doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.2016.02.017

预应力干磨削加工 40Cr 工件表面微结构损伤 *

关宏博¹,陈 磊¹,张修铭¹,张天乐²,修世超¹

(1. 东北大学 机械工程与自动化学院, 沈阳 110189; 2. 克莱姆森大学 机械工程系, 美国 克莱姆森市 SC29634)

摘 要:表面残余应力、表面烧伤、磨削裂纹等表面微结构损伤是评价零件表面质量的重要指标,直接影响零件的使用 寿命,严重时造成零件失效。为研究预应力干磨削加工零件表面微结构损伤特征及规律,以40Cr材料为载体,开展预 应力磨削加工试验研究,检测残余应力、硬度,并采用 SEM、EDS 等方法分析表面层形貌和化学成分。结果表明,试件加 工表面存在淬硬现象,预应力对工件表层残余应力有较好的抑制作用,表层残余拉应力随磨削深度增大而增大,随预应 力增大而减小。磨削深度对熔融涂覆及表面微裂纹损伤影响程度较大,磨削烧伤表面形成氧化膜会影响零件使用性 能。预拉应力通过改变残余应力状态而对表面磨削微裂纹损伤起到抑制作用。

关键词:预应力;干磨削;40Cr;残余应力;微损伤;表面裂纹

中图分类号: TG580.6 文献标志码: A 文章编号: 1007-9289(2016)02-0117-06

Surface Micro-structure Damage of 40Cr Samples in Pre-stressed Dry Grinding Process

GUAN Hong-bo¹, CHEN Lei¹, ZHANG Xiu-ming¹, ZHANG Tian-le², XIU Shi-chao¹

School of Mechanical Engineering and Automation, Northeastern University, Shenyang 110189;
 Department of Mechanical Engineering, Clemson University, Clemson SC29634, USA)

Abstract: Surface residual stress, surface burns, ground cracks and other surface micro-structure damages, which affect the service life of parts directly and even cause serious component failure, are important factors to measure the surface quality of parts. A pre-stressed dry grinding test was performed for 40Cr steel and residual stress, hardness were also tested. The morphology and chemical composition of the surface layer were studied by adopting the analytical methods, such as SEM and EDS. The results show that the surface layer of sample is hardened, and pre-stress restrains residual tension stress. Residual tension stress increases with increasing of grinding depth and decreases with increasing of the pre-stress. The grinding depth has a significant effect on surface melting coating and micro-crack damages. The oxidation film caused by grinding burn can affect the performance of sample. Pre-stress can reduce the grinding micro-crack damages by changing the residual stress.

Keywords: pre-stressed; dry grinding; 40Cr; residual stress; micro-structure damage; surface cracks

0 引 言

磨削加工是一种重要的机械加工工艺,磨削 过程中产生大量的磨削热将严重影响工件的表 面质量。同时磨削热以及控制磨削温度而使用 的磨削液也会对环境造成影响。磨削淬硬技术 通常是在干磨削条件下利用磨削热把材料快速 加热到相变温度,并以大于马氏体相变临界冷却 速度急速冷却,使得工件表面发生马氏体相变, 实现表层强化^[1-2]。预应力磨削技术通过施加预 应力可有效地的控制表面残余应力,使零件在磨

收稿日期:2015-08-28; 修回日期:2016-03-17; 基金项目: * 国家自然科学基金(51375083); 沈阳市科学技术计划(F16-205-1-02) 通讯作者:修世超(1958—), 男(汉), 教授, 博士; 研究方向:表面完整性控制与先进磨料加工技术; Tel: (024) 8368 1875; E-mail: shchxiu@mail.neu.edu.cn

网络出版日期: 2016-04-13 11:27; 网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.tg.20160413.1127.008.html 引文格式:关宏博,陈磊,张修铭,等. 预应力干磨削加工 40Cr 工件表面微结构损伤[J].中国表面工程, 2016, 29(2): 117-122. GUAN H B, CHEN L, ZHANG X M, et al. Surface micro-structure damage of 40Cr samples in pre-stressed dry grinding process[J]. China Surface Engineering, 2016, 29(2): 117-122. 削加工后,表面层产生理想应力状态,提高了零件抗疲劳强度,延长零件使用寿命。这两种技术都有各自突出特点,也存在不足。磨削淬硬技术虽然在磨削加工时能实现表面淬硬,但不能实现 对工件表面残余应力的主动控制。预应力磨削 技术虽然在磨削加工的同时可以控制工件表面 残余应力,但不能实现表面强化,没有将磨削热 加以利用。预应力干磨削技术是融合了预应力 磨削和磨削淬硬技术的一种新工艺,既能实现表 面残余应力的控制又能够实现表面强化,绿色度 更高^[3]。目前磨削淬硬加工通常采用低速大切 深、小进给量的方式进行,而普通切深磨削在工 程中更为常见^[4]。

文中主要针对常规磨削速度和普通切深范 围进行讨论并开展试验,具有一定的工程实际应 用价值。目前对零件表面微结构损伤研究主要 集中在表面层残余应力、烧伤和裂纹等^[5]。零件 表面残余应力受磨削温度、塑性变形、比容变化、 挤压作用以及金相组织等综合影响。与磨削加 工时磨削热的产生与冷却有关的因素,都在不同 程度上影响磨削烧伤。磨削裂纹也与磨削热有 关,磨削裂纹与一般淬火裂纹不同,只发生在磨 削表面上,深度较浅,且深度基本一致^[6-7]。

文中针对 40Cr 材料工件开展普通切深预应 力干磨削试验研究,重点分析工件表面微结构损 伤特征与产生机制。

1 预应力干磨削试验

1.1 设备及材料选择

选用型号为 M7120A 平面磨床,选用粒度号 F46、直径 250 mm、陶瓷结合剂的白刚玉砂轮。 针对 40Cr 合金钢试件在施加预应力的条件下进 行平面干磨削试验。试件加工尺寸为 50 mm× 10 mm×22 mm,其中磨削宽度为 10 mm。预应 力是通过试件在磨削前沿磨削方向施加预拉力 来实现的,并且在加工时保持这个预拉力,在磨 削加工结束后撤掉该拉力(如图 1 所示)。试验 采用自主设计的预应力施加夹具,通过施加预紧 力矩的方式加载预拉应力。

根据预应力夹具的装夹范围以及预应力磨 削的需要,考虑后续试验的测量,试件为特殊加 工,预紧力矩与预应力的关系表达式可表示为:

$$\sigma = \frac{6M}{2df_c A + 3d_2 A \frac{P + \pi d_2}{\pi d_2 - Pf}} \tag{1}$$

式中: σ 为施加在试件上的预应力, MPa; *M* 为螺杆上所施加的预紧力矩, Nm; *f* 为螺纹摩擦 因数; f_e 为螺旋副的摩擦因数; *A* 为试件的横截 面面积, mm²; d_2 为螺杆螺纹中径, mm; *d* 为螺杆 螺纹公称直径, mm; *P* 为螺杆螺距, mm。代入 试验值得到简化公式(2), 其中 K 为影响系数, K=7.14×10⁻⁴ mm⁻³。

$$\sigma = \mathbf{K} \cdot \mathbf{M} \tag{2}$$



Fig. 1 Schematic diagram of applying pre - stress of the 40Cr sample

1.2 试验过程

为使试件表面达到奥氏体转变温度并达到 好的强化效果,采用干磨削顺磨的方式。砂轮线 速度 37.7 m/s,进给速度 0.022 m/s,磨削宽度 10 mm。预应力干磨削试验条件如表 1 所示。 图 2为干磨削加工后的试件。

表 1 预应力干磨削试验条件

Table 1 Experimental conditions of pre-stressed dry grinding

Sample No.	Grinding	Torque/	Pre-stress/
	depth/ μ m	(N•m)	MPa
0	50	0	0
1	50	40	28.6
2	100	40	28.6
3	150	40	28.6
4	150	60	42.9
5	150	90	64.3



图 2 干磨削加工后的 40Cr 试件 Fig. 2 40Cr sample after pre-stressed dry grinding processing

2 表面残余应力及硬度测量与分析

采用 ASMB2-8 型小直径盲孔残余应力测量 仪测量表面残余应力,测量方案是在试件加工表 面中线位置沿试件加工方向取等间距 3 点测量 的平均值;采用 THV-5 维氏硬度计测量强化层 表面硬度,测量方案是在试件表面垂直于磨削方 向取等间距 3 点测量的平均值。维氏硬度测量 试验力为 1 kg。表面残余应力及表面硬度测量 结果如表 2 所示。

表 2 干磨削加工后表面残余应力及硬度测量结果

Table 2Measurement results of the surface residualstress and hardness on ground surface

Sample	Grinding	Pre-stress/	Residual	Hardness/
No.	depth/ μ m	MPa	stress/MPa	ΗV
0	50	0	104.7	515.8
1	50	28.6	85.4	513.3
2	100	28.6	105.6	671.6
3	150	28.6	125.2	742.5
4	150	42.9	108.6	740.2
5	150	64.3	76.3	735.1

比较表中1、2、3号工件的试验条件及测量 结果可以看出,当磨削条件和施加的预应力相同 时,随着磨削深度增加,工件表面的残余拉应力 与磨削深度呈近似线性关系增长。产生这种变 化的原因从两个方面考虑:一方面是因为随着磨 削深度的增大,磨削的接触弧长变长,磨削所产 生的热量增多,导致热应力和表层马氏体相变应 力的增加,就表面残余应力而言,这两种是主要 的影响因素,但其对于残余应力的作用相反,试 验结果说明在这一阶段,热应力的影响大于相变 应力;另一方面磨削深度增加导致单位时间内参 与磨削的磨粒数量增多,磨削力增大,使得材料 的冷塑性变形增大,切削作用和挤压作用加大, 但是就 40Cr 材料而言,其对最终残余应力的影 响较小且比较复杂。综合以上因素,因此表层的 残余应力呈现随磨削深度增加而增大的状态。

比较表中 0、1 号工件及 3、4、5 号工件的试验 条件及测量结果可以看出:预应力对残余拉应力 有较好的抑制作用。当其他磨削条件相同时,随 着施加的预应力增加,工件表面残余拉应力值减 小。由于预应力的增大,使得试件在磨削前的拉 伸弹性变形增大,磨削时表层的弹性变形得到释放,在磨削冷却完成后,撤掉预应力,里层金属要恢复会产生较大的收缩,使得表层的残余拉应力减小。

通常情况下,表面淬硬要求硬度达到 55 HRC, 或维氏硬度 600 HV_{1.0},分析表中数据看出,各试件 实现了不同程度的加工硬化。在试验数据范围内, 随磨削深度的增加,淬硬层硬度呈增加趋势,原因是 磨削深度增加,接触弧长、接触面积增加,磨削力也 相应的增加,进而产生更多的磨削热,加速了奥氏体 相变。因此适当增加磨削深度有利于增加表面强化 效果,在所述试验条件下,预应力大小对硬度变化无 显著影响。

3 表面微损伤的检测与分析

3.1 熔融涂覆与磨削烧伤

磨削烧伤是工件材料在磨削弧区高温作用下,表层微观组织发生的一种不可逆变化,弧区最高平均温度是引起磨削烧伤的重要因素,砂轮切削速度对磨削温度影响最大,在试验采用的常规磨削速度(37 m/s)下,各工件表面出现了不同程度的烧伤。

工件表面发生磨削烧伤时,金相组织发生变 化,生成氧化膜。金属处于熔融状态时,可认为 金属发生了相变。磨削接触区温度极高,磨屑在 被去除时发生严重的塑性变形,部分磨屑处于熔 融状态附着在表面上形成涂覆。材料熔融涂覆 痕迹越明显,烧伤越严重。试件表面熔融涂覆与 磨削烧伤 SEM 形貌如图 3 所示。

比较图 3(b)(c)(d)可以发现,随着磨削深度 的增加,工件表面烧伤涂覆程度加大。这是由于 当磨削深度增加时,一方面产生了更多的磨削热 量,使得工件表面更容易发生涂覆损伤;另一方 面,磨削深度增加,磨削力增大,使得被切除的工 件材料增多,产生更多的磨屑,为涂覆的产生提 供了更有力的条件。可以发现,比较图 3(a)(b) 及图 3(d)(e)(f)预应力对表面涂覆烧伤影响较 小,试验对工件表面施加预应力数值较小,对被 加工区域材料的物理属性影响较小,对磨削热的 传导影响不明显,因此对工件烧伤的影响并不明 显。烧伤损伤中热的作用机理占主导地位,因而 能够影响磨削热量的因素都会对其表面烧伤产 生影响。





3.2 表面磨削裂纹

干磨削的过程中,磨削接触区内的磨削热导 致试件表面产生热应力和金相组织引起的体积 变应力,表面某一位置的残余应力大于材料的断 裂极限从而在工件表面产生磨削裂纹或显微裂 纹^[8],这会影响零件的抗疲劳强度、抗腐蚀氧化 能力和断裂强度。

图 4 为于磨削后 40Cr 试件表面裂纹 SEM 形貌,文中选取 0、1、3、5 号工件进行对比。0 号 件和 3 号件表面产生了一定程度的呈龟甲状的 裂纹(见图 4(a)(c))。这种裂纹受残余应力的影 响,在次表层形成裂纹源延伸到表面,在磨削中, 次表层受磨削热造成的热应力、相变应力、冷塑 性变形的综合作用产生极大的残余拉应力,当某 一位置的残余拉应力超过材料的断裂极限,就会 在次表层形成微裂纹。随着时间推移次表层裂 纹延伸到表面就形成了表面的龟甲状微裂纹,这 种裂纹的深度相对较深,对表面质量和零件的使 用寿命影响较大。1号件表面未出现龟甲状的裂 纹,在熔融涂覆区出现了裂纹(见图 4(b))。它是 片状磨屑熔融粘结到磨削表面,冷却收缩产生残 余拉应力,拉应力数值超过材料断裂极限,形成 熔融涂覆区裂纹,这类裂纹对于磨削基体表面的 影响较小,它会使得该区域的涂覆层极易从表面

脱落下来,影响零件的后续使用。5号件表面在 垂直于磨削方向出现呈平行分布的线型裂纹(见 图 4(d)),它是由于磨削时产生大量的磨削热使 得表层发生马氏体相变膨胀,冷却后局部马氏体 收缩,表层受拉应力作用形成的裂纹。这类裂纹 一般深度较浅,分布均匀,只存在于局部浅层表 面,对零件的危害较小。

比较图 4(b)(c)可看出试件表面裂纹随磨削 深度增加而有所增大。因为磨削深度增加导致 磨削热增大,马氏体相变使表层产生更大的组织 应力,组织应力和热应力的叠加导致表层裂纹加 大。比较图 4(a)~(d)可看出,施加预应力可以 减少表面裂纹损伤。因为磨削加工后卸载预拉 力,工件里层金属收缩,弹性拉伸变形恢复,表层 产生残余拉应力减小,产生残余压应力的趋势增 加。抑制了裂纹的生成与扩展,表层材料的组织 结构致密性增加,表面完整性得到改善。此外, 施加预应力使得试件弹性变形组织松散,影响奥 氏体生成速度,改变晶相变化应力大小,对磨削 裂纹分布产生影响。

3.3 能谱分析

采用能谱仪(EDS)配合扫描电子显微镜 (SEM)分析干磨削后 40Cr 工件表面成分。未烧 伤磨削表面和烧伤磨削表面 EDS 分析及各元素 的质量分数如图 5 和图 6 所示。分析数据可知: 烧伤表面相比未烧伤表面元素含量变化较大的 为氧,因磨削高温使表层铁被氧化,形成 Fe₃O₄。 碳元素含量的变化是由于有 Fe₃C 析出。烧伤表 面附着断续分布的氧化膜,氧化膜厚度不均,在 使用过程中,极易脱落。其表面形貌结构复杂无 规律,存在大量孔洞裂纹等,易被腐蚀和氧化。 烧伤严重区域,由于磨削热引起表面晶格畸形和 晶界错位,化学成分不均造成电位差,易发生电 化学腐蚀,影响零件使用。



(a) Sample 0







(d) Sample 5 图 4 40Cr 试件表面裂纹 SEM 形貌

Fig. 4 Surface morphologies of the surface cracks of 40Cr samples



图 5 未烧伤表面形貌及能谱分析 Fig. 5 Surface morphologies and EDS analysis of the unburnt surface



图 6 烧伤表面形貌及能谱分析 Fig. 6 Surface morphologies and EDS analysis of the burnt surface

因此工件表面烧伤影响其表面质量,使零件 抗腐蚀能力和耐疲劳能力下降,影响使用性能, 减少使用寿命。

4 结 论

(1)预应力干磨削过程中,预应力对工件表 层残余应力有较好的抑制作用,表面残余应力随 磨削深度增大而增大,随预应力增大而减小。

(2)在试验条件下,加工强化表面存在淬硬 现象,适当增加磨削深度有利于增加表面强化效 果;预应力大小对硬度变化无显著影响。

(3) 磨削深度对表面熔融涂覆影响程度较大,随着磨削深度的增加,工件表面熔融涂覆现象趋于明显;预应力对熔融涂覆无显著影响。

(4) 干磨削加工表面形成一定的氧化膜。磨 削深度增加微裂纹尺度有所增大。预拉应力通 过改变残余应力状态而对表面磨削微裂纹损伤 起到抑制作用。

参考文献

- [1] 刘菊东,王贵成.基于磨削加工的表面形变淬火工艺—— 磨削淬硬[J].工具技术,2004,38(7):11-14.
 LIU J D, WANG G C. Surface deformation quenching process based on grinding-grind hardening[J]. Tool Engineering, 2004, 38(7): 11-14(in Chinese).
- [2] XIU S C, CAI G Q, LI C H. Study on surface finish mech-

anism in quick – point grinding [J]. International Journal of computer applications in technology, 2007, 29(2): 163-167.

[3] 修世超,白斌,张修铭,等.预应力淬硬磨削复合加工表 面硬化试验研究[J].东北大学学报,2015,36(1): 86-90.

XIU S C, BAI B, ZHANG X M, et al. Study of the surface hardening in pre-stressed hardening grinding combined machining[J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2015, 36(1): 86-90(in Chinese).

- [4] 张修铭,于永涛,白斌等.小切深磨削条件下工件表面硬 化机理[J].中国机械工程,2015,26(7):949-953.
 ZHANG X M, YU Y T, BAI B, et al. Surface hardened mechanism of grinding conditions in small depth of cut[J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(7):949-953(in Chinese).
- [5] LI K, LIAO T W. Surface/subsurface damage and the fracture strength of ground ceramics [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1996, 57(3/4): 207-220.
- [6] ALI Y M, ZHANG L C. Estimation of residual stresses induced by grinding using a fuzzy logic approach [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997, 63(1-3): 875-880.
- [7] LIU X, ZHANG B. Machining simulation for ceramics based on continuum damage mechanics [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2002, 124(3): 553-561.
- [8] 高铁生. 磨削裂纹产生的原因与控制[J]. 热处理技术与装备, 2007(6): 54-55.

GAO T S. The reason and control for grinding crack generating[J]. Heat Treatment Technology and Equipment, 2007(6): 54-55(in Chinese).

122