

# 高速钢激光相变强化层的耐磨性及 刀具的切削性能

陈传忠 于慧君\* 朱瑞富 周香林 于家洪 王世清

(山东工业大学材料科学与工程学院·机械工程学院, 济南 250014)

**提要** 研究了 W18Cr4V 高速钢激光相变强化层的组织和耐磨性能, 并对高速钢刀具的切削性能及失效形式进行了分析讨论。结果表明: 高速钢经激光相变强化后组织和性能得到了很大的改善, 硬度达 1003Hv<sub>0.1</sub> 以上, 且韧性有显著提高, 耐磨性提高了 2~8 倍, 刀具激光相变强化后, 寿命提高了 3~5 倍, 是以磨损形式失效的。

**关键词** W18Cr4V 高速钢, 激光相变强化, 耐磨性, 刀具, 切削性能

## 1 引言

众所周知, 世界能源约有一半以上是以不同形式消耗在克服机械零件对偶表面相互作用的摩擦上, 摩擦磨损是机械设备时效的主要原因之一, 越是重要的机构和复杂的摩擦副其寿命问题越突出(此处“副”的意思为摩擦的对偶件或对磨的零件)。由于摩擦磨损引起的损失使美国经济每年支付 1000 亿美元的巨额资金, 其中材料部分约占 200 亿美元<sup>[1]</sup>; 德国因此损失约 100 亿马克; 我国仅冶金、电力、建材、煤炭和农机五个部门的不完全统计, 每年因磨损消耗钢材 500 万吨, 耗资相当于 50 亿元人民币。因此综合利用摩擦学知识研制新材料、创造新工艺, 通过减磨及抗磨措施来提高构件的寿命将具有巨大的经济意义。利用化学热处理尤其是激光热处理可显著提高材料抵抗摩擦磨损的能力。故本文研究了 W18Cr4V 高速钢激光相变强化层的组织、耐磨性能以及刀具的切削性能和失效形式。

## 2 试验材料及方法

### 2.1 试验材料

试样及刀具材料采用 W18Cr4V 高速钢, 其化学成分(wt.-%)为 C: 0.79, W: 18.7, Cr: 4.2, V: 1.1, S: 0.02, P: 0.017。试样尺寸分别为 10 mm×10 mm×60 mm 和 25 mm×25 mm×25 mm, 车刀尺寸为 18 mm×18 mm×200 mm。锯条侧刀尺寸为  $\phi 58 \times 25$  mm, 齿距为 1.5 mm 及 2.5 mm 两种。表面粗糙度  $R_a = 0.8 \mu\text{m}$ 。试样和刀具的原始热处理状态: 870 °C, 3.5 h, 740 °C, 6 h 球化退火, 1280 °C 油淬, 560 °C, 1 h 三次回火。

## 2.2 试验方法

试样及刀具经丙酮清洗后喷涂黑色有机涂料,选用 HJ-4 型 1500 W 工业横流 CO<sub>2</sub> 激光器加热。试样的激光加热工艺参数见表 1,光束直径为 5 mm,搭接扫描。

Table 1 The technological parameters and the depth of strengthened layers

Sample number	1	2	3	4	5	6	7	
Power (kW)	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	1.2	1.2	
Scanning velocity (mm/s)	1.7	2.1	2.7	3.4	4.3	3.4	4.3	
Layer depth (mm)	1.30	1.05	0.70	0.30	0	1.73	1.73	
Sample number	8	9	10	11	12	13	14	15
Power (kW)	1.2	1.2	1.2	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Scanning velocity (mm/s)	5.4	6.5	8.3	5.4	6.5	8.3	10.2	10.3
Layer depth (mm)	1.52	1.30	1.08	1.80	1.68	1.50	1.30	1.15

刀具的相变强化工艺是在表 1 的优化结果基础上根据刀具的尺寸情况确定的。外圆车刀及端面车刀的相变强化条件:束径为 3.5 mm,功率为 800~1000 W,扫描速度 0.2~1.8 m/min,沿主切削刃单道扫描。锯条刨刀的相变强化条件:采用束径为 3.5 mm,螺距为 2 mm 的螺旋线搭接扫描,功率为 1000~1200 W,扫描速度为 0.5~1.8 m/min,如图 1 所示。

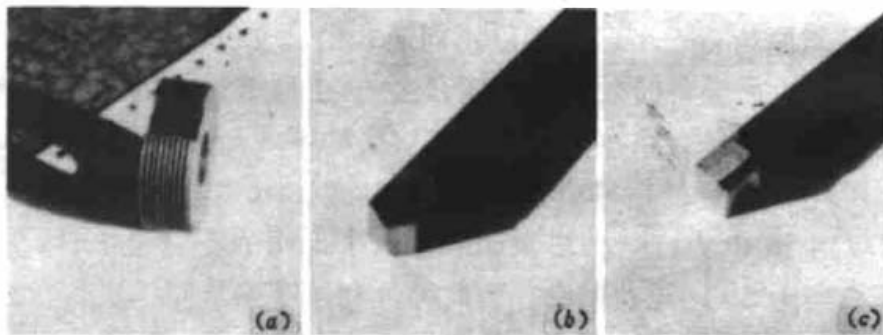


Fig. 1 Cutting tools

(a) saw blade blander tool; (b) excircle lathe tool; (c) planer tools

用 JXA-840 型扫描电镜和 H-800 型透射电镜分析强化层的组织、结构,并用 X 射线衍射仪进行相分析;磨损试验采用 MM200 型磨损试验机,磨轮材料为 YG6,通过磨痕宽  $b$  来计算磨痕体积  $V$  作为磨损性能指标;采用维氏硬度压痕结合声发射法测量韧性;车刀切削试验条件为:车床转速为 360 r/min,进给量为 0.24 mm,切削深度为 1.25 mm,工件状态为 45 钢正火,硬度为 230 HB。锯条刨刀刨削的锯条材料为冷轧状态的 15 钢。

## 3 结果与分析

### 3.1 组织结构

激光相变强化层深度  $\delta$  随工艺参数不同而异,见表 1,层深随激光功率的增加和扫描速度的降低而增加。高速钢常规淬回火组织经激光相变强化后得到了明显的细化,奥氏体晶粒度由常规热处理的 7~8 级提高到 10~12 级,相变区中不同部位的晶粒大小存在明显差别,距表面一定深度处(0.1~0.15 mm),其晶粒度级别最高。X 射线相分析表明,激光相变强化层由马氏

体(M)、残余奥氏体(Ar)及未溶碳化物组成,碳化物类型为  $M_6C$ ,  $MC$ ,  $Cr_7C_3$ 。利用  $\gamma_{220} - \alpha_{211}$  线对定量分析表明, Ar 量随工艺参数的改变而变化,但其体积分数一般在 10~15% 之间,比常规热处理明显减少。透射电镜分析结果表明,相变强化层的 M 为片状和板条状混合组织,如图 2。针状 M 量较大,其亚结构为孪晶[图 2(b)],板条 M 量较少,亚结构为密度较高的位错[图 2(c)]。这是由于激光超快速加热的加热时间极短,碳化物的溶解不完全、碳及合金元素扩散难以充分进行造成激光相变组织微观碳含量及合金元素含量分布不均匀,在富碳区形成大量针状马氏体,而在贫碳区形成一定数量的板条马氏体。这从能谱及电子探针成分分析及碳化物尺寸测定和计算结果得到证明<sup>[2]</sup>。

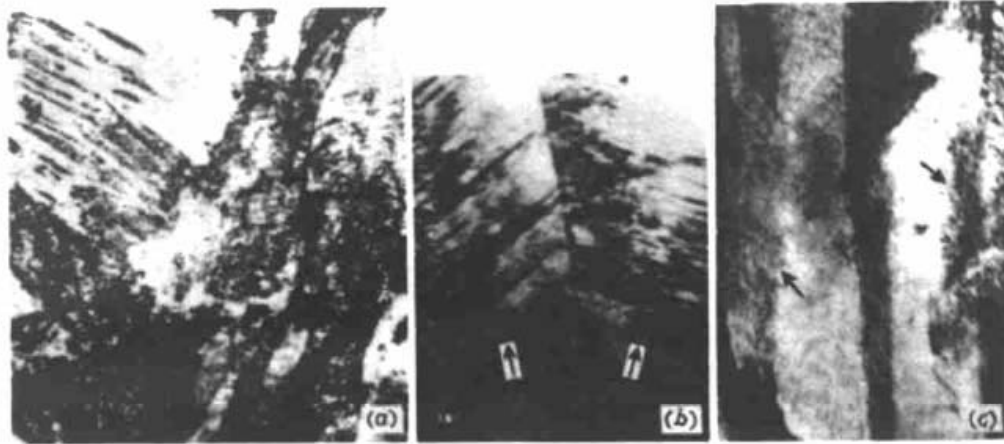


Fig. 2 Martensite of the phase transformation region

(a) morphology of martensite, 50000 $\times$ ; (b) acicular martensite, 50000 $\times$ ; (c) lathed martensite, 60000 $\times$

### 3.2 显微硬度与回火稳定性

由图 3 激光相变硬度分布曲线可知,相变区硬度较基体有很大的提高,峰值强化区硬度达 906Hv<sub>0.1</sub>,回火带硬度较低。经 640 °C 回火后强化层硬度达到最高值 1003Hv<sub>0.1</sub>,说明激光加热淬火不仅显著提高了强化层的硬度,而且还提高了高速钢的回火稳定性,红硬性比常规淬火提高了 80 °C 左右。这是由于激光加热淬火既能细化奥氏体组织,又能使大量碳化物溶解,加之激光淬火冷速极大,致使碳化物来不及析出,淬火后有较多的碳和合金元素仍存在于 M 和 Ar 中,这就提高了 M 及 Ar 的分解温度,从而提高了红硬性。正是由于 M 及 Ar 中碳及合金元素的固溶度较高,回火时会有更多的合金碳化物弥散析出,显著增强二次硬化效果,使回火后的硬度明显提高。回火温度继续升高,转变成回火索氏体,故硬度降低。

### 3.3 强化层的残余应力状态

激光相变强化层表面残余应力为压应力,内部为拉应力,近似按正弦函数分布,见图 4 曲线 2。残余应力的大小和分布状态随工艺参数变化而改变,若在相同的光束直径和扫描速度的条件下增加激光功率至 1500 W,表面熔化,这时表面残余应力变为拉应力,见图 4 曲线 1。强化层残余应力分布状态是加热时所达到的最高温度、冷却速度、温度梯度及材料的力学性能等因素综合作用的结果。

### 3.4 韧性测试结果及分析

维氏硬度压痕结合声发射法测定高速钢激光相变强化层的韧性结果表明<sup>[3]</sup>,W18Cr4V 钢经激光相变强化后韧性较常规淬回火有较大的改善,这是由于组织的细化,淬火马氏体间不连



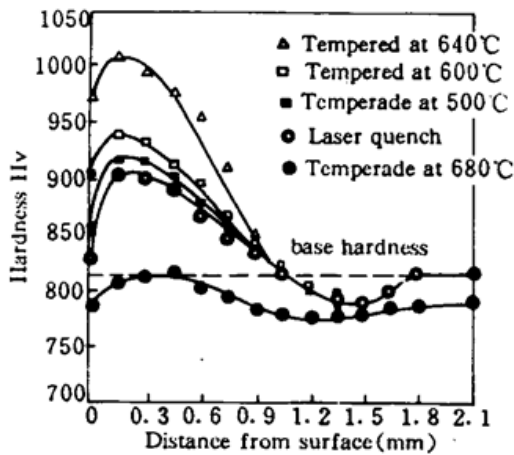


Fig. 3 Distribution of microhardness in sample No. 13

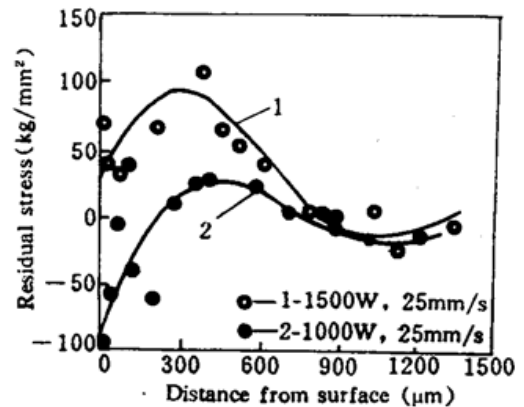


Fig. 4 Distribution of the residual stresses of the laser strengthened layer (the diameter of the laser beam is 3 mm)

续分布的残余奥氏体及碳化物周围奥氏体的存在,碳化物通过尖角溶化机制溶解呈圆滑状,使应力集中松弛,阻止裂纹的扩展,使韧性提高。激光相变强化层经 640 °C 回火后韧性最好,其原因是激光相变强化组织中合金元素的进一步溶入使其回火稳定性提高,且在回火过程中析出高度弥散的碳化物使淬火马氏体畸变能下降,内应力消除,应力集中下降,从而韧性提高。回火温度继续升高,碳化物聚集长大,韧性下降。

### 3.5 强化层的耐磨性

由表 2 磨损试验结果可知,高速钢激光淬火组织的耐磨性较常规淬回火组织高约 2~3 倍;经 640 °C 回火后,耐磨性进一步提高,约为常规热处理的 6~9 倍。从磨损试样磨痕形貌看试样是以犁沟形式磨损的,激光淬火试样的磨痕细浅、磨屑细小,经回火后磨痕更细,磨屑更小,如图 5。这是由于激光淬火组织细化所致,因为在以犁沟形式磨损时,材料在同一硬度时韧性好的材料表现出好的耐磨性;另外又由于激光相变强化层具有很高的硬度,且韧性较好的残余奥氏体的硬度也有很大的提高,故其耐磨性有很大的提高。

Table 2 Wear condition of steel tempered at different temperatures\*

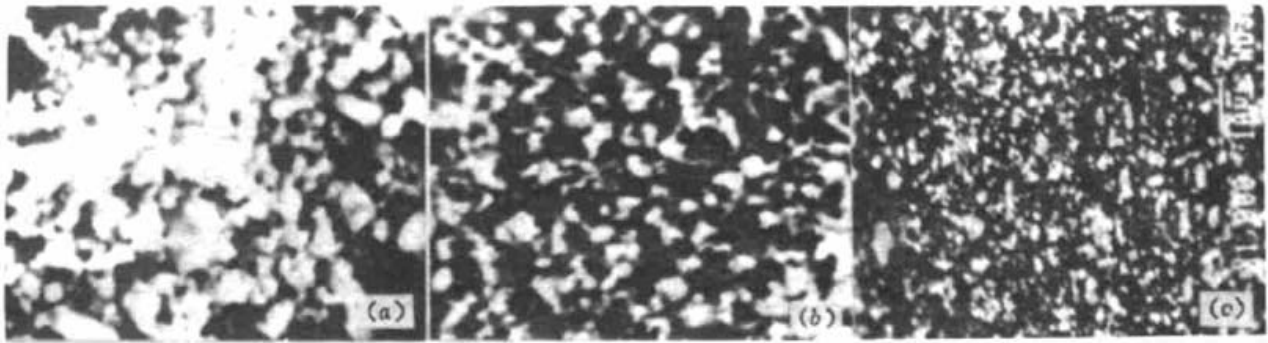
Sample	Not tempered		Tempered at 560 °C		Tempered at 640 °C	
	<i>b</i> (mm)	<i>V</i> (mm <sup>3</sup> )	<i>b</i> (mm)	<i>V</i> (mm <sup>3</sup> )	<i>b</i> (mm)	<i>V</i> (mm <sup>3</sup> )
Conventional quench and temper	6.17	9.787				
Sample No. 6	3.97	2.607				
Sample No. 7	5.02	5.271				
Sample No. 8	4.71	4.902				
Sample No. 11	4.35	3.430	3.97	2.607	2.96	1.081
Sample No. 12	4.71	4.354	4.33	3.383	3.17	1.327
Sample No. 13	4.86	4.783	4.56	3.951	3.34	1.552

\* *b* represents the width of grinding crack, *V* represents the volume of grinding crack.

激光相变硬化层经 640 °C 回火后,在马氏体及残余奥氏体内部析出高度弥散的碳化物,且硬度极高,在磨损时起支承作用,并且基体的韧性较好,故耐磨性更好。

### 3.6 刀具的切削试验结果与分析

W18Cr4V 高速钢外圆车刀、端面车刀及锯条刨刀经激光相变强化处理后的切削试验结果

Fig. 5 The morphology of wear chips (1000 $\times$ )(a) quenched commonly; (b) laser strengthened layer; (c) tempered at 640  $^{\circ}\text{C}$ 

见表 3 及表 4。结果表明,车刀经激光相变硬化后其寿命可以提高到原来的 3~4 倍,经适当温度回火后还有所提高,可提高到原来的 4 倍以上。而且加工工件的表面粗糙度参数  $R_a$  明显下降。但在 1.5 kW, 1.0 m/min 和 1.8 m/min 条件下,由于扫描速度太快,车刀表面未能加热到  $A_{c1}$  温度以上,未发生相变强化,反而处于接近  $A_{c1}$  的较高温度,发生过回火现象,这时表层组织为回火屈氏体,碳化物亦聚集长大,硬度和韧性都较低<sup>[3]</sup>,故车刀的使用寿命比普通淬火加回火处理的车刀的寿命短。刨刀的使用寿命经激光相变硬化并在 640  $^{\circ}\text{C}$  回火后提高更多,约为原来的 5.3~6.7 倍。这是由于激光超快速加热使硬化层组织具有较高的硬度和韧性。其耐磨性有显著改善,故其寿命有明显提高。因经 640  $^{\circ}\text{C}$  回火后,使其硬度和韧性达到最佳配合状态,且红硬性较高,故切削性能得到进一步的提高。

Table 3 Results of cutting experiment of excircle (end plane) lathe tools

Technological parameters	Conventional	1 kW	1 kW	1.5 kW	1.5 kW
	quench then temper	0.2 m/min	0.5 m/min	1.0 m/min	1.8 m/min
No temper			80(159)*		
Tempered at 560 $^{\circ}\text{C}$	29(58)	116(234)	84(167)	22(45)	9(19)
Tempered at 600 $^{\circ}\text{C}$			88(174)		
Tempered at 640 $^{\circ}\text{C}$			92(186)		

\* In the table data in or out of brackets are the workpiece number out with excircle and end plane lathe tools once ground.

Table 4 Number of saw bladers cut with a planer tool once ground\*

Conventional quench then temper	Laser quench	Laser quench then temper at 560 $^{\circ}\text{C}$	Laser quench then temper at 600 $^{\circ}\text{C}$	Laser quench then temper at 640 $^{\circ}\text{C}$
3000~3600	14000~16000	16000~17500	18000~19050	19500~20100

\* The material of the saw blader is 15 steel.

### 3.7 刀具的失效形式

不论是车刀还是刨刀都是以磨损形式失效。前切削刃圆角半径增大,后刀面上出现磨损带,且前刀面上出现月牙状的凹坑。导致磨损失效的主要原因是粘着磨损、塑性变性。虽然刀具的硬度超过切屑的硬度,但连续不断流出的切屑始终作用在一面积不大的刀具表面上,粘附

层周期性地局部破坏,导致了刀具表层材料内的交变应力,使粘附的刀具表面内也会发生塑性变形,使刀具切削刃圆角半径增大,且随切削时间的延长,其钝化程度趋于严重,切削能力下降,摩擦加剧,温度升高,当达到 650~700 °C 以上时,组织发生变化,转变成硬度较低的回火索氏体,硬度下降,就会发生塑性变形磨损失效,形成后刀面上的月牙坑,且有明显的回火现象。另外还伴有磨粒磨损。高速钢刀具经激光相变强化后,不仅硬度有很大的提高,而且其韧性有较大的改善,故刀具是以磨损而不是以崩刃、碎裂、裂纹等破损形式失效的。

## 4 结 论

4.1 W18Cr4V 高速钢激光相变强化层是由马氏体、残余奥氏体及碳化物组成,组织得到了明显的细化,残余奥氏体比常规淬火少,一般在 10~15% 左右;强化层中存在残余压应力,内部存在残余拉应力。

4.2 W18Cr4V 高速钢激光相变强化层经 640 °C 回火后,硬度高达 1003Hv<sub>0.1</sub>,且韧性较常规淬火有明显提高,耐磨性提高了 5~8 倍,高速钢刀具激光相变强化后切削性能提高了 3~5 倍,都是以磨损形式失效的。

## 参 考 文 献

- 1 高彩桥. 摩擦金属学. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1988. 2
- 2 陈传忠, 孔翠荣, 侯绪荣等. W18Cr4V 高速钢激光相变强化层中碳化物的溶解及碳的扩散. 金属热处理, 1995, (9): 5~8
- 3 陈传忠, 孔翠荣, 曹怀华等. W18Cr4V 高速钢激光相变强化层的韧性. 金属热处理, 1996, (3): 15~18

## Wear Resistance of Laser Strengthened High Speed Steel and Cutting Property of the Tools

Chen Chuanzhong Yu Huijun Zhu Ruifu Zhou Xianglin  
Yu Jiahong Wang Shiqing

(Shandong University of Technology, Jinan 250014)

**Abstract** In this paper the structure and wear resistance of laser strengthened W18Cr4V high speed steel are studied, and the cutting property and failure form of the tools are discussed. The test results indicate that the properties of the laser strengthened layer have been improved greatly compared with those of the steel and tools heat-treated commonly. The hardness can reach 1000Hv<sub>0.1</sub>. The toughness of laser strengthened layer is also improved remarkably, and the wear resistance is increased by 2~8 times. The service life of laser strengthened cutting tools of high speed steel can be prolonged by 2~5.7 times than the non-laser-treated ones.

**Key words** W18Cr4V high speed steel, laser strengthening, wear resistance, tools, cutting property