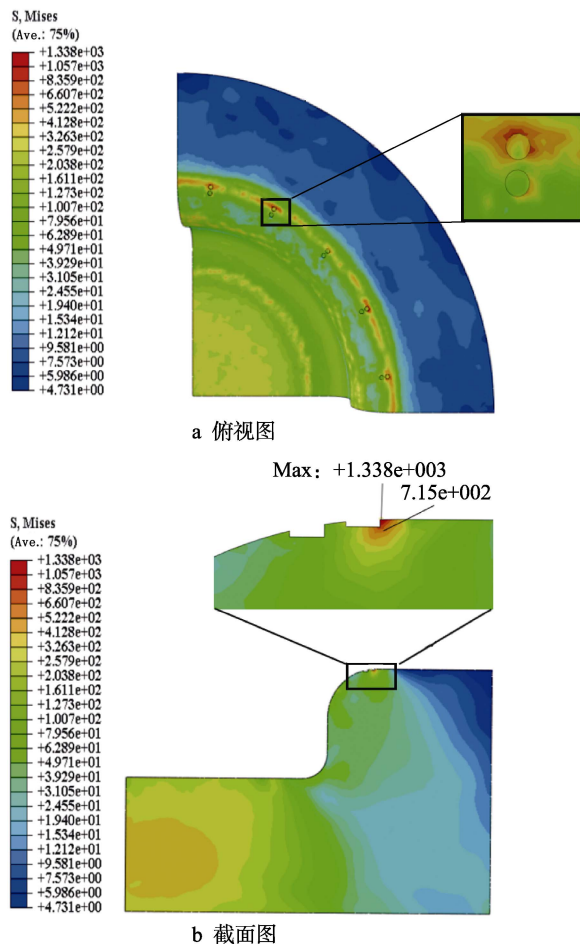


图 6 圆形织构化凹模的应力分布图

Fig.6 Stress distribution diagram of circular textured die: a) Top view; b) Sectional view

织构的最大应力减小了 15%, 能够很好地减小组织化模具的应力集中程度。此外, 三角形织构在使用过程中, 应力集中的敏感度大, 长期反复冲压使得三角形尖端更容易产生微裂纹<sup>[23]</sup>。因此, 在只考虑模具应力的情况下, 圆形织构相对于三角织构更有利于模具的寿命。

## 2.3 复合织构对应力的影响

由于复合织构比单一织构能更好地改善摩擦学性能, 从抗磨减阻的角度来看, 可以显著地增加模具寿命<sup>[24-25]</sup>。将三角形织构和圆形织构进行组合, 研究三角形-圆形复合织构对模具应力大小和分布的影响, 图 7 为复合织构化模具的应力分布图。

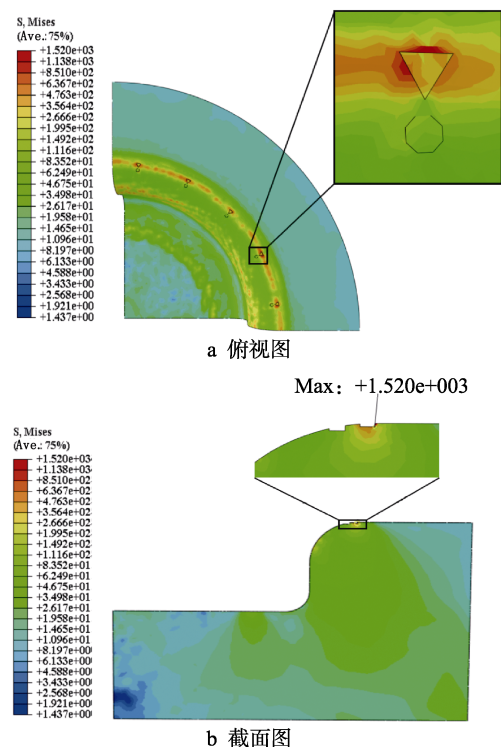


图 7 复合织构化凹模的应力分布图

Fig.7 Stress distribution diagram of composite textured die: a) top view; b) sectional view

从图 7a 可以看出, 模具的最大应力位于三角形织构附近, 其值为 1520 MPa, 相对于单一的三角形织构, 其最大应力有所下降, 而相对于单一的圆形织构, 复合织构处的应力表现出明显的增加趋势, 这说明三角形织构在增加模具应力方面的作用远远大于圆形织构。图 7b 反映了复合织构处最大应力的影响区域, 可以看到, 复合织构化模具的最大应力同样分布在模具表层较小的区域, 且分布范围小于单一三角形织构化模具和单一圆形织构化模具。

通过图 8 对比三种织构形式的应力分布可知, 在受到径向拉力时, 三角形织构趋向于将应力集中于尖角端, 而圆形织构趋向于将应力分布到周围。在三角形织构和圆形织构两种应力分布效果的共同作用下,

复合织构的应力在数值上介于两种织构之间,且在外圈的三角形织构区域达到最大。因此,复合织构化模具相比单一三角形织构化模具,应力集中现象明显减小,但是圆形织构化模具减小应力集中的效果相对更好。

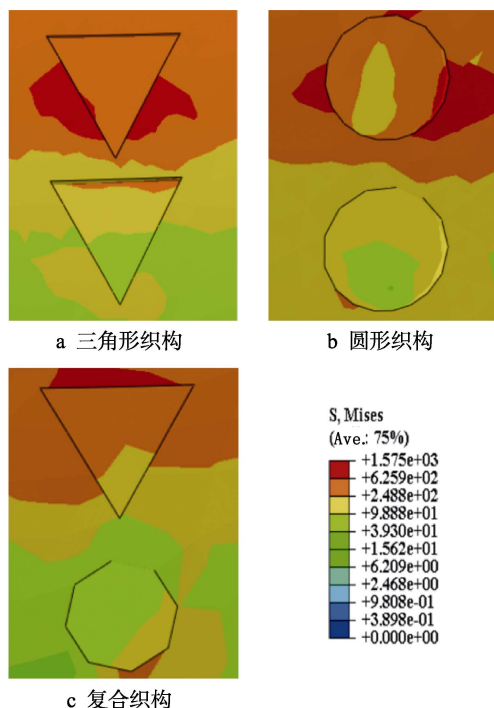


图8 三种分布形式织构处的应力分布图

Fig.8 Stress distribution diagram of three dies at the texture: a) triangular texture; b) circular texture; c) composite texture

## 2.4 摩擦系数对织构处最大应力的影响

在冲压过程中,冲压工艺条件(如压边力、冲压速度、润滑条件等)不同,会影响冲压过程中的摩擦系数,其中模具和冲压板料摩擦副的摩擦学性能会显著地影响模具上的应力大小和分布。因此,本文设置不同的摩擦系数(0.1~0.3),通过不同摩擦系数下织构化模具上的最大应力,来分析三种织构化模具的应力集中情况。图9为不同摩擦系数下的三种织构化模具在织构处的最大应力变化趋势图。

由图9可知,在不同的摩擦系数下,三角形织构化模具的应力集中现象最明显,复合织构化模具次之,而圆形织构化模具产生应力集中的程度相对较轻,这和前面分析研究得到的规律一致。从图9还可以看出,不同摩擦系数下,凹模织构处的应力变化趋势基本一致,即随着摩擦系数的增加,织构处的最大应力呈减小趋势。其中,当摩擦系数在0.25~0.3时,三角形织构和圆形织构的板料发生断裂,断裂部位持续地沿着模腔向下滑动,造成应力在凹模内壁达到最大;摩擦系数为0.25左右时,其最大应力值取得最小。而复合织构模具的最大应力值随摩擦系数的增加而减小,且在冲压摩擦系数达到0.3时,板料仍然没有发生断裂。这说明复合织构化模具可以在更严峻的

工况(如高摩擦系数)条件下应用,其效果相对于单一织构化模具的效果更好。

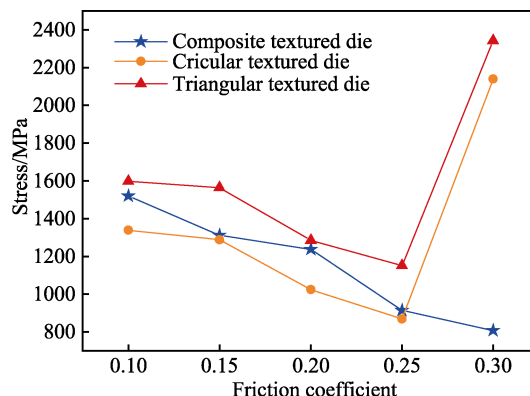


图9 不同摩擦系数下织构处的最大应力

Fig.9 Maximum stress at the texture under different friction coefficients

## 3 结论

1) 织构化模具在织构处的局部区域出现应力集中现象,但是这种应力集中只出现在模具表层较小的区域,远离该区域后,应力迅速下降到稳定值。

2) 相对于三角形织构,圆形织构减小了边缘效应和在尖端的位错塞积,使应力集中显著性减小。而复合织构在三角形织构与圆形织构应力效应的叠加作用下,应力集中得到改善,说明在减小应力集中方面,复合织构同样优于三角形织构。

3) 随着摩擦系数的增大,模具最大应力呈减小趋势,使三角形织构和圆形织构的最大应力达到最小值的摩擦系数为0.25。当摩擦系数大于0.25时,由于板料断裂造成模具划伤,进而产生更大的应力。复合织构最大应力随着摩擦系数的增加呈下降趋势,且在摩擦系数达到0.3的情况下,板料不会发生断裂。因此,对于应力集中情况的改善方面,可以从摩擦学方面入手。

4) 对于织构化模具存在应力集中的问题,可以通过改善润滑条件,使得织构化模具在使用过程中形成明显的流体动压润滑,以此提高承载力,减小应力集中,达到提高模具寿命的目的。

## 参考文献:

- [1] 鹿重阳, 杨学锋, 王守仁, 等. 三角沟槽形织构化硬质合金工作表面动压润滑及减摩特性[J]. 摩擦学报, 2018, 38(5): 537-546.  
LU Chong-yang, YANG Xue-feng, WANG Shou-ren, et al. Dynamic pressure lubrication and anti-friction characteristics of the working surface of the cemented carbide with triangular grooved microtexture[J]. Tribology, 2018, 38(5): 537-546.
- [2] CHEN P, LI J L, LI Y L. Effect of geometric micro-

- groove texture patterns on tribological performance of stainless steel[J]. *Journal of Central South University*, 2018, 25(2): 331-341.
- [3] CHEN P, LIU X J, HUANG M J, et al. Numerical simulation and experimental study on tribological properties of stamping die with triangular texture[J]. *Tribology international*, 2019, 132: 244-252.
- [4] GALDA L, SEP J, PRUCNAL S. The effect of dimples geometry in the sliding surface on the tribological properties under starved lubrication conditions[J]. *Tribology international*, 2016, 99: 77-84.
- [5] 秦立果, 杨浩, 刘斌, 等. 组织化表面改性及其在生物材料上的应用[J]. *表面技术*, 2018, 47(9): 1-11.  
QIN Li-guo, YANG Hao, LIU Bin, et al. Surface texturing modification and its effect on biomaterials[J]. *Surface technology*, 2018, 47(9): 1-11.
- [6] ZHANG H, HUA M, DONG G N, et al. A mixed lubrication model for studying tribological behaviors of surface texturing[J]. *Tribology international*, 2016, 93: 583-592.
- [7] SEGU D Z, HWANG P. Friction control by multi-shape textured surface under pin-on-disc test[J]. *Tribology international*, 2015, 91: 111-117.
- [8] 顾新建, 黄沈权, 陈茂熙, 等. 模具行业需求驱动的云制造服务平台[J]. *计算机集成制造系统*, 2012, 18(7): 1650-1657.  
GU Xin-jian, HUANG Shen-quan, CHEN Ji-xi, et al. Cloud manufacturing service platform driven by mold manufacturing industry demand[J]. *Computer integrated manufacturing systems*, 2012, 18(7): 1650-1657.
- [9] 李光耀, 王琥, 杨旭静, 等. 板料冲压成形工艺与模具设计制造中的若干前沿技术[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(10): 31-39.  
LI Guang-yao, WANG Hu, YANG Xu-jing, et al. Some new topics on process design and mould manufacture for sheet metal forming[J]. *Journal of mechanical engineering*, 2010, 46(10): 31-39.
- [10] 符永宏, 杨守军, 许华, 等. 基于均匀性的模具表面复合织构[J]. *江苏大学学报: 自然科学版*, 2014, 35(3): 343-348.  
FU Yong-hong, YANG Shou-jun, XU-Hua, et al. Composite texture of mold surface based on uniformity[J]. *Journal of Jiangsu University (natural science edition)*, 2014, 35(3): 343-348.
- [11] CHEN P, XIANG X, SHAO T M, et al. Effect of triangular texture on the tribological performance of die steel with TiN coatings under lubricated sliding condition[J]. *Applied surface science*, 2016, 389: 361-368.
- [12] 陈平, 史哲, 刺颖乾, 等. 基于凹模压边区摩擦学性能的冲压仿真分析[J]. *中国表面工程*, 2018, 31(1): 59-66.  
CHEN P, SHI Z, LA Y Q, et al. Stamping simulation analysis based on tribological properties of die-binder area[J]. *China surface engineering*, 2018, 31(1): 59-66.
- [13] FLEURY R M N, NOWELL D. Evaluating the influence of residual stresses and surface damage on fatigue life of nickel superalloys[J]. *International journal of fatigue*, 2017, 105: 27-33.
- [14] FLEURY R M N, SALVATI E, NOWELL D, et al. The effect of surface damage and residual stresses on the fatigue life of nickel superalloys at high temperature[J]. *International journal of fatigue*, 2019, 119: 34-42.
- [15] MALL S, HAMRICK J L, NICHOLAS T. High cycle fatigue behavior of Ti-6Al-4V with simulated foreign object damage[J]. *Mechanics of materials*, 2001, 33(11): 679-692.
- [16] 尹晓阳, 涂杰松, 段海涛, 等. 表面润滑对 6061 铝合金板材成形性能的影响[J]. *塑性工程学报*, 2018, 25(2): 65-72.  
YIN Xiao-yang, TU Jie-song, DUAN Hai-tao, et al. Effect of surface lubrication on formability of 6061 aluminum alloy sheet[J]. *Journal of plasticity engineering*, 2018, 25(2): 65-72.
- [17] 王战辉, 马向荣, 范晓勇, 等. 凸形封头与筒体不连续区域应力分布及优化[J]. *轻工机械*, 2019, 37(1): 98-103.  
WANG Zhan-hui, MA Xiang-rong, FAN Xiao-yong, et al. Stress distribution and optimization in discontinuous area of convex head and cylinder[J]. *Light industry machinery*, 2019, 37(1): 98-103.
- [18] KOVALCHENKO A, AJAYI O, ERDEMIR A, et al. Friction and wear behavior of laser textured surface under lubricated initial point contact[J]. *Wear*, 2011, 271: 9-10.
- [19] RAMACHANDRA S, OVAERT T C. Effect of coating geometry on contact stresses in two-dimensional discontinuous films[J]. *Journal of tribology*, 2000, 122(4): 665-671.
- [20] 吴行阳, 葛宙, 阮敬杰, 等. 边缘修形组织化 N、Si 共掺杂类金刚石碳膜在空气中的摩擦磨损性能[J]. *上海交通大学学报*, 2018, 52(5): 554-560.  
WU Xing-yang, GE Zhou, RUAN Jing-jie, et al. Edge-profiling effect on the tribological properties of protrusion textured N-Si-DLC films in air[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2018, 52(5): 554-560.
- [21] CHAUHAN M M, SHARMA D S. Stress concentration at the corners of polygonal hole in finite plate[J]. *Aerospace science and technology*, 2016, 58: 197-206.
- [22] 黄霞, 王路生, 郑浩然, 等. 微缺陷对 B2-NiAl 高温涂层材料力学性能及失效机理的影响[J]. *表面技术*, 2019, 48(1): 10-21.  
HUANG Xia, WANG Lu-sheng, ZHENG Hao-ran, et al. Effect of Micro-defects on the mechanical properties and failure mechanism of B2-NiAl high temperature coatings[J]. *Surface technology*, 2019, 48(1): 10-21.
- [23] 程正坤, 廖日东, 李玉婷, 等. 表面形貌对应力集中系数的影响研究[J]. *北京理工大学学报*, 2016, 36(3): 231-236.  
CHENG Zheng-kun, LIAO Ri-dong, LI Yu-ting, et al. Effect of surface topography on stress concentration factor[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2016, 36(3): 231-236.
- [24] 阮鸿雁, 吕建军, 司辉, 等. 多圆弧与三角形复合织构表面的动压润滑性能[J]. *江苏大学学报(自然科学版)*, 2010, 31(3): 254-258.  
RUAN Hong-yan, LV Jian-jun, SI Hui, et al. Hydrodynamic lubrication performance on multi-textured surface structured by multi-arcs and triangle textures[J]. *Journal of Jiangsu University(natural science edition)*, 2010, 31(3): 254-258.
- [25] 郑晓辉, 宋皓, 张庆, 等. 激光表面组织化对材料摩擦学性能影响的研究进展[J]. *材料导报*, 2017, 31(17): 68-74.  
ZHENG Xiao-hui, SONG Hao, ZHANG Qing, et al. Effect of laser surface texturing on tribological properties of materials: A review[J]. 2017, 31(17): 68-74.