

高强度金属棒料高速与应力集中 复合剪切断裂行为

董渊哲¹, 刘柏扬², 朱成成¹, 任芋见², 赵升吨²

(1. 长安大学道路施工技术与装备教育部重点实验室, 710064, 西安;

2. 西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对传统剪切工艺不适用于高强度金属棒料高效精密切断的难题,提出了高速与应力集中复合的精密剪切新原理工艺,分析了环形槽几何参数对理论应力集中系数的影响,建立了42CrMo高强度棒料的高速剪切断裂有限元模型,研究了铣削和激光旋切环形槽对槽根等效应力应变场、应力三轴度、损伤起裂及三维裂纹扩展断裂行为的影响,并通过高速剪切试验,获得了不同环形槽对棒料剪切断面质量的影响规律。研究表明:对于表面不带环形槽的棒料,损伤起裂需要较大程度的塑性变形累积,切断后的棒料存在压塌及飞边缺陷;所提工艺方法有效约束了槽根附近材料的塑性变形,提高了高速剪切断面质量,圆度误差由11.2%减少到2.3%~4.7%,平面度误差由1.08 mm降低为0.58~0.65 mm,最大弯曲变形度由1.5 mm降低为0.4~0.5 mm,最大剪切载荷和断裂能量也得到了显著降低;相比铣削环形槽,激光旋切获得的尖角窄槽进一步降低了剪切载荷和断裂能量。新工艺方法可为高强度金属棒料的高效、精密及低能耗剪切行为提供参考。

关键词: 精密剪切;高强度棒料;高速;环形槽;断裂行为

中图分类号: TG316 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202408015 **文章编号:** 0253-987X(2024)08-0145-11

High-Speed Shearing with Stress Concentration and Fracture Behavior of High-Strength Metal Bars

DONG Yuanzhe¹, LIU Boyang², ZHU Chengcheng¹, REN Yujian², ZHAO Shengdun²

(1. Key Laboratory of Road Construction Technology and Equipment of MOE, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Due to the deficiencies of low efficiency and precision in traditional shearing methods, a new high-speed precise shearing method with stress concentration is proposed for high-strength metal bars. The influence of geometric parameters of circumferential notches is analyzed on theoretical stress concentration coefficient. High-speed shearing finite element models are established for 42CrMo bars with notches processed by milling cutter or laser, and the effects of notches on fracture behavior, such as damage initiation and three-dimensional crack propagation, are revealed based on distribution of equivalent stress, plastic strain and stress triaxiality. Besides, comparative experimental tests are conducted, and section quality is evaluated for

收稿日期: 2024-02-08。 作者简介: 董渊哲(1989—),男,讲师;赵升吨(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目:国家自然科学基金资助项目(52105398);陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2022JQ-440);长安大学中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(300102252105)。

网络出版时间: 2024-04-29

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.t.20240425.2213.006>

notched and unnotched 42CrMo bars. The results show that for unnotched bars, the damage initiation needs more accumulation of plastic deformation, and squeezed flashes are left on the fracture section. As contrast, the new method effectively restrains the plastic deformation near the notch and improves the section quality, with roundness error from 11.2% to 2.3%—4.7%, flatness error from 1.08 mm to 0.58—0.65 mm, and the maximum bending deformation from 1.5 mm to 0.4—0.5 mm. The maximum shear load and fracture energy also decrease significantly. In addition, compared with milled notches, the narrow and sharp notches by laser further reduce the shear load and fracture energy. The new method shows advantages of high efficiency and precision, and low energy consumption.

Keywords: precise shearing; high-strength bar; high-speed; circumferential notch; fracture behavior

金属棒料切断分离的下料工序是大多数机械零部件成形制造的第一道工序^[1]。室温抗拉强度超过 800 MPa 的 42CrMo 钢、GC15 轴承钢、钛合金等中等直径的高强度、难切削金属棒料,对剪切设备的载荷能力要求较高,目前常采用高温剪切或高速锯切工艺,不同程度地存在着断面质量差、能耗高、生产效率低、刀具寿命低、废旧切削液污染等问题。随着冷(温)挤压、等温锻造、精密模锻、精密滚轧等近净成形新工艺和新技术的发展,急需高效精密的剪切技术以提供支撑。

20 世纪 50 年代以来,国内外学者在金属棒料精密剪切方面开展了大量研究工作,提出的精密剪切方法包括径向约束剪切^[2]、轴向加压剪切^[3]、扭剪复合剪切^[4]、预压痕双冲程剪切^[5]、低应力疲劳切断^[6-7]和高速剪切^[8]等。高速剪切方法在径向约束剪切的基础上,通过施加高速载荷、降低金属韧性来提高金属棒料剪切质量。试验研究表明:对于中等直径棒料,采用 5~10 m/s 的加载速度能获得更加垂直平整的剪切断面^[8]。伯明翰大学 Organ^[9]研制了加载速度达 9.1 m/s 的液化气内燃锤,针对中等强度的中碳钢、铝合金和黄铜棒料开展了高速剪切试验,最大切断直径为 22 mm,相比加载速度为 1 m/s 左右的低速剪切,径向压扁量降低了 10%~25%。李永堂等^[8,10]研制了 4 kJ 液气式高速精密剪切机,采用 4~6 m/s 剪切速度剪断的 35 号和 45 号中碳钢棒料,最大切断直径为 20 mm,断面不平度和倾斜度得到有效降低,径向压扁程度改善了 14.3%。上述高速剪切方法均采用锋利的剪刀直接高速冲击切入棒料,在剪切高强度棒料时极易造成崩刃,主要适用于小直径、中低强度的碳钢以及铝合金、铜合金等有色金属,且剪切断面仍存在较为明显的径向压扁,如图 1 所示。

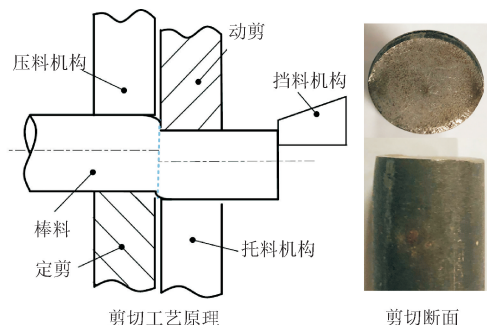


图 1 传统切入式高速剪切原理及径向压扁的断料
Fig.1 Conventional high-speed shearing method and cropped bar with radially compressional deformation

高应变率下的金属材料力学行为研究方面,对于体心立方(BCC)晶体结构的金属,特别是低、中碳钢,Armstrong 等^[11]的研究表明,在一定范围内提高应变率可造成应力强化,具体表现为:材料的屈服强度随应变速率的增加而增加,与最大拉应力对应的应变随之减小,塑性变形受到抑制;而升高温度则会造成一定程度的应力软化。Singh 等^[12]比较了低碳钢在高应变率(750 s^{-1})和准静态(0.001 s^{-1})下的拉伸和压缩动态力学行为,发现相较于准静态,高应变率下的屈服强度增加约 2.5 倍,抗拉强度增加约 1.18 倍。Hor 等^[13]对 42CrMo4 钢进行了 $10^{-2}\sim 10^5\text{ s}^{-1}$ 应变率范围内的帽型试样剪切试验,结果表明应变率敏感度在 1000 s^{-1} 左右时最为显著,同时测得该应变率剪切后的试样表面温升约为 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。Lu 和 Zhu 等^[14-15]对 42CrMo 钢的试验结果表明:当应变率超过 3000 s^{-1} 时,绝热温升造成的应力软化效应超过了应变率增加的应力强化效应。许多学者认为,绝热剪切带的产生取决于材料热软化与应变/应变率硬化之间的竞争,对于面心立方(FCC)和密排六方(HCP)晶体结构的金属,应

变率的影响效应则不尽相同^[16-17]。

在金属损伤与断裂预测模型及断裂准则方面,麻省理工学院的 Bai 等^[18]开展了近全应力三轴度范围的断裂力学试验,揭示了金属材料的断裂模式强烈依赖于试件的应力三轴度。此后,更多的研究开始集中于应力三轴度对损伤演化的影响规律。Xue^[19]针对 GTN 模型,在预测低应力三轴度剪切断裂的局限性时进行了考虑剪切损伤演化的模型修正。Lou 等^[20-21]系统研究了剪切、单向拉伸、平面应变拉伸等应力状态下的损伤断裂特性,先后提出了 DF2012、DF2014 等韧性损伤断裂模型,这些模型综合考虑了微孔洞形核、生长和剪切聚合演化机制,并成功应用于 AA2024-T351 合金以及 DP980 高强钢的圆棒拉伸、圆柱压缩、板材剪切等断裂失效行为预测。Zhuang 等^[22]对 DF2012 和 DF2014 断裂准则参数的不同标定方法及预测精度进行了评价。上述断裂模型均是在较低应变速率条件下进行预测,对于高应变速率条件则有待进一步扩展。由此可见,复杂应力三轴度和高应变速率耦合效应下的断裂力学行为精准预测仍是研究的难点。

本文针对现有剪切方法存在的诸多不足,依托已授权的国家发明专利^[23-24],提出了高强度金属棒料的高速与应力集中复合精密剪切新工艺,结合理论分析、数值模拟与试验验证,对预制有不同环形槽的高强度金属棒料开展了高速与应力集中复合剪切研究,揭示了环形槽根部损伤起裂和三维裂纹动态扩展的断裂行为规律,提出了断面评价指标并获得了不同环形槽对断面质量的影响规律。该方法成功实现了高强度金属棒料的高效、精密及低能耗剪切。

1 工艺原理及理论分析

1.1 工艺原理

本文提出的新工艺如图 2 所示。新工艺综合利用环形槽的应力集中效应、径向约束限制棒料弯曲及高速载荷抑制材料塑性变形等技术优势,在提高剪切断面质量与效率的同时降低了载荷和能耗,具体包括以下两个过程。

(1)棒料表面预制环形槽。在金属棒料表面批量铣削或激光旋切出等间距的环形槽,通过应力集中起裂替代剪刀切入起裂方式,不仅能避免崩刃,延长模具寿命,还可以有效降低剪切载荷和能耗,进一步提高断面几何精度。

(2)高速冲击剪切棒料。带有环形槽的棒料被送入整体式径向约束剪切模具中,槽根尖角处于套

筒式动剪套和静剪套之间,气缸上腔气体压缩后,储存压力为 P_1 的压力势能,气缸下腔快速排油,气体快速膨胀驱动锤头高速打击动剪块从而切断棒料,并进一步通过弹簧复位动剪块。

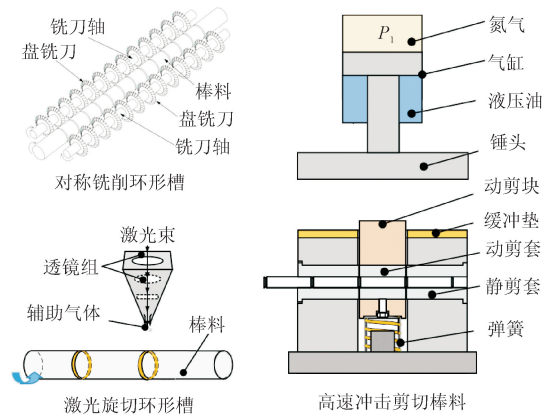


图 2 金属棒料高速与应力集中复合精密剪切新工艺示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the new high-speed precise shearing method for metal bars with stress concentration

该工艺可采用单面或双面剪切,双面剪切时一次切断可获得 2 节断料,剪断效率更高,更适用于批量加工。对于不同直径的棒料,可考虑更换相应孔径的套筒式动剪和静剪。动、静剪套间的轴向间隙 l_1 越小越好,由于 l_1 过大时易产生崩刃及剪切断面倾斜,因此 l_1 与环形槽宽度 w 之间应满足 $l_1 < w$ 。

1.2 环形槽几何参数对理论应力集中系数的影响

在径向约束剪切过程中,环形槽根部剪应力存在着应力集中。线弹性力学范围内,环形槽根部的理论应力集中系数 k_t ^[25-26]可估算为

$$k_t = \frac{2}{3} \frac{(h/r)^{3/2} \varphi(2\bar{\alpha})}{(1+h/r) \arcsin(\sqrt{(h/r)/(1+h/r)}) - \sqrt{h/r}} \quad (1)$$

式中: h 、 $2\bar{\alpha}$ 、 r 分别为环形槽的槽深、张角和槽根曲率半径; $\varphi(2\bar{\alpha})$ 为张角因子,可通过有限元分析获得,表示如下

$$\varphi(2\bar{\alpha}) = \frac{4}{3} - \frac{2\bar{\alpha}}{6\pi} \left(1 + \frac{2\bar{\alpha}}{\pi}\right) \quad (2)$$

其中 $2\bar{\alpha} = 2\pi\alpha/180$ 。

由式(1)可知,环形槽几何参数对 k_t 的影响由大到小依次为 r 、 h 、 $2\bar{\alpha}$ 。减小槽根曲率半径 r , k_t 显著增大;增加槽深 h , k_t 逐渐增大;降低环形槽张角 $2\bar{\alpha}$, k_t 呈现一定程度增加,但变化较小。对于 20~50 mm 的中等直径金属棒料, h 过大会增加材料浪费,因此铣削环形槽时, h 的选用范围为 1~2 mm;

刀尖圆角过小易磨损及崩尖,因此 r 的选用范围为 $0.2 \sim 0.3 \text{ mm}$;张角 2α 对 k_t 的影响较小,且轴类零件锻造前常倒角 45° 以减小对模具的损伤,因此 2α 宜选为 90° 。对于激光旋切环形槽,根据试验槽型^[27], h 、 r 、 2α 的选用范围分别为 $1 \sim 2 \text{ mm}$ 、 $\leq 0.1 \text{ mm}$ 及 $\leq 30^\circ$ 。

1.3 临界载荷的理论计算

如图3所示,棒料在剪切分离阶段,分别受到来自自动、静剪套的压力 F_1 和 F_2 ,以及两侧剪断面上的剪切载荷 P 。图中, m 为中间段棒料质量, σ_x 、 σ_y 、 σ_z 为三向主应力, τ_{xz} 为剪应力, d 为圆棒直径, s 为 z 方向的位移, γ 为剪切偏转角, τ_n 为名义剪应力, $\tau_{n_{\max}}$ 为最大名义剪应力, BE 为中性轴。

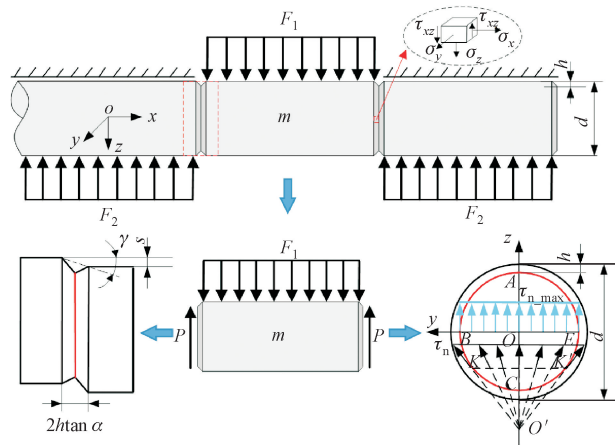


图3 金属棒料剪切阶段的受力示意图

Fig. 3 Force diagram of metal bar in the shearing process

根据 Theoder Karman 理论,相比于单向受压,三向压应力状态更有利于金属材料的塑性发挥,也更容易产生纯剪切断裂^[8]。此时,剪应力对裂纹的产生和扩展起主导作用,力平衡公式可写为

$$F_1 - 2P + mg = m \frac{d^2 s}{dt^2} \quad (3)$$

式中: t 为时间。

根据材料力学理论,当不考虑环形槽时,剪断面上任意一点的名义剪应力可表示为

$$\tau_n(y, z) = \frac{PS_y^*}{I_y L_{KK'}} \quad (4)$$

式中: S_y^* 、 I_y 分别为线段 $K-K'$ (见图3) 以下截面对 y 轴的面积矩及对中性轴 BE 的惯性矩; $L_{KK'}$ 为线段 KK' 的长度。

最大名义剪应力 $\tau_{n_{\max}}$ 均匀分布于中性轴上,可计算如下

$$\tau_{n_{\max}} = \frac{4P}{3\pi(d/2 - h)^2} \quad (5)$$

考虑环形槽根部的应力集中效应,截面上的最大实际剪应力产生于槽根 B 点和 E 点,计算公式为

$$\tau_{\max} = k_t \frac{4P}{3\pi(d/2 - h)^2} \quad (6)$$

根据文献[28]的试验结果,最大等效应力 $\bar{\sigma}_{\max}$ 可近似等于 $\sqrt{3}\tau_{\max}$,当 $\bar{\sigma}_{\max}$ 达到材料的失效强度 $\bar{\sigma}_b$ 时,裂纹在 B 点和 E 点萌生。假定棒料净加速度为0,将式(1)、(2)、(6)分别代入式(3),可求得施加在棒料上的临界载荷 F_m ,表示为

$$F_m = \frac{\sqrt{3}\pi(d - 2h)^2}{8} \cdot$$

$$\frac{3(1 + h/r) \arcsin(\sqrt{(h/r)/(1 + h/r)}) - \sqrt{h/r} \bar{\sigma}_b}{2(h/r)^{3/2} [4/3 - (2\alpha/6\pi)(1 + 2\alpha/\pi)]} \bar{\sigma}_b \quad (7)$$

1.4 临界剪切断裂能量的理论计算

根据 Yu 等^[29]的试验结果,对于受均布冲击载荷的两端固支梁,剪切位移只需达到梁截面厚度的30%以内,梁截面就会被沿竖直方向的裂纹所贯穿。假定剪切断裂位移为 s ,则整个剪切过程中的临界剪切断裂能量 W 可近似计算如下

$$W = \int_0^s F dz = \frac{F_m s}{2} = \frac{F_m (d - 2h) \bar{\epsilon}_f}{2} \quad (8)$$

式中: $\bar{\epsilon}_f$ 为材料等效断裂应变。

2 试验方案及数值模型

2.1 材料性能和试验方案

以机械制造业中轴类零件常用的 42CrMo 高强度钢冷拔圆棒为例,直径取为 26 mm ,采用4%硝酸酒精溶液腐蚀20 s,观察到的金相组织主要为铁素体和片状珠光体,如图4所示。

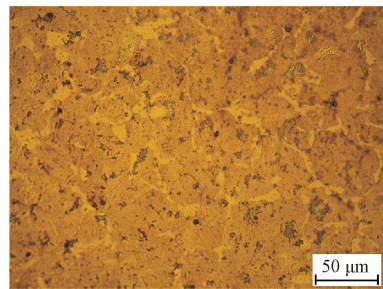


图4 42CrMo 棒料的金相组织

Fig. 4 Metallographic structure of 42CrMo bar

在 Hopkinson 压杆及 Instron 5982 试验机上开展试验,得到 20°C 下、 $0.1 \sim 3\,000 \text{ s}^{-1}$ 应变率范围内的真压缩应力-应变曲线,如图5所示。由图可见,当应变率从 0.1 s^{-1} 增大到 $1\,000 \text{ s}^{-1}$,材料的屈服强度

从 579.8 MPa 增大到 812.2 MPa,增加幅度为 40.1%,抗压强度从 944.8 MPa 增大到 1 183.8 MPa,增加幅度为 25.3%;当应变率从 $1\,000\text{ s}^{-1}$ 继续增大到 $3\,000\text{ s}^{-1}$,材料抗压强度小幅增大到 1 225.0 MPa,增加幅度为 3.5%,此时,屈服应力未发生明显变化。

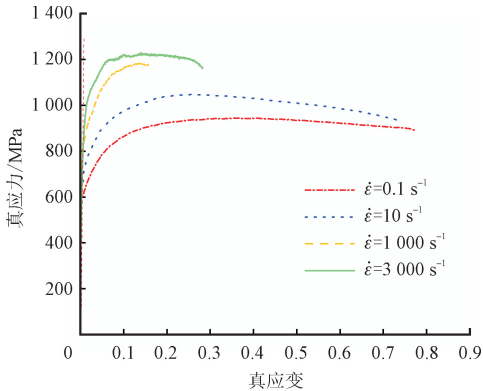


图 5 不同应变率下 42CrMo 棒料的真压缩应力-应变曲线
Fig. 5 True compressive stress-strain curve of 42CrMo bar under different strain rates

采用 C66Y-35 型液气锤对带有不同环形槽的 42CrMo 棒料开展 3 组高速剪切对比试验,锤头质量 m_1 为 1 300 kg,动剪块和动剪套的整体质量 m_2 为 28 kg,锤头行程为 640 mm,剪切速度 v 为 5 m/s,剪切长度 L 为 100 mm,模具轴向间隙 l_1 为 0.2 mm,径向间隙 l_2 为 0.2 mm。第 1 组试验的棒料表面不带环形槽。第 2 组试验的棒料表面铣削合理几何参数的环形槽,采用研制的对称伺服铣削设备^[30]开槽,进给速度为 0.5 mm/s,12 把铣刀同时旋切,耗时约为 3 s,加工效率约为 4 件/s,槽根曲率半径 r 为 0.20 mm,张角 2α 为 90° ,槽深 h 为 1.5 mm。第 3 组试验的棒料表面激光旋切合理几何参数的环形槽,采用 JK300D 型 Nd:YAG 毫秒激光器^[27]开槽,峰值功率为 12.8 kW,脉宽为 0.3 ms,脉冲频率为 50 Hz,加工转速为 20 r/min,离焦量为 0,旋切时间约为 10 s,加工效率约为 6 件/min;采用尼康 LV150N 光学显微镜观测,得到平均 r 为 0.08 mm, 2α 为 21° , h 为 1.5 mm。

2.2 高速剪切有限元模型

在 Abaqus/Explicit 软件中建立 1/4 对称的带有不同环形槽的高速剪切有限元模型,如图 6 所示。剪切速度 v 为 5 m/s,环形槽及远端采用 C3D8RT 单元,过渡区域采用 C3D4RT 单元,动、静剪套和上锤头采用 R3D4 单元,最小单元尺寸为槽根底角半径的 1/4~1/2,单元数量视环形槽的不同在 50~140 万之间。采用库伦摩擦模型模拟接触,摩擦系数为 0.2。

模具轴向间隙 l_1 为 0.2 mm,径向间隙 l_2 为 0.2 mm。

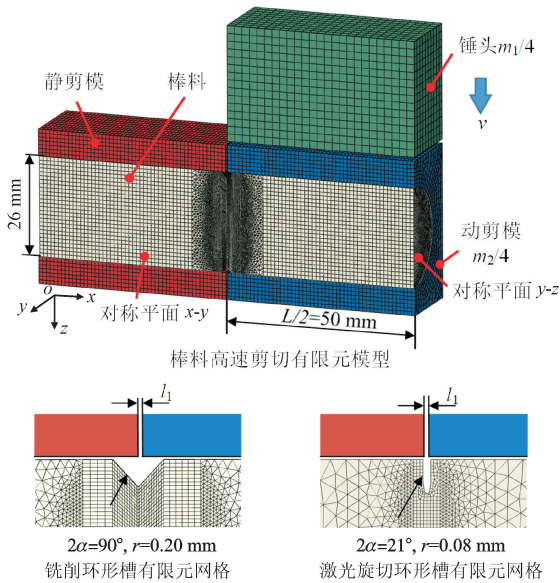


图 6 表面带有不同环形槽棒料的高速剪切有限元模型
Fig. 6 Finite element model of high-speed shear of notched bar

采用 Johnson-Cook 本构关系描述 42CrMo 材料与应变率相关的塑性变形行为,表达式如下

$$\bar{\sigma} = (A + B\bar{\epsilon}_p^n) \left[1 + C \ln\left(\frac{\dot{\bar{\epsilon}}_p}{\dot{\bar{\epsilon}}_r}\right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \tag{9}$$

式中: $\bar{\sigma}$ 为等效应力; $\bar{\epsilon}_p$ 为等效塑性应变; $\dot{\bar{\epsilon}}_p$ 为等效塑性应变率; $\dot{\bar{\epsilon}}_r$ 为参考应变率,取为 0.1 s^{-1} ; A 、 B 、 C 、 n 、 m 均为材料参数; T 为试验温度; T_r 为参考温度,取为 $20\text{ }^\circ\text{C}$; T_m 为材料熔点,取为 $1\,430\text{ }^\circ\text{C}$ 。

对图 5 中塑性变形阶段的数据进行拟合,得到式(9)中的材料参数: $A=574.25\text{ MPa}$, $B=871.79\text{ MPa}$, $C=0.05$, $n=0.29$, $m=0.57$ 。

在 DF2012 准静态断裂准则^[20]基础上,本文引入应变率项 $[1 + C_4 \ln(\dot{\bar{\epsilon}}_p / \dot{\bar{\epsilon}}_r)]$ 和温度项 $[1 + C_5 (T - T_r) / (T_m - T_r)]$,提出了新的扩展断裂准则以判定金属材料的高速剪切断裂失效。该准则综合考虑了应变率和温度影响下的微孔洞形核、生长和剪切聚合成微裂纹的演化机制,当等效塑性应变超过材料的临界阈值时发生断裂。微孔洞的形核通过等效塑性应变描述,其形核率与等效塑性应变 $\bar{\epsilon}_p$ 成正比;微孔洞的生长通过应力三轴度 σ^* 的函数 $\langle 1 + 3\sigma^* \rangle / 2$ 来表征,引入了一 1/3 的截止阈值,当 $\sigma^* < -1/3$ 时,微孔洞受压不长大;微孔洞的剪切聚合通过正则化的剪切应力关系式 $2\tau_{\max} \bar{\sigma}$ 描述。采用 FORTRAN 语言进行断裂准则算法开发,并利用 VUSDFLD 子程序集成到 ABAQUS 软件中,具体的扩展断裂准则表达式如下

$$\left(\frac{2\tau_{\max}}{\sigma}\right)^{C_1} \left(\frac{\langle 1+3\sigma^* \rangle}{2}\right)^{C_2} \dot{\epsilon}_f = D(\dot{\epsilon}_p, T) \quad (10)$$

$$\langle 1+3\sigma^* \rangle = \begin{cases} 1+3\sigma^*, & 1+3\sigma^* \geq 0 \\ 0, & 1+3\sigma^* < 0 \end{cases} \quad (11)$$

$$D(\dot{\epsilon}_p, T) = C_3 \left[1 + C_4 \ln\left(\frac{\dot{\epsilon}_p}{\dot{\epsilon}_r}\right) \right] \left(1 + C_5 \frac{T - T_r}{T_m} \right) \quad (12)$$

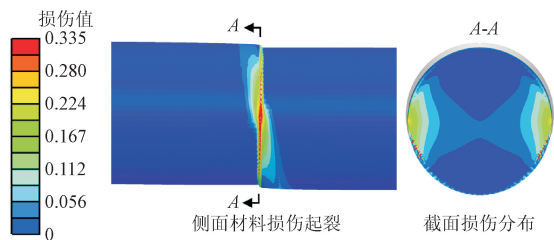
式中: $D(\dot{\epsilon}_p, T)$ 为损伤值; C_1 和 C_2 为调控系数, 用于修正孔洞形核、生长与聚合对韧性断裂的不同影响效果; 常数 C_3 等于材料的等效断裂应变; C_4 为应变率影响因子; C_5 为温度影响因子; $\langle \rangle$ 为取值操作, 当应力三轴度 σ^* 小于 $-1/3$ 时, 括号中的值取 0, 表示此时韧窝在负应力三轴度下受压不断裂。

通过不同应力三轴度、应变率及温度下的拉伸、压缩和剪切试验, 得到式(10)~式(12)中 42CrMo 的材料参数: $C_1 = 2.31$, $C_2 = 1.38$, $C_3 = 0.34$, $C_4 = -0.04$, $C_5 = -0.868$ 。

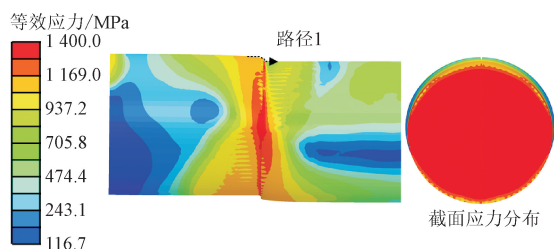
3 结果与讨论

3.1 环形槽对高速剪切断裂行为的影响

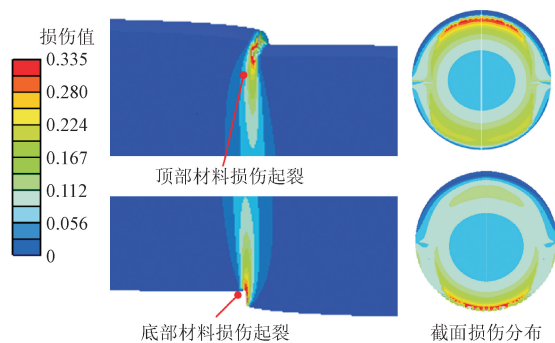
图 7 展示了表面不带环形槽 42CrMo 棒料的高速剪切断裂过程的模拟云图, 其中图 7(d) 将模拟切断结果与试验断面进行了对比。断裂过程包括侧面损伤起裂(剪切位移 $s = 1.9$ mm)、顶部和底部损伤起裂($s = 2.62$ mm)和完全切断分离($s = 4.42$ mm) 3 个阶段, 剪切过程的平均等效应变速率为 $1\,078\text{ s}^{-1}$ 。如图 7(a)、7(b) 所示, 当 $s = 1.9$ mm 时, 侧面损伤起裂, 最大损伤值 $D = 0.34$, 等效应力集中并贯穿于整个剪切截面。如图 7(c), 当 $s = 2.62$ mm 时, 棒料顶部、底部与模具剪刃接触的局部材料损伤起裂, 并受到右侧材料向下运动时的拉伸作用产生弯曲变形,



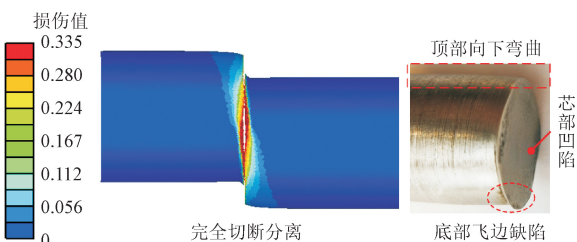
(a) 剪切位移 $s = 1.90$ mm 时的损伤分布



(b) 剪切位移 $s = 1.90$ mm 的等效应力分布



(c) 剪切位移 $s = 2.62$ mm 时的损伤分布



(d) 剪切位移 $s = 4.42$ mm 时的损伤分布

图 7 表面不带环形槽 42CrMo 棒料的高速剪切断裂过程
Fig. 7 Fracture behavior of unnotched 42CrMo bar under high-speed shearing load

导致顶部、底部起裂位置不在同一竖直平面上, 剪切面产生一定程度的偏斜。由图 7(d) 可见, 当 $s = 4.42$ mm 时, 棒料完全切断分离, 有限元模拟结果与试验断面形状一致程度较高, 芯部材料存在凹陷, 顶部材料向下弯曲, 底部边缘挤压出飞边, 断面圆度及平整度较差。

图 8 和图 9 给出了表面带有铣削环形槽 ($h = 1.5$ mm, $r = 0.20$ mm, $2\alpha = 90^\circ$) 和激光旋切环形槽 ($h = 1.5$ mm, $r = 0.08$ mm, $2\alpha = 21^\circ$) 的 42CrMo 棒料剪切断裂过程的模拟云图, 其中图 8(d) 和图 9(d) 将模拟切断结果与试验断面进行了对比。与图 7 相比, 图 8、图 9 中侧面损伤起裂、顶部和底部损伤起裂及完全切断分离 3 个阶段所需的剪切位移均减小。由于环形槽的存在, 沿着槽根的环形区域应力集中显著, 等效应力 $\bar{\sigma}$ 最大值为 $1\,355$ MPa, 而附近区域的应力程度则相对较低, 顶部和底部材料并未产生明显弯曲变形。随着剪切位移逐渐增大, 损伤起裂点逐渐沿着槽根向顶部和底部扩展, 并向芯部横向扩展, 形成一圈闭合的损伤轮廓曲线; 此后, 该损伤轮廓曲线的前缘逐渐向芯部收缩、汇聚形成最后瞬断点, 完成整个棒料的切断分离。从图 8(d) 和图 9(d) 可以看出, 有限元模拟结果与试验断面形状一致程度较高, 断面整体平整且圆度较好, 无塌角和飞边等缺陷。

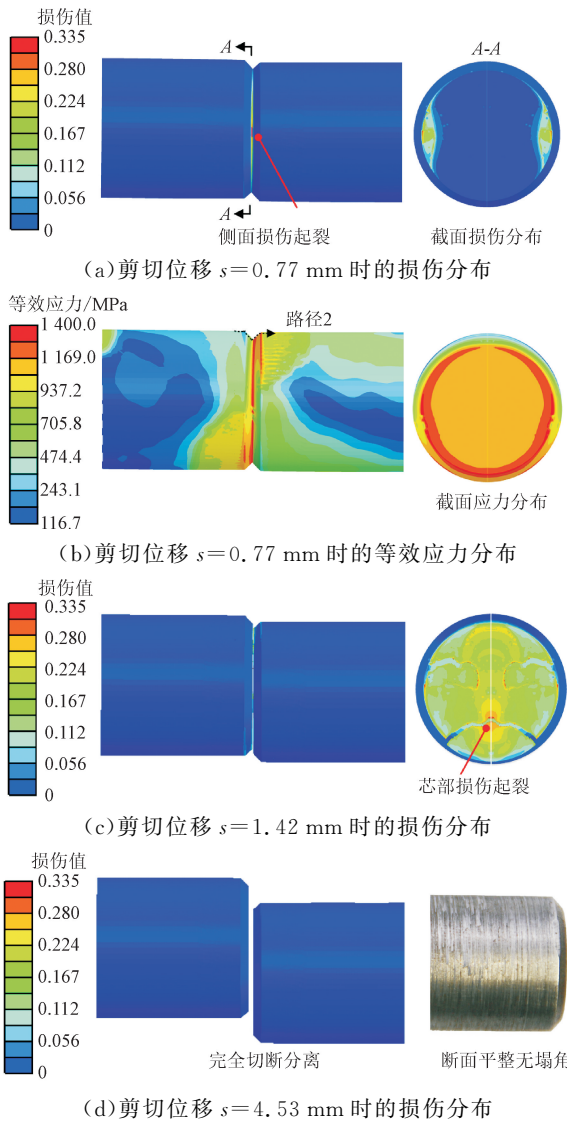


图 8 表面带铣削环形槽 42CrMo 棒料的剪切断裂过程
Fig. 8 Fracture behavior of 42CrMo bar with notch by milling cutter under high-speed shearing load

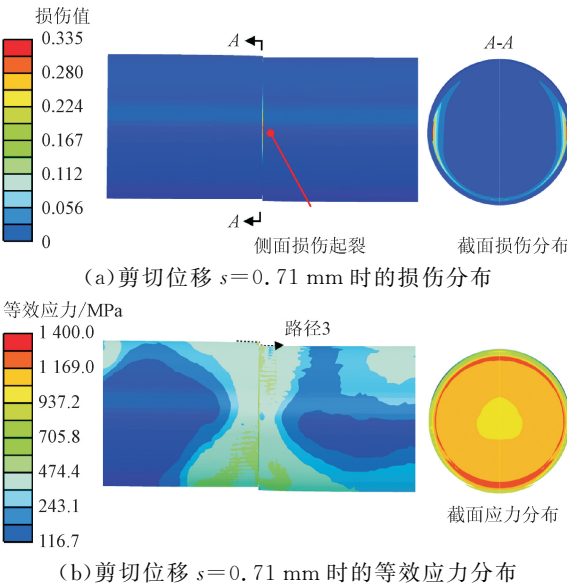


图 9 表面带激光旋切环形槽 42CrMo 棒料的剪切断裂过程
Fig. 9 Fracture behavior of 42CrMo bar with notch by laser under high-speed shearing load

综上所述,对于表面不带环形槽的棒料,损伤起裂需要更大程度的塑性变形累积,而在棒料表面铣削或激光旋切具有合理几何参数的环形槽,使得材料的损伤起裂主要源于槽根的剪切应力集中效应,环形槽附近的塑性变形区有效缩小,切断后的棒料断面整体平整,无塌角和飞边等缺陷。上述 3 种有限元模拟断面形状与试验结果一致度较高,均表明本文所建立的本构关系方程和开发的断裂准则方程具有较高的精度。

在剪切起裂阶段,进一步对比了棒料表面沿着路径 1(见图 7)、2(见图 8)和 3(见图 9)上连续节点的等效塑性应变 $\bar{\epsilon}_p$ 和应力三轴度 σ^* 的分布情况,结果如图 10 和图 11 所示,其中路径中点为顶部剪刃接触点或槽根节点,横轴表示路径节点相对于槽根沿 x 轴的坐标。由图 10 和图 11 可见,沿着上述路径,等效塑性应变 $\bar{\epsilon}_p$ 的值均先增大再减小,峰值位于剪刃接触点或环形槽根部。对于表面不带环形槽的棒料,顶部起裂点附近宽度为 4 mm 左右的区域发生了较大塑性变形,应力三轴度 σ^* 从 0.54(拉应力)降低到-3.26(压应力),再逐渐增加到-1.71(压应力),与顶部材料弯曲力学行为相一致。对于表面带有铣削槽的棒料,塑性变形区域缩小至顶部起裂点左侧 0.25 mm、右侧 1.50 mm 范围内, σ^* 波动幅度减小,在槽根左侧从-0.11(压应力)增加到峰值 0.57(拉应力),在槽根处降低为 0.08(剪应

力),在槽根右侧逐渐降低至 -0.57 (压应力),表明了槽根左侧受拉,右侧受压,槽根处以剪应力为主。对于表面带有激光槽的棒料,塑性变形区和应力三轴度波动进一步集中于槽根附近 0.20 mm 以内的更小区域。

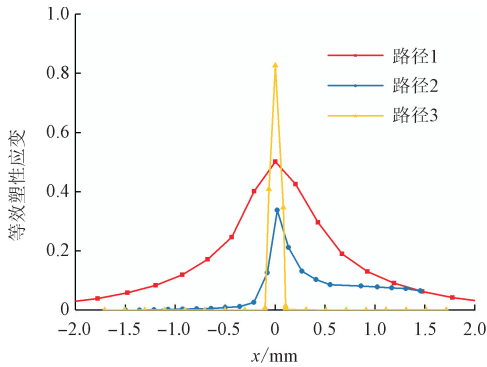


图 10 不同槽型棒料沿路径节点的等效塑性应变分布
Fig. 10 Equivalent plastic strain distribution of nodes along paths on bar with different notches

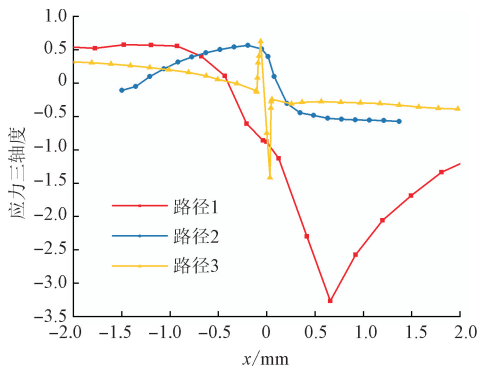


图 11 不同槽型棒料沿路径节点的应力三轴度分布
Fig. 11 Stress triaxiality distribution of nodes along paths on bar with different notches

3.2 环形槽对剪切载荷和断裂能量的影响

对于铣削环形槽,当槽型一定($2\alpha = 90^\circ$, $r = 0.2\text{ mm}$)、槽深 h 不同时,得到的剪切载荷-位移曲线结果如图 12 所示。对所得曲线进行积分,得到的剪切断裂能量如图 13 所示。由图 12 和图 13 可见,当 h 从 0 增加到 2.0 mm ,剪切载荷显著降低,剪切断裂位移从 3.8 mm 减小为 1.1 mm ,降低了 71.4% ;剪切断裂能量从 $2\,132.6\text{ J}$ 降低为 420.5 J ,且随着槽深的增加,降低幅度逐渐减小。相比剪刀直接冲击切入棒料的传统高速剪切方法,剪切前在棒料表面预制应力集中环形槽,不仅显著降低了剪切载荷和断裂能量,而且有效遏制了断面附近材料的塑性变形。

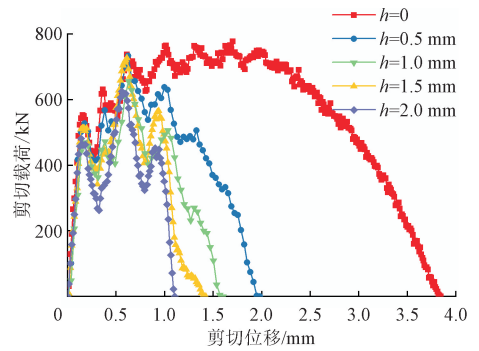


图 12 不同槽深对剪切载荷-位移的影响
Fig. 12 Influence of different notch depth on shear load-displacement

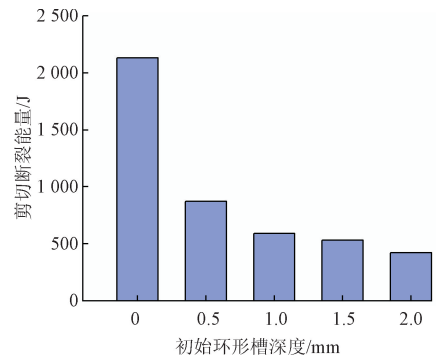


图 13 不同槽深对剪切断裂能量的影响
Fig. 13 Influence of notch depth on shear fracture energy

对比铣削和激光旋切环形槽,当槽深一定($h = 1.0\text{ mm}$)、槽型($2\alpha, r$)不同时,得到的剪切载荷-位移曲线结果如图 14 所示。铣削槽的几何参数为: $2\alpha = 90^\circ$, $r = 0.2\text{ mm}$,激光槽的几何参数为: $2\alpha = 21^\circ$, $r = 0.08\text{ mm}$ 。

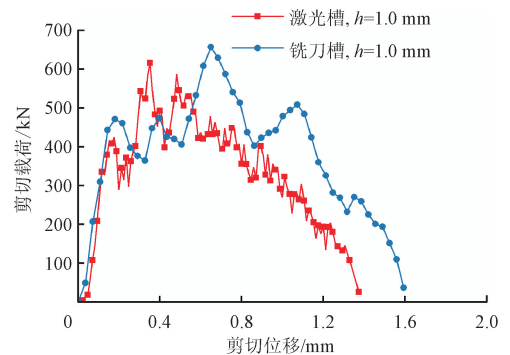


图 14 不同槽型对剪切载荷-位移的影响
Fig. 14 Influence of different notch profile on shear load-displacement

由图 14 可见,相较于铣削槽,激光旋切获得的尖角窄槽进一步降低了剪切载荷,并使得剪切断裂位移

从 1.6 mm 降低为 1.4 mm,剪切断裂能量从 589.7 J 降低为 457.5 J,能量的降低幅度达 22.4%。

3.3 剪切断面质量分析

在高速剪切试验中,试验 2 的棒料带有铣削环形槽($r=0.20\text{ mm}$, $2\alpha=90^\circ$, $h=1.5\text{ mm}$),试验 3 的棒料带有激光旋切环形槽($r=0.08\text{ mm}$, $2\alpha=21^\circ$, $h=1.5\text{ mm}$),环形槽的微观形貌如图 15 所示。由图可见,激光旋切获得的尖角槽根应力集中更显著。此外,在激光加工过程中,大部分熔渣已被高压辅助气体吹离,环形槽根部表层残留着厚度为 0.3~0.6 mm 的组织细化淬硬层,硬度由 239.4 HV 增加到 600 HV 以上^[31],进一步增加了剪切时的槽根脆化起裂。

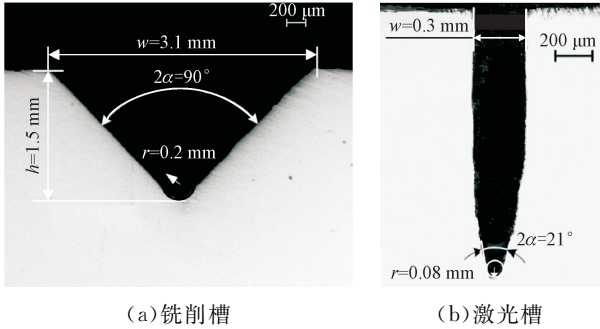


图 15 铣削环形槽和激光旋切环形槽的微观形貌
Fig. 15 Microtopography of notches by milling and laser rotary cutting

图 16(a)~(c)分别给出了 3 组试验棒料的剪切断面形貌,3 组试验的断面质量通过 e_r 、 e_b 和 e_f 3 个指标评价,其中 e_r 为圆度误差,采用圆度仪测量; e_f 为平面度误差,即断面最高点和最低点的高度差,采用 KathMatic 公司 KC-X1000 激光共聚焦显微镜测量; e_b 为棒料最大弯曲变形,采用 Global classic SR 575 三坐标测量机测量。图 16(d)给出了试验 1

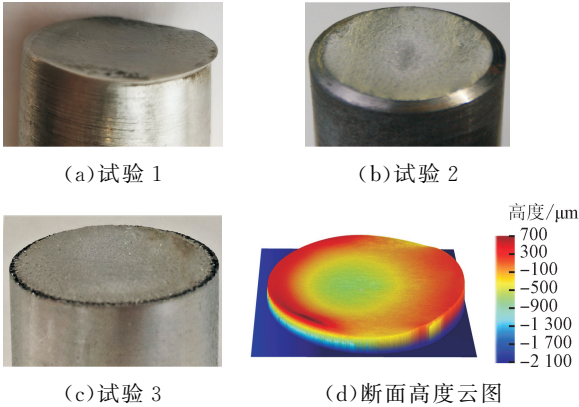


图 16 带有不同环形槽 42CrMo 棒料的高速剪切断面
Fig. 16 Fracture section of 42CrMo bars by high-speed shear with different circumferential notches

棒料断面的高度云图。3 个断面质量评价指标参数的测量结果列于表 1。

表 1 带有不同环形槽 42CrMo 棒料的高速剪切断面质量评价参数对比

Table 1 Comparison of quality evaluation parameters of 42CrMo bars with different circumferential notches by high-speed shear			
试验	$e_r/\%$	e_f/mm	e_b/mm
1	11.2	1.08	1.50
2	4.7	0.58	0.50
3	2.3	0.65	0.40

由图 16 和表 1 中试验 1 与试验 2 的对比结果可见,表面不带环形槽时(试验 1),切断后的棒料存在压塌变形、芯部凹陷和飞边缺陷,在断面顶部形成新月形“剪切唇”,这种现象产生的主要原因是剪切初始阶段,套筒式剪切模挤压并切入棒料表面,使得该处材料弯曲变形造成断面倾斜,在压-剪混合作用下形成挤压剪切带。在棒料表面铣削合理几何参数的环形槽(试验 2),有效改善了高速剪切断面质量,获得了整体平整、圆度好、无明显塌角的断面,断面圆度误差 e_r 由 11.2% 显著减少到 4.7%,平面度误差 e_f 由 1.08 mm 降低为 0.58 mm,最大弯曲变形 e_b 由 1.50 mm 降低为 0.50 mm。新工艺方法不仅有效抑制了断料塑性变形程度,提高了断面质量,还生成了带倒角的断料,使其更适合于后续的精密模锻等近净成形工序,防止尖锐边缘损伤锻造模具。

试验 3 得到的断面主要包括外缘激光影响区和主要剪断区,与试验 2 相比,在棒料表面预制合理几何参数的激光环形槽,断面圆度误差 e_r 和最大弯曲变形 e_b 略有改善,表明激光槽的应力集中效应更为显著,能有效约束断面周围材料的塑性变形;断面平面度误差 e_f 略微提高,主要原因是激光影响区的粗糙度高于主要剪断区,而由于表层激光影响区可在零件精密锻造后的倒角及表面处理工序中进行清除,因此不影响后续工序。

4 结 论

(1) 环形槽几何参数对理论应力集中系数 k_t 的影响由大到小依次为槽根曲率半径 r 、槽深 h 、张角 2α 。增加槽深 h , k_t 逐渐增大;减小槽根曲率半径 r , k_t 显著增大;降低张角 2α , k_t 略微增加。铣削环形槽的合理几何参数为 $1\text{ mm}\leq h\leq 2\text{ mm}$, $0.2\text{ mm}\leq r\leq 0.3\text{ mm}$, $2\alpha=90^\circ$ 。激光旋切环形槽的合理几何

参数为 $1\text{ mm} \leq h \leq 2\text{ mm}$, $r \leq 0.1\text{ mm}$, $2\alpha \leq 30^\circ$, 槽宽 $w \leq 1\text{ mm}$ 。

(2) 42CrMo 棒料的剪切断裂行为过程主要包括侧面损伤起裂、顶部和底部损伤起裂和完全切断分离 3 个阶段。对于表面不带环形槽的棒料, 损伤起裂需要更大程度的塑性变形累积, 剪切面相对垂直截面产生偏斜, 切断后的棒料存在压塌及飞边缺陷。在棒料表面引入具有合理几何参数的铣削或激光旋切环形槽, 使得塑性变形区和应力三轴度波动集中于槽根附近, 形成了环形的损伤轮廓线并向芯部收缩汇聚完成切断分离。采用有限元模拟的断面形状与试验结果一致度较高, 表明本文所建立的本构关系方程和开发的断裂准则方程具有较高精度。

(3) 新工艺方法有效约束了槽根附近材料的塑性变形, 提高了高速剪切断面质量, 使得断面圆度误差由 11.2% 显著减少到 2.3%~4.7%, 平面度误差由 1.08 mm 降低为 0.58~0.65 mm, 最大弯曲变形由 1.50 mm 降低为 0.40~0.50 mm, 最大剪切载荷和断裂能量也显著降低。此外, 相较于铣削环形槽, 激光旋切获得的尖角窄槽进一步降低了剪切载荷和断裂能量。

参考文献:

- [1] 赵升吨. 高端锻压制造装备及其智能化 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2019.
- [2] THIPPRAKMAS S, JIN M, MURAKAWA M. An investigation of material flow analysis in fineblanking process [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 192-193: 237-242.
- [3] CHEN Mingan, LI Huizhong, LI Xueqian, et al. Characterization of deformation microstructure and fractured surface of plastic shearing of copper bar [J]. *Materials Science and Engineering*, 2007, 452-453: 454-461.
- [4] KAJINO S, ASAKAWA M. New billet cutting process combining torsion and shear load to reduce droop height [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2020, 282: 116660.
- [5] HU C L, CHEN L Q, ZHAO Zhen, et al. Study on the pre-shearing cropping process of steel bars [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 97(1): 783-793.
- [6] 赵仁峰, 赵升吨, 钟斌, 等. 低周疲劳精密下料新工艺及试验研究 [J]. *机械工程学报*, 2012, 48(24): 38-43. ZHAO Renfeng, ZHAO Shengdun, ZHONG Bin, et al. Experimental study on new low cycle fatigue precision cropping process [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48(24): 38-43.
- [7] 赵升吨. 低应力疲劳裂纹可控式精密分离技术 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2019.
- [8] SONG J L, LI Y T, LIU Z Q, et al. Numerical simulation and experiments of precision bar cutting based on high speed and restrained state [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2009, 499(1/2): 225-229.
- [9] ORGAN A J. The calibration of high energy-rate impact forming machines [J]. *International Journal of Machine Tool Design and Research*, 1967, 7(4): 325-349.
- [10] 付建华, 李永堂, 雷步芳, 等. 金属棒料高速精密剪切试验研究 [J]. *机械工程学报*, 2005, 41(5): 154-156. FU Jianhua, LI Yongtang, LEI Bufang, et al. Experimental research on the high-speed precision shearing of metal bar [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2005, 41(5): 154-156.
- [11] ARMSTRONG R W, WALLEY S M. High strain rate properties of metals and alloys [J]. *International Materials Reviews*, 2008, 53(3): 105-128.
- [12] SINGH N K, CADONI E, SINGHA M K, et al. Dynamic tensile and compressive behaviors of mild steel at wide range of strain rates [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2013, 139(9): 1197-1206.
- [13] HOR A, MOREL F, LEBRUN J L, et al. An experimental investigation of the behaviour of steels over large temperature and strain rate ranges [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2013, 67: 108-122.
- [14] LU Yesen, ZHU Zhiwu, LI Dingyuan, et al. Constitutive model of 42CrMo steel under a wide range of strain rates based on crystal plasticity theory [J]. *Materials Science and Engineering*, 2017, 679: 215-222.
- [15] ZHU Zhiwu, LU Yesen, XIE Qijun, et al. Mechanical properties and dynamic constitutive model of 42CrMo steel [J]. *Materials & Design*, 2017, 119: 171-179.
- [16] GUO Yazhou, RUAN Qichao, ZHU Shengxin, et al. Temperature rise associated with adiabatic shear band: causality clarified [J]. *Physical Review Letters*, 2019, 122(1): 015503.
- [17] SHANG Hongchun, WU Pengfei, LOU Yanshan, et al. Machine learning-based modeling of the coupling effect of strain rate and temperature on strain hardening for 5182-O aluminum alloy [J]. *Journal of Materi-*

- als Processing Technology, 2022, 302: 117501.
- [18] BAI Yuanli, WIERZBICKI T. A new model of metal plasticity and fracture with pressure and lode dependence [J]. International Journal of Plasticity, 2008, 24(6): 1071-1096.
- [19] XUE Liang, WIERZBICKI T. Numerical simulation of fracture mode transition in ductile plates [J]. International Journal of Solids and Structures, 2009, 46(6): 1423-1435.
- [20] LOU Yanshan, HUH H. Evaluation of ductile fracture criteria in a general three-dimensional stress state considering the stress triaxiality and the lode parameter [J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2013, 26(6): 642-658.
- [21] LOU Yanshan, HUH H, LIM S, et al. New ductile fracture criterion for prediction of fracture forming limit diagrams of sheet metals [J]. International Journal of Solids and Structures, 2012, 49(25): 3605-3615.
- [22] ZHUANG Xincun, MENG Yehui, ZHAO Zhen. Evaluation of prediction error resulting from using average state variables in the calibration of ductile fracture criterion [J]. International Journal of Damage Mechanics, 2018, 27(8): 1231-1251.
- [23] 西安交通大学. 一种径向约束金属棒料的低应力双面高速剪切方法: CN201610606879.3 [P]. 2016-10-26.
- [24] 西安交通大学. 一种对称多刀的棒管料开槽机: CN201410193035.1 [P]. 2014-08-20.
- [25] ZAPPALORTO M, LAZZARIN P, YATES J R. Elastic stress distributions for hyperbolic and parabolic notches in round shafts under torsion and uniform antiplane shear loadings [J]. International Journal of Solids and Structures, 2008, 45(18/19): 4879-4901.
- [26] NODA N A, TAKASE Y. Stress concentration formula useful for all notch shape in a round bar (comparison between torsion, tension and bending) [J]. International Journal of Fatigue, 2006, 28(2): 151-163.
- [27] 董渊哲, 赵升吨, 崔敏超, 等. 40Cr 圆棒低应力剪切的激光旋切环形槽理论与试验研究 [J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(11): 121-128.
- DONG Yuanzhe, ZHAO Shengdun, CUI Minchao, et al. Theoretical and experimental study on laser rotary grooving for 40Cr bar low-stress shearing [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(11): 121-128.
- [28] GU Liyao, WANG Minjie, DUAN Chunzheng. On adiabatic shear localized fracture during serrated chip evolution in high speed machining of hardened AISI 1045 steel [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2013, 75: 288-298.
- [29] YU T X, CHEN F L. A further study of plastic shear failure of impulsively loaded clamped beams [J]. International Journal of Impact Engineering, 2000, 24(6/7): 613-629.
- [30] 崔敏超, 赵升吨, 孙红星, 等. 开槽方法对低应力精密下料工艺的影响 [J]. 锻压技术, 2017, 42(10): 62-68.
- CUI Minchao, ZHAO Shengdun, SUN Hongxing, et al. Influences of slotting methods on low-stress precision cutting [J]. Forging & Stamping Technology, 2017, 42(10): 62-68.
- [31] 杜成明, 李勇, 孙影, 等. 42CrMo 钢表面激光淬火硬化试验研究 [J]. 材料保护, 2022, 55(7): 160-164.
- DU Chengming, LI Yong, SUN Ying, et al. Experimental study on laser quenching hardening of 42CrMo steel surface [J]. Materials Protection, 2022, 55(7): 160-164.

(编辑 李慧敏)