

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2020.08.012

CBN 砂轮对 GCr15 钢的磨削硬化试验研究*

张 宇, 梁国星*, 张 浩, 郝建宇, 程 强
(太原理工大学 机械与运载工程学院, 山西 太原 030024)

摘要: 为了对磨削硬化加工提供更多的理论依据, 采用 CBN 砂轮对 GCr15 钢进行了磨削硬化试验, 对磨削硬化加工过程中磨削组织的变化, 以及磨削参数对磨削硬化层的硬度及其分布的影响进行了分析与研究。采用暗场显微镜观测了磨削前后 GCr15 钢的组织变化, 并分析了组织变化的原因; 采用显微维氏硬度计分析了硬化层硬度均匀性以及产生硬度不均匀性的原因; 通过磨削硬化试验组研究了磨削参数对硬化层硬度的影响, 并从磨削热的角度分析了产生此类影响的原因。研究结果表明: 硬化层深度为 0.12 mm, 工件微观组织的转变是影响磨削过程中硬化层硬度均匀性的主要因素, 适当提升磨削深度和工件进给速度可以获得更高的硬化层硬度, 加快工件的冷却速率也可以提升硬化层的硬度。

关键词: 磨削硬化; GCr15; 硬度分布; 一致性; 磨削热

中图分类号: TH161.1; TG580.6

文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2020)08-0926-05

Experimental study on grind-hardening of GCr15 steel with CBN grinding wheel

ZHANG Yu, LIANG Guo-xing, ZHANG Hao, HAO Jian-yu, CHENG Qiang

(College of Mechanical and Vehicle Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: In order to provide more theoretical basis for the grind-hardening process, CBN grinding wheel was used for the grind-hardening test of GCr15 steel, the changes of the grinding organization during the grind-hardening process and the influence of the grinding parameters on the hardness and distribution of the hardened layer were analyzed and studied. The dark-field microscope was used to observe the microstructure changes of GCr15 steel before and after grinding, and the reasons for the microstructure changes were analyzed. The micro-Vickers hardness tester was used to analyze the hardness uniformity of the hardened layer and the causes of the hardness nonuniformity. The influence of the grinding parameters on the hardness of the hardened layer was studied by the grind-hardening test group, and the causes of such effects were analyzed from the perspective of grinding heat. The results indicate that the depth of the hardened layer is 0.12 mm, the transformation of the microstructure of the workpiece is the main factor affecting the hardness uniformity of the hardened layer during the grinding process. Properly increasing the grinding depth and workpiece feed rate can achieve higher hardness of the hardened layer, and increasing the cooling rate of the workpiece can also increase the hardness of the hardened layer.

Key words: grind-hardening; GCr15; hardness distribution; consistency; grinding heat

0 引 言

磨削硬化是 20 世纪 90 年代新出现的一种复合加工技术, 利用磨削热对可淬硬钢表面进行加热, 并利用工件基体的快速自冷却及磨削力的综合作用来实现材

料表面硬化的新工艺。该工艺可以显著提高工件表面硬度和耐磨性, 达到了与表面硬化处理相同的性能^[1]。该技术将磨削技术与热处理技术很好地结合在一起, 符合工程中日益倡导的过程集中和绿色制造的理念, 发展潜力很大。磨削硬化效果是通过磨削硬

收稿日期: 2019-11-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51575375); 山西省自然科学基金资助项目(201801D211174)

作者简介: 张宇(1994-), 男, 河南洛阳人, 硕士研究生, 主要从事先进制造技术方面的研究。E-mail: 445817717@qq.com

通信联系人: 梁国星, 男, 教授, 硕士生导师。E-mail: Lianguoxing@tyut.edu.cn

化层来实现的,磨削硬化层的性能随显微组织的不同而不同。

大量实验研究了磨削硬化过程中硬化层的形成机理。结果表明,与常规淬火方法相比,磨削硬化工艺可以产生磨削硬化层,其组织为细小马氏体结构。现阶段对于磨削硬化国内外学者做了大量的研究,并取得了若干创新成果。刘菊东^[2-3]对 40Cr、65Mn 钢进行了磨削硬化实验,结果表明在磨削温度和应力的综合作用下,完全硬化区硬度与基体相比提高了 2.2 倍。硬化层中奥氏体从表面到里层逐渐细化,其组织形貌呈现由细到粗再到细的规律;ORTEGA N^[4]对 AISI 1045 钢磨削硬化过程进行了建模并通过磨削硬化试验对模型进行了校正。研究表明,可以通过在与磨削加工表面平行的表面施加热源来模拟磨削硬化过程;ZARUDI I^[5]针对 AISI 4140 钢研究了磨削硬化层组织的形成以及磨削淬硬层的摩擦磨损与弯曲疲劳性能。实验结果表明,磨削淬硬层是在温度场与应力场的共同作用下形成的,磨削硬化层表面以下 5 μm~6 μm 处有细小的针状马氏体组织结构,并且磨削淬硬层中马氏体结构的尺寸由表及里逐渐增大。综上所述,磨削硬化已受到广大学者的广泛关注,文章系统地研究了磨削硬化层组织变化,分析了硬化层硬度均匀性以及磨削参数对硬化层硬度的影响,为磨削硬化加工提供了理论依据。

目前,国内外学者在磨削硬化领域已有了一些研究进展,但大多集中于白刚玉、棕刚玉砂轮^[6-8]。CBN 砂轮具有高硬度、耐高温、磨削性能好等优良特征,在 GCr15 产品加工时,为同时兼顾其加工质量和加工效率,有必要开展磨削硬化加工。

本文采用电镀 CBN 砂轮对 GCr15 钢进行磨削硬化实验,通过实验结果分析磨削条件对于磨削硬化层的影响,并探究影像磨削硬化层均匀性的主要因素。

1 平面磨削试验

试验用样件材料为退火态 GCr15 钢,初始硬度为 212 HV。

GCr15 钢化学成分如表 1 所示。

表 1 GCr15 钢化学成分(质量分数/(%))

C	Cr	Mn	Si	Ni	Cu	Mo
0.95~1.05	1.30~1.65	0.20~0.40	0.15~0.35	0.30	0.25	0.10

GCr15 钢微观组织结构如图 1 所示。

退火态 GCr15 钢在磨削前内部组织为铁素体、珠光体、碳化物的混合结构,从图 1 可以看出试件通过球化退火,球粒状碳化物大量分布在铁素体基体上,从而降低了表面硬度,改善了工件的切削性能,并且淬火时

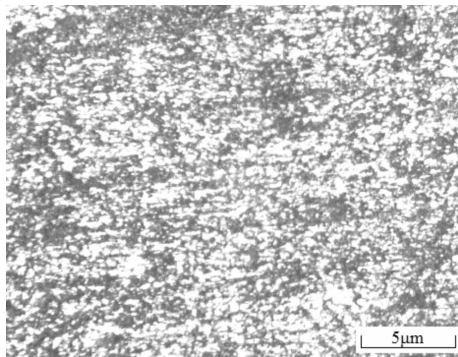


图 1 GCr15 钢微观组织结构

不易造成过热现象^[9]。

笔者用 MV-40 数控加工中心对 GCr15 钢进行磨削硬化试验,采用电镀 CBN 砂轮,直径 100 mm,磨粒粒度 200#,磨削方式为干磨与切入式逆磨。磨削后用电火花线切割机切取试件,用粒度不同的砂纸打磨并抛光,使试件表面呈镜面状,然后用 4% 硝酸酒精溶液侵蚀,最后用无水乙醇清洗以去除表面污物。采用暗场显微镜观察表面微观组织,使用硬度检测仪对硬度进行观察与研究。

试验过程中采用的试验参数如表 2 所示。

表 2 试验参数

Workpiece no.	Grinding depth/μm	Feeding speed/(m·min ⁻¹)	Grinding wheel speed/(m·s ⁻¹)
1	200	0.4	30
2	300	0.4	
3	400	0.4	
4	300	0.2	
5	300	0.6	

2 试验结果与分析

2.1 磨削表面组织分析

GCr15 钢磨削硬化层组织分布如图 2 所示。

图 2 为 2 号工件磨削硬化层的微观组织分布。通常认为 GCr15 钢淬火后的显微组织常由黑、白相间的两种马氏体区域所组成,结合图 1,磨削后工件表面形貌与磨削前有明显差异。从原理上分析,主要是由于在磨削过程中,工件磨削表面受到大量磨削热导致温升,使工件表面形貌发生改变。

从实验结果来看,工件硬化层可分 3 个部分,即:完全硬化区、过渡区和基体。在 GCr15 钢的磨削过程中,当磨削表面温度超过工件相变温度时,工件原始组织发生相变,经自我快速冷却后形成完全硬化层,完全硬化层由细小马氏体、分布在马氏体基体上的白色球状碳化物和少量残留奥氏体组成^[10]。完全硬化层与

基体之间因为温度小幅度削弱的原因出现过渡层,过渡层的组织由部分马氏体、铁素体和碳化物组成^[11]。

基体组织在硬化过程中没有发生相变。由于磨削力的作用,基体中的铁素体出现严重的断裂。

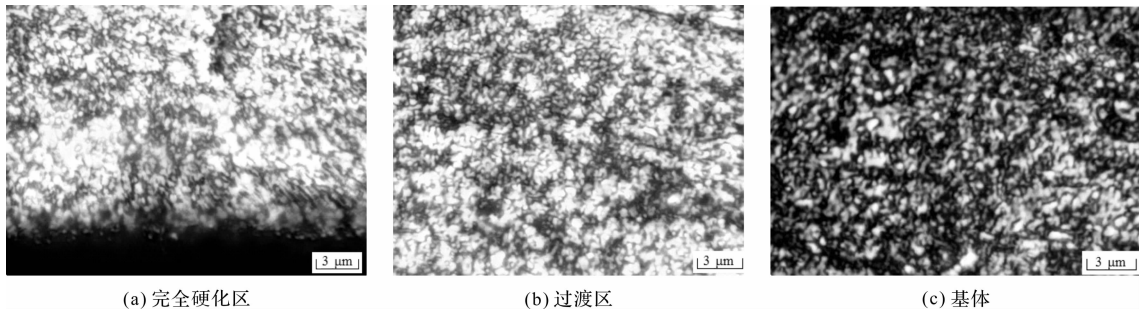


图2 磨削硬化层组织分布

2.2 硬化层硬度均匀性及分析

通过表面磨削实验,笔者用 HMV-G 显微维氏硬度计测定了 1 号至 6 号工件表面不同位置的显微硬度。

硬度测量结果如表 3 所示。

表3 硬度测量结果(HV 0.5)

Workpiece no.	Position along the width direction/mm	Distance from cutting-in point/mm				
		15	30	45	60	75
1	1.5	536.8	467.1	606.5	390.6	634.0
	3.0	539.5	556.4	615.7	594.0	643.5
	4.5	555.7	528.5	487.4	623.4	634.0
2	1.5	566.1	658.6	671.4	643.1	684.4
	3.0	598.9	658.6	658.9	662.3	666.1
	4.5	485.2	513.2	641.5	662.8	662.8
3	1.5	597.5	645.4	645.4	741.3	804.6
	3.0	615.9	666.2	666.5	692.7	746.1
	4.5	645.3	738.0	684.4	684.4	746.1
4	1.5	624.8	669.4	606.5	664.9	602.7
	3.0	588.4	658.6	647.4	673.5	784.1
	4.5	710.8	539.3	665.6	632.4	754.7
5	1.5	592.8	598.2	576.8	662.6	707.9
	3.0	615.9	615.3	747.8	804.4	743.4
	4.5	734.0	615.3	737.5	771.7	784.1

由表 3 可以看出:磨削后工件表面硬度沿宽度方向变化不明显。这表明在工件表面的宽度方向上,热量的传递是相对均匀的;沿砂轮进给方向,也就是磨削方向,硬度有逐渐变大的趋势。可以认为,工件表面硬度沿磨削方向的存在一定的规律性升高,但是硬度变化并不明显。针对这种现象,笔者只处理沿磨削方向硬度的测量数据,而忽略沿宽度方向硬度分布的数据;进而由于工件表面马氏体呈随机分布,原始组织不均匀,造成数据分布离散,故将结果优化。

硬度测量优化结果如表 4 所示。

分析表 4 数据,砂轮刚进入切入区,产生的磨削热少,所以切入区的硬化层硬度相对较低。在磨削的中

表4 硬度优化结果(HV 0.5)

Workpiece no.	Distance from cutting-in point/mm				
	15	30	45	60	75
1	544.1	556.4	569.8	623.4	634.0
2	566.1	610.7	657.4	662.3	671.1
3	619.5	655.8	665.4	706.1	746.1
4	624.8	658.6	665.6	673.5	713.8
5	604.3	615.3	742.7	746.2	763.8

间区硬度的变化相对缓慢,这是因为在这个区域内磨削温度变化小,传入这段区域得到热量大致相同,在这段长度内硬度具有较高的一致性。在切出区,由于范围的限制,热源积累的时间增加,磨削产生的热只能向工件里传导,造成温度的快速升高从而影响磨削硬化的效果。总体来看,硬度沿着磨削加工的方向呈现逐渐变大的趋势。

综上所述,工件沿长度方向上的受热不均匀是影响硬化层均匀性的重要原因^[12]。在磨削硬化过程中,工件表面硬度值基本保持在稳定状态,高于 512 HV 要求的表面硬度。由此可知,1 号至 5 号工件均实现了磨削硬化,并出现了硬化层。

从微观组织分析原因,工件在磨削硬化加工过程中,珠光体在 Ac1 ~ Ac3 温度范围内首先转变为奥氏体,但由于磨削时间和温度的限制,导致奥氏体成分呈现不均匀性,这种不均匀的奥氏体可能导致马氏体中的碳含量高于钢在磨削硬化层局部区域的平均碳含量。由于碳含量是影响硬度的主要因素,最终硬化层表面硬度呈现出不均匀的特征。另外,在磨削过程中,试件中仍有一些未溶解的渗碳体,即残余碳化物,会影响磨削硬化层硬度均匀性,并且工件材料中原始组织中的分布不均匀也会导致硬度分布不均匀^[13]。

2.3 磨削参数对硬化层硬度的影响

2.3.1 磨削深度对硬化层硬度的影响

对比 1、2、3 号工件不同深度得到的磨削深度对显

显微硬度的影响如图3所示。

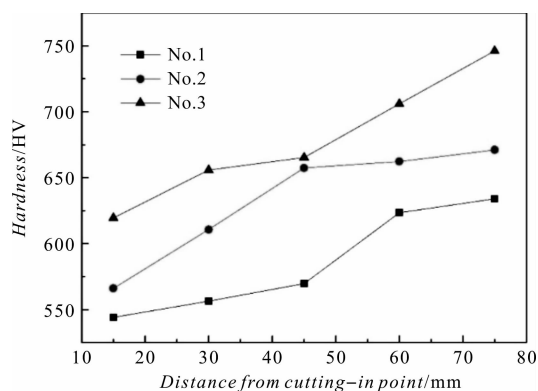


图3 磨削深度对显微硬度的影响

从图3中可以看出:试件表面硬度随着磨削深度的增加而增加。这是由于磨削深度的增加,使得磨料与工件之间的摩擦和压缩增大。此外,磨削比高,在加工过程中产生大量的热量,导致磨削区温度较高。磨削比能高,热量大,导致磨削区温度高。因此,工件表面的奥氏体转变完成,马氏体的形成量也随之增加。然后,工件表面硬度最终提高。

2.3.2 工件进给速度对硬化层硬度的影响

对比2号、4号、5号不同进给速度对显微硬度的影响如图4所示。

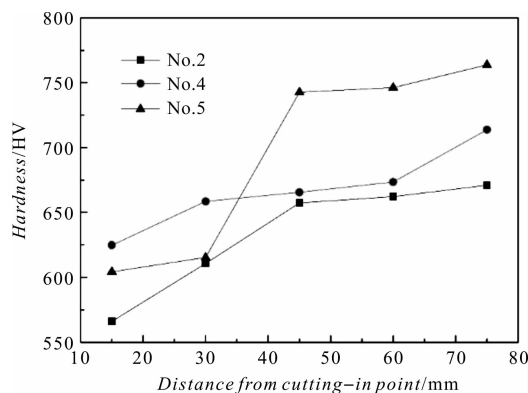


图4 工件进给速度对显微硬度的影响

由图4可知:随着进给速度的增加,表面硬度增加。这是由于进给速度的增加,使得磨削热在工件表面停留的时间缩短。进入工件的热量减少导致硬化层深度降低。与此同时,奥氏体的相变时间缩短,且随着进给速度的增加,奥氏体的形成尺寸变小工件表面。马氏体转变后,当进给速度较低时,马氏体晶粒尺寸明显减小,使表面硬度增大略有增加。

2.4 硬化层深度方向硬度分布

No.2号工件沿深度方向硬度分布如表5所示。

由表5可知:表面硬度随着离表面距离的增加而减小,呈非线性变化。

表5 No.2工件沿深度方向硬度分布

Distance from the surface/mm	Distance from cutting-in point/mm		
	30	45	60
0.05	610.5	605.6	591.4
0.10	515.0	524.4	553.1
0.15	334.6	359.8	348.3
0.20	224.6	222.8	234.3
0.25	226.8	222.8	231.7

由表5所作对照图沿深度方向硬度分布如图5所示。

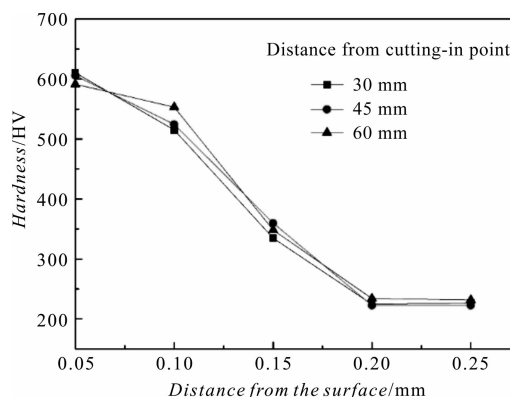


图5 No.2工件沿深度方向硬度分布

由图5可知:在离工件表面0~0.1 mm的位置,硬度变化缓慢,梯度没有明显下降。离工件表面距离再大,硬度迅速下降,最终达到工件基体硬度。根据硬度的变化,将磨削层分为高硬度区、硬度下降区和低硬度区。这一变化的原因是内部温度电导率使得不同区域的微观结构彼此不同。结合图2,3个区域分别对应为完全硬化区、过渡区和基体。

磨削硬化工艺要求硬化层硬度应大于512 HV。因此,本文确定硬度大于512 HV的区域为硬化层。从图5可以看出,随着距离表面的距离增加,工件的硬度逐渐降低。本文得出磨削硬化层的总深度为0.12 mm。

3 硬化层的主动控制

研究表明,硬化层硬度对工件表面完整性的影响至关重要,因此,硬化层硬度的控制是目前磨削硬化技术的关键。

根据上述试验可以得出,要得到高硬度的磨削层,可以通过增加CBN砂轮磨削的深度和工件的进给速度来实现。在硬化层均匀性分析实验中可以看到,沿磨削方向,硬度有逐渐变大的趋势,这是因为随着磨削的进行,磨削热和磨削力急剧增加,导致工件表面温度瞬间增加,组织开始逐渐转变为奥氏体。奥氏体通过工件本身的冷却产生马氏体,工件与空气之间的热流交换和工件内部的导热影响着工件的冷却速率。

通过分析可知,冷却速率也是影响硬化层硬度的

主要原因,且表面硬度随冷却速率的增加而增加。因此也可以通过控制冷却速率来控制硬化层的硬度。

综上所述,可以人为控制增加磨削深度和增加进给速度来提升硬化层硬度,还可以通过加快工件的冷却速率来提升硬化层的硬度。

4 结束语

本文对 GCr15 钢进行了磨削硬化实验,通过实验结果分析了磨削条件对于磨削硬化层的影响,并探究了影像磨削硬化层均匀性的主要因素。主要结论如下:

(1)磨削后观察工件表面微观组织。根据组织的分布,将工件分为完全硬化区、过渡区和基体区。完全硬化区由细小马氏体、白色颗粒状碳化物和少量残留奥氏体组成。过渡区的组织部分由针状马氏体、铁素体和碳化物组成。基体组织在硬化过程中没有发生相变。由于磨削力的作用,基体中的铁素体出现严重的断裂;

(2)磨削后,工件表层出现磨削硬化层。磨削后工件表面硬度沿宽度方向变化不明显,表面硬度沿磨削方向分布存在一定的不均匀现象。主要原因是由于磨削时间和温度的限制,导致工件微观组织的转变不均匀,且工件材料中原始组织中的分布不均匀也会导致硬度分布不均;

(3)硬化层硬度随磨削深度和进给速度的增加而增加。可以人为控制增加磨削深度和增加进给速度来提升硬化层硬度,加快工件冷却速率也可以提升硬化层硬度。硬化层硬度随工件表面深度的增加而降低,试验结果表明,硬化层深度大致为 0.12 mm。

参考文献 (References):

[1] XIU S C, CAI G Q, LI C H. Study on dynamic strength mod-

el of contact layer in quick-point grinding[J]. *Key Eng Mater*, 2006(304-305):570-575.

[2] 刘菊东,王贵成,陈康敏. 65Mn 钢磨削硬化层组织的研究[J]. *中国机械工程*, 2004, 15(17):1573-1576.

[3] 刘菊东,王贵成,陈康敏. 原始组织对 40Cr 钢磨削硬化层的影响研究[J]. *金属热处理*, 2004, 29(12):61-65.

[4] ORTEGA N, ALONSO U, SANCHEZ J A, et al. Modeling of the hardening and finishing stages of grindhardened workpieces[J]. *Int. J. Adv. Manuf. Technol*, 2016(82):435-449.

[5] ZARUDI I, ZHANG L C. Mechanical property improvement of quenchable steel by grinding[J]. *Journal of Materials Science*, 2002, 37(18):3935-3943.

[6] 焦彬. 42CrMo 钢磨削淬硬加工表面完整性及试验研究[D]. 镇江:江苏大学机械工程学院, 2016.

[7] 张修铭,于永涛,白斌. 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):949-953, 954.

[8] 刘菊东,王贵成,陈康敏. 45 钢磨削硬化的试验研究[J]. *材料科学与工艺*, 2005, 13(3):326-328, 333.

[9] 任颂赞. 钢铁金相图谱[M]. 上海:上海科学技术文献出版社, 2003.

[10] 李刚,相珺,况军,等. GCr15 钢表面激光淬火的组织与性能[J]. *材料热处理学报*, 2010, 31(4):129-132.

[11] 王泽宁,崔洪芝,张国松,等. GCr15 钢表面感应淬火微观组织及室温干滑动磨损行为[J]. *材料热处理学报*, 2015, 36(11):180-186.

[12] 何深荣,王彦东,耿志杰,等. 40Cr 材料干磨削表面硬化层一致性仿真研究[J]. *精密制造与自动化*, 2016(2):7-10.

[13] LIU Ming-he, ZHANG Ke, XIU Shi-chao. Mechanism investigation of hardening layer hardness uniformity based on grind-hardening process[J]. *Int. J. Adv. Manuf. Technol*, 2017, 88(9-12):3185-3194.

[编辑:方越婷]

本文引用格式:

张宇,梁国星,张浩,等. CBN 砂轮对 GCr15 钢的磨削硬化试验研究[J]. *机电工程*, 2020, 37(8):926-930.

ZHANG Yu, LIANG Guo-xing, Zhang Hao, et al. Experimental study on grind-hardening of GCr15 steel with CBN grinding wheel[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2020, 37(8):926-930.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>