

# 40Cr 调质钢磨削淬硬表面强化的实验研究

## Experimental Research on Grinding Hardening for Quenched and Tempered 40Cr Steel

韩正铜<sup>1</sup>, 张宁菊<sup>2</sup>, 高 顶<sup>1</sup>, 陈冬梅<sup>1</sup>

(1 中国矿业大学 机电工程学院, 江苏 徐州 221008;

2 无锡科技职业学院 机械工程系, 江苏 无锡 214006)

HAN Zheng-tong<sup>1</sup>, ZHANG Ning-ju<sup>2</sup>, GAO Ding<sup>1</sup>, CHEN Dong-mei<sup>1</sup>

(1 College of Mechanical and Electrical

Engineering, China University of Mining and Technology,

Xuzhou 221008, Jiangsu, China; 2 Department of Mechanical

Engineering, Wuxi Vocational School of Technology, Wuxi 214006, Jiangsu, China)

**摘要:** 对 40Cr 调质钢进行磨削强化开展研究, 通过变切深和变进给磨削强化实验, 分析磨削力和比磨削能, 研究强化层深度的变化规律, 并对试件的金相组织进行分析。研究表明 40Cr 调质钢磨削强化具有可行性。

**关键词:** 40Cr 钢; 磨削; 表面强化

中图分类号: TG580 64; TG156 33 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2007)12-0035-04

**Abstract:** This paper tried to carry out test study on grinding hardening of 40Cr steel. Through carrying out the grinding experiments with variable cut depths and feed speeds, the grinding force and the specific grinding energy were analyzed. Furthermore, the changing law of depth of hardening layer was studied, and the metallographic structure of test-piece was analyzed, it showed the feasibility of grinding hardening for 40Cr steel.

**Key words:** 40Cr steel; grinding; surface hardening

钢制零件的表面强化处理, 大多采用传统的高频或中频感应加热淬火。之后一般还要进行磨削加工, 以获得所要求的尺寸精度、形状精度和表面质量。传统的表面淬火加磨削工艺存在两个主要问题: 一是表面强化热处理工艺难以集成到产品生产线上、自动化程度低。二是磨削加工时, 磨削热可能会对已强化材料造成热损伤。长期以来, 国内外研究磨削热所做的工作, 主要集中在将磨削热作为消极因素加以研究。近十几年来, 一些学者研究<sup>[1-3]</sup> 试图主动有效地控制磨削工艺条件, 利用磨削热对工件表层进行热处理, 初步形成了磨削淬硬表面强化技术。

磨削强化处理技术是利用磨削热替代高、中频感应淬火热源对钢件表层进行强化处理, 将磨削加工与表面强化合为一体。磨削强化是磨削加工与表面淬火的集成过程, 其工艺过程如下: 在零件上首先利用粗磨产生的大量磨削热取代传统的表面淬火热源以达到工件表层强化的目的, 然后再精磨获取所要求的精度和表面质量。从而省去感应加热表面淬火工艺, 简化生产工艺。

40Cr 是最常用的合金调质钢, 具有较高的抗拉强度、屈服强度及疲劳强度, 综合力学性能较好。调质后, 可改善其切削性能, 它是目前最常用的表面淬火材料。因此, 研究 40Cr 调质钢的磨削淬硬表面强化技术具有重要意义。

本工作针对经过调质处理后的 40Cr 调质钢, 以不同切深和不同进给速度进行磨削强化实验, 测量磨削过程中的磨削力, 计算比磨削能和热源强度<sup>[4]</sup>。对磨削强化试样进行硬度梯度测试, 确定强化层硬度与工艺参数的关系。对磨削强化试样进行金相组织分析, 考察基体、过渡层和强化层结构特征和磨削强化效果。

## 1 实验

实验系统组成如下: (1) 磨床: MMD7125 精密平面磨床; (2) 砂轮: 棕钢玉砂轮, 直径  $D = 300\text{mm}$ ,  $v_s < 40\text{m/s}$ ; (3) 测力仪: KISTLER 9443B 三向压电式测力仪; (4) 硬度仪: HSX-1000 型全自动显微硬度测试仪; (5) 显微镜: XJZ-6 光学显微镜。

所采用的实验条件及优化后的磨削参数如表 1 所示。

表 1 磨削条件与磨削参数  
Table 1 Grinding condition and parameters

Diameter of grinding wheel/mm	Rotational speed / (r · min <sup>-1</sup> )	Variable depth		Variable feeding		Grinding method	Cooling method
		Feeding / (m · min <sup>-1</sup> )	Depth/mm	Feeding / (m · min <sup>-1</sup> )	Depth/mm		
300	1250	0.40	0.05	0.30	0.15	Normal	Dry grinding
			0.10	0.50			
			0.15	0.75			
			0.20	1.00			
			0.25	1.50			

2 结果与分析

2.1 变磨削参数实验的磨削力分析

磨削力与砂轮轴的振动、加工精度、机床功率消耗、砂轮耐用度、比磨削能和热源强度等密切相关，用磨削力可诊断磨削状态，故将磨削力作为磨削强化评定参数之一。

与切削类似，一般磨削也存在三向力，即沿砂轮径向的法向磨削分力  $F_z$ ，沿砂轮切向的切向磨削分力  $F_y$ ，以及轴向磨削分力  $F_x$ （通常不计）， $F_z$  大于  $F_y$  是磨

削的一个显著特征。切向磨削分力  $F_y$  是计算比磨削能和热源强度的主要参数。

当进给速度  $v_w$  为 0.40m/min 时分别以 0.05, 0.10, 0.15, 0.20mm 和 0.25mm 五种切深对 40Cr 工件进行磨削加工，用动态测力仪记录磨削过程中的磨削力。变切深磨削强化实验中切向磨削力实验结果如图 1a 所示。

当切深  $a_p$  为 0.15mm 时，砂轮分别以 0.2, 0.3, 0.45, 0.8m/min 和 1.2m/min 五种进给速度对 40Cr 工件进行磨削加工，切向磨削力实验结果如图 1b 所示。

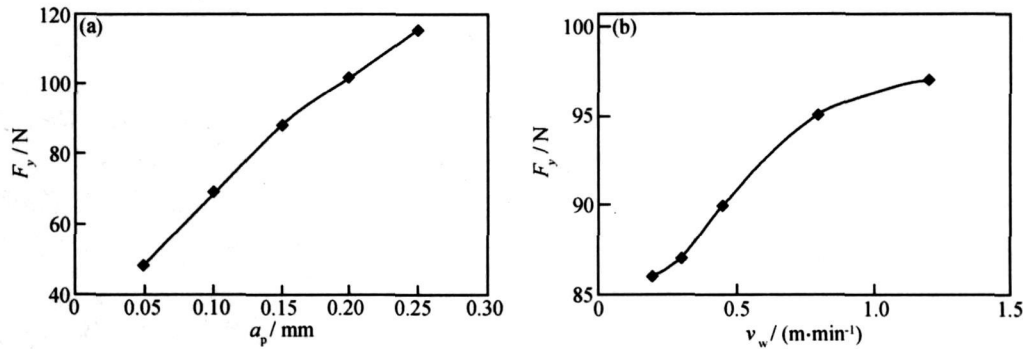


图 1 磨削参数对磨削力  $F_y$  的影响  
(a) 变切深; (b) 变进给  
Fig 1 The effect of grinding parameters on grinding force  $F_y$   
(a) variable depth; (b) variable feeding

2.2 磨削参数对比磨削能的影响

比磨削能为磨除单位体积金属的磨削能量，可以利用式(1)计算：

$$u = \frac{F_y v_s}{10^3 v_w a_p b} \quad (\text{J/mm}^3) \quad (1)$$

式中： $F_y$  为切向力 (N)； $v_s, v_w$  为砂轮及工件线速度 (m/s)； $a_p, b$  为磨削深度与宽度 (mm)。

式(1)可以计算出当  $v_s = 20\text{m/s}$ ,  $v_w = 0.40\text{min}$ ,  $b = 5\text{mm}$ ,  $a_p$  分别为 0.05, 0.10, 0.15, 0.20mm

和 0.25mm 时的比磨削能，得到比磨削能随切深的变化趋势，如图 2a 所示。

当  $v_s = 20\text{m/s}$ ,  $a_p = 0.15\text{mm}$ ,  $b = 5\text{mm}$ ，进给速度分别为 0.2, 0.3, 0.45, 0.8m/min 和 1.2m/min 时的比磨削能如图 2b 所示。

可见，比磨削能随着切深  $a_p$ 、进给速度  $v_w$  增加而非线性减小。

2.3 磨削参数对热源强度的影响

热源强度即为进入工件的能量。热源强度的计算

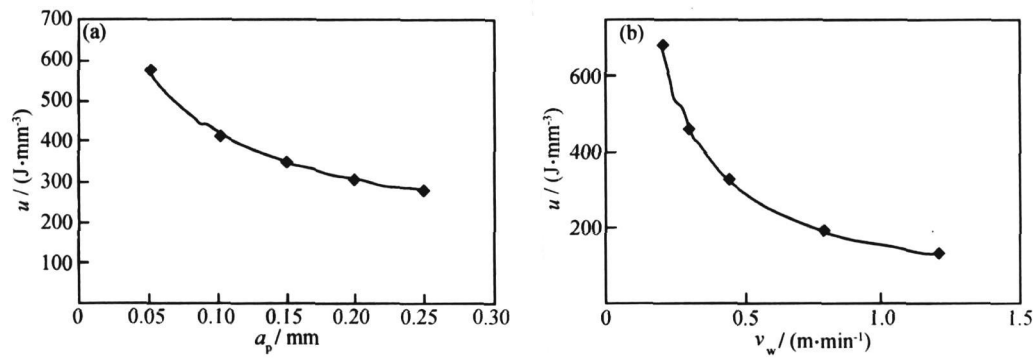


图2 磨削参数对比磨削能的影响  
(a) 变切深; (b) 变进给

Fig. 2 The effect of grinding parameters on grinding ratio energy  
(a) variable depth; (b) variable feeding

是对磨削区温度场的理论分析, 按矩形热源模型建立磨削温度场时的热源强度为

$$q_m = \frac{F_y v_s}{l_s b} R_w \quad (\text{J} \cdot \text{mm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}) \quad (2)$$

式中:  $F_y$  为切向力(N);  $v_s$  为砂轮线速度(m/s);  $b$  为磨削宽度(mm);  $R_w$  为传入工件热量的百分比,  $R_w = 0.7 \sim 0.9$ , 此处选择  $R_w = 0.8$ ;  $l_s$  为砂轮与工件接触长度(mm)。

平面磨削中,  $v_w$  与  $v_s$  相差很大, 可用简化式计算砂轮与工件的接触长度, 即:

$$l_s = \sqrt{D a_p} \quad (3)$$

式中:  $D$  为砂轮直径。

当  $v_s = 20 \text{ m/s}$ ,  $v_w = 0.40 \text{ m/min}$ ,  $b = 5 \text{ mm}$ ,  $R_w = 0.8$ ,  $a_p$  分别为  $0.05, 0.10, 0.15, 0.20 \text{ mm}$  和  $0.25 \text{ mm}$  时的热源强度计算结果如图 3a 所示。

当  $v_s = 20 \text{ m/s}$ ,  $a_p = 0.15 \text{ mm}$ ,  $b = 5 \text{ mm}$ ,  $R_w = 0.8$ ,  $l_s = 6.71 \text{ mm}$ , 进给速度分别为  $0.2, 0.3, 0.45, 0.8 \text{ m/min}$  和  $1.2 \text{ m/min}$  时的热源强度计算结果如图 3b 所示。

可见, 热源强度随着切深  $a_p$ 、进给速度  $v_w$  增加而逐渐增强。

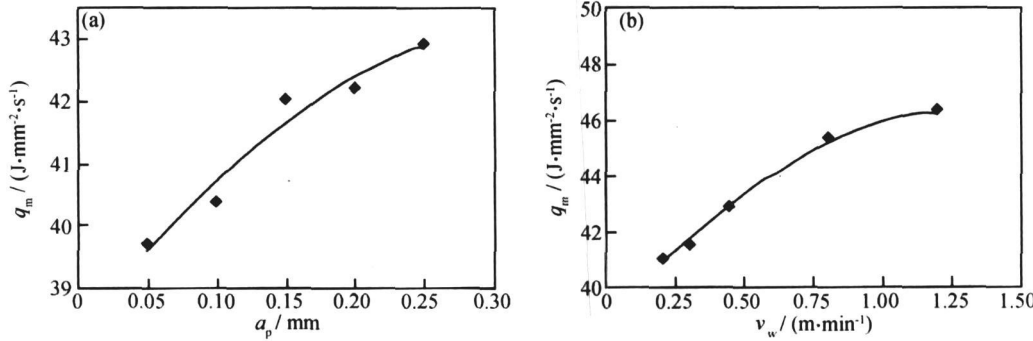


图3 磨削参数对热源强度的影响  
(a) 变切深; (b) 变进给

Fig. 3 The effect of grinding parameters on heat flux  
(a) variable depth; (b) variable feeding

2.4 磨削参数与强化层深度的关系

变切深时硬度梯度测量结果显示, 基体硬度集中在 HV200 (HRC18.7) 左右, 强化层硬度集中在 HV560 (HRC53) 左右, 强化层硬度是基体硬度的 2.8 倍, 是常规淬火硬度 (HV509) 的 1.1 倍, 与中频感应加热淬火的效果相似。进给速度  $v_w = 0.40 \text{ m/min}$  时切深与强化层的关系如图 4 所示。可以看出: 随切深

的增加, 强化层的深度也增加, 但当切深到  $0.20 \text{ mm}$  时, 随切深增加强化层深度反而减小, 这与热源强度随切深的变化规律不吻合, 说明按普通磨削矩形分布运动热源建立的磨削温度场理论模型不完全适合于 40Cr 钢变切深时的磨削强化。  
变进给速度时硬度梯度的测量结果显示, 强化层硬度集中在 HV600 (HRC57) 左右。切深  $a_p =$

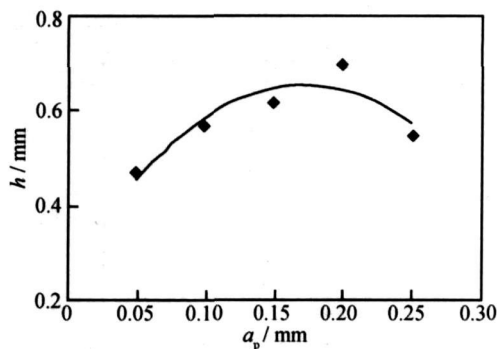


图 4 变切深对强化层的影响

Fig. 4 The effect of variable depth on hardening layer

0.15 mm 时进给速度与强化层的关系如图 5 所示。可以看出: 随着进给速度的减小, 强化层的深度逐渐增加。提高工件进给速度  $v_w$ , 可使热源强度增加, 却使热源在工件表面上的移动速度加快, 砂轮(等效于热源)和工件表面固定点的接触时间变小, 进入工件表面的热量也相应减少, 使强化层的深度减小。因此采用

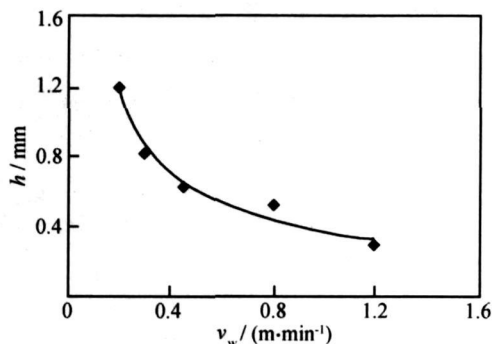


图 5 变进给对强化层的影响

Fig. 5 The effect of variable feeding on hardening layer

缓进给的磨削方式有利于磨削强化。

## 2.5 金相组织

截取  $a_p = 0.20 \text{ mm}$  和  $v_w = 0.40 \text{ m/min}$  的磨削效果较好的稳定磨削阶段的一试样进行抛光腐蚀后观察其金相组织, 如图 6 所示。显微组织可明显分为三部分<sup>[5,6]</sup>: 强化层、过渡层和基体。基体组织为回火索氏体和少量未溶铁素体组织。强化层为马氏体组织, 过渡层为索氏体与马氏体的混合组织, 宽度为 0.3 mm 左右。

可以看出, 磨削强化获得了与感应加热表面淬火相似的表层硬化组织, 强化层由马氏体和碳化物颗粒组成, 其组织具有非均匀形态, 马氏体为超精细的圆状颗粒, 其尺寸沿强化层由外向内逐渐增大, 而位错密度逐渐降低, 其硬度很高, 表层因相变体积膨胀而产生压

应力, 无裂纹出现, 表明磨削强化可行且效果优于感应加热表面淬火。

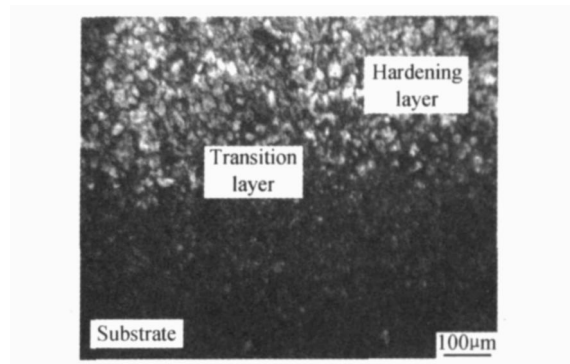


图 6 强化层与基体的显微组织

Fig. 6 Microstructure of hardening layer and substrate

## 3 结论

(1) 随切深的增加, 强化层深度增加, 但强化层深度达到最大值后反而减小。

(2) 如切深不变, 随进给速度的增加, 强化层深度非线性减小。

(3) 磨削强化可获得与感应加热表面淬火相似的表层硬化组织, 硬化表面硬度为 HRC53 左右。强化层与基体间明显存在宽约 0.3 mm 的过渡层。

## 参考文献

- [1] BROCKHOFF T. Grinding-hardening. A comprehensive view [J]. Annals of the CIRP, 1999, 48(1): 255-260.
- [2] ZARUDII, ZHANG L C. Mechanical property improvement of quenchable steel by grinding [J]. Journal of Materials Science, 2002, 37(18): 3935-3943.
- [3] 刘菊东, 王贵成. 基于磨削加工的表面形变淬火工艺-磨削强化 [J]. 工具技术, 2004, 38(7): 11-14.
- [4] 李伯民, 赵波. 现代磨削技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [5] 张宁菊. 钢件表面的磨削强化处理技术的基础研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学机电学院, 2005.
- [6] 任松赞, 张静江. 钢铁金相图谱 [M]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 2003.

基金项目: 中国矿业大学科技基金资助项目(2006B009); 江苏高校高新技术项目(JH03-001)

收稿日期: 2007-02-05; 修订日期: 2007-09-28

作者简介: 韩正铜(1960—), 男, 中国矿业大学副教授、博士, 主要从事先进制造技术方面的教学和科研工作, 联系地址: 江苏徐州中国矿业大学机电学院(221008)。E-mail: cumthanzt@126.com