纯钽薄壁构件高速级进拉深成形黏模磨损规律

徐 腾 谢泽锋 关运鹏 辛东旭 邓春阳 冉家琪 龚 峰*
深圳大学机电与控制工程学院,深圳,518060

摘要:基于热力耦合有限元模型预测了成形速度提高对纯钽薄壁级进拉深成形黏模磨损关键决定因素的影响,随后通过实验表征观测并分析不同速度下拉深件表面磨损微观形貌、面粗糙度*Sa*以验证仿真结果。仿真数据与实验数据均表明成形速度提高将导致纯钽薄壁构件高速级进拉深成形黏模磨损量的增加,验证了热力耦合模型有效性;综合仿真与实验分析发现,成形速度提高将导致板料与模具初期接触作用力增大,促使纯钽板料与模具圆角发生局部区域黏着造成后续磨损;同时,随着成形速度的增大,各级拉深成形温度均有不同程度的升高;由于工件表面与模具多次高速接触下摩擦热与塑性变形热的共同作用,当成形速度增大至400 mm/s时,工件表面质量随着拉深的进行而迅速变差,*Sa*值从第1级拉深的2.692 μm增大至4.816 μm;随着成形速度的增大,前工序成形历史将进一步导致第4级微观表面材料剥落以及划痕加深、磨损加剧。

关键词:纯钽薄板;高速级进拉深;黏模磨损;成形速度
中图分类号:TP182
DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2026.11.026 **开放科学(资源服务)标识码(OSID)**:

Laws of Die Adhesive Wear of High Speed Progressive Deep Drawing Forming for Pure Tantalum Thin-walled Components

XU Teng XIE Zefeng GUAN Yunpeng XIN Dongxu DENG Chunyang RAN Jiaqi GONG Feng*
School of Mechanical and Electrical and Control Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong, 518060

Abstract: A thermo-mechanical coupled finite element model was used to predicted the effects of increased forming speed on the key decisive factors governing die adhesive wear during progressive deep drawing forming of pure tantalum thin-walled blanks. Deep-drawn parts formed at different speeds were then characterized by microscopic wear morphology and surface roughness *Sa* to verify the simulations. Both Simulation and experimental results both show that the increase of forming speed raises the die adhesive wear loss during high-speed progressive deep drawing forming of pure tantalum thin-walled components, which verifies the effectiveness of the thermo-mechanical coupled model. Combined simulation and experimental analyses reveal that the higher forming speed increases the initial contact force between blank and dies, triggering local adhesion between pure tantalum sheet blanks and die fillets and inducing subsequent wear. Meanwhile, the forming temperature at each drawing stage also increases to varying degrees with the growth of forming speed. Owing to the combined effects of frictional heat and plastic deformation heat generated under repeated high-speed contact between workpiece surfaces and dies, when the forming speed rises to 400 mm/s, the surface quality of workpieces deteriorates rapidly as the drawing process proceeds, and the *Sa* value increases from 2.692 μm in the first drawing stage to 4.816 μm. The forming history of previous working stages further causes micro surface material spalling, deeper scratches and aggravated wear in the fourth drawing stage as the forming speed increases.

Key words: pure tantalum thin sheet; high-speed progressive deep drawing; die adhesive wear; forming speed

0 引言

钽具有冷加工性能好、化学稳定性高、抗液态金属腐蚀能力强等一系列优异性能,在汽车电子、航空航天、医疗卫生等高新技术领域已有重要应用[1]。钽属于典型的应变率敏感型金属材料,在高速成形过程中其材料性能会随着应变率的改变而发生变化;高速成形时易产生的黏模磨损问题也同样不容忽视。纯钽在高速拉深时产生的黏模磨损情况与拉深时的温度场分布、接触压力分布

收稿日期:2025-08-25
基金项目:国家自然科学基金(52005341,52575421)

均有直接关系。

针对成形速度、应变率效应、成形温度等因素对黏模磨损的影响，相关学者已开展了一系列研究，HOGE等[2]早在1977年就研究了温度与应变速率对钽流动应力的影响；MEYERS等[3]研究了大变形、高应变率加载下纯钽的本构行为，以及温度和应变率对材料力学性能的影响，发现纯钽的流动应力对温度和应变率的变化相当敏感；彭建祥等[4]研究了温度(−100～400 ℃)和应变率(10^{-5}～10^{3} s^{-1})的变化对纯钽的流动应力的影响。关于影响黏模磨损的因素，国内外已有学者进行了相关研究。储家佑等[5]分析了模具、板材的材料性质、滑动速度、法向压力和表面状态等因素对磨损的影响规律。平板正人等[6]的研究发现，不同模具材料对应的黏模磨损表现形式和界面黏结程度存在显著差异。侯英岢等[7]认为模具材料的硬度对黏模行为存在影响，即低硬度的模具材料表面会加剧模具与板料间产生黏模磨损。从以往研究来看，纯钽薄板的应变率效应与高速拉深成形工件表面黏模磨损行为之间的影响关系尚未得到重视，因此有必要对纯钽薄板动态力学性能、成形速度与纯钽构件拉深成形及表面黏模磨损行为间的关系进行深入分析。

Archard模型更接近于黏模磨损的真实情况，是目前应用最为广泛的一种磨损计算模型，可以用于黏模磨损的定量计算[8-11]。本文将Archard模型与冲压有限元模拟仿真结合来开展高速级进拉深成形模拟，获取材料高速成形工件的应力场、温度场等影响黏模磨损的影响指标结果，结合高速级进拉深成形实验验证磨损模型的有效性，并获取构件表面粗糙度、表面硬度等成形结果对磨损程度进行评估。

1　纯钽薄板材料本构研究

1.1　准静态拉伸力学性能试验

本文使用的材料为电子束熔炼轧制退火纯钽薄板，材料厚度为0.2 mm。不考虑材料的各向异性，拉伸样件沿轧制方向取样，采用线切割设备制备，试样轴向为轧制方向。将试验温度设置为室温293 K，拉伸速率为3 mm/min，名义应变率为0.002 s^{-1}。获取的纯钽薄板基本机械性能参数如表1所示。准静态拉伸共进行3次，如图1所示，可见3条应力-应变曲线基本保持一致，表明材料力学性能比较稳定。

1.2　基于动态拉伸力学性能试验的钽薄板应变率效应研究

表1　纯钽薄板基本机械性能参数

Tab.1　Basic mechanical performance parameters of pure tantalum sheet

屈服强度/MPa	254.42
抗拉强度/MPa	352.61
弹性模量/GPa	194.33
泊松比	0.34

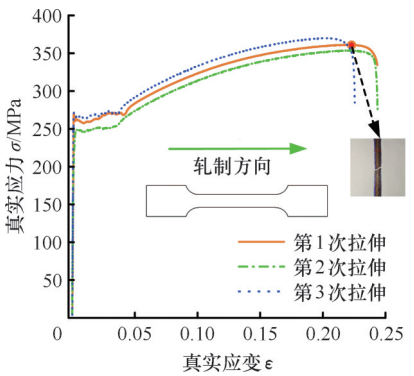


图1　纯钽薄板准静态真实应力-应变曲线(293 K)

Fig.1　True stress-strain curve of pure tantalum sheet under quasi-static loading(293 K)

根据国家标准GB/T 30069.1—2013规定，动态拉伸试验在霍普金森拉杆装置上进行，弹性杆包括入射杆与透射杆，材料均为TC4钛合金，直径均为19 mm，与试样两端宽度一致。

试验的应变速率 $\dot{\varepsilon}$ 分别设置为600、1000、1500、2000、3000 s^{-1}，试验在室温293 K的条件下开展。霍普金森拉杆试验数据经处理后可以得到纯钽薄板在不同应变速率下的室温动态拉伸力学特征曲线，见图2。

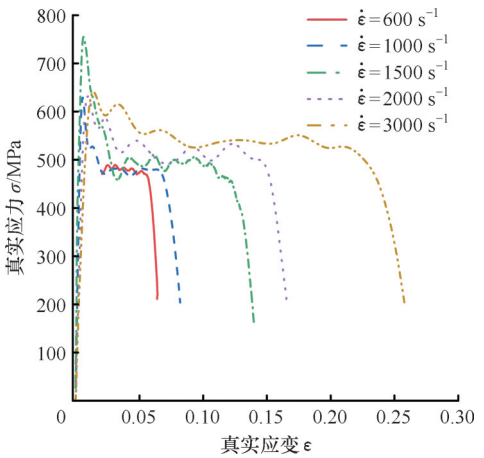


图2　动态拉伸下的真实应力-应变曲线(293 K)

Fig.2　Real stress-strain curve under dynamic stretching(293 K)

本文测得的动态拉伸力学性能曲线经过拟合可以获得纯钽薄板的率相关本构方程，即[12]

$$\sigma=(254.42+194.437\varepsilon^{0.3383}+\lambda)\cdot(1+0.0339\ln(\dot{\varepsilon}^{*}))(1-(T^{*})^{0.5423}) \quad (1)$$

$$\lambda=-13.91+294\varepsilon-1235\varepsilon^2 \tag{2}$$

式中：σ为材料真实应力；ε为等效塑性应变；λ为改善模型与试验曲线的拟合效果的修正项；$\dot{\varepsilon}^*$为量纲一应变率；T^*为量纲一温度。

上述本构方程将用于本文热力耦合高速级进拉深有限元仿真。由前文拉伸试验获取的纯钽薄板动态拉伸屈服强度可知：动态加载下，动态屈服强度均远高于准静态下的屈服强度，达到了635 MPa。在600～3000 s^{-1}应变速率范围内，纯钽薄板屈服强度具有明显的应变率强化效应，且应变硬化与应变速率无关。整体来看，在上述应变速率范围内屈服强度随着应变速率的增大呈现上升趋势，仅在1000、1500 s^{-1}应变速率下屈服强度稍有下降，降低幅度约为20 MPa。受内部杂质含量、加工工艺及组织结构影响，纯钽薄板的屈服强度在一定范围内随着应变速率的增大反而有所下降[13]。综上所述，纯钽薄板在不同变形速度下表现出较为明显的应变率效应，此效应将改变高速拉深成形区域的温升情况以及塑性成形能力，从而对成形区域黏模磨损程度造成了影响。

2 纯钽薄壁构件高速级进拉深有限元模型

本文利用ABAQUS有限元分析平台进行纯钽外壳高速级进拉深成形性能研究，分析纯钽外壳应力场以及温度场分布。由Archard磨损模型可知，通过分析纯钽外壳在级进拉深成形过程中接触压力、温度场随成形速度变化的规律，可以进一步得出黏模磨损的演变规律。

高速级进拉深成形是一个成形时间很短的过程。成形过程中产生的塑性变形热以及摩擦热会在模具内累积。为在有限元模拟中考虑上述塑性变形热以及摩擦热造成的温升对成形过程的影响，选择完全热力耦合开展分析。通过设置多个分析步，并在对应分析步设置载荷及边界条件，以实现级进拉深成形过程中凸模下行、压边圈的下行及回退等步骤[14]。

模具、压边圈和板料采用通用接触方式，在相互作用属性中按照仿真经验将摩擦因数设置为0.35[15-16]，设定摩擦产生的耗散能百分数为90%，从而模拟无润滑状态下的拉深成形过程。级进有限元模型及网格划分如图3所示，4道次拉深有限元仿真分析模型以及网格划分如图4所示。

本文的有限元仿真分析以拉深圆筒直径为8.2 mm、高度为10 mm、底部圆角为0.2 mm的纯钽电容器外壳为对象展开，其拉深成形速度可达300 mm/s，本文分别设置5、200、300、400 mm/s共4组速度进行成形模拟。纯钽薄壁构件坯料为直径19.4 mm、厚度0.2 mm的纯钽圆片。凸模和凹模的间隙为0.22 mm，凸模和凹模的圆角半径如表2所示[17]。

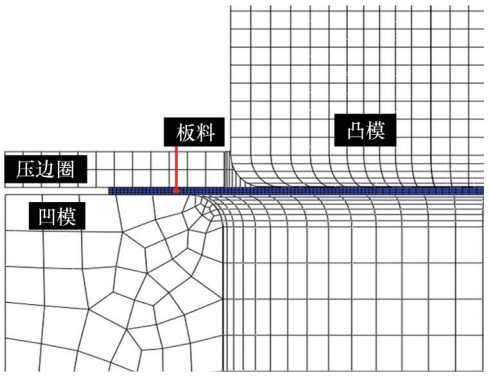


图3 级进有限元模型网格划分

Fig.3 Grid division of progressive finite element model

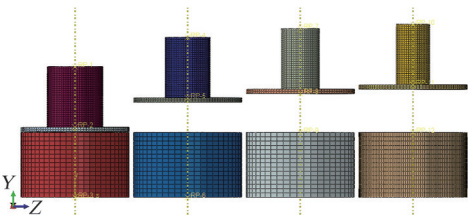


图4 级进拉深有限元模型

Fig.4 Finite element model of progressive deep drawing

表2 各级模具圆角半径

Tab.2 Radius of mold corners at all levels mm

模具	第1级	第2级	第3级	第4级
凸模	0.9	0.6	0.4	0.2
凹模	1.0	0.6	0.5	0.4

3 纯钽薄壁构件高速级进拉深实验方案

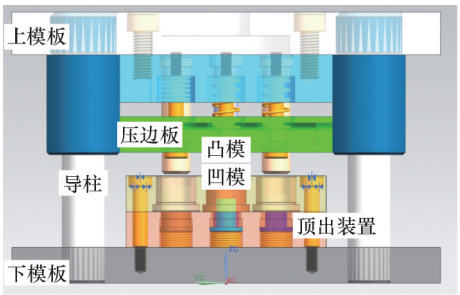
3.1 实验设备及模具

本文采用公称压力为50 kN的铁美高公司S5型伺服冲床开展高速级进拉深实验。该实验采用电子束熔炼轧制退火纯钽薄板，材料的厚度为0.2 mm，拉深筒形件尺寸及拉深工艺参数与前文有限元仿真参数一致，经过工艺计算所用的坯料直径为19.4 mm，并使用线切割设备制备。

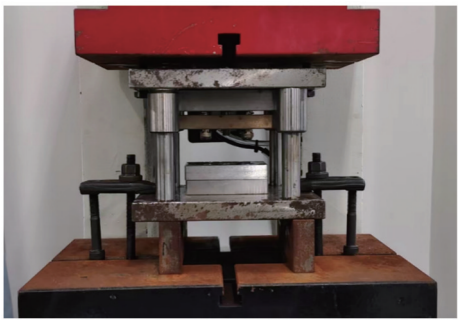
模具材料选择SKH9，凸模和凹模表面粗糙度值Ra=0.8 μm，第1级到第4级的凸模、凹模圆角半径经工艺计算后分别进行取值，实际取值与表2中相同。级进拉深模具的三维模型和实物安装如图5所示。

3.2 实验条件

实验选取较低成形速度5 mm/s及较高成形速度200、300、400 mm/s开展研究，速度设为恒速加载。在每个成形速度v_i下均进行完整的拉深过



(a)高速级进拉深模三维模型



(b)级进拉深模具及其在冲床上的安装

图5　级进拉深模具三维模型和实物安装示意

Fig.5　3D diagram and physical installation of progressive deep-drawing die

程，分别得到各速度下的第1级半成品、第2级半成品、第3级半成品以及最后一级完整工件。实验共得到16个筒形件拉深样品，如图6所示。

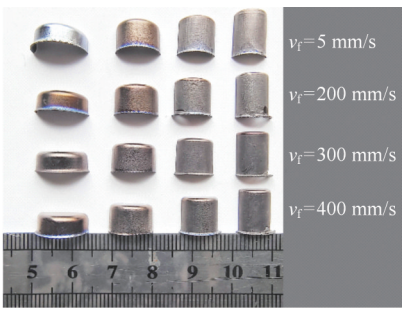


图6　级进拉深不同成形速度下的纯钽外壳

Fig.6　Pure tantalum shell under different forming speed of step drawing

使用VKX250K激光共聚焦显微镜、VHX-2000超景深三维显微镜对工件表面进行表征，得到样品表面的粗糙度值以及表面微观形貌。上述测量观察区域为筒形件的底部圆角及其与筒壁相切区域、筒壁中部区域以及筒形件顶部，如图7中圆圈标记区域所示。

4　结果与讨论

4.1　有限元仿真预测与初步分析

4.1.1　成形速度对拉深件应力场的影响

不同成形速度v_f对应的仿真结果如图8所示，结果表明，在无润滑条件下，设置的4组成形速度下的纯钽外壳均没有出现拉裂的情况，成形

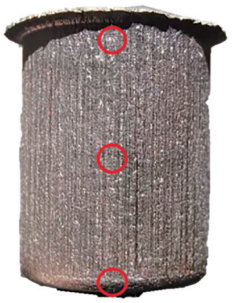


图7　表征区域

Fig.7　Representative region

质量良好，仿真结果与实际级进拉深结果相符，即便在高速成形条件下也没有发生拉裂。

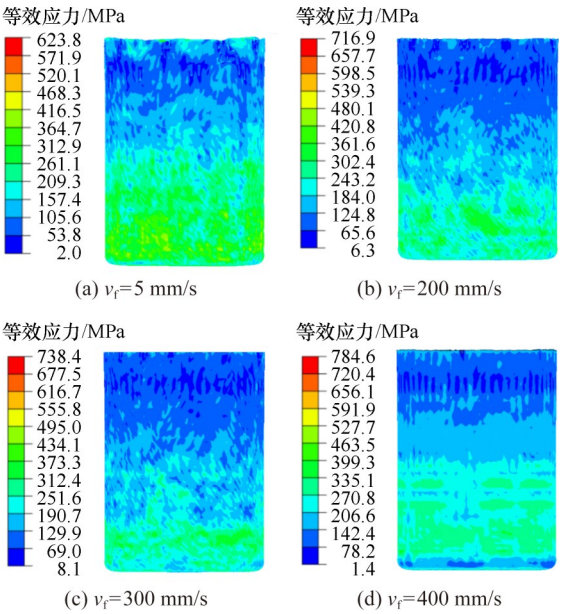


图8　不同成形速度下应力场分布的有限元仿真成形结果

Fig.8　FE simulation results of stress field distribution under various forming speeds

由于最后一级的拉深件经历过多次变形，使得材料内部已经出现了加工硬化，此外成形过程中，板料与模具多次发生接触和滑移导致出现温度效应，温度升高造成的材料软化及灼伤将使得拉深件表面质量降低以及磨损程度加剧，因此选取纯钽外壳的第4级拉深过程进行分析。在400 mm/s成形速度下，第4级的接触压力在拉深初始阶段经历的变化如图9所示，可以看出，在拉深初始阶段，圆角表面有两处位置先后出现峰值接触压力，这表明模具圆角出现峰值接触压力的同时，板料上也会出现接触压力p_c，当接触压力达到一定值时，将造成板料与模具圆角表面发生黏模磨损[18]。

基于前文仿真所得应力场结果，本文结合模具-板料的接触状态进一步分析，发现不同成形速

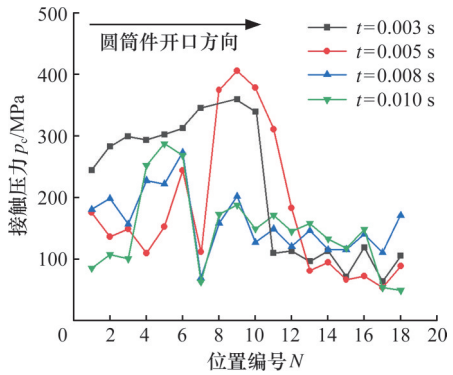


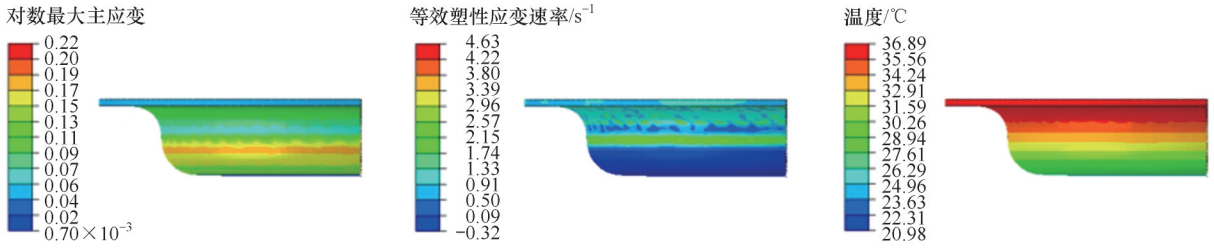
图9 400 mm/s成形速度下第4级拉深件表面接触压力

Fig.9 Contact pressure on the surface of fourth-stage deep-drawn part at forming speed of 400 mm/s

度下，拉深件上的接触压力分布区域并无明显差异，这是因为不同速度下，半成品筒形件在进行下一级拉深时与凹模的接触区域几乎一样，接触压力呈“点状”或是连续分布在筒形件与凹模接触的面上，主要的差异在接触压力的数值上，局部接触压力数值的增大将加剧此处产生摩擦从而导致温度升高。接触压力是导致黏模磨损的重要原因之一。接触压力越大，板料就越易在高速滑动时与模具产生黏模。随着成形速度的增大，在应变硬化以及应变率效应的共同作用下，材料强度和变形抗力均会提高；若使板材继续拉深则需要更大的成形力，导致板料与模具接触初期的作用力增大，由于成形初期峰值接触压力的存在，导致较软的纯钽板料与模具圆角会发生局部区域的黏模，进而造成后续的磨损。

4.1.2 成形速度对拉深件温度场的影响

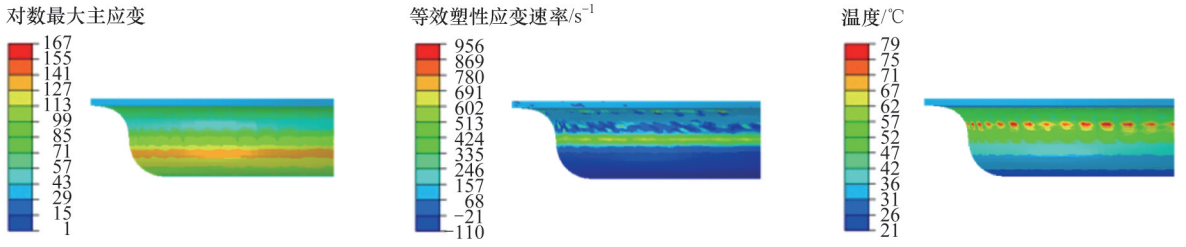
根据塑性变形热的计算公式，其他条件不变时塑性变形量的大小会影响温度的升高。由此可知当成形速度较高时，材料在相同时间内的塑性应变会增大。选取5、400 mm/s速度下第1级拉深成形的中间时刻成形结果进行分析，可以发现速度越大，应变速率和应变越大，温度越高。5 mm/s速度下的应变速率为4.63 s^{-1}，温度为36.89 ℃；400 mm/s速度下的应变速率达到956 s^{-1}，温度可达79 ℃，与5 mm/s速度下相比，成形区温度提高约114%，如图10和图11所示。此处显示的温度变化是摩擦功与塑性变形功共同作用的结果。



(a)应变 (b)应变速率 (c)温度

图10 5 mm/s成形速度下第1级拉深工件应变、应变速率和温度分布

Fig.10 Strain, strain rate and temperature distributions of first-stage deep-drawn part at forming speed of 5 mm/s



(a)应变 (b)应变速率 (c)温度

图11 400 mm/s成形速度下第1级拉深工件应变、应变速率和温度分布

Fig.11 Strain, strain rate and temperature distributions of first-stage deep-drawn part at forming speed of 400 mm/s

此外，靠近筒形件顶部开口区域的筒壁厚度在拉深过程中是增大的，且越靠近开口区域厚度越大。凸模下行时，发生增厚的筒壁会与凹模圆角附近的直壁发生挤压作用并伴随摩擦接触；多次连续的拉深导致热量累积和温度增加，因此在模拟结果中温度最高的区域为筒形件顶部区域。如图12所示，当成形速度为5 mm/s时，成形区域温升由第1级拉深的36.89 ℃提高至第4级拉深的176 ℃；当拉深速度为400 mm/s时，成形区域温升由第1级拉深的79 ℃提高至第4级拉深的244 ℃。在第4级拉深成形过程中，不同拉深速度下的成形区域温度均达到176 ℃以上，400 mm/s速度下的成形区域温度可达244 ℃，相比于5 mm/s速度时温度提高了38%。这是因为经历前3级的变形和磨损后，坯料与模具表面的粗糙度更大，与第1级拉深相比，第4级拉深产生的温升更高，最

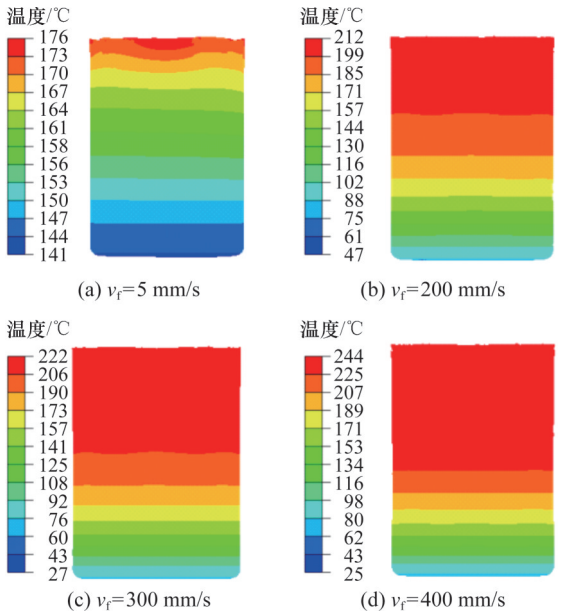


图 12　不同成形速度下第 4 级拉深工件温度场分布

Fig.12　Temperature field distributions of fourth-stage deep-drawn part under various forming speeds

终导致磨损问题也更加突出。

4.2　实验验证及讨论

4.2.1　成形速度对拉深件表面磨损的影响

选取成形速度分别为 5、200、300 和 400 mm/s 的各级筒形件，对上述区域使用激光共聚焦显微镜分别测量其表面以获得表面形貌的深度信息，使用专用后处理软件计算得到工件的表面算术平均高度（面粗糙度）*Sa* 值，分析不同速度对工件表面质量的影响以及高速条件下各级拉深件的表面质量变化情况。选取不同工序拉深件的 *Sa* 值随速度的变化曲线进行分析，如图 13 所示。可以看出，在 5～400 mm/s 成形速度区间内第 4 级拉深工件的 *Sa* 值随成形速度的增大整体呈增大趋势，其中 5～300 mm/s 速度范围内 *Sa* 值变化较为平缓，当速度提高至 400 mm/s 时 *Sa* 值急剧增大并达到最大值 4.816 μm。当成形速度为 400 mm/s 时，*Sa* 值随着拉深的进行逐渐增大，从第 1 级的较低值 2.692 μm 增大至 4.816 μm。值得关注的是，当速度低于 400 mm/s 时，第 4 级拉深件的 *Sa* 值与第 2、3 级的 *Sa* 值相差不大，甚至出现第 4 级的 *Sa* 值小于第 2、3 级 *Sa* 值的情况。这说明当成形速度增大至 400 mm/s 时，随着级进拉深过程持续进行，制件的表面质量（粗糙度）快速劣化。该现象由两方面因素共同导致：一是高速成形过程中摩擦热与塑性变形热大量累积；二是板料在多级成形中反复与模具型腔接触、挤压。上述表面质量恶化规律与有限元仿真得到的温度场高温分布区域的规律高度吻合。

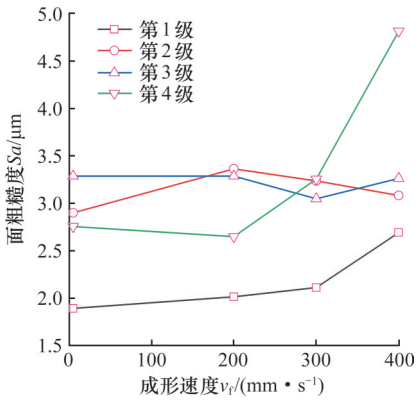
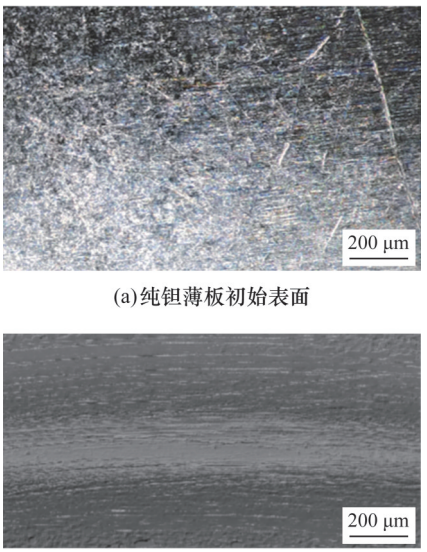


图 13　工件表面 *Sa* 与成形速度 v_f 的关系

Fig.13　Relation between workpiece surface *Sa* and forming speed v_f

图 14a 所示为纯钽薄板的原始表面，图 14b 所示为模具圆角初始表面，可见均较为平整。



(a)纯钽薄板初始表面

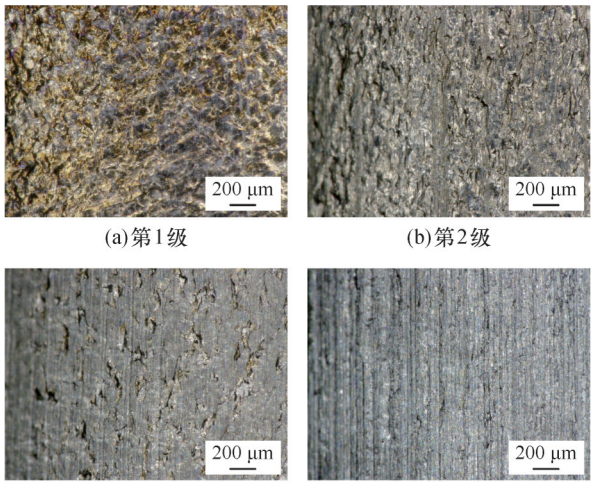
(b)第 4 级凹模圆角初始表面

图 14　坯料与模具表面初始情况

Fig.14　Initial surface of blank and die

选取高速 400 mm/s 下的各级纯钽外壳筒壁中部及以上区域的表面进行观察，如图 15 所示。第 1 级和第 2 级拉深筒形件表面出现凹凸不平的“疙瘩”，这是板材发生变形时晶粒发生变形、扭转造成的“桔皮现象”。相关研究表明[19]，晶粒尺寸对纯钽薄壁构件拉深表面质量也有一定程度的影响。此时第 1 级拉深件在宏观上看不到划痕，第 2 级拉深件有轻微的划痕，第 3 级拉深件表面在与模具经历了几次摩擦接触后出现了明显划痕，第 4 级拉深件表面最为严重。从第 3 级拉深开始，由于受到模具表面的挤压和摩擦，在接触压力增大至极限后，硬度较高的模具微凸体会挤压硬度较低的纯钽板料表面微凸体使其发生变形，加之高速滑动产生的高温，使得硬度较低的材料脱离板材并黏结至模具表面生成黏结瘤。黏结部位在剪

切力的作用下发生破坏，并在滑动中脱落形成碎屑和黏结瘤附着在较硬的模具圆角上，在后续持续的滑移过程中会在筒形件表面产生划痕。由图15c可见，发生黏模磨损的工件表面存在大量材料剥落区域，经第4级拉深完成最终成形后，工件表面划痕数量激增，磨损最为严重。这与上述通过激光共聚焦显微镜测得的面粗糙度变化趋势基本吻合。



(a)第1级　(b)第2级

(c)第3级　(d)第4级

图15　成形速度400 mm/s下各级拉深件表面形貌实物图

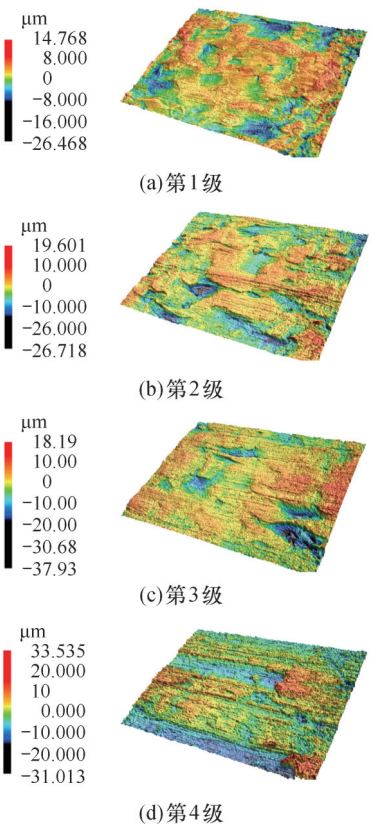
Fig.15　Physical map of surface morphology of drawing parts with forming speed of 400 mm/s

图16所示为成形速度400 mm/s条件下，各级拉深件经激光共聚焦显微镜扫描得到的微观表面形貌，可清楚地观察到工件各阶段的表面磨损情况。

图17所示为成形速度5、200、300、400 mm/s条件下第4级拉深件的微观表面形貌，可以看出，工件表面与模具发生多次相对滑移后，随着成形速度的提高，界面摩擦热与塑性变形热持续累积，工件表层温度显著升高；高温易诱发钽材向模具表面转移黏附，进而出现表层材料剥落、划痕加深、界面磨损持续加剧的现象。在模具圆角区域观察到了堆积物，如图18所示。图17关于拉深件表面损伤随速度增大而恶化的演化规律与仿真结果温度分布对黏模磨损的预测趋势也基本吻合。

4.2.2　成形速度对拉深件硬度的影响

由Archard磨损模型可知，硬度是影响磨损的一个因素，当板料硬度较低、模具硬度较高时，板料表面容易出现损伤。从以往研究来看，筒底在成形过程中仅有微小形变，此处材料的硬度比较低，接近原始板料的硬度。从底部圆角区域至筒形件顶端开口处，通常硬度的变化趋势是逐渐增大的[20]。按照图19标记的位置，沿筒壁厚度方



(a)第1级

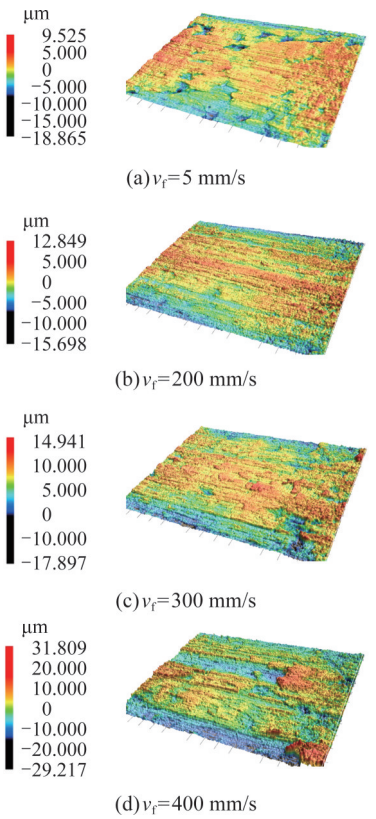
(b)第2级

(c)第3级

(d)第4级

图16　成形速度400 mm/s下各级拉深件表面微观形貌

Fig.16　Surface microstructure of drawn parts with forming speed of 400 mm/s



(a)v_f=5 mm/s

(b)v_f=200 mm/s

(c)v_f=300 mm/s

(d)v_f=400 mm/s

图17　不同成形速度下第4级拉深件的表面微观形貌

Fig.17　Surface microstructure of the 4th stage drawn parts at different forming speeds

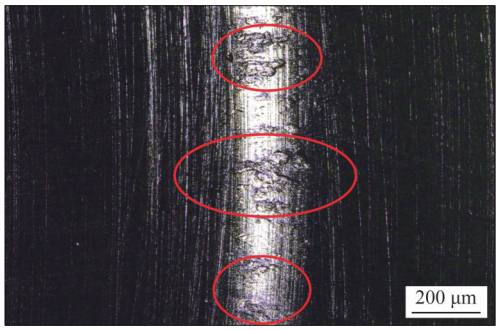


图 18　模具圆角黏结情况

Fig.18　Bonding condition of rounded corner of stamping die

向分别对成形速度 5 mm/s(低速)、400 mm/s(高速)下各级拉深筒形件开展维氏硬度测量,获取各级拉深件 5 次测量结果的平均值,如图 20 所示,可以看出各级拉深件的硬度随着成形速度的增大呈现下降趋势。对比 5 mm/s 和 400 mm/s 两种速度下的成形结果,除了第 1 级拉深件在两种速度下的硬度相差不大外,其余工序中成形速度为 400 mm/s 的拉深件维氏硬度均略低于成形速度为 5 mm/s 时的拉深件维氏硬度。成形速度较低时,越往后一级拉深,筒形件筒壁部分的硬度呈增大趋势,板材同一部位的材料会经历多次塑性变形,内部晶粒会发生多次变形扭转,从而导致硬度逐渐提高。在级进拉深成形 5～400 mm/s 速度范围内,材料硬度最大值约为 160HV,且随着成形速度的增大而降低。由 Archard 磨损模型可知,板料的硬度越大,磨损程度越低。

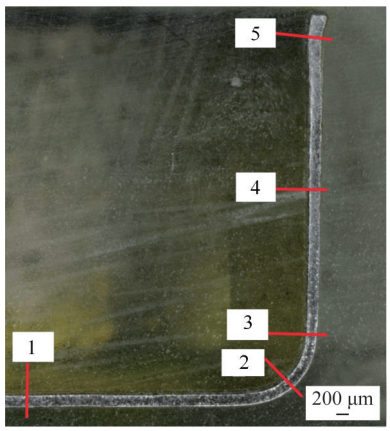


图 19　拉深筒形件剖切面测量点

Fig.19　Measuring point of section of deep drawing cylinder

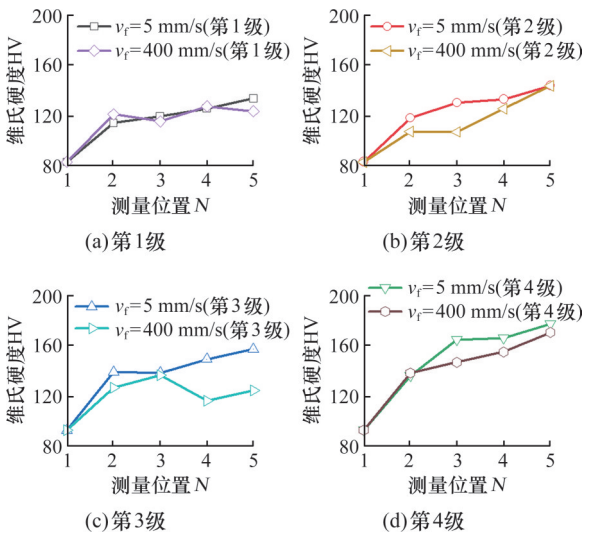


图 20　不同成形速度下各级拉深件的硬度

Fig.20　Hardness of drawing parts at all levels under different forming speeds

5　结论

1)纯钽薄板在不同拉深成形速度下表现出较为明显的应变率效应,此效应将改变材料高速成形温升及塑性成形能力,从而对成形黏模磨损程度造成影响。

2)应变硬化和应变率效应的共同作用易造成钽薄壁构件在高速拉深成形初期时板料与模具接触作用力较大,导致较软钽材与模具圆角在高速相对滑移时产生局部黏着,进而造成后续磨损。

3)钽薄壁构件高速拉深成形时,筒壁中部及其上方区域因壁厚增大,将引起此区域多次连续拉深热量累积和温度升高;成形速度越高,各级拉深成形温度均将有不同程度的升高;由于经历多级变形和磨损,终级拉深成形温升更高,因此此阶段的磨损问题也更为突出。

4)钽薄壁构件高速拉深成形时,筒壁中部及其上方区域的表面磨损程度随成形速度增大而提高;高速状态下的摩擦热与塑性变形热共同作用,以及工件表面与模具多次接触将导致高速成形时(400 mm/s)级进拉深工件表面质量随成形持续进行而迅速变差;随着成形速度的提高,前工序成形历史将进一步导致后续工序拉深微观表面材料剥落以及划痕加深、磨损加剧。

5)钽薄壁构件高速拉深成形时,各级拉深件抵抗黏模磨损能力随成形速度的增大出现下降趋势;从工件底部圆心沿径向向外,抵抗黏模磨损能力逐渐增强。

参考文献:

[1]　吴全兴. 钽及其合金的用途[J]. 稀有金属快报, 2002(3): 23-24.
WU Quanxing. Use of Tantalum and Its Alloys[J]. Rare Metals Letters, 2002(3): 23-24.

[2]　HOGE K G, MUKHERJEE A K. The Temperature and Strain Rate Dependence of the Flow Stress of Tantalum [J]. Journal of Materials Science, 1977, 12(8): 1666-1672.

[3] MEYERS M A, CHEN Y J, MARQUIS F D S, et al. High-strain, High-strain-rate Behavior of Tantalum[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1995, 26(10): 2493-2501.
[4] 彭建祥，李英雷，李大红. 纯钽动态本构关系的实验研究[J]. 爆炸与冲击，2003，23(2)：183-187.
PENG Jianxiang, LI Yinglei, LI Dahong. An Experimental Study on the Dynamic Constitutive Relation of Tantalum[J]. Explosion and Shock Waves, 2003, 23(2): 183-187.
[5] 储家佑，俞建荣. 冲模粘结瘤的影响因素及预防对策[J]. 模具工业，1987，13(3)：2-6.
CHU Jiayou, YU Jianrong. Influencing Factors and Preventive Countermeasures of Sticking Tumor of Stamping Die[J]. Die & Mould Industry, 1987, 13(3): 2-6.
[6] 平板正人，邢奇源. 粘模的各种因素及防止措施[J]. 模具技术，1989(2)：12-18.
HEIBAN Masato, XING Qiyuan. Various Factors and Preventive Measures of Mold Sticking[J]. Die and Mould Technology, 1989(2): 12-18.
[7] 侯英岢，张卫刚，于忠奇，等. 模具硬度对高强度钢板拉毛缺陷的影响规律研究[J]. 塑性工程学报，2008，15(6)：43-47.
HOU Yingke, ZHANG Weigang, YU Zhongqi, et al. The Study of the Effect of Die Hardness on Galling of High Strength Steel[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2008, 15(6): 43-47.
[8] 董文正，徐令，林启权. 高强钢板弯曲成形界面压力变化规律及黏模行为[J]. 中南大学学报(自然科学版)，2016，47(5)：1513-1518.
DONG Wenzheng, XU Ling, LIN Qiquan. Contact Pressure and Galling Behavior at Die Radius in Bending Process with High Strength Steel Sheet[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2016, 47(5): 1513-1518.
[9] 李伟，王成勇，田植诚，等. 基于型面接触应力分析的模具局部磨损[J]. 塑性工程学报，2013，20(5)：33-37.
LI Wei, WANG Chengyong, TIAN Zhicheng, et al. Research on Localized Wear of the Die Based on Contact Stress Analysis on Die Surface in Stamping Process[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2013, 20(5): 33-37.
[10] BRECHET Y, ESTRIN Y. On the Influence of Strain Rate Sensitivity on Wear in the Archard Regime[J]. Scripta Metallurgica et Materialia, 1994, 30(11): 1455-1460.
[11] ERSOY-NÜRNBERG K, NÜRNBERG G, GOLLE M, et al. Simulation of Wear on Sheet Metal Forming Tools: an Energy Approach[J]. Wear, 2008, 265(11/12): 1801-1807.
[12] 徐腾，邓春阳，邱国强，等. 纯钽薄壁构件高速级进拉深应变率效应及成形性研究[J]. 中国机械工程，2024，35(12)：2157-2168.
XU Teng, DENG Chunyang, QIU Guoqiang, et al. Strain Rate Effect and Formability Research of High-speed Stage Deep Drawing for Pure Tantalum Thin-wall Members[J]. China Mechanical Engineering, 2024, 35(12): 2157-2168.
[13] 彭建祥. 钽的本构关系研究[D]. 绵阳：中国工程物理研究院，2001：15-16.
PENG Jianxiang. Study on Constitutive Relation of Tantalum[D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2001: 15-16.
[14] 王鹰宇. Abaqus分析用户手册[M]. 北京：机械工业出版社，2017：1124.
WANG Yingyu. Abaqus Analysis User's Guide[M]. Beijing: China Machine Press, 2017: 1124.
[15] LI Jianliang, ZHANG Xiafei, WANG Jun, et al. Mechanical and Frictional Performance of Ta and Ta-Ag Alloy Films Deposited at Different Sputtering Powers[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2019, 28(8): 5037-5046.
[16] XU Teng, DOU Shihao, SU Mingwu, et al. Improving the Quality of Tantalum Cylindrical Deep-drawn Part Formation Using Different Lubricating Media-coated Dies[J]. Processes, 2024, 12(1): 210.
[17] 王孝培. 冲压手册[M]. 3版. 北京：机械工业出版社，2004.
WANG Xiaopei. Stamping Handbook[M]. 3rd ed. Beijing: Mechanical Industry Press, 2004.
[18] YANG D Y, JUNG D W, SONG I S, et al. Comparative Investigation into Implicit, Explicit, and Iterative Implicit/Explicit Schemes for the Simulation of Sheet-metal Forming Processes[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1995, 50(1/2/3/4): 39-53.
[19] 张行健，王志法，陈德欣，等. 冷变形量及退火温度对钽板再结晶组织的影响[J]. 稀有金属与硬质合金，2005，33(4)：8-12.
ZHANG Xingjian, WANG Zhifa, CHEN Dexin, et al. Effect of Cold Deformation and Annealing Temperature on Recrystallization Microstructure of Tantalum Sheet[J]. Rare Metals and Cemented Carbides, 2005, 33(4): 8-12.
[20] 刘钊扬. 汽车车身板用6A16铝合金拉深成形性能的研究[D]. 北京：北京有色金属研究总院，2020.
LIU Zhaoyang. Study on Deep Drawing Formability of 6A16 Aluminum Alloy for Automobile Body Panel[D]. Beijing: General Research Institute of Nonferrous Metals, 2020.

（编辑 胡佳慧）

作者简介：徐 腾，男，1988年生，博士、副研究员。研究方向为金属塑性成形理论、工艺及设备，超声振动冲压成形，伺服冲压成形。E-mail：tengxu@szu.edu.cn。龚 峰*（通信作者），男，1982年生，教授、博士研究生导师。研究方向为塑性成形工艺及理论、先进光学制造工艺与装备。E-mail：gongfeng@szu.edu.cn。

本文引用格式：
徐腾，谢泽锋，关运鹏，等. 纯钽薄壁构件高速级进拉深成形黏模磨损规律[J]. 中国机械工程，2026，37(11)：2938-2946.
XU Teng, XIE Zefeng, GUAN Yunpeng, et al. Laws of Die Adhesive Wear of High Speed Progressive Deep Drawing Forming for Pure Tantalum Thin-walled Components[J]. China Mechanical Engineering, 2026, 37(11): 2938-2946.