

高能电脉冲对淬火态 GCr15 钢切削性能的影响

张 硕¹, 王海波¹, 张 冰¹, 宋国林¹, 王兴龙², 韩 彬³, 唐国翌¹

(1. 清华大学 深圳研究生院, 广东 深圳 518055)

(2. 深圳市平进股份有限公司, 广东 深圳 518000)

(3. 黑龙江北方工具有限公司, 黑龙江 牡丹江 157013)

摘 要: 在高频淬火态 GCr15 轴承钢切削过程中施加高能脉冲电流, 研究了高能电脉冲对淬火态 GCr15 钢切削性能的影响。结果表明, 在脉冲电流的作用下, 主切削力、轴向表面粗糙度、表面硬度以及刀具磨损状况都显著降低。对高频淬火态 GCr15 轴承钢而言, 脉冲电流的电致塑性效应与焦耳热效应能够促进位错运动, 从而在较低温度与较短时间内达到回火效果, 提高材料表面塑性变形能力, 有效改善其切削加工性能。

关键词: 脉冲电流; 塑性变形; 切削力; GCr15 轴承钢

中图分类号: TG501.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2018)02-0574-07

高频淬火态 GCr15 轴承钢表面具有较高硬度而心部具有良好的塑性与韧性, 因此具有优秀的机械强度与抗疲劳、耐磨损性能, 在工程领域得到广泛应用^[1]。但是, 由于其表面的高硬度低塑性状态, 加工性能极差。淬火钢在金属切削加工性的总体范围内^[2], 按照被加工材料的加工性能分级规定, 硬度、强度均为 9a 级, 属于极难加工的材料。淬火态 GCr15 钢精加工常用方法是磨削加工, 但是磨削加工效率低、砂轮磨损消耗量大、磨削废液对环境污染严重。与磨削加工相比, 近年来随着超硬刀具材料与其相关技术的发展, 干式硬态切削^[3,4]能得到与磨削加工相当的表面加工质量, 且具有更高的效率与环保性, 因此硬态切削成为淬硬钢加工的重要途径^[5-8]。

近年来高能脉冲电流在辅助材料加工领域得到广泛的研究与应用。在高密度脉冲电流电致塑性效应^[9,10]作用下, 能够促进位错的运动, 从而显著提高材料塑性变形能力, 改善难变形材料的加工性能^[11]。Xu 等研究发现高能脉冲电流能够降低 AZ31 镁合金轧制过程的变形抗力并获得较好的表面质量, 这证实电脉冲辅助轧制后可缩短退火时间^[12]。田绍权等证实电脉冲可以降低冷拔铜丝的再结晶温度并缩短时间, 同时电脉冲可以促进位错运动, 从而得到更细小的晶粒结构^[13]。Qin 等利用脉冲电流控制金属材料的显微组织, 他们通过控制脉冲电流的参数来控制晶粒往特定形态生

长, 从而得到有利的物理、力学、化学性能^[14-16]。

大量研究将脉冲电流应用于金属材料的轧制、拉延工艺中, 但是对于电脉冲应用于切削加工的研究却较少报道, 仅 Wang 等研究了电脉冲对 304 不锈钢切削性能的影响^[17], 对于切削表层硬度很高的淬硬钢的研究尚属空白。因此本实验将脉冲电流应用于淬火态 GCr15 轴承钢的切削过程, 分析了脉冲电流对其切削性能的影响机理, 证实电脉冲辅助切削能够有效改善难加工材料的切削性能。

1 实 验

实验材料为轴承钢 GCr15, 其化学成分如表 1 所示。材料尺寸为直径 15 mm, 长度 200 mm。在电脉冲辅助切削前首先进行高频淬火处理, 表面硬度为 60 ± 2 HRC。

电脉冲辅助切削实验在半自动控制 CJK0632 车床上进行。图 1 为电脉冲辅助切削工作原理示意图, 其中刀具与刀架和车床之间必须做好绝缘处理, 以防止脉冲电流通过刀具, 导致切削过程中由于刀具震动引起刀具与试样表面打火, 从而造成被加工试样表面

表 1 GCr15 钢化学成分

Table 1 Chemical composition of GCr15 steel (ω/%)

C	Mn	Cr	Si	S	P	Fe
0.95~1.05	0.2~0.4	1.3~1.65	0.15~0.35	<0.02	<0.03	Bal.

收稿日期: 2017-02-23

基金项目: 广东省省级科技计划项目 (2014B090901029); 深圳市基础研究项目 (JCYJ20140417115840280)

作者简介: 张 硕, 男, 1990 年生, 硕士, 清华大学深圳研究生院新材料研究所, 广东 深圳 518055, 电话: 0755-26036382, E-mail: zhangshuonwpu@163.com

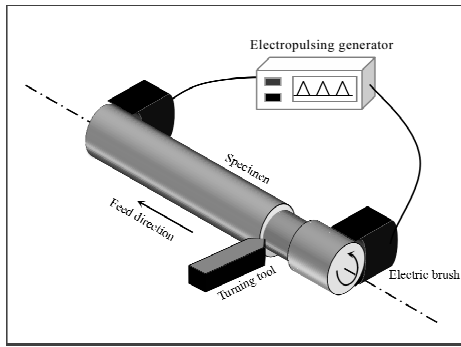


图 1 电脉冲辅助切削工作原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of the electropulsing assisted cutting process

质量下降。脉冲电流由自主研发设计的脉冲电源提供，所提供的脉冲电流为正向尖波高能窄脉宽电流（最大电流 5000 A，脉宽 62 μs），脉冲电源通过电刷与工件形成回路。所施加的脉冲电流参数（电压、频率、峰值电流、均方根电流等）通过自行研制的脉冲电流采集系统读出。实验采取 3 组电脉冲参数进行对比实验，具体参数如表 2 所示。为保证实验条件的一致性，切削参数保持一致：转速 400 r/min，切削线速度 21.4 m/min，进给量 0.1 mm/r，切削深度 0.1 mm。实验刀具为三菱 NX2525 金属陶瓷刀片，刀尖曲率半径为 0.4 mm。

电脉冲辅助切削后，采用三维视频显微镜（HiROX KH-7700）观察试样表面形貌、切屑形貌以及刀具磨损状况；采用 HITACHI S-4800 场发射扫描电镜观察金相显微组织；采用接触式粗糙度测试仪（Taylor Hobson Surtronic 25）测量切削试样轴向表面粗糙度，取样长度 4 mm，每组样品测试 5 组数据取其平均值；由 FLR660 红外热成像仪记录切削区的切屑表面最高温度的波动变化，在切削之前利用热电偶测量的温度

表 2 电脉冲参数选择

Table 2 Electropulsing parameters during electropulsing cutting process

Specimen No.	Electropulsing tempering	Electropulsing cutting
1	—	0
2	—	Frequency: 500 Hz, Maximum current density: 9.60 A/mm ²
3	Frequency: 500 Hz Maximum current density: 9.60 A/mm ² During time: 120 s Surface temperature: 180 °C	Frequency: 500 Hz, Maximum current density: 9.60 A/mm ²

来校准红外热成像仪的温度；使用维氏显微硬度计测量试样表层硬度梯度变化，测试载荷 0.987 N，每点在相同条件下测试 3 组数据取其平均值。

本实验采用的主切削力计算方法为：通过测量机床空载功率和电机功率来计算机床主轴切削功率 N_q (kW)，切削扭矩 M (N·m)和切削主分力 F_z (N)^[18-20]。根据能量传递平衡关系，在机床稳态时，由电功率平衡可得：

$$N=N_k+N_q+N_f \tag{1}$$

其中， N_f 是机床切削时的附加损耗功率，它是切削时附加机械损耗功率与附加电损之和。 N_k 是电机空载功率。 N_q 是电机的有用输出功率，它与电机总功率 N 之间关系复杂，但从实际使用来说，可以近似等于线性关系，即：

$$N=N_k+aN_q \tag{2}$$

其中， a 是电功率平衡方程线性化系数，对于车床 $a=1.15\sim 1.25$ 。根据系数 a 有关计算公式^[18]，经计算对于本实验 $a=1.294$ 。

根据式(1)中考虑附加损耗功率的作用，并由式(2)可导出以下计算公式：

$$N_q = \frac{1}{a}(N - N_k) \tag{3}$$

$$M = \frac{9550}{an}(N - N_k) \tag{4}$$

$$F_z = \frac{9550}{anr}(N - N_k) \tag{5}$$

2 结果与分析

2.1 脉冲电流对切削温度与切削力的影响

表 3 为 3 种样品机床主轴切削功率 N_q 、切削扭矩 M 以及主切削力 F_z 的大小。图 2 与图 3 分别为切削过程温度分布图与 3 组样品温度对比图。

从表 3 中可以看到，切削过程引入电脉冲后主切削力明显比传统切削的主切削力低。经过电脉冲回火后再进行电脉冲辅助切削，主切削力为 206.70 N，相比于干切削降低了 25%，效果十分显著。从电机功耗角度来看，正常切削时电机切削功率为 87 W，电切削时切削功率均有所降低，不同程度地节省了输出能量。在切削参数相同的情况下，影响主切削力的主要因素为材料的表面塑性，对于淬火态的 GCr15 钢其表面呈现高硬度低塑性的状态，因此其切削性能较差，干切削时主切削力较高。在引入脉冲电流后，脉冲电流激发了材料的电致塑性效应，高能脉冲电流形成大量定向漂移电子，当电子风作用于位错网络及位错缠结时，大量能量传递使得位错能量增加成为可动位错，从而

表 3 3 种样品机床主轴切削功率 N_q 、切削扭矩 M 以及主切削力 F_z

Table 3 Comparison of cutting power of the lathe spindle N_q , cutting torque M and main cutting force F_z

Sample No.	Cutting power, N_q/kW	Cutting torque, $M/N\cdot m$	Main cutting Force, F_z/N
1	0.087	2.073	276.46
2	0.077	1.841	245.45
3	0.065	1.550	206.70

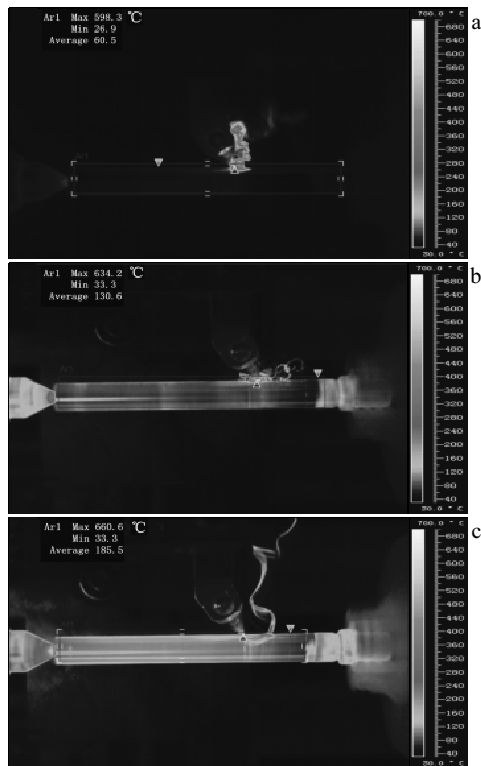


图 2 切削过程温度分布图

Fig.2 Temperature distribution in cutting process: (a) sample 1, (b) sample 2, and (c) sample 3

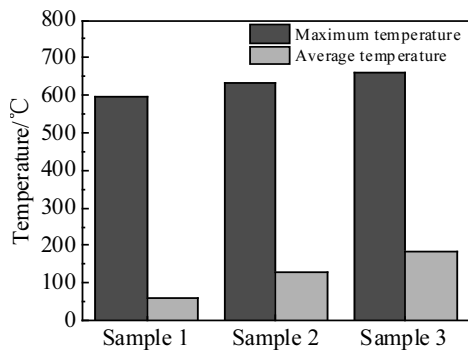


图 3 最高温度与平均温度对比图

Fig.3 Comparison of maximum temperature and average temperature

促进位错运动; 同时在脉冲电流焦耳热效应的作用下, 使得工件表面平衡温度增加。从图 3 可以看出, 干切削时工件表面的平均温度为 60.5 °C, 随着通电时间的增加, 样品 2 与样品 3 表面的平均温度分别增至 130.6 和 185.5 °C。温度的提高也对位错运动和原子扩散与迁移能力起到积极作用, 从而使材料的表面塑性得到提高, 降低了切削力。随着通电时间的增加, 在电致塑性效应与热效应的共同作用下, 使得样品在低于传统回火温度以及较短时间内对材料表面起到回火效果^[21-23], 从而使材料表面的塑性变形能力明显改善, 大大降低了主切削力。

由图 3 可以看出, 切削过程中刀尖处最高温度增幅相对较小, 3 组样品分别为 598.3、634.2、660.6 °C。一方面由于脉冲电流焦耳热效应导致切削温度的提高, 另一方面随着切削力的降低导致切削热减少, 切削温度降低, 在两方面共同作用下导致刀尖最高温度波动较小, 在该范围内合理变化。

2.2 脉冲电流对表面粗糙度的影响

被加工工件的表面粗糙度是衡量工件表面质量的一个重要指标, 切削过程影响工件轴向表面粗糙度 (R_a) 的因素包括切削参数 (转速、进给量、被吃刀量等)、刀具角度、润滑状态、材料表面塑性等。本实验中主要研究电脉冲对材料表面塑性的影响从而改善切削后工件轴向表面粗糙度。图 4 为 3 组样品表面粗糙度变化曲线, 图 5 为 3 种样品表面微观形貌图。从图 4 可以看出, 样品表面粗糙度与主切削力有相同变化趋势, 干切削后样品的轴向表面粗糙度 R_a 为 1.26 μm , 在引入电脉冲后工件表面粗糙度明显降低, 样品 2 与样品 3 的轴向表面粗糙度 R_a 分别为 1.14 和 0.96 μm 。从图 5a 可以看出, 对于干切削样品, 由于其表面塑性较低, 切削力较大, 从而引起加工系统震动而导致切屑的不

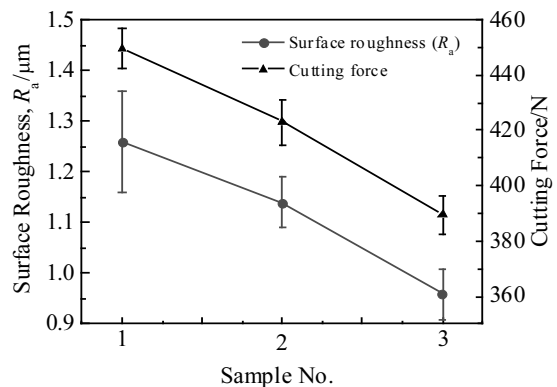


图 4 电脉冲切削对表面粗糙度和切削力的影响

Fig.4 Effect of electropulsing parameters on surface roughness ($R_a/\mu m$) and cutting force

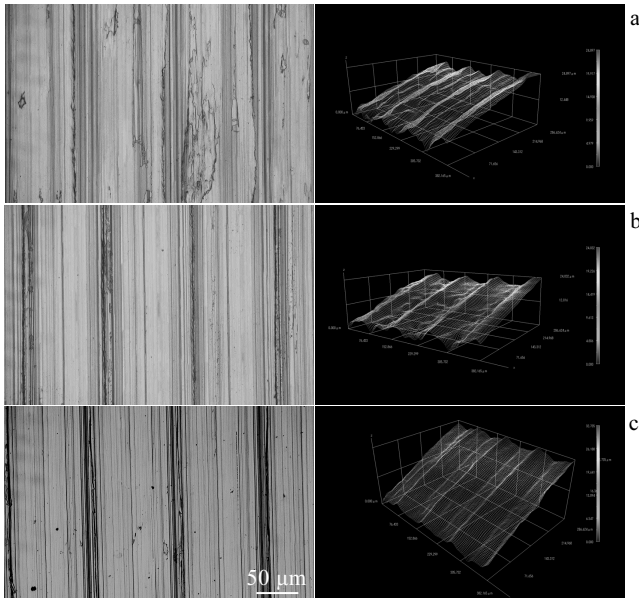


图 5 样品表面显微形貌与三维形貌图

Fig.5 OM images of surface morphology and 3-dimension surface morphology images of GCr15 steel specimens: (a) sample 1, (b) sample 2, and (c) sample 3

连续性，从而导致产生切屑崩碎，切削后加工表面有表层撕脱现象，即表层剥落，表面加工质量较差。图 5b 与 5c 中，表层剥落现象已经有了明显改善，尤其图 5c 中，可以明显看出表面质量大幅提高。工件表面加工质量与工件的表面塑性变形能力有关，对于高硬度材料，随着材料表面塑性变形能力的增加，易形成连续切屑，但容易断屑，且不易黏刀，从而不易产生积屑瘤，因此材料表面加工质量也会有所改善，表面粗糙度随之降低。表面粗糙度的变化趋势与主切削力的变化趋势一致，主切削力降到最低值时，表面粗糙度也降到最小值。随着主切削力的减小，工艺系统所产生的震动减弱，切削过程更加平稳；同时由于主切削力的减小，对刀具的磨损程度也随之减小，因此加工表面质量明显提高。主切削力与工件表面和刀尖之间摩擦力成正比，同时也是影响表面粗糙度的主要因素之一^[24]。

2.3 脉冲电流对表面加工硬化及表层显微组织的影响

图 6 为 3 组样品表层硬度梯度变化曲线。从图中可以看出，干切削后材料表面硬度达到 6712 MPa，较未切削状态提高了 500 MPa，加工硬化效果较为严重。在电脉冲辅助切削后，表面硬度较干切削样品稍有降低，加工硬化有所改善。在经过电脉冲回火后，表面硬度降低至 6500 MPa，加工硬化效果降低 41%。同时由于电脉冲对工件表层起到回火作用，使得次表层硬

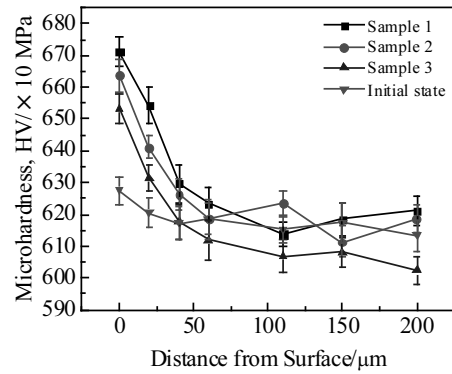


图 6 表层硬度梯度变化曲线

Fig.6 Microhardness distribution along the depth from the sample surface

度也略微降低。

在干切削过程中，工件表层受到刀具的强烈挤压而发生复杂的塑性变形，大量位错发生缠结从而阻碍了位错的运动，导致晶粒被拉长、破碎，阻碍材料进一步变形，使得材料表面塑性变形能力进一步降低。从而导致切削力增大，加速刀具磨损。其显微组织如图 7a 所示。在图 7a 中，可以测出其塑性流变层厚度约为 50 μm。可以看出，马氏体组织受到挤压被拉长与破碎。在引入高能脉冲电流后，材料的表层和次表层硬度都有所降低，图 7b 为样品 2 的显微组织。其塑性流变层厚度降低至 30 μm，已经可以看到部分未被拉长的马氏体组织。图 7c 为样品 3 的显微组织。与图 7a 相比，塑性流变层已有极大改善，在图 7c 中可以看出，大部分马氏体晶粒未发生明显变形。说明随着电致塑性效应以及伴随发生的焦耳热效应、集肤效应和纯电效应，在电子与表层原子的碰撞过程中使得大量能量输入，从而使表层原子振动能急剧增加，促使表层原子运动能力升高，使得大量缠结位错能够激活和运动，克服了在滑移面运动的障碍，晶粒得以进一步变形，从而提高了金属表层的塑性，减弱刀尖和工件表面的挤压和摩擦所产生的加工硬化，降低了表层硬度。在加工硬化以及电脉冲对材料表层的软化同时作用下，使得在切削过程中材料表层硬度保持在一个相对稳定范围内，有效地减弱了加工硬化效果，从而对表面质量、刀具寿命等方面起到积极作用。

2.4 脉冲电流对刀具磨损的影响

图 8 为 3 组样品切削时刀具的磨损特性曲线。可以看出，在普通切削时，刀具的磨损十分剧烈，几乎没有正常磨损阶段，磨损曲线接近线性曲线，一开始便进入了急剧磨损期。随着通电时间的增加，刀具的

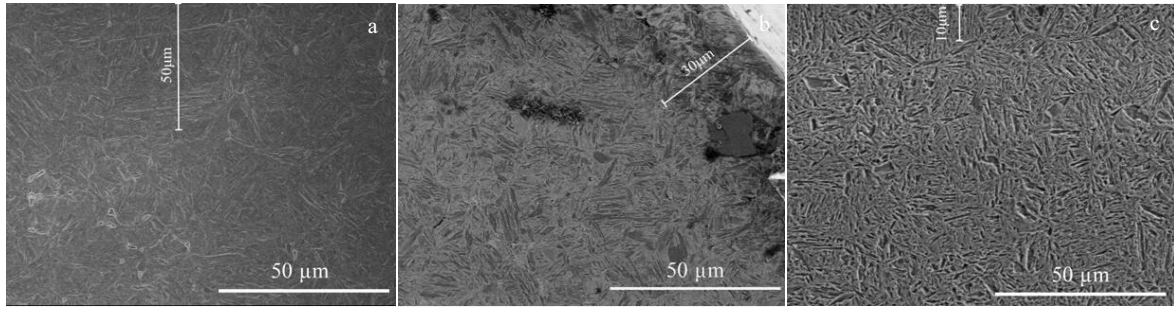


图 7 表层截面显微组织

Fig.7 Microstructures of the samples along the depth from surface: (a) sample 1, (b) sample 2, and (c) sample 3

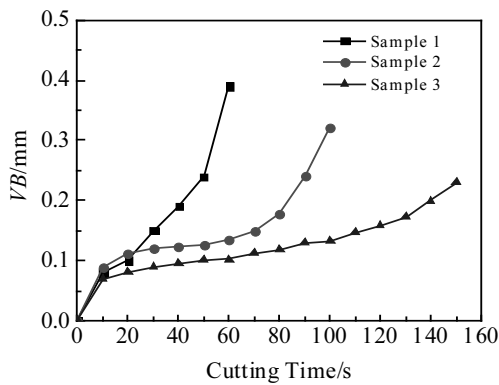


图 8 刀具磨损曲线

Fig.8 Wear curves of inserts

正常磨损阶段有明显增长，样品 2 的正常磨损阶段为 80 s，然后开始急剧磨损。而样品 3 经过电脉冲回火后在切削时间达到 150 s 时，刀尖最大磨损量 $VB_{max}=0.23$ mm，还未出现急剧磨损，刀具使用寿命较样品 2 提高了 100%。图 9 为在相同切削参数下 3 组样品切削加工后刀具刀尖显微形貌。刀具在切削过程中，切屑的形成和流出时与刀尖产生较大的剪切作用，两者之间发生高速的摩擦和挤压运动，因此在前刀面因机械磨损出现大量的划痕及沟槽。在本实验中出现沟槽磨损的原因主要是由于预切削面上出现的冷硬层所导致。由于淬火态 GCr15 钢表面呈现高硬度低塑性状态，切削时，刀具与切屑的接触长度小，在刀尖附近引起应力集中，并使该处温度上升，在局部区域形成急剧变化的温度梯度，从而加强了刀尖局部区域的磨损过程，以至出现沟槽磨损，因此切削时刀具易产生崩刃和刀片局部碎裂，造成刀具的脆性破损。随着电脉冲导致加工硬化效果的减弱，沟槽磨损的程度也随之降低。对于干切削样品，如图 9a 所示，由于其切削力较高并主要集中于刀尖附近，且造成加工系统的震

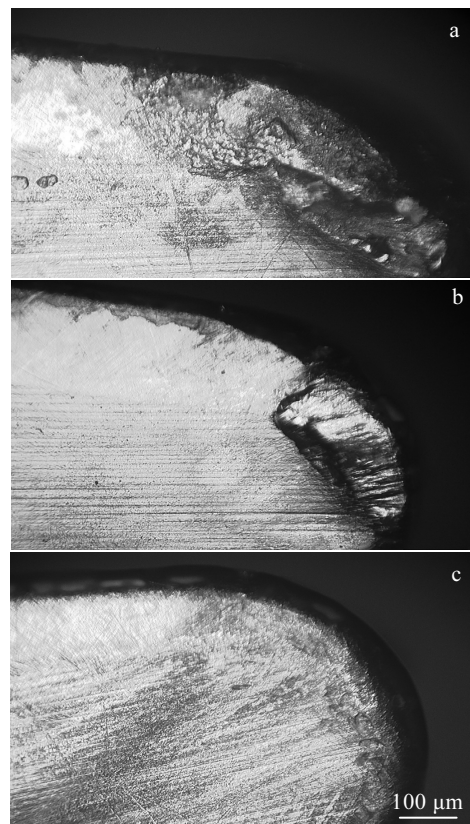


图 9 刀具磨损形貌对比

Fig.9 Comparison of tool wear morphologies for sample 1 (a), sample 2 (b), and sample 3 (c)

动，使得加工过程处于不稳定状态，此时刀具的主要磨损是由于塑性剪切磨损，可以看到刀具的前端被一层层剪离下来，切削刃的强度随之减弱，因此出现了严重的崩刃现象。在崩刃后继续切削中，刃区损坏部分迅速扩大，导致了更为严重的破损。在施加脉冲电流后，如图 9b 所示，在电致塑性效应的作用下，工件表面塑性变形能力的提高，以及脉冲电流产生的电子润滑效应，使得切削抗力降低，刀尖的应力集中程度

也随之降低, 因此刀具磨损程度较干切削时有明显改善。此外, 在图 9a 与 9b 中, 刀尖靠近主切削刃附近仍出现轻微剥落现象, 刀尖两侧磨损不同的原因与刀具参与切削的切削刃有关, 主切削刃靠近待加工表面处, 工件材料加工硬化严重, 主切削刃受到的应力高于副切削刃, 待加工表面处切削温度也要高于已加工表面, 所以主切削刃产生的磨损也较副切削刃更加严重。对于进行电脉冲回火的样品, 如图 9c 所示, 由于样品表面塑性明显提高, 切削力显著降低, 切屑的形成和流出时形成连续切屑, 与前刀面的接触面积增大, 刀尖受到的应力降低, 因此刀尖磨损程度较其它两样品有极大改善, 仅出现轻微磨损, 未发现崩刃现象。但由于切屑与前刀面的接触面积增大, 导致前刀面受到较大的摩擦与挤压, 磨损程度也较为严重。

3 结 论

1) 在脉冲电流电致塑性效应与焦耳热效应的共同作用下, 工件表面塑性变形能力明显提高, 主切削力降低 13% 左右。

2) 工件表面粗糙度与表面硬度变化与切削力变化趋势基本一致, 在脉冲电流的作用下, 切削后工件的表面质量显著提高, 加工硬化效果也得到改善, 轴向表面粗糙度 R_a 由 $1.26 \mu\text{m}$ 降至 $0.96 \mu\text{m}$, 加工硬化效果降低 41%。

参考文献 References

- [1] Chen Kangmin(陈康敏), Zhang Qiuyang(张秋阳), Li Xinxing(李新星) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2015, 44(6): 1531
- [2] Shi Zengmin(石增敏), Zheng Yong(郑 勇), Feng Ping(丰 平). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2007, 36(S3): 26
- [3] Tang Linhu(唐林虎), Huang Jianlong(黄建龙), Gao Chengxiu(高成秀). *Manufacturing Technology & Machine Tool*(制造技术与机床)[J], 2011(11): 130
- [4] Tang Linhu(唐林虎), Huang Jianlong(黄建龙), Gao Chengxiu(高成秀) *et al. Manufacturing Technology & Machine Tool*(制造技术与机床)[J], 2012(1): 112
- [5] Cui Bodi(崔伯第). *Machinery Design & Manufacture*(机械设计与制造)[J], 2013(7): 150
- [6] Zhang Yuzhou(张玉周), Gong Zhijian(龚志坚), Yan Yonggang(闫勇刚). *Journal of Qingdao Technological University*(青岛理工大学学报)[J], 2009, 30(6): 103
- [7] Zhu Xuechao(朱学超), Shen Liping(沈利平). *Manufacturing Technology & Machine Tool*(制造技术与机床)[J], 2009(12): 31
- [8] Liu X L, Wen D H, Li Z J *et al. Journal of Materials Processing Technology*[J], 2002, 129(1-3): 217
- [9] Troitskii O A. *Dokl Akad Nauk SSSR*[J], 1963, 148: 332
- [10] Wang Shaonan(王少楠), Tang Guoyi(唐国翌), Xu Zhuohui(徐卓辉) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2010, 39(11): 1997
- [11] Tang G Y, Zhang J, Zheng M X *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2000, 281(1-2): 263
- [12] Xu Z, Tang G, Tian S *et al. Journal of Materials Processing Technology*[J], 2007, 182(1-3): 128
- [13] Tian Shaoquan(田绍权), Xu Zhuohui(徐卓辉), Tang Guoyi(唐国翌). *Transactions of Materials and Heat Treatment*(材料热处理学报)[J], 2006(6): 103
- [14] Qin R S, Samuel E I, Bhowmik A. *Journal of Materials Science*[J], 2011, 46(9): 2838
- [15] Qin R S, Rahnama A, Lu W J *et al. Materials Science and Technology*[J], 2014, 30(9): 1040
- [16] Rahnama A, Qin R S. *Materials Science and Engineering A*[J], 2015, 627: 145
- [17] Wang H, Chen L, Liu D *et al. Materials Science and Technology*[J], 2015, 31(13a): 1564
- [18] Kondratenko K, Gousskov A, Gousskov M *et al. Mechanisms and Machine Science*[J], 2015, 23: 929
- [19] Liu Fei(刘 飞), Xu Zongjun(徐宗俊). *Machine Design & Research*(机械设计与研究)[J], 1988(6): 14
- [20] Wu Wenge(武文革), Xin Zhijie(辛志杰). *Metal Cutting Theories & Tools*(金属切削原理及刀具)[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2009: 46
- [21] Tian Xue(田 雪), Liu Jinxu(刘金旭), Li Shukui(李树奎) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2016, 45(1): 202
- [22] Zheng Jianyi(郑建毅), He Wen(何 闻), Shi Yanbin(施彦彬). *Journal of Zhejiang University, Engineering Science*(浙江大学学报, 工学版)[J], 2012(8): 1407
- [23] Huang Jinliang(黄金亮), Cao Xingguo(曹兴国), Sun Wanchang(孙万昌). *Development and Application of Materials*(材料开发与应用)[J], 1996(11): 24
- [24] Liu X L, Wen D H, Lin Z J *et al. Journal of Materials Processing Technology*[J], 2002, 129(2): 200

Effect of Electropulsing Assisted Cutting Process on Cutting Properties of Quenched GCr15 Bearing Steel

Zhang Shuo¹, Wang Haibo¹, Zhang Bing¹, Song Guolin¹, Wang Xinglong², Han Bin³, Tang Guoyi¹

(1. Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University, Shenzhen 518055, China)

(2. Shenzhen Pingjin Corporation, Shenzhen 518000, China)

(3. Heilongjiang North Tools Co., Ltd, Mudanjiang 157013, China)

Abstract: Electropulsing was introduced into the cutting process of the high-frequency quenched GCr15 bearing steel. The effect of electropulsing on cutting properties of quenched GCr15 steel was investigated. Results indicate that the main cutting force, axial roughness on machined surface, surface microhardness and tool wear significantly decrease under the effect of electropulsing. For high-frequency quenched GCr15 bearing steel, the electroplasticity effect and Joule heating effect can accelerate the movement of dislocations; thus the material is tempered at a lower temperature and in shorter time, and the plastic deformation ability and the cutting properties of GCr15 bearing steel have a remarkable improvement.

Key words: electropulsing; plastic deformation; cutting force; GCr15 bearing steel

Corresponding author: Tang Guoyi, Ph. D., Professor, Advanced Materials Institute, Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University, Shenzhen 518055, P. R. China, Tel: 0086-755-26036752, E-mail: tanggy@sz.tsinghua.edu.cn