

再生 $\text{Cu}_{57.5}\text{Zn}_x\text{Pb}_{0.5\sim 3.5}$ 合金切削性能分析

王法超^{1,2}, 马 帅¹, 胡丹丹², 沈守稳², 郎 滨², 刘 伟³, 程佳慧¹

(1. 太行山西省实验室, 山西 太原 030000; 2. 宁波长振铜业有限公司, 浙江 宁波 315000; 3. 铜基新材料山西省重点实验室, 山西 运城 044000)

摘要: 对废杂铜制备的低铜含量再生黄铜合金进行切削性能测试, 研究了铅质量分数变化、工艺参数、环境条件对表面加工质量的影响。结果表明: 随着铅质量分数增加, 材料表面加工切削力和表面粗糙度均呈现先降低后升高的变化趋势; 当铅的质量分数为1.5%~2.5%时, 加工表面粗糙度变化不大, 均能达到理想值, $R_a \approx 2.5 \mu\text{m}$; 当铅的质量分数为2.5%时, 表面加工切削力最低($F=164.96 \text{ N}$), 且在车床转速 $n=700 \text{ r/min}$ 和进给量 $f=0.15 \mu\text{m/Z}$ 的工艺条件下, 可获得良好的切削性能。采用冷却液冷却方式可使材料表面加工切削力显著降低至 $F=139.37 \text{ N}$, 同时表面粗糙度下降至 $R_a=2.024 \mu\text{m}$; 相比自然冷却, 采用空气冷却方式时, 材料加工表面粗糙度有所改善, 从 $R_a=2.529 \mu\text{m}$ 降低至 $R_a=2.216 \mu\text{m}$ 。本研究为再生黄铜高效精密加工挤压圆棒生产提供了工艺指导, 在材料研发和机械制造领域具有实际应用价值。

关键词: 废杂铜; 铅质量分数; 加工参数; 切削力; 表面粗糙度

doi: 10.3969/j.issn.1009-3842.2026.02.008

中图分类号: TG506.3 文献标识码: A 文章编号: 1009-3842(2026)02-0076-10

铜及铜合金是良好的功能材料和重要的结构材料, 在现代高科技产业中不可或缺^[1]。然而, 中国的铜矿储量仅占全球总量的4%左右, 且矿石品位低, 开采成本高。因此, 中国铜资源严重依赖进口, 回收废杂铜(铜、黄铜、青铜废料等)成为弥补中国铜资源短缺的重要手段^[2-5]。铅黄铜作为一种典型的易切削铜合金材料, 在加工过程中易被刀具切削成型, 同时还拥有良好的机械性能, 如较高的强度、硬度, 以及耐腐蚀性等, 使之在各种复杂的环境下能够保持稳定的性能, 从而广泛应用于电子电器、汽车仪表、水暖卫浴、阀门阀芯等众多行业^[6-7]。然而器件应用生命周期结束后, 该类黄铜中所含铅的去除一直是行业难题。因此, 利用废旧黄杂铜生产再生铅黄铜合金是一条解决含铅废杂铜堆积的有效途径^[8-10]。

高精度零件的制造, 不仅依赖数控加工技术, 还需要材料具备优异的切削性能, 从而在切削过程中保持稳定的性能, 不出现因切削力、热等因素影响导致的性能变化。这样, 才有可能加工出达到设计要求的高精度零件^[11-13]。陈曙光等^[14]通过实验明确了C3602铅黄铜切削参数与表面粗糙度

的定量关系, 研究结果可用于指导精密零件生产的工艺优化, 平衡效率与表面质量需求, 为实际加工提供理论依据。梁梦媛等^[15]针对精密结构件对材料综合性能(力学性能、切削性、耐蚀性)的高要求, 通过系统分析铅黄铜的成分、加工工艺及其性能的关系, 指出铅颗粒可以改善切削性能, 但过量会导致力学性能下降(如延伸率降低), 并据此提出了适用于精密结构件的成分-工艺窗口: 铅的质量分数1.5%~2.5%+微量Sn强化。因此, 材料切削性能是影响零件加工精度的关键因素, 尤其在废杂铜再生制备低铜含量铅黄铜合金过程中, 其切削性能的优劣直接影响着零件精度。

为探究再生黄铜合金切削性能与加工精度的内在关联, 本研究以废杂铜为原料, 通过熔炼—铸造—挤压工艺制备 $\text{Cu}_{57.5}\text{Zn}_x\text{Pb}_{0.5\sim 3.5}$ 系列铅黄铜合金棒材, 系统研究铅质量分数梯度变化、挤压工艺参数及环境条件对材料切削性能的协同影响。借助金相显微镜、扫描电镜等检测仪器, 分析不同实验条件下样品的微观形貌特征, 揭示了多因素对低铜含量的再生黄铜合金切削性能的影响规律, 为废杂铜的绿色高值化利用提供了参考依据。

收稿日期: 2025-08-28; 修订日期: 2025-12-30

基金项目: 太行山西省实验室开放课题专项资金(THYF-KFKT-25010300)资助

作者简介: 王法超(1993—), 男, 安徽阜阳人, 硕士, 工程师, 研究方向: 废杂铜增值再生; E-mail: 1396695960@qq.com; 通讯作者:

刘伟, 工程师; E-mail: weilyd@yeah.net

1 实 验

1.1 实验原料

本实验所用原材料为废旧杂黄铜，以及国内铜加工企业回收料、再生锌块等。废旧杂黄铜原料主要来自已报废的工艺品、汽车配件、消防阀门、电工电子器件和通讯仪表等，以及铜加工企业的边角料，如车削屑、挤压头、加工尾料等。

表1 废杂铜原料的主要化学成分和来源

Table 1 Main chemical components and sources of scrap copper (%, mass fraction)

名称	主要成分												来源
	铜	铅	铁	锡	铝	镍	硅	锰	铋	锑	镉	锌	
黄铜沫料	63.35	1.88	0.36	1.01	0.30	0.42	0.1668	0.3428	0.0018	0.0277	0.0022	余量	欧洲
1#紫铜米	99.00	0.20	0.20	0.20	0.10	0.10	0.0010	0.0050	0.0030	0.0010	0.0010	余量	美国
破碎黄铜	59.18	3.00	0.29	0.72	0.70	0.36	0.0204	0.0236	0.0031	0.0603	0.0110	余量	荷兰
HPb57-3 挤压头	57.79	2.77	0.69	0.83	0.43	0.34	0.0507	0.0573	0.0110	0.0371	0.0092	余量	车间 回料
HPb57-3 铜沫	58.62	2.75	0.58	0.77	0.04	0.31	0.0199	0.0145	0.0181	0.0257	0.0092	余量	客户 回料
再生锌块	0.03	0.58	0.12	0.10	0.00	0.00	0.0000	0.0001	0.0080	0.0000	0.0075	余量	国内

1.2 成分设计

对预处理后的废杂铜原料，设计 Cu_{57.5}Zn_xPb_{0.5-3.5} 系列合金成分：先在普通黄铜中添加一定量的 Pb，Fe，Sn，Ni，Mn，Si，以获得复杂黄铜，然后通过“锌当量”计算公式进行评估，以确定合金材料双相组织，并对合金力学性能进行初步判断。其中，元素 Pb 主要用于改善材料的切削性能，添加量通常控制在 0.5%~3.5% 之间；元素 Si 的锌当量系数为 10，可

废杂铜来源广泛，形状、大小也各不相同。不同类型的铜合金混杂在一起，成分相当复杂。除铜元素外，部分原料含有多种金属元素，如锌、铅、铁、锡、锰、硅、铋、锑、镉等，还含有多种非金属元素，如碳、硫、氧、氮、氢等，致使最终产品纯度低、性能不均，易产生缺陷。表 1 为实验所用废杂铜原料的名称、化学成分和来源。

使 Cu-Zn 相图左移，且易与熔体中 Fe 元素生成 Fe-Si 中间化合物，形成难以去除的夹杂物，故需将其质量分数严格控制在 0.05% 以内；Al 元素的锌当量系数为 6，可起到固溶强化效果，使材料硬度急剧升高，但硬度过高对后续加工不利，故将其质量分数控制在 0.04% 以内；Fe，Sn，Ni 等其他元素主要根据对材料结构性能的需求确定^[16-18]。表 2 是再生黄铜合金圆棒的化学成分表。

表2 圆棒的主要化学成分

Table 2 Main chemical composition of round bar (%, mass fraction)

元素	Cu	Pb	Fe	Sn	Al	Ni	Mn	Si	其他	Zn
含量	57.50	0.5~3.5	0.56	0.45	0.035	0.26	0.0453	0.0368	≤0.20	余量

1.3 实验方法

采用废杂铜制备再生黄铜合金圆棒，制备工艺流程如图 1 所示。先利用熔铸三体炉(即 1 台熔化炉、1 台静置炉和 1 台铸造炉)以水平连铸方式将预处理后的废杂铜原料制备成圆形铸锭^[19]。后续：先对 Φ198 mm 圆锭预热，再将铸锭自头部至尾部均分成头、中、尾三段，其中头部与中部、中部与尾部的温度差值均控制在 5~15 ℃；然后选用模具钢 H13 制

备挤压模，根据材料收缩量特性，出模尺寸设计为 Φ(22.45 ± 0.08) mm；最后，选用 20 MN 反向挤压机，控制挤压速度为 13 m/s，挤压力始终保持不小于 8 MN。经过上述工艺流程，可平稳、高效精准生产出符合质量要求的黄铜合金圆棒。

选用同一规格圆棒作为切削性能研究的实验对象，并在测试前切削成统一外径尺寸。首先，针对同一系列产品，将 Pb 质量分数分别控制为 0.5%，

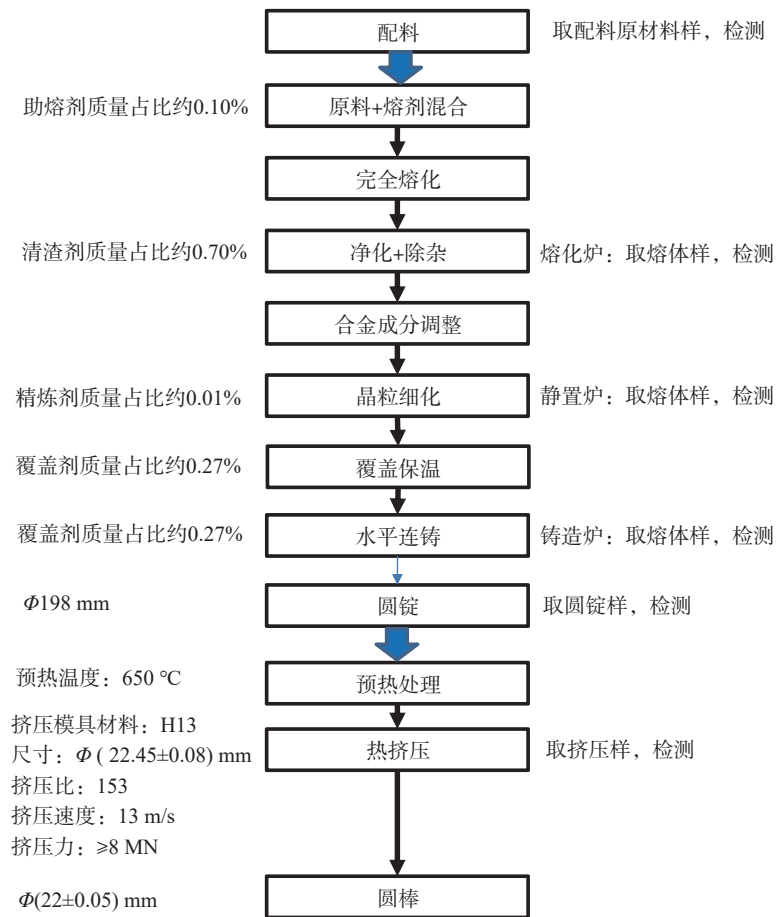


图1 黄铜合金圆棒制备工艺流程图

Fig. 1 Process flow diagram for the preparation of brass round bars

1.0%，1.5%，2.0%，2.5%，3.0%和3.5%，其他元素（Cu，Fe，Al，Sn，Ni，Cd，Mn，Si等）保持基本一致，锌为余量，同时控制切削工艺参数和冷却方式不变（见表3），探索不同铅质量分数对材料切削性能的影响。然后，选定综合切削性能最佳的铅质量分数产品作为研究对象，分别控制车床转速 n 为300，500，700，900和1100 r/min，进给量 f 为0.10，0.15，0.20，0.25和0.30 $\mu\text{m}/\text{Z}$ ，其余变量一致，探索不同加工工艺参数对材料切削性能的影响。最后，根据最佳加工工艺参数，对比分析自然冷却、冷却液冷却和空气冷却三种冷却方式对材料切削性能的影响。

表3 黄铜合金圆棒切削工艺参数和冷却方式

Table 3 Cutting process parameters and cooling methods for brass round bars

类型	切削深度 h	进给量 f	车床转速 n	冷却方式
参数	2 mm	0.15 $\mu\text{m}/\text{Z}$	500 r/min	自然冷却

1.4 检测方法

材料的切削性能指标包括刀具寿命、加工表面粗糙度、切削力和切屑的形状及大小等。不同的加工要求需采用不同的切削性能评定指标^[20-21]。例如：粗加工时一般不考虑表面粗糙度，而采用刀具寿命或切削力大小指标；精加工时对加工精度要求较高，则选用加工表面粗糙度指标来判定。结合下游产品对切削性能指标的要求，本实验采用切削力(F)和加工表面粗糙度(R_a)指标来判定材料的切削性能。(1)切削力指标：反映材料变形抗力，与刀具磨损和加工能耗直接相关，其值越大，材料的切削性能越差；(2)表面粗糙度指标：受刀具几何参数、振动及切屑形态影响，其值越小，材料的切削加工性能越好。由于二者存在耦合作用，需通过实验平衡优化，以满足高精度加工需求。

切削力测量选用迪佳科技DJ-CL-1切削力实验装置,如图2(a)所示。该装置包含CA6140A型车床、计算机辅助测试仪、K11型合金刀具、游标卡尺和直尺。计算机辅助测试系统不仅可以测量切削力的平

均值,还可以获得切削力的瞬时值,时间间隔为25~120 ms,可消除测力仪各向间的相互干扰。表面粗糙度测量选用吉泰科仪TR200粗糙度测量仪,该设备包含可调节式测量平台和便携式粗糙度测试仪。

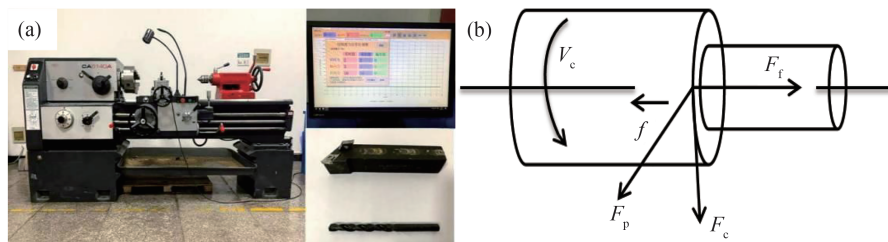


图2 (a)切削力实验装置和(b)切削样品的受力分析

Fig. 2 (a) Cutting force experimental setup and (b) force analysis diagram of the cutting sample

为了便于分析、计算和测量刀具受力情况,按切削主运动速度方向、切深方向和进给方向建立空间直角坐标系。切削时的受力分析如图2(b)所示,切削合力 F 在该坐标系中分解成三个分力,即主切向力 F_c 、轴向力 F_p 和径向力 F_r 。测量出参照样和实验样在切削加工时的 F_c 、 F_p 和 F_r ,利用式(1)计算切削合力 F 。

$$F = \sqrt{F_c^2 + F_p^2 + F_r^2} \quad (1)$$

实验样品的微观形貌分别用金相显微镜(OM, WMJ-9950, 上海无陌)和扫描电子显微镜(SEM, JSM—IT510, 日本电子)拍摄,微区成分使用能谱仪(EDS, AZtecLiveOne Xplore30, 英国牛津)分析。利用图形处理分析实验样品的微观形貌,统计铅颗粒尺寸和面积占比。

2 结果及分析

2.1 铅质量分数对材料切削性能的影响

图3为不同铅质量分数的圆棒对应的加工切削力和加工后表面粗糙度变化曲线。随着铅质量分数的增加,材料表面加工切削力和粗糙度均呈现先降低后提高的变化趋势。

当铅质量分数为2.5%时,表面加工切削力最低, $F=164.96\text{ N}$ 。

当铅质量分数为1.5%~2.5%时,加工表面粗糙度变化不大,均能达到理想水平, R_a 约为 $2.5\text{ }\mu\text{m}$ 。

当铅质量分数为0.5%时,材料表面加工切削力和表面粗糙度最高,分别为 $F=214.80\text{ N}$, $R_a=6.671\text{ }\mu\text{m}$ 。这是因为铅质量分数过低时,润滑

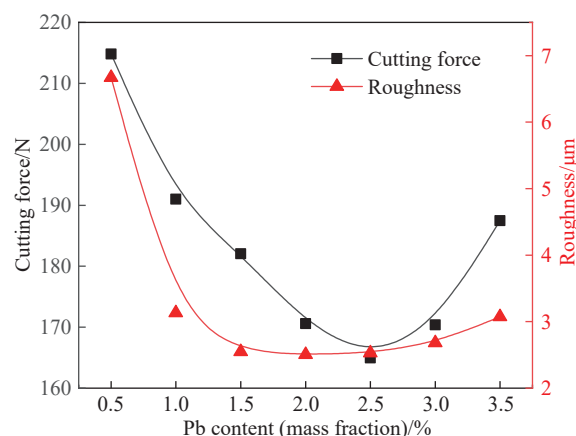


图3 含不同铅质量分数的圆棒加工切削力和表面粗糙度值变化曲线

Fig. 3 Changes in cutting force and roughness values during surface machining of round bars with different lead mass fractions

作用减弱,导致刀具与切屑、工件间的摩擦系数增加,尤其是刀-屑接触面的黏附现象加剧,使主切向力 F_c 和轴向力 F_p 显著上升。另外,断屑能力下降,易形成连续带状切屑,增加切屑对刀具的缠绕和阻力,进一步增大切削力。同时,缺乏铅的润滑保护,会加剧刀具前刀面月牙洼磨损和后刀面磨损,使切削力和加工表面粗糙度随时间推移上升更快^[22-23]。

当铅质量分数从2.5%开始增加后,材料表面加工切削力和表面粗糙度呈上升趋势。当铅质量分数为3.5%时,材料表面加工切削力和粗糙度最高,分别为 $F=187.47\text{ N}$, $R_a=3.074\text{ }\mu\text{m}$ 。这与铅质量分数过高有关。过量铅导致黄铜基体连续性被严重破坏,形成过多弱化点。此外,铅过量时易在基

体晶界上富集,形成局部偏析区,导致切削时铅黏附在刀具前刀面,形成积屑瘤,影响切削稳定性;同时,铅的热导率[35 W/(m·K)]远低于铜-锌基体[120 W/(m·K)]^[24],过量铅导致材料整体热导率降低,切削热难以扩散,使刀具过热,加剧月牙洼磨损(刀具前刀面的凹坑状磨损),增大材料表面加工切削力和表面粗糙度。

进一步对不同铅质量分数产品中铅颗粒分布进行金相分析。图4是不同铅质量分数产品的铅颗粒分布金相图。选取测量面积为0.60 mm²金相图片,按最大卡规直径统计铅颗粒尺寸,结果见表4。图4中深黄色部分为黄铜基体,黑色部分为铅颗粒。对比发现:当铅质量分数为0.5%和1.0%时,测量面积内铅颗粒总数很低,分别为1470个和1641个,直径为0~5 μm的铅颗粒占比高达99.05%和98.69%,直

径>5 μm的铅颗粒占比很低,约1%~2%,局部铅颗粒数量明显减少,分布稀疏且不均匀。当铅质量分数分别为1.5%,2.0%和2.5%时,直径为0~5 μm的铅颗粒占比分别为94.42%,91.49%和94.77%,直径为5~10 μm和>10 μm的铅颗粒占比明显增多,表明铅颗粒聚集或长大,但整体铅颗粒呈现弥散分布,且粒径细小、均匀,无局部铅颗粒聚集。当铅质量分数分别为3.0%和3.5%时,直径为5~10 μm的铅颗粒占比分别高达16.68%和12.41%,直径>10 μm的铅颗粒占比分别高达2.44%和11.30%,表明铅颗粒出现严重偏析,且部分颗粒形态与细小球状相差较大,呈团聚或聚集现象,形成粗大颗粒或链状聚集^[25-26]。此现象可能与多种杂质元素偏聚在高铅质量分数的铅颗粒周围或内部有关,需采用SEM-EDS分析进一步确定杂质成分。

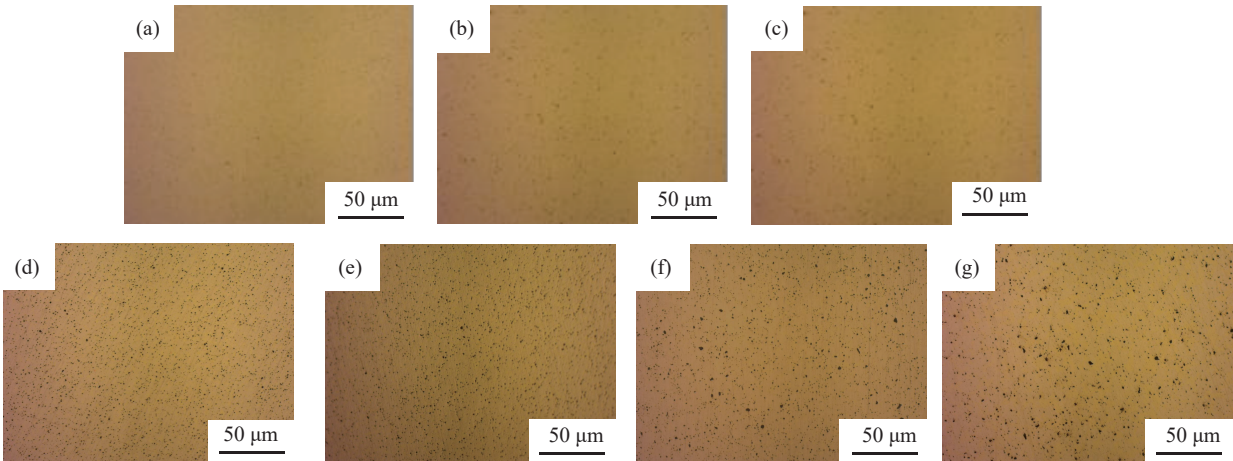


图4 含不同铅质量分数产品的铅颗粒分布金相图

Fig. 4 Metallographic images of lead particle distribution in products containing different lead mass fractions;
(a) 0.5%; (b) 1.0%; (c) 1.5%; (d) 2.0%; (e) 2.5%; (f) 3.0%; (g) 3.5%

表4 含不同铅质量分数产品的铅颗粒尺寸/占比分布

Table 4 Distribution of lead particle size/proportion for products with different lead mass fractions							
Pb质量分数/%	总数/个	0~5 μm 数量/个	0~5 μm 占比/%	5~10 μm 数量/个	5~10 μm 占比/%	>10 μm 数量/个	>10 μm 占比/%
0.5	1470	1456	99.02	8	0.55	6	0.43
1.0	1641	1620	98.69	11	0.70	10	0.61
1.5	2004	1892	94.42	62	3.08	50	2.50
2.0	2874	2629	91.49	154	5.36	91	3.15
2.5	3166	3000	94.77	132	4.17	34	1.06
3.0	4604	3724	80.88	768	16.68	112	2.44
3.5	5837	4453	76.29	724	12.41	660	11.30

对高铅质量分数(3.0%和3.5%)样品进行SEM-EDS分析。图5为杂质相的面扫描和点扫描结果。结果表明:基体为黄铜合金;白色颗粒是铅颗粒,并沿晶界弥散分布,不同区域铅颗粒的尺寸、形态相差较大,局部呈长大或聚

集现象,形成粗大的颗粒物;灰黑色颗粒是Fe的化合物,其中还夹杂着Si等化合物,该类杂质相会诱发切削力瞬态峰值出现,并引发颤振,使加工表面出现微裂纹和凹坑,显著降低材料切削性能。

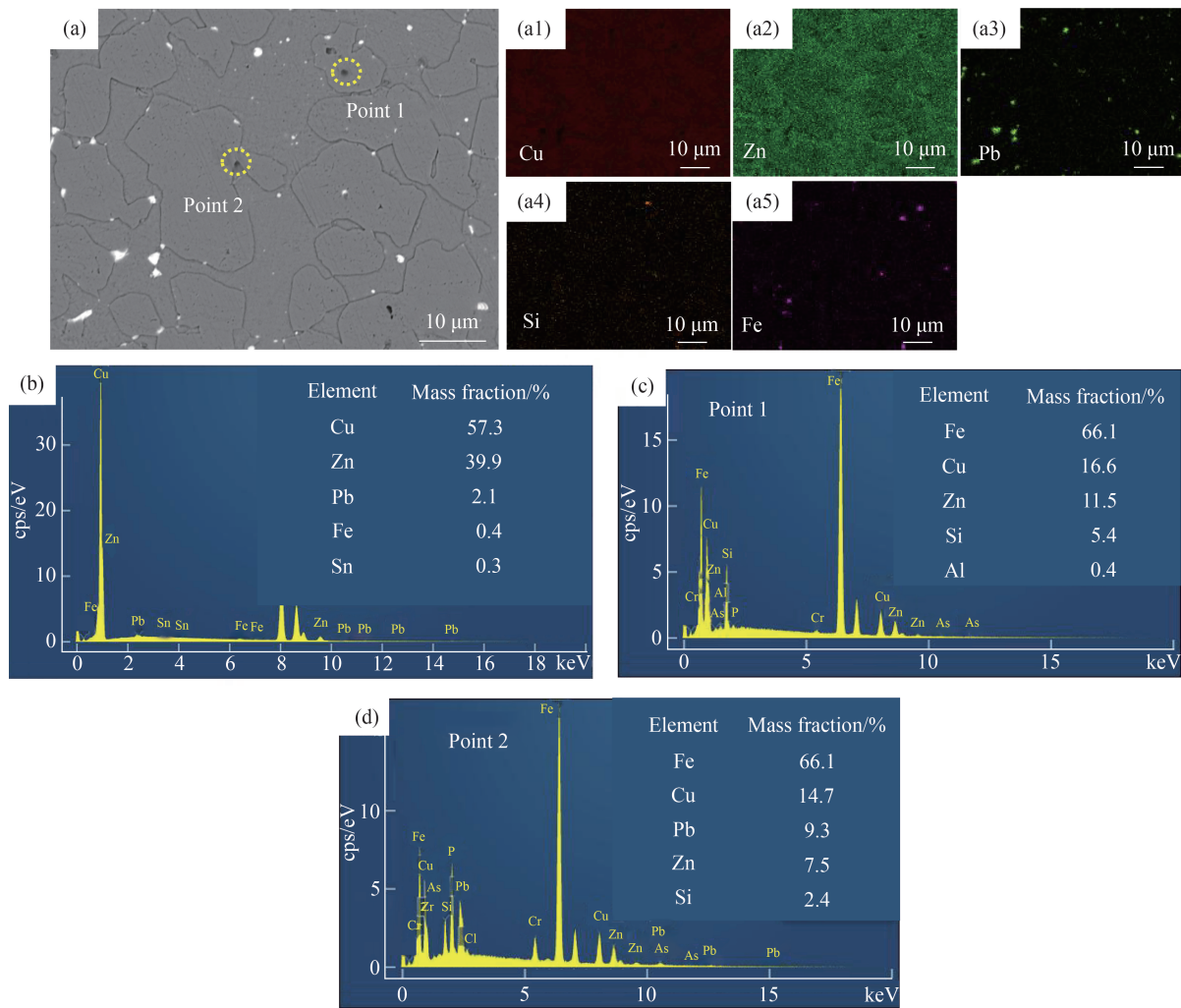


图5 扫描电镜能谱分析结果:(a)杂质相的微观形貌(a1~a5分别为杂质相Cu, Zn, Pb, Si, Fe的微观形貌);

(b)微观区域面扫描的能谱成分;(c)点1的能谱成分;(d)点2的能谱成分

Fig. 5 SEM-EDS analysis results: (a) Microstructure of the impurity phase (a1~a5 are the elements distributions of Cu, Zn, Pb, Si and Fe, respectively); (b) EDS composition of surface scanning; (c) EDS composition of Point 1 in figure (a);

(d) EDS composition of Point 2 in figure (a)

2.2 加工参数对材料切削性能的影响

取铅质量分数为2.5%的试验样品,控制车床转速 n 和进给量 f 变化,其余变量一致,探索不同加工参数对材料切削性能的影响。当车床转速 n 分别为300, 500, 700, 900和1100 r/min时,其对应加工的切削力和表面粗糙度变化如图6所示。可

见,随着车床转速 n 增大,材料表面加工切削力呈现递减趋势,而加工表面粗糙度呈现递增趋势。其中:当 n 为300 r/min时,对应的切削力和加工表面粗糙度达到最大值和最小值,分别为 $F=180.29$ N, $R_a=2.501$ μm ;当 n 为1100 r/min时,对应的切削力和加工表面粗糙度达到最小值和最大值,分别为 $F=156.00$ N, $R_a=5.008$ μm 。其原因是随着车床转

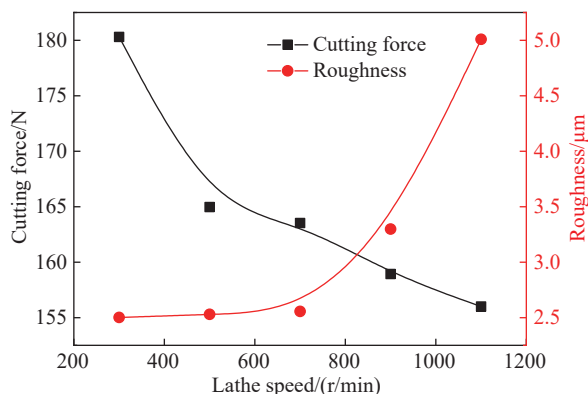


图6 不同车床转速 n 下圆棒表面加工切削力和表面粗糙度变化曲线

Fig. 6 Changes in cutting force and roughness values on the surface of a round bar under different lathe speeds n

速(切削速度)增加,剪切区温度升高,材料热软化效应增强,导致剪切强度降低,切削力减小^[27]。与此同时,适当的切削速度有利于减少材料撕裂产生的积屑瘤和鳞刺,当切屑快速脱离,可减小工件表面塑性变形,降低加工表面粗糙度,如 n 在300~700 r/min时,加工表面粗糙度较低。然而,当转速超过机床/刀具稳定性极限时,会引发高频颤振,产生周期性表面波纹,并加速刀具磨损(如月牙洼磨损),这些现象都会增大工件表面粗糙度,直接影响表面质量,如 n 在900~1100 r/min时,加工表面粗糙度较高。由此可以得出, $n=700$ r/min为最佳车削速度,此时材料切削力相对较低,而加工表面粗糙度未明显增大。

以最佳车床转速,即 $n=700$ r/min,探究不同加工进给量 f 对切削力和加工表面粗糙度的影响。实验设定 f 分别为0.10, 0.15, 0.20, 0.25和0.30 $\mu\text{m}/\text{Z}$ 。图7是 $n=700$ r/min时,不同加工进给量下切削力和加工表面粗糙度的变化曲线。可见,随着进给量 f 增大,材料表面加工切削力和表面粗糙度几乎呈现单调递增趋势。当 f 为0.10 $\mu\text{m}/\text{Z}$ 时,材料表面加工切削力和表面粗糙度最小,分别为 $F=120.74$ N, $R_a=1.715$ μm ;当 f 为0.30 $\mu\text{m}/\text{Z}$ 时,材料表面加工切削力和表面粗糙度最大,分别为 $F=238.63$ N, $R_a=7.718$ μm 。由此推测,随着进给量 f 增加,切削厚度也在增大,从而使剪切区材料变形抗力增大,主切向力 F_c 和轴向力 F_p 线性上升,切削力显著上升。在进给量(如 f 为0.10~0.15 $\mu\text{m}/\text{Z}$)合理、切削

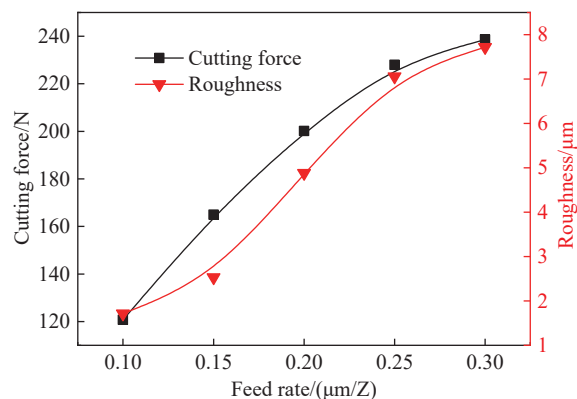


图7 不同进给量 f 下圆棒表面加工切削力和表面粗糙度变化曲线

Fig. 7 Changes in cutting force and roughness values on the surface of a round bar under different feed rates f

温度稳定的条件下,所产生的积屑瘤易脱落,可满足材料加工表面粗糙度要求。而较大进给量(如 f 为0.20~0.30 $\mu\text{m}/\text{Z}$)可能会抑制积屑瘤脱落,加剧材料侧向塑性流动,形成鳞刺。同时,大进给量还会加速刀具磨损,出现刀尖圆弧半径增大或刃口崩缺现象,显著劣化材料表面粗糙度。

综上所述可知,不同的车床转速 n 和进给量 f 对材料表面加工切削力和表面粗糙度会产生不同的影响。结合实际工况和生产效率需求,推荐选择车床转速 n 为700 r/min,进给量 f 为0.15 $\mu\text{m}/\text{Z}$,以达到工艺最佳匹配,从而获得良好的切削性能。

2.3 冷却方式对材料切削性能的影响

固定铝质量分数为2.5%、加工车床转速 n 为700 r/min、进给量 f 为0.15 $\mu\text{m}/\text{Z}$,其余条件不变,探索不同冷却方式对材料切削性能的影响。在自然冷却、冷却液冷却(选用Hocut 795-B水溶性合成液)和空气冷却(选用0.3~0.4 MPa压缩空气)三种不同冷却方式下,所对应切削力和加工表面粗糙度变化如图8所示。冷却液冷却方式对应的切削力和加工表面粗糙度分别为 $F=139.37$ N, $R_a=2.024$ μm ,与其他两种冷却方式相比,均有大幅度降低。这与冷却液作用机理有关:一方面,冷却液可以有效降低切削区的温度,减少工件材料的热软化和刀具的热变形;另一方面,冷却液可以降低刀具与切屑、刀具与工件之间的摩擦系数,减少加工摩擦,从而获得良好的切削性能。同时发现,对比自然冷却,采用空气冷却方式时,切削力变化不大,但加工表面粗

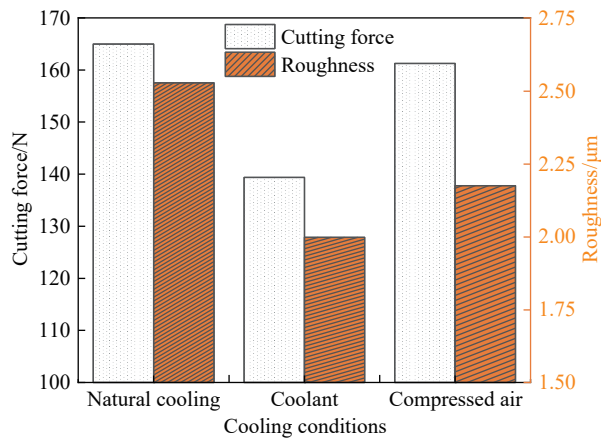


图8 不同冷却方式下圆棒表面加工切削力和表面粗糙度变化曲线

Fig. 8 Changes in cutting force and roughness values during surface machining of round bars under different cooling methods

糙度有所改善, R_a 从自然冷却时的 $2.529 \mu\text{m}$ 降低至 $2.216 \mu\text{m}$ 。空气冷却方式适用于对工件表面粗糙度有中等精度要求的产品, 且前期投入成本低于冷却液方式。

2.4 多因素协同作用对切削性能的影响分析

要全面理解再生易切削低铜黄铜合金的切削性能, 需综合分析铅质量分数、加工参数(车床转速与进给量)及冷却方式三者间的协同作用。这些因素对切削性能的影响并非独立, 而是通过相互作用共同决定材料的切削力与表面粗糙度。

2.4.1 铅质量分数与加工参数的交互作用

铅质量分数对材料切削性能的影响与加工参数密切相关。当铅质量分数为 $1.5\% \sim 2.5\%$ 时, 铅颗粒在基体中呈弥散分布(图4), 能显著改善材料的润滑性和断屑能力, 从而降低切削力和表面粗糙度(图3)。然而, 铅质量分数的优化窗口需结合加工参数进一步调整。例如, 在低转速(300 r/min)下, 即使铅质量分数为 2.5% , 切削力仍较高(180.29 N), 而提高转速至 700 r/min 时, 切削力显著降低(164.96 N)。这表明, 铅的润滑作用在较高切削速度下能更有效发挥, 同时可避免转速过高(如 1100 r/min)导致的颤振和表面粗糙度急剧升高(图6)。

此外, 进给量的选择需与铅质量分数匹配。当铅质量分数为 2.5% 时, 采用较小的进给量($0.15 \mu\text{m/Z}$)可充分发挥铅的润滑优势, 实现较低的切削力(164.96 N)和表面粗糙度($2.5 \mu\text{m}$)。若进给量过大

(如 $0.30 \mu\text{m/Z}$), 即使铅质量分数适宜, 也会因切削厚度增加导致剪切区变形抗力显著上升, 削弱铅的润滑效果(图7)。

2.4.2 冷却方式对铅质量分数与加工参数的调控

冷却方式在协同机制中起到关键调节作用。对于铅质量分数为 2.5% 的材料, 冷却液的使用能进一步降低切削力(139.37 N)和表面粗糙度($2.024 \mu\text{m}$), 其作用机理包括: 1) 抑制热软化效应。冷却液快速带走切削热, 避免材料过度软化导致塑性变形, 从而稳定切削力。2) 减少摩擦与积屑瘤。冷却液可润滑刀具-切屑界面, 减少铅颗粒黏附刀具的风险, 尤其在高铅质量分数(如 3.5%)时, 可缓解铅偏析引起的积屑瘤问题(图5)。

相比之下, 空气冷却虽成本较低, 但其降温效果有限, 仅能小幅改善表面粗糙度(从 $2.529 \mu\text{m}$ 降至 $2.216 \mu\text{m}$), 对切削力的影响不明显。因此, 在铅质量分数较高或加工参数较苛刻时(如高转速、大进给量), 冷却液的优势更为突出。

2.4.3 工业化建议

基于上述分析, 通过控制以下条件, 生产的低铜含量再生黄铜在切削性能和材料表观质量上可实现最优:

- 1) 以铅质量分数为核心。 $1.5\% \sim 2.5\%$ 为最佳范围, 确保铅颗粒弥散分布, 提供润滑与断屑功能。
- 2) 以加工参数为调节变量。转速 700 r/min 与进给量 $0.15 \mu\text{m/Z}$ 为平衡点, 既能利用铅的润滑作用, 又能避免热积累或颤振。
- 3) 以冷却方式为增强手段。冷却液可进一步优化切削性能, 尤其在铅质量分数或加工参数接近临界值时。

3 结 论

针对同一系列 $\text{Cu}_{57.5}\text{Zn}_x\text{Pb}_{0.5-3.5}$ 铅黄铜圆棒, 从材料切削性能检测入手, 分析在不同铅质量分数、不同工艺参数、不同环境条件下所制备产品的表面质量, 得出以下结论:

- 1) 铅质量分数对合金切削性能具有显著影响。当铅质量分数为 2.5% 时, 材料表现出最优的综合切削性能, 此时切削力最低(164.96 N), 表面粗糙度稳定在 $R_a \approx 2.5 \mu\text{m}$ 。该铅质量分数下铅颗粒呈细小弥

散分布(94.77%颗粒直径 $<5\ \mu\text{m}$),既保证了润滑效果,又避免了过量铅导致的偏析问题。

2) 车床转速 700 r/min 配合进给量 $0.15\ \mu\text{m}/\text{Z}$ 时,可获得最佳的切削性能平衡。在此参数下,切削力维持在 156~180 N 之间,表面粗糙度控制在 $R_a \approx 2.5\ \mu\text{m}$,既保证了加工效率,又满足了精密加工的质量要求;

3) 采用冷却液冷却方式,可大幅度降低切削力和加工表面粗糙度,分别为 $F=139.37\ \text{N}$, $R_a=2.024\ \mu\text{m}$ 。与自然冷却相比,采用空气冷却方式,切削力变化不大,但其加工表面粗糙度有所改善,从 $R_a=2.529\ \mu\text{m}$ 降低至 $R_a=2.216\ \mu\text{m}$,适用于对工件表面粗糙度有中等精度要求的产品,且前期投入成本低于冷却液方式。

参考文献:

- [1] 徐鹏, 乔灵慧, 卢伟伟, 等. 高强电解铜箔微观组织结构与性能调控机制研究[J]. 铜业工程, 2025(3): 1-8.
- [2] LI X, MA B Z, WANG C Y, et al. Sustainable recovery and recycling of scrap copper and alloy resources: a review [J]. Sustainable Materials and Technologies, 2024, 41: e01026.
- [3] WANG C, HUANG X, LIM M K, et al. Mapping the structural evolution in the global scrap copper trade network [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 275: 122934.
- [4] LIU S, LIU W, TAN Q Y, et al. The impact of China's import ban on global copper scrap flow network and the domestic copper sustainability [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2021, 169: 105525.
- [5] TIAN X, ZHENG J X, HU L, et al. Impact of China's waste import policy on the scrap copper recovery pattern and environmental benefits [J]. Waste Management, 2021, 135: 287-297.
- [6] 邓濯. 铅黄铜合金在海水中的超声空蚀特征及机理[D]. 镇江: 江苏大学, 2022.
- [7] PENG H H, GUO C J, SHEN S W, et al. Effect of Bi addition on microstructure and properties of lead brasses [J]. Materials Today Communications, 2025, 46: 112636.
- [8] 王占昊, 刘硕, 杨思原, 等. 中国废杂铜回收工艺现状及研究进展[J]. 中国冶金, 2025, 35(3): 34-43, 75.
- [9] KOINIG G, KUHN N, FINK T, et al. Deep learning approaches for classification of copper-containing metal scrap in recycling processes [J]. Waste Management, 2024, 190: 520-530.
- [10] LIU W, MA B Z, ZHOU Z G, et al. Efficient separation of impurities in scrap copper by sulfurization-vacuum distillation [J]. Vacuum, 2022, 202: 111145.
- [11] 薛成, 鞠康, 段春争. 精加工细晶粒纯铜材料的切削力研究[J]. 工具技术, 2020, 54(10): 8-12.
- [12] 陈倩倩, 唐思文, 卢继, 等. 加工参数对无氧铜切削断屑的仿真及实验研究[J]. 工具技术, 2024, 58(11): 35-39.
- [13] 张超, 岳善廓, 何艳, 等. 面向铜镍合金车削加工的微织构CBN刀具研究[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2025, 45(4): 70-79.
- [14] 陈曙光, 刘平, 田保红. C3602 铅黄铜切削表面粗糙度的研究[J]. 机械制造, 2004, 42(12): 47-48.
- [15] 梁梦媛, 靳磊, 凌真, 等. 精密结构件用铅黄铜的性能研究[J]. 机电工程技术, 2023, 52(11): 88-90, 133.
- [16] 王雪松, 周兵, 戴姣燕, 等. Al 含量对等值锌当量耐磨黄铜组织及性能的影响[J]. 材料导报, 2021, 35(20): 20124-20128.
- [17] YANG C, DING Z, TAO Q C, et al. High-strength and free-cutting silicon brasses designed *via* the zinc equivalent rule [J]. Materials Science and Engineering: A, 2018, 723: 296-305.
- [18] 林国志. 锌当量调控对无铅硅黄铜的切屑变形-断裂机制影响研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2021.
- [19] 王法超, 胡丹丹, 沈守稳, 等. $\text{Cu}_{54-56}\text{Zn}_{40-44}$ 再生铜合金棒材成形工艺及性能研究[J]. 精密成形工程, 2024, 16(9): 102-111.
- [20] 魏安祥, 刘婉容, 刘宏. 高导铈铜合金棒材上引连铸工业试验研究[J]. 铜业工程, 2021(1): 19-21, 39.
- [21] 杨超, 刘小君, 杨海东, 等. 表面织构对刀具切削性能及前刀面摩擦特性的影响[J]. 摩擦学报, 2015, 35(2): 228-235.
- [22] KIM J Y, LEE J E, KIM M S, et al. Enhancing machinability in free-cutting duplex brass alloys: isotropic blocky α phase formation *via* optimized hot extrusion processing [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2025, 1010: 177062.
- [23] 张弘弢, 鲍绍箕. Pb 在金属切削过程中的减摩机理[J]. 大连工学院学报, 1988, 28(1): 59-66.

- [24] 张启运, 庄卫东. 金属材料热物性学 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2011.
- [25] SUN X F, LIU Y J, ZHAO Y, et al. Investigation of lead particles loading on the surface of activated carbon on the performance of lead carbon batteries and its potential mechanisms [J]. Journal of Energy Storage, 2023, 60: 106641.
- [26] ADELBERG K, VAN DER WEIJDEN A, HELMBRECHT L, et al. Perovskite-based photoluminescent detection of lead particles in gunshot residue [J]. Forensic Science International, 2025, 370: 112415.
- [27] 罗韬. 颗粒增强钛基复合材料车削加工切削机理研究 [D]. 盐城: 盐城工学院, 2025.

Cutting Performance of $\text{Cu}_{57.5}\text{Zn}_x\text{Pb}_{0.5-3.5}$ Alloy Produced from Scrap Copper

WANG Fachao^{1,2}, MA Shuai¹, HU Dandan², SHEN Shouwen², LANG Bin², LIU Wei³, CHENG Jiahui¹

(1. Taihang Laboratory In Shanxi Province, Shanxi Taiyuan 030000, China; 2. Ningbo Changzhen Copper Industry Co., Ltd., Ningbo 315000, China; 3. Shanxi Key Laboratory of Copper-Based New Materials, Yuncheng 044000, China)

Abstract: By analyzing the cutting performance of low copper content recycled brass alloy prepared from scrap copper, influences of lead mass fraction, process parameters, and environmental conditions on the surface processing quality of the material were studied. Results revealed the following trends: as lead content increased, both surface machining cutting force and roughness values of the material initially decreased and subsequently increased. When lead content ranged from 1.5% to 2.5%, surface roughness values exhibited minimal variation, all achieving relatively ideal levels with an average R_a value of approximately 2.5 μm . Notably, when the lead content reached 2.5%, surface machining cutting force was at its lowest, measuring $F=164.96$ N. With lead content fixed at 2.5%, optimal cutting performance was achieved when lathe rotational speed (n) was set at 700 r/min and feed rate (f) at 0.15 $\mu\text{m}/\text{Z}$. The use of coolant cooling method significantly reduced cutting force on the surface of the material to $F=139.37$ N, while surface roughness decreased to $R_a=2.024$ μm . Compared with natural cooling, air cooling method improved surface roughness of the material during processing, reducing it from $R_a=2.529$ μm to $R_a=2.216$ μm . This study provided practical process guidance for the efficient and precise machining of extruded round bars with recycled brass, offering significant potential for applications in material development and mechanical manufacturing.

Key words: scrap copper; lead content; processing parameter; cutting force; surface roughness

doi: 10.3969/j.issn.1009-3842.2026.02.008

引文格式: 王法超, 马帅, 胡丹丹, 沈守稳, 郎滨, 刘伟, 程佳慧. 再生 $\text{Cu}_{57.5}\text{Zn}_x\text{Pb}_{0.5-3.5}$ 合金切削性能分析[J]. 铜业工程, 2026(2): 76-85.

WANG Fachao, MA Shuai, HU Dandan, SHEN Shouwen, LANG Bin, LIU Wei, CHENG Jiahui. Cutting performance of $\text{Cu}_{57.5}\text{Zn}_x\text{Pb}_{0.5-3.5}$ alloy produced from scrap copper[J]. Copper Engineering, 2026(2): 76-85.