

HPb59-1剪切销镦粗过程一致性控制研究

时晓钊, 卢一玮, 韩达稳, 王刚, 李莉, 王涛*

四川航天川南火工技术有限公司, 四川 泸州

收稿日期: 2026年5月25日; 录用日期: 2026年6月23日; 发布日期: 2026年7月3日

摘要

为确定Y2状态的HPb59-1剪切销液压镦粗的最优工艺参数, 首先通过拉伸破坏试验获取HPb59-1铜棒原材料主要力学性能指标; 随后结合仿真分析、试验件尺寸和理论计算结果, 设计并开展液压镦粗压力梯度试验, 通过金相组织分析探究镦粗前后材料微观结构的变化规律, 同时结合产品拉断力测试数据, 最终确定合理的液压镦粗压力参数。研究表明: 镦粗过程中材料金相组织发生显著变化, 镦粗后轴向截面的 α 相条带宽度增加、长度伸长, β 相沿带状边界更连续, 变形特征更加显著; 在镦粗过程中, 剪切销材料内部结构在塑性变形作用下发生了重构, 这种组织结构的演变直接导致了其剪切性能的显著增强; 与传统手工镦粗相比, 液压镦粗工艺可有效提升产品拉断力的一致性; 对于Y2状态的HPb59-1剪切销, 当液压镦粗压强控制在707.4 MPa~1061 MPa范围内时, 产品拉断力散差较小, 综合性能表现稳定, 可满足实际生产要求。

关键词

HPb59-1, 剪切销, 镦粗, 一致性

Research on Consistency Control of Upsetting Process for HPb59-1 Shear Pins

Xiaozhao Shi, Yiwei Lu, Dawen Han, Gang Wang, Li Li, Tao Wang*

Sichuan Aerospace Chuannan Pyrotechnic Technology Co., Ltd., Luzhou Sichuan

Received: May 25, 2026; accepted: June 23, 2026; published: July 3, 2026

Abstract

To determine the optimal hydraulic upsetting process parameters for HPb59-1 shear pins in the Y2

*通讯作者。

文章引用: 时晓钊, 卢一玮, 韩达稳, 王刚, 李莉, 王涛. HPb59-1 剪切销镦粗过程一致性控制研究[J]. 材料科学, 2026, 16(7): 1-10. DOI: 10.12677/ms.2026.167150

state, the primary mechanical property indicators of raw HPb59-1 brass bars were first obtained via tensile fracture tests. Subsequently, gradient hydraulic upsetting pressure tests were designed and implemented, combined with simulation analysis, specimen dimensions, and theoretical calculation results. The evolution law of material microstructure before and after upsetting was investigated through metallographic analysis, and reasonable hydraulic upsetting pressure parameters were finally determined in combination with product breaking force test data. The results show that obvious changes occur in the metallographic structure of materials during upsetting. After upsetting, the width and length of α -phase bands on axial cross-sections increase, the β -phase distributes more continuously along band boundaries, and the deformation characteristics become more prominent. The internal microstructure of shear pin materials is reconstructed under plastic deformation, and such structural evolution directly leads to a remarkable improvement in shear performance. Compared with the traditional manual upsetting method, the hydraulic upsetting process can effectively improve the consistency of the product breaking force. For HPb59-1 shear pins in Y2 state, when the hydraulic upsetting pressure is controlled within the range of 707.4 MPa to 1061 MPa, the breaking force dispersion of finished products is low with stable comprehensive performance, which can fully meet the requirements of practical industrial production.

Keywords

HPb59-1, Shear Pin, Upsetting, Consistency

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着现代装备制造业向轻量化、精密化和高可靠性方向演进,基础连接与传动零部件的性能直接决定了整机系统的服役寿命与安全性。铜合金销轴类零件作为机械结构中不可或缺的定位、连接及传动单元,广泛应用于汽车、电子电气、精密机械及航天精密制造装备等诸多领域[1]-[3]。HPb59-1作为应用最广泛的易切削铅黄铜之一,凭借其基体兼具高强度、高稳定性与优异耐蚀性能,成为铜销制造的首选材料。

Y2状态作为HPb59-1铜材的控制半硬状态,相较于软态(M),它具备适中的屈服强度,能够有效避免镦粗时材料与模具型腔的粘结,保证头部成形后的尺寸精度与表面光洁度;相较于硬态(Y),它保留了充足的室温塑性,从根本上规避了大变形量镦粗时头部产生宏观裂纹的风险。同时,Y2状态有效保留了HPb59-1材料优异的易切削性能,材料中均匀分布的铅质点可起到“微润滑”作用,大幅降低切削力,减少刀具磨损,使铜销加工过程中尺寸精度更易控制,表面粗糙度可达到Ra1.6 μm 以上,配合精度稳定在IT8级,能够满足剪切销与销孔的精密配合要求。因此,Y2状态的HPb59-1可精准匹配分离结构剪切销服役工况需求,是航天关键产品中剪切销零件的优选制备方案,是冷镦(镦粗)工艺的“黄金状态”。

液压镦粗作为剪切销成型的核心工艺,其工艺参数的合理性直接决定了Y2状态HPb59-1剪切销微观组织结构的稳定性,进而影响其高强度、高塑性、易加工等核心优点的充分发挥。目前,工厂仍采用传统手工镦粗工艺加工剪切销,该工艺受人为操作因素影响较大,易造成剪切销拉断力波动偏大、性能离散度突出,逐步背离航天领域高可靠、高稳态的技术质控标准;而采用液压镦粗工艺时,若压力参数控制不合理,会导致剪切销出现晶粒粗大、组织不均匀、拉断力散差过大等问题,甚至产生裂纹缺陷,直接制约Y2状态HPb59-1剪切销的力学性能优势与精度优势,进而影响产品合格率。

现有研究多聚焦于HPb59-1热处理后的挤压成型状态[4]-[8],针对Y2态HPb59-1剪切销液压冷镦

(镦粗)工艺的系统性探究仍较为匮乏,尚未明确液压镦粗压力参数与剪切销微观组织、拉断力一致性之间的内在关联,也未确定适配 Y2 状态材料特性的最优液压镦粗参数范围。因此,开展 Y2 态 HPb59-1 剪切销液压镦粗工艺系统性试验并明确最优工艺参数,既是充分挖掘该材料高强度、高塑性与工艺适配性等核心优势的关键,亦是提升剪切销产品质量与力学稳定性、控制制造成本、推动精密镦粗工艺高可靠工程化应用的重要路径,具备重要的理论研究价值与工程实践意义。

2. 产品结构及原材料性能分析

本文研究剪切销类产品主要由两个连接杆类零件和剪切销构成,两个钢制连接杆(30CrMnSi HRC32~37)之间通过轴、孔径配合,再通过剪切销对连接杆轴向固定。产品工作时两个连接杆受到轴向相反方向的拉力,使二者之间固定的剪切销切断,完成解锁分离工作实现产品功能。为了保证连接杆的密封性及剪切方向性,工艺要求两个连接杆之间的配合间隙应不大于 0.015 mm,这一精度要求对于确保在正常工作状态下两者不发生相对位移至关重要。为实现上述配合精度要求,工艺上采用“一一对应实测、配磨加工”的工艺方法。剪切销与连接杆之间的配合是产品最关键的配合部位,直接关系到剪切销的剪切性能和产品的分离可靠性,该配合采用过盈配合形式,通过镦粗工艺使剪切销与连接杆之间形成紧密的过盈连接,确保剪切销在工作过程中不发生松动或位移。剪切销为了控制配合间隙,外径工艺要求为 $\phi d_{-0.006}^0$ (一般取 $\phi 6$ 、 $\phi 6.5$ 、 $\phi 7$ 等),表面粗糙度要求 Ra0.8 μm 以上,抗拉强度一般满足 411 MPa~585 MPa,剪切销的径向切断性能决定着产品的分离拉断力。基于多年剪切销类分离产品的试制与生产数据统计分析,发现镦粗情况下的剪切力难以仅通过原材料性能参数进行理论精准表征,相关数据如表 1 所示。表中剪切系数范围设定为 0.6~0.8,据此可通过力学理论公式计算剪切力: $F_s = \tau_b A = (0.6 \sim 0.8) \sigma_b \frac{\pi d^2}{2}$ (单销双剪切面,多销按数量修正)。实际生产数据显示,尽管系统阻力、配合面摩擦对切断力存在一定影响,但其贡献量远无法弥补理论剪切力与实际剪切力之间的差值。该结果证实:在镦粗过程中,受塑性变形作用,剪切销材料内部结构发生重构,进而使其剪切性能呈现明显的增强效应。

Table 1. Material performance requirements and test results of theoretical and actual shear forces of shear pins for various products

表 1. 各类产品剪切销材料性能要求值及理论剪切力与实际剪切力的测试结果

产品代号	剪切销数量(个)	直径(mm)	抗拉强度(MPa)	理论切断力(kN)	实际剪切力(kN)
LS1	1	6	471~585	18.65~30.88	37.93~44.14
LS2	2	9.5	411~451	69.92~102.30	122.59~142.20
LS3	2	6.2	411~451	29.78~43.57	49.04~68.64
LS4	4	7	471~585	87.01~144.09	177~206
LS5	4	9	471~520	143.83~211.72	265~317

产品通常选择 HPb59-1-Y2 GB/T4423-2007 剪切销原材料,为了验证原材料元素含量的符合性,依据厂内金属材料元素复验技术规范,分析结果如表 2 所示,满足 HPb59-1-Y2 入厂复检要求。

为进一步考核原材料主要力学性能指标符合性,将同批次 6 根原材料加工成标准拉伸试样,开展常温拉伸破坏力学试验,试验结果如表 3 所示。从表中数据可以看出,各试验件主要力学性能试验结果均在合理范围内且具有良好的 consistency,满足复验技术规范。

Table 2. Elemental analysis results of raw materials for shear pins

表 2. 剪切销原材料元素分析结果

检测项目	规范要求范围	实测值	检测结论
Cu 含量	57%~60%	57.68%	合格
Pb 含量	0.8%~1.9%	1.65%	合格
杂质总和含量	≤1%	1.0%	合格

Table 3. Experimental results of main mechanical properties of shear pin raw materials

表 3. 剪切销原材料主要力学性能试验结果

检测项目	规范要求范围(MPa)	实测值(MPa)	检测结论
抗拉强度	≥420	569.79~580.75	合格
屈服强度	≥225	361.20~413.01	合格

3. 人工镦粗过程分析与仿真分析

镦粗过程是一种典型的冷变形过程，是提高黄铜强度的重要方法之一。在镦粗过程中，材料在压力作用下发生塑性变形，其内部组织结构发生显著变化，从而导致材料性能的改变。然而，任何材料的变形能力都是有限度的，当变形达到某一临界程度时，材料将无法继续发生塑性变形，甚至可能出现裂纹等缺陷。为了找出镦粗过程剪切销内部组织的变化规律，本研究分别对 HPb59-1 原材料和手工镦粗后四销类产品剪切销的金相进行取样分析，取样部位如图 1 所示，在剪切销径向的 1/3 处和 2/3 处分别进行横向和纵向取样。

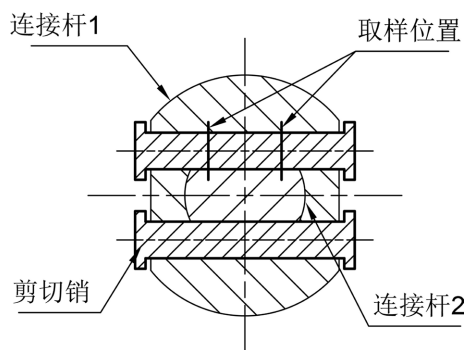


Figure 1. Schematic of sampling locations for metallographic analysis

图 1. 金相分析取样位置示意图

金相(100 倍)结果如图 2 所示[9] [10]: 1) 原材料具有显著的原始各向异性，轴向截面呈现明显的带状组织，晶粒沿加工方向拉长，方向性强，径向截面以等轴晶为主，组织均匀，无明显方向性；2) 手工镦粗使轴向带状组织更加显著，与原材料相比，镦粗后轴向截面的 α 相条带宽度增加、长度伸长， β 相沿带状边界更连续，变形特征更加显著；3) 手工镦粗后径向截面组织变化相对较小， α 相仍以等轴状为主，但尺寸略有减小、分布更均匀；4) 手工镦粗未引起缺陷，所有截面均未观察到裂纹、孔洞、折叠等缺陷，说明手工镦粗的变形量未超过材料的塑性极限，变形过程控制得当；5) 手工镦粗的变形均匀性相对较差，与机械压力镦粗相比，手工操作的应力分布不均匀，可能存在局部过变形或变形不

足的区域，这在金相观察中表现为晶粒尺寸和变形程度的局部差异。综上所述，人工镦粗过程中剪切销的金相组织发生了明显变化，这种变化对产品的拉伸破坏载荷产生重要影响。在人工镦粗过程中，由于缺乏量化控制手段，每件产品的镦粗效果都可能存在差异，导致剪切销内部晶粒变化出现不可控的情况。这种不可控性是造成前期剪切系数测试结果与产品拉伸破坏载荷反算剪切系数差异较大的主要原因。因此，如何实现镦粗过程的量化控制，保证剪切销内部组织的一致性，成为提高产品质量稳定性的关键问题。

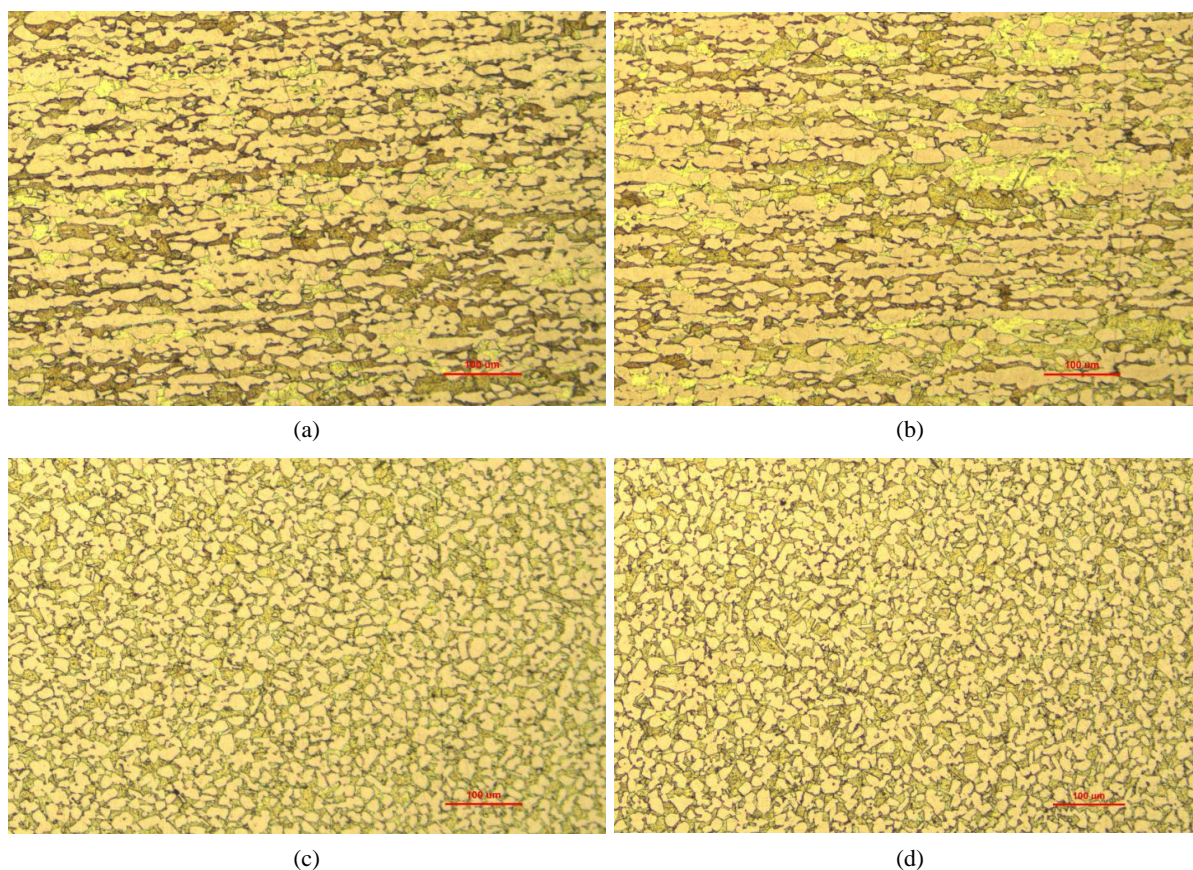


Figure 2. Metallographic images of shear pins before and after artificial upsetting: (a) Axial metallographic micrograph of raw material; (b) Axial metallographic micrograph after artificial upsetting; (c) Radial metallographic micrograph of raw material; (d) Radial metallographic micrograph after artificial upsetting

图 2. 人工镦粗前后剪切销金相图: (a) 原材料轴向金相图; (b) 人工镦粗后轴向金相图; (c) 原材料径向金相图; (d) 人工镦粗后径向金相图

为揭示剪切销镦粗变形演化规律，本文基于 SolidWorks 构建 $\phi 6 \text{ mm} \times 23 \text{ mm}$ 的单销圆柱形三维几何模型，对微小倒角等非关键结构进行合理简化处理后，将模型导入 Ansys Workbench 有限元仿真平台开展模拟分析[11]-[14]。参照表 3 中 HPb59-1 材料主要力学性能试验结果及铜合金主要力学参数，取铜合金的弹性模量 E : 105 GPa，泊松比 ν : 0.3，密度 ρ : 8.5 g/cm³，屈服强度 $R_{p0.2}$: 361.2 MPa，抗拉强度 R_m : 569.79 MPa，断后伸长率 A : 14%，剪切模量 G : 39 GPa；结合实际液压镦粗成形过程，将剪切销下端设置为固定约束模拟下模具支撑，上端分别施加轴向 10 kN、20 kN、30 kN、40 kN 镦粗压力载荷；该剪切销为规则圆柱形构件，仿真采用全局统一尺寸的实体单元均匀划分网格，全局网格尺寸设定为 0.1 mm，整体网格疏密一致、单元分布均匀。

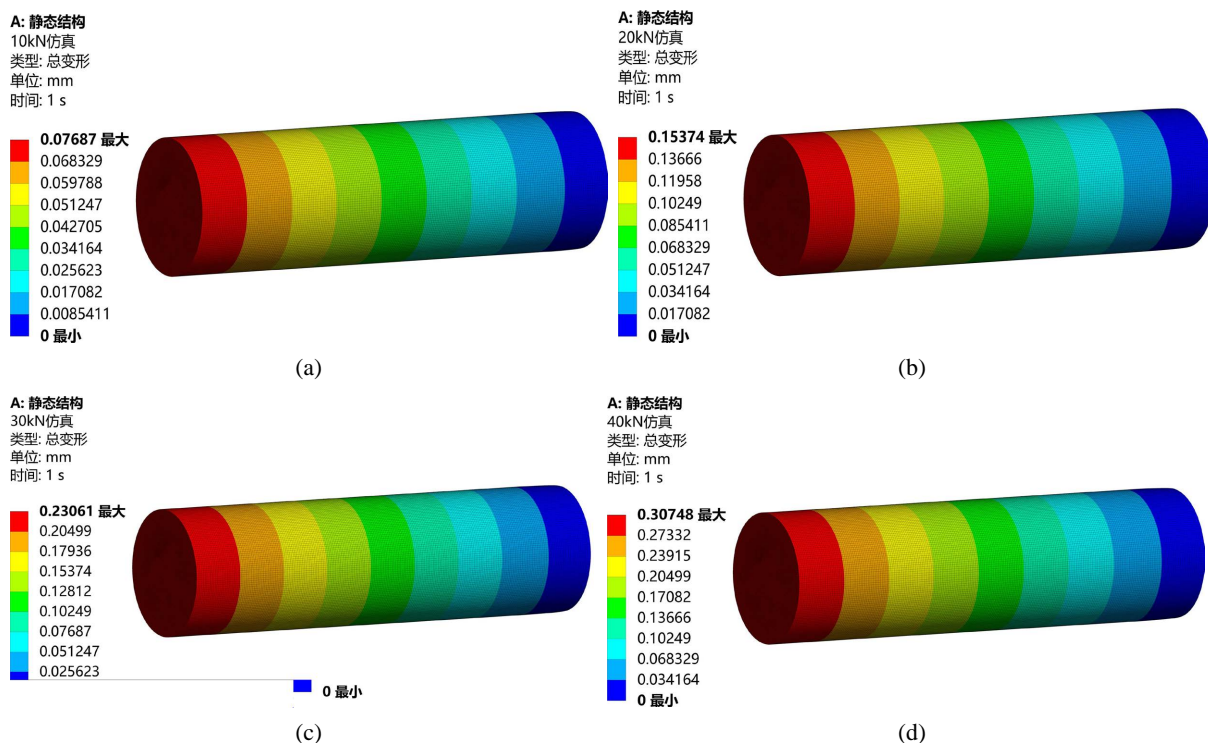


Figure 3. Simulation results of shear pin upsetting: (a) 10 kN pressure; (b) 20 kN pressure; (c) 30 kN pressure; (d) 40 kN pressure

图 3. 剪切销镦粗仿真结果：(a) 10 kN 压力；(b) 20 kN 压力；(c) 30 kN 压力；(d) 40 kN 压力

如图 3 仿真结果显示，剪切销在轴向压缩载荷作用下的变形呈现明显的轴向梯度分布特征，最大变形量出现在载荷作用端(左端面)，最小变形量出现在固定端(右端面)，变形沿轴向逐渐减小；由于剪切销在加工过程中左右两端会切掉一部分，所以 4 种条件下对应的镦粗外圆变形量范围分别为：10 kN——0.017~0.068 mm；20 kN——0.034~0.137 mm；30 kN——0.051~0.205 mm；40 kN——0.068~0.273 mm。

4. 液压镦粗量化控制

由表 3 原材料力学性能试验结果可知，工厂采购的剪切销原材料 HPb59-1 屈服强度为 361 MPa~413 MPa。这意味着镦粗过程使用的单位压强应不小于 361 MPa，才能使材料发生塑性变形达到镦粗的效果，这一参数为镦粗工艺参数的确定提供了重要的理论依据。为控制剪切销镦粗后内部金相的一致性，并初步摸索出合适的镦粗控制方式，采用同根棒料的原材料加工直径为 $\phi 6$ mm 的剪切销进行试验验证。根据材料力学原理，剪切销受到轴向镦粗力发生塑性变形的最小压力计算如下：

$$F_{\min} = \sigma A = 361 \times \pi \times (6/2)^2 \text{ N} = 10205 \text{ N} \approx 10.2 \text{ kN}$$

因此，在量化控制过程中，使用的镦粗力须不小于 10.2 kN，才可能达到镦粗的效果。剪切销与连接杆的装配配合间隙通常控制在 0~0.03 mm 范围内，结合本文图 3 的轴向镦粗仿真结果可知：当镦粗载荷不低于 20 kN 时，剪切销工作段的外圆变形量可达到 0.03 mm 以上，能够实现对配合间隙的有效填充与过盈锁紧。基于此，本试验设计选取 20 kN、30 kN 和 40 kN 三种镦粗压力状态，对应的单位压强分别为 707.4 MPa、1061 MPa 和 1414.7 MPa。由图 4 不同镦粗压力下试件表面宏观形貌可见：镦粗载荷升至 40 kN 时，剪切销表层产生明显宏观裂纹，开裂程度较为严重。因此，对于 $\phi 6$ mm 单剪切销，工艺上不宜采

用 40 kN 及以上的镦粗压力。

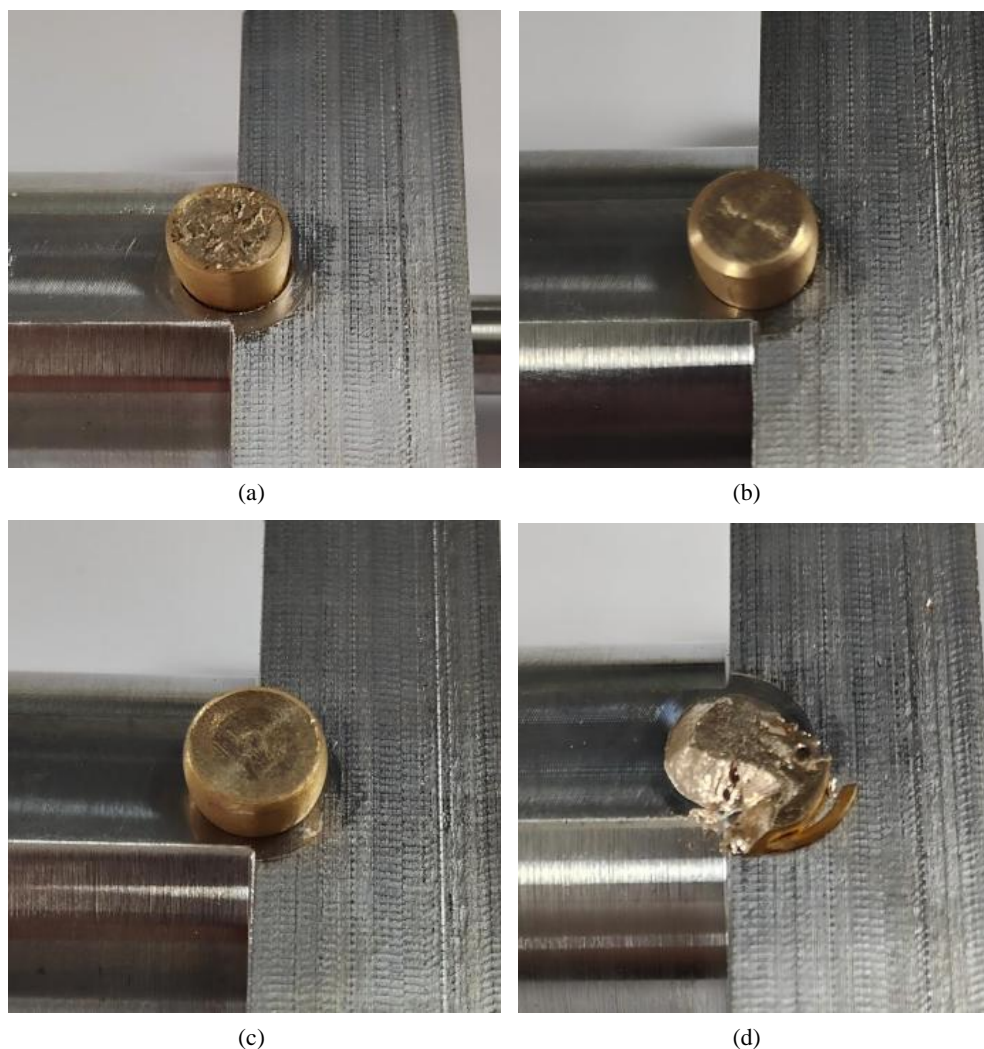


Figure 4. Physical photograph of the test piece after upsetting: (a) Manual upsetting; (b) 20 kN upsetting; (c) 30 kN upsetting; (d) 40 kN upsetting

图 4. 试验件镦粗后实物图: (a) 手工镦粗; (b) 20 kN 镦粗; (c) 30 kN 镦粗; (d) 40 kN 镦粗

对液压镦粗压力 20 kN、30 kN 和 40 kN 三种镦粗后的剪切销进行金相(100 倍)分析, 结果如图 5 所示, 分析结果表明: 1) 镦粗压力是控制变形程度的决定性因素, 随着压力从 20 kN 增大到 40 kN, 晶粒变形程度显著增强, 轴向截面晶粒长宽比从 2:1~3:1 增大到超过 5:1, 流线组织从模糊带状演变为连续带状; 2) 组织均匀性随压力增大而提高, 较大的变形量促进了材料内部的充分流动, 铅颗粒、 α 相和 β 相的分布更加均匀, β 相被进一步破碎细化; 3) 各向异性随压力增大而加剧, 轴向截面的变形特征始终强于径向截面, 且差异随压力增大而更加显著, 20 kN 时两方向差异较小, 40 kN 时轴向带状组织与径向细碎状组织形成鲜明对比; 4) 铅颗粒变形随压力增大而显著, 从 20 kN 的不规则块状, 到 30 kN 的条带状, 再到 40 kN 的细条带状, 铅颗粒的变形和重新分布对切削性能和力学性能具有双重影响; 5) 在试验压力范围内(20~40 kN)未产生缺陷, 所有试验条件下均未观察到裂纹、孔洞等缺陷, 说明 HPb59-1 在该压力范围内具有良好的塑性变形能力。

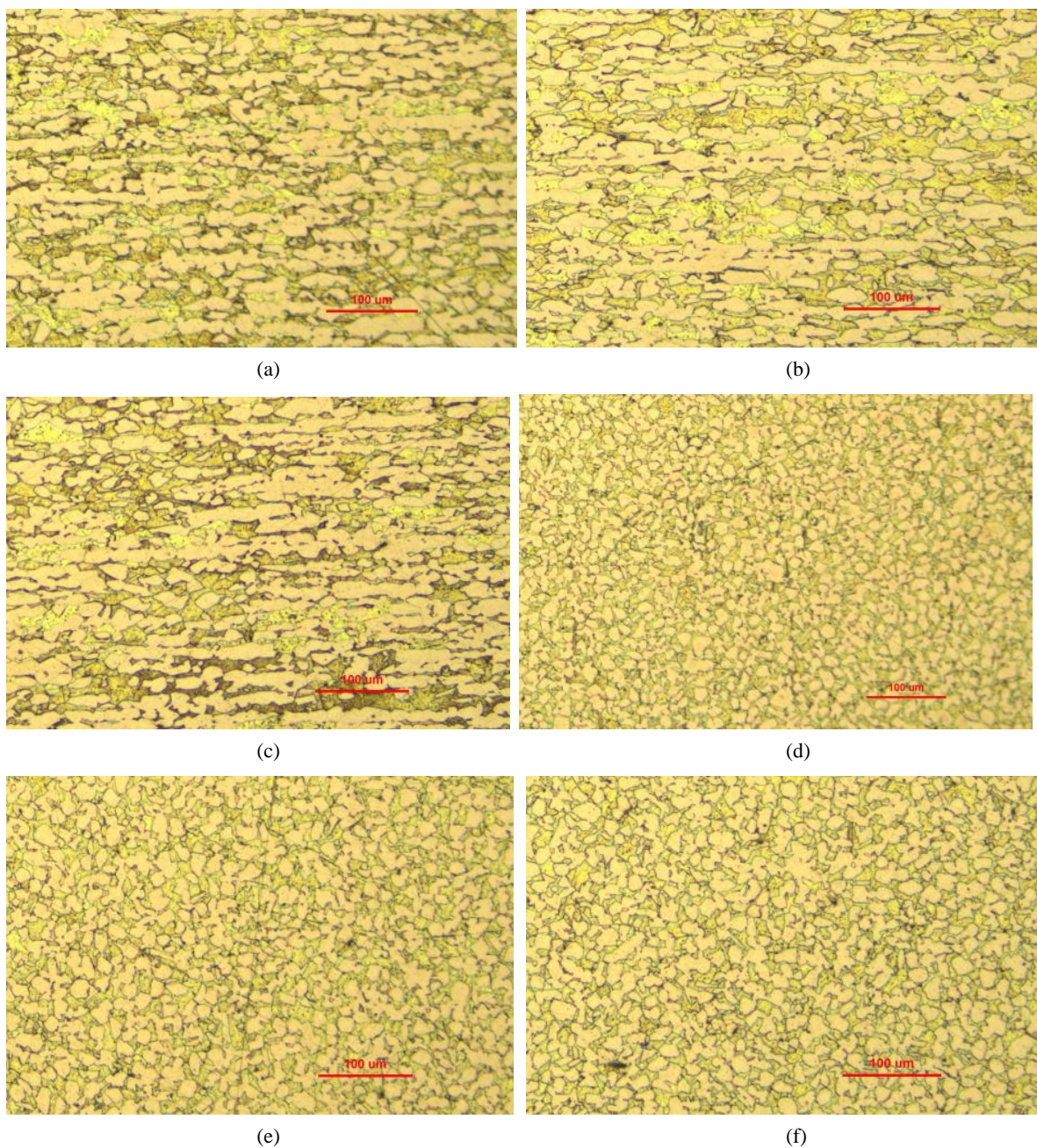


Figure 5. Metallographic micrographs of shear pins after upsetting under different pressure conditions: (a) Axial metallographic micrograph at 20 kN; (b) Axial metallographic micrograph at 30 kN; (c) Axial metallographic micrograph at 40 kN; (d) Radial metallographic micrograph at 20 kN; (e) Radial metallographic micrograph at 30 kN; (f) Radial metallographic micrograph at 40 kN

图 5. 各压力条件下剪切销镦粗后金相图：(a) 20 kN 压力轴向金相图；(b) 30 kN 压力轴向金相图；(c) 40 kN 压力轴向金相图；(d) 20 kN 压力径向金相图；(e) 30 kN 压力径向金相图；(f) 30 kN 压力径向金相图

综合本研究对实际生产数据的分析、材料力学性能测试、金相组织观察以及镦粗前后试件宏观形貌的对比，得出以下结论：1) 镦粗变形使剪切销内部的轴向带状组织特征更加显著。具体而言，在镦粗后剪切销的轴向截面上， α 相条带的宽度和长度均有所增加， β 相沿带状边界的连续性提高，呈现出更明显

的塑性变形特征。分析认为,在镦粗过程中,剪切销材料内部结构在塑性变形作用下发生了重构,这种组织结构的演变直接导致了其剪切性能的显著增强。2)当镦粗压力低于 10 kN 时, $\phi 6$ mm 的单剪切销未发生明显的塑性变形,无法达到镦粗工艺预期目的。3)当镦粗压力提高到 20 kN 以上时,剪切销工作段的外圆径向变形量可达到 0.03 mm 以上,足以有效填充配合间隙并实现过盈镦粗。4)若继续将镦粗载荷提高至 40 kN,剪切销表层将出现明显的宏观裂纹,开裂程度较为严重,表明过高的镦粗载荷会对材料造成损伤。综上所述,针对 $\phi 6$ mm 的单剪切销,建议在工程实践中采用 20 kN~30 kN 范围内的液压镦粗压力,对应的单位压强范围为 707.4 MPa~1061 MPa。其他规格系列产品可据此原则,根据其实际切断面面积进行换算,以确定适宜的镦粗压力参数。

5. 小批量验证

在各类剪切销产品中,四销结构产品销体数量最多、加工难度最高,同时拉伸破坏载荷离散性最大。为验证液压镦粗工艺参数(单位压强范围: 707.4 MPa~1061 MPa)的有效性与技术优势,以 LS4 型产品为研究对象开展小批量验证试验。试验设置人工镦粗与液压镦粗两组工艺,各投产 2 个批次,每批次试样 300 件;其中 J1、J2 批次采用人工镦粗, J3、J4 批次采用液压镦粗,镦粗压力为 108.90 kN~163.33 kN。所有试样均采用同一炉批号原材料统一制备,加工完成后对每批产品随机抽取 5% (15 件)开展拉伸破坏试验,测试结果如表 4 所示。试验表明:相较于传统工艺,本文提出的液压镦粗加工方案产品性能一致性显著更优,能够更为精准地控制产品拉断力,有效提升产品可靠性。

Table 4. Test results of tensile fracture load for small-batch specimens

表 4. 小批量试验拉伸破坏载荷结果

批次	平均拉断力(kN)	标准差(kN)	全批数量(件)	抽检数量(件)
J1	188.2	3.76	300	15
J2	196.7	3.56	300	15
J3	191.2	1.90	300	15
J4	187.0	1.96	300	15

6. 结论

本文结合仿真分析、理论分析与剪切销类产品的生产实践开展系统研究,明确了剪切销镦粗属于典型冷变形过程,其核心作用机制是通过形变强化效应提升材料力学强度,进而保证产品整体结构的完整性与稳定性。金相组织分析结果表明,镦粗过程中材料金相组织发生显著变化,镦粗后轴向截面的 α 相条带宽度增加、长度伸长, β 相沿带状边界更连续,变形特征更加显著;在镦粗过程中,剪切销材料内部结构在塑性变形作用下发生了重构,这种组织结构的演变直接导致了其剪切性能的显著增强。

通过系统工艺试验与数据分析,确定剪切销镦粗过程的压强范围为 707.4 MPa~1061 MPa。试验验证表明,液压镦粗可有效解决人工镦粗过程中存在的性能波动问题,显著提升产品质量的一致性与稳定性,同时对提升该类型产品的质量稳定性、可靠性具有重要的工程应用价值,可为同类冷变形零部件的工艺优化提供参考。

参考文献

- [1] 杨宏亮,王雨时,闻泉,李来福,薛刚.引信剪切销保险机构解除保险特性仿真方法[J].探测与控制学报,2016,38(5): 31-36.

- [2] 朱功, 苑铁兵, 周丽, 孙凯. C72900 铜合金与 15-5PH 不锈钢的动态力学性能及本构关系[J]. 机械工程材料, 2020, 44(10): 87-91, 97.
- [3] 陈阳, 谢莉, 张挺, 彭德平, 朱必武, 刘筱. 高速冲击载荷下 AMPCO®18 铜合金力学性能及本构模型[J]. 材料与冶金学报, 2024, 23(4): 386-390.
- [4] 卜建荣, 徐君燕. HPb59-1 黄铜减压阀热挤压工艺及模具[J]. 特种铸造及有色合金, 2015, 35(12): 1308-1310.
- [5] 张少伍, 钱金明, 王泾文, 张金标. HPb59-1 铅黄铜阀体冲压缺陷分析与检测[J]. 特种铸造及有色合金, 2013, 33(1): 94-96.
- [6] 肖艳红, 郭成. HPb59-1 黄铜热压缩变形流动应力方程的构建及应用[J]. 锻压技术, 2012, 37(3): 127-132.
- [7] 李高峰, 康关军, 王超, 乔博. 包套法热挤压铅黄铜 HPb59-1 法兰工艺[J]. 热加工工艺, 2009, 38(9): 142-143.
- [8] 伍太宾. HPb59-1 黄铜外导体的温挤压成形工艺[J]. 热加工工艺, 2005, 34(12): 42-43, 45.
- [9] 吴洛平. HPb59-1 黄铜超塑性压缩变形后金相组织的变化[J]. 华侨大学学报, 1993, 14(4): 483-488.
- [10] 金从卓. HPb59-1 黄铜零件失效金相分析[J]. 航空精密制造技术, 1994(5): 31-33.
- [11] 吕书林, 张法楷, 于晏同, 丁学芳, 赵有斌, 任嘉嘉, 相海. 应用于黄精预处理的挤压膨化机挤压结构仿真优化[J]. 中国油脂, 2026, 51(4): 151-156.
- [12] 王鑫. 基于 ANSYS 的 90MN 重型电极挤压机机身有限元分析[J]. 机械设计, 2022, 39(S1): 154-157.
- [13] 柴民杰, 于华丽, 李磊. 基于 ANSYS 的铝合金蜗轮盘挤压铸造数值模拟分析[J]. 热加工工艺, 2020, 49(21): 64-66.
- [14] 刘文忠, 熊倩, 蒋渝. 铜合金单向静拉伸颈缩失稳的有限元模拟[J]. 热加工工艺, 2011, 40(14): 20-23.