

小载荷强化对汽车零件表面硬度的影响^{*}

卢曦 郑松林

【摘要】 以未经过表面工艺强化的低强度汽车前桥和经过表面工艺强化的高强度汽车变速箱齿轮为对象,对汽车零件经过疲劳极限以下小载荷强化前后,表面硬度的变化规律及其微观原因进行了试验研究和分析。结果表明,小载荷强化后,低强度前桥的表面硬度随着其强度的提高而提高;高强度变速箱齿轮的表面硬度随着其强度的提高而降低;小载荷强化所引起的结构微观组织变化是其表面硬度变化的主要原因;对于汽车零件表面硬度的变化而言,强化和损伤的作用效果相同。

关键词: 汽车 零件 疲劳 小载荷强化 表面硬度

中图分类号: U463.03; U467.4⁺97

文献标识码: A

Change of Surface Hardness for Vehicle Component after Strengthening under Low-amplitude Loads

Lu Xi Zheng Songlin

(University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, 200093, China)

Abstract

The change and reason of surface hardness were investigated for vehicle components, which include the front axle without surface strengthened process and the transmission gear with surface strengthened process, after strengthening under low amplitude load. The experimental results show that the variation is almost direct ratio to strength and hardness of the front axle after strengthening under low-amplitude loads, but it is inverse ratio for the transmission gear. The main reason of surface hardness variation of vehicle components is that the micro-structure is strengthened and improved. For the surface hardness variation of vehicle components, the strengthening and fatigue damage exhibit the same effect.

Key words Vehicle, Component, Fatigue, Coaxing, Surface hardness

引言

金属材料的疲劳破坏多从自由表面的薄弱微区开始,疲劳损伤与疲劳过程中微观塑性变形的发生与发展相联系,所以表面微观塑性变形抗力是反映构件疲劳损伤抗力的指标。材料的硬度表征了材料抵抗塑性变形的能力,材料的表面硬度能够反映材料的疲劳损伤过程,疲劳损伤过程与表面硬度的变化存在相互对应关系^[1~4]。文献[5]初步提出了基于材料表面硬度变化的疲劳损伤评价方法,但没有涉及到疲劳极限以下的小载荷对表面硬度的影响。

汽车零件承受的载荷 80% 低于其疲劳极限,传

统的疲劳损伤理论仅将疲劳极限以下的小载荷看作有损伤和无损伤来处理。疲劳试验表明^[6~7],疲劳裂纹萌生前,部分小载荷对材料和零件具有强化作用,忽略了小载荷的强化,会造成疲劳损伤评估过于保守。为了通过表面硬度变化来准确地评估其疲劳损伤以及剩余强度和剩余寿命,除了研究疲劳损伤过程中结构表面硬度的变化外,还需研究低于疲劳极限的小载荷强化对表面硬度的影响。

1 试验设计

汽车零件所用钢铁材料种类繁多,从强度来分,包括低强度、中强度和高强度;从工艺强化来分,包

收稿日期: 2007-04-17

^{*} 国家自然科学基金资助项目(项目编号:50375101)、上海市自然科学基金资助项目(项目编号:07ZR14081)和上海市教委创新项目(项目编号:08YZ102)

卢曦 上海理工大学机械工程学院 副教授, 200093 上海市

郑松林 上海理工大学机械工程学院 教授

括表面未经过工艺强化和表面经过工艺强化。因此,在汽车零件选择时,要充分考虑到材料的强度等级和表面热处理情况。综合考虑这些因素后,选择未经过表面工艺强化的国产某汽车前桥(低强度材料)和经过表面工艺强化的国产某变速箱齿轮(高强度材料)为对象。试验研究小载荷强化过程中,零件表面硬度的变化规律。

低强度前桥为焊接件,材料为 20 号钢,弹性模量 200 GPa,泊松比 0.3,屈服极限 324 MPa,屈强比 0.69。高强度齿轮为变速箱倒挡圆柱齿轮,材料为 28MnCr5,采用碳氮共渗工艺强化,表面硬度 58~62HRC,单齿弯曲屈服强度约 1 700 MPa,极限强度约 2 300 MPa。

前桥用电液伺服疲劳试验机进行平面四点弯曲试验,试验频率为 6 Hz,应力比 0.1,正弦波加载;DHT-100 型硬度计测量表面硬度;齿轮用高频疲劳试验机进行单齿弯曲试验,试验频率为 74 Hz,应力比 0.11,正弦波加载;HX500 型显微硬度计测量齿根表面显微硬度。

2 试验结果及分析

2.1 前桥

前桥疲劳试验选择 S-N 曲线高低两点;最佳强化载荷强化 30 万次后,过载试验直到断裂;最佳强化载荷强化 30 万次后,静压断,试验结果如表 1 所示。

表 1 前桥试验结果

Tab.1 Experimental results of front axle

序号	试验形式	载荷/MPa	疲劳寿命/次
012	S-N 曲线低点	186	294 120
018	S-N 曲线高点	217	175 000
054	强化 30 万次后验证	130/186	391 400
055	强化 30 万次后验证	130/186	668 000
026	强化 30 万次后静压断	130	—
027	强化 30 万次后静压断	130	—

表 1 中 130 MPa 是前桥的最佳强化小载荷幅值,054、055 号试件直接用最佳强化载荷和最佳强化次数强化后,再用幅值为 186 MPa 的大载荷试验直到断裂。

平面四点弯曲的中性层在疲劳试验中应力为零,因此中性层的硬度可作为未经过强化和损伤的原始硬度。前桥的表面硬度测量时,不同的应力层至少取 4 点的平均作为表面硬度。不同试件的表面硬度测量结果见表 2 所示。

表 2 前桥表面硬度测量结果

Tab.2 Results of surface hardness for front axle HRB

序号	试验形式	中性层	受拉面	受压面
012	S-N 曲线低点	78	80	78
018	S-N 曲线高点	77	81	79
054	强化 30 万次后验证	76	79	78
055	强化 30 万次后验证	78	81	80
026	强化 30 万次后静压断	80	87	—
027	强化 30 万次后静压断	78	86	—

从表 2 中可以看到,前桥在较小的疲劳载荷(012 号试件)下断裂后,受拉面的表面硬度提高了 2 HRB,提高 2.6%,受压面的表面硬度没有变化。在较大的疲劳载荷(018 号试件)下断裂后,受拉面的表面硬度提高较大,达到 4 HRB,提高 5.2%。受压面的硬度虽然有所提高,但提高幅度不如受拉面。经过低载强化 30 万次后大载荷断裂的 054、055 号试件,受拉面和受压面的表面硬度的提高趋势均明显高于未经过低载强化的 012 号试件。受拉面的表面硬度提高 4%,受压面的表面硬度提高 2.6%。在强化小载荷下进行 30 万次强化后静压断的 026、027 号试件,受拉面的表面硬度提高幅度最大,为 7 HRB 和 8 HRB,表面硬度提高 8.75% 和 10.3%。

前桥的表面硬度变化和文献[8]中标准材料试样的试验结果相似,只是变化幅度略有区别。因此,可以初步推断,对于未经过表面工艺强化的低强度汽车零件,疲劳载荷越大,表面硬度提高越大。同样的高载荷,经过小载荷强化的表面硬度提高比未经过小载荷强化的大。

2.2 齿轮

齿轮表面硬度很高,离散性较大,因此,齿根的显微硬度至少是 5 点的平均值。显微硬度测量载荷 4.9 N,保持时间 30 s。测量结果如表 3 所示。

表 3 齿轮表面显微硬度测量结果

Tab.3 Results of microhardness for gear

试验形式	载荷/MPa	循环数/次	静强度/MPa	平均硬度/HV	标准差
原始				851	18
				860	20
过载	412	6×10^4		826	17
	412	1.2×10^5		830	15
	412	1.8×10^5		864	32
	412	2.6×10^5		840	19
强化	263	1.0×10^5	2 319	864	11
	263	2.0×10^5	2 436	822	37
	263	3.0×10^5	2 534	768	8
	263	4.0×10^5	2 382	831	17
静强度			2 267	815	17
			2 288	814	25

表3中,263 MPa为最佳强化小载荷的幅值,过载幅值412 MPa下的平均疲劳寿命为26万次。试验中,为了检验小载荷的强化效果,还同时进行了静强度试验。从表3中可以发现,除了个别断齿外,无论单齿弯曲承受过载,还是经过最佳强化载荷强化,齿轮表面显微硬度都呈下降趋势。过载时不同的疲劳寿命期间,单齿表面硬度的变化如图1所示。其中,过载循环18万次(循环比约为0.7),表面显微硬度较高可能是硬度离散造成的。

不同强化次数下齿轮的表面显微硬度变化如图2所示。

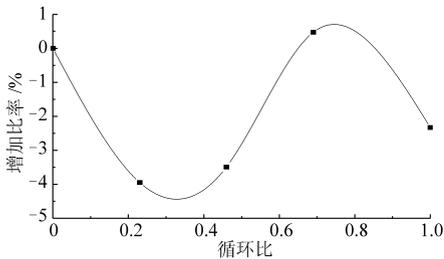


图1 过载时齿轮表面显微硬度曲线

Fig.1 Microhardness at different cycle ratios

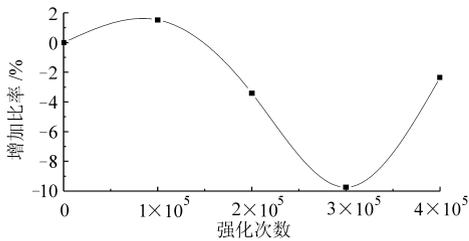


图2 不同强化次数的齿轮表面显微硬度曲线

Fig.2 Microhardness at different strengthening times

从图2中可以看到,齿轮表面显微硬度随着强化次数的增加,首先呈下降趋势,当强化次数过高时,表面显微硬度又上升,其原因可能是其本身硬度较高,也可能是强化次数过多,表面硬度又有所回升,具体原因需要深入研究。

在最佳强化载荷下,不同的强化次数与剩余静强度的变化曲线如图3所示。

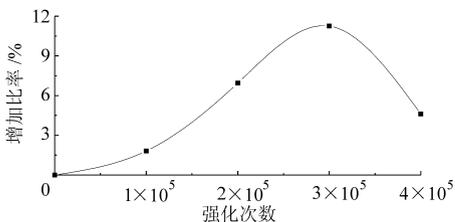


图3 不同强化次数的剩余静强度曲线

Fig.3 Residual strength in different strengthening times

从图3中可以看到,最佳强化载荷强化后,单齿弯曲强度得到了一定的提高,强化次数为30万次时,剩余静强度增加比率达到最大。再增加强化次数,静强度的增加比率呈下降趋势。图3结果印证

了小载荷强化后,零件强度能够得到提高。

试验结果表明,经过表面工艺强化后的高强度齿轮,无论是小载荷强化还是疲劳损伤,齿轮的表面显微硬度均呈下降趋势,表面显微硬度下降越多,其强度提高越大。这和未经过表面工艺强化的低强度材料和零件的结论正好相反。

3 表面硬度变化原因分析

不同的强度、不同表面工艺处理的汽车零件,在小载荷强化和疲劳损伤过程中,表面硬度会发生不同的变化。表面硬度是其微观组织性能的一种表现方式,必须从结构的微观组织变化来解释表面硬度产生变化的原因。

微观研究表明^[9],适当的强化载荷形成的内应力使金属的晶体结构排列更加紧凑,组织内的孔洞(或空穴)得到弥合或填充,微观组织更加均匀、致密,从而在宏观上表现为疲劳强度和寿命得到提高。前桥受压面的硬度提高幅度不如受拉面,原因可能是受压面的强化效果没有受拉面的效果好。

高强度齿轮原始材料通过锻造得到并经过工艺强化,齿轮原始组织很细密均匀,基本没有孔洞、裂纹等缺陷,组织的特性已经得到较大的发挥,微观强度和硬度很高。小载荷强化使组织的综合性能得到强化,表现为微观强度和硬度有所下降,塑性得到了提高,因而,宏观上疲劳寿命提高。相对于原始S-N曲线,小载荷强化后疲劳强度同样得到提高。小载荷强化前后微观组织的透射电镜观察结果如图4所示。

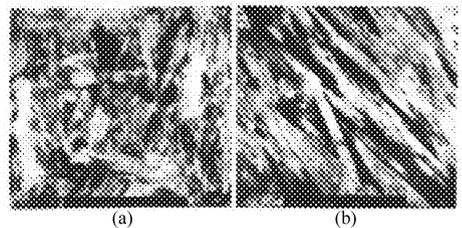


图4 齿轮透射电镜观察结果($\times 12000$)

Fig.4 TEM results of gear ($\times 12000$)

(a) 未强化 (b) 最佳强化

从图4中可以明显发现,未经过强化的微观组织存在明显的断裂、错位等现象,韧性较差。经过小载荷强化后,虽然微观组织也有错位,但断裂时微观组织排列仍然比较均匀。

4 结论

(1)未经过表面工艺处理的低强度前桥,小载荷强化对结构内部微观组织进行了重新调整,组织变得更加均匀和密实,结构强度得到提高的同时,表面

硬度也有所提高。

(2)经过表面工艺处理的高强度变速箱齿轮,小载荷强化后,微观组织的改善使齿轮的硬度下降,硬度下降越多,改善效果越显著,强度和寿命提高比例

也越大。

(3)小载荷强化和疲劳损伤使结构的表面硬度发生同方向的变化,即硬度的变化可能是强化的结果,也可能是疲劳损伤的结果。

参 考 文 献

- 1 王宏伟, 马晋生, 南俊马, 等. 表面微观屈服强度与疲劳极限的关系[J]. 金属学报, 1991, 37(5): 365~369.
Wang Hongwei, Ma Jinsheng, Nan Junma, et al. Surface yield strength versus fatigue limit for steels[J]. Acta Metallurgica Sinica, 1991, 37(5): 365~369. (in Chinese)
- 2 Lemaitre J, Dufailly J. Damage measurements[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1987, 28(5/6): 643~661.
- 3 Chaboche J L. Continuous damage mechanics—a tool to describe phenomena before crack initiation[J]. Nuclear Engineering and Design, 1981, 64(2): 233~247.
- 4 Milman Y V, Galanov B A, Chugunova S I. Plasticity characteristic obtained through hardness measurement[J]. Acta Metallurgica et Materialia, 1993, 41(9): 2 523~2 532.
- 5 Ye Duyi, Wang Zhenlin. An approach to investigate pre-nucleation fatigue damage of cyclically loaded metals using Vickers microhardness tests[J]. International Journal of Fatigue, 2001, 23(1): 85~91.
- 6 郑松林. 低幅载荷对前轴疲劳寿命影响的试验研究[J]. 机械强度, 2002, 24(4): 547~549.
Zheng Songlin. Studying the effect of low amplitude loading on fatigue life of truck front axle[J]. Journal of Mechanical Strength, 2002, 24(4): 547~549. (in Chinese)
- 7 卢曦, 郑松林, 寇宏滨, 等. 圆柱齿轮低载强化试验研究[J]. 中国机械工程, 2005, 16(23): 2 109~2 111.
- 8 河本 ■, 中川降夫, 矶原诚. あらかじめ过小応力の繰返しを受けた軟鋼の疲労強度と硬度[J]. 材料試験, 1961, 10(91): 294~303.
Kawamoto Minoru, Nakagawa Takao, Fujiwara Makoto. Fatigue strength and hardness of mild steel subjected to the repeated pre-understressing[J]. Journal of the Japan Society for Testing Materials, 1961, 10(91): 294~303.
- 9 郑松林, 卢曦, 马晓婷. 汽车结构件低载强化后的疲劳断口特性[J]. 机械工程材料, 2006, 30(6): 17~19, 73.

(上接第 177 页)

- 3 董学珠. 齿轮啮合理论基础[M]. 北京:机械工业出版社,1989.
Dong Xuezhu. Basic theory of gear meshing[M]. Beijing: Chinese Machine Press, 1989. (in Chinese)
- 4 Lin Chungyun, Chung-Biau Tsay, Fong Zhanghua. Mathematical model of spiral bevel and hypoid gears manufactured by the modified roll method[J]. Mechanism and Machine Theory, 1997, 32(2): 121~136.
- 5 曾韬. 螺旋锥齿轮设计与加工[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1989.
Zeng Tao. Design and manufacture of spiral bevel gear[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press,1989. (in Chinese)
- 6 李铭. 弧齿锥齿轮数控加工技术[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2005.
Li Ge. NC machining technology of spiral bevel gear[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2005. (in Chinese)
- 7 Litvin F L. Gear geometry and applied theory[M]. Chicago: University of Illinois,2004.
- 8 Wang J, Wang X C, Jiang H, et al. Coordinate measurement of tooth surface of spiral bevel gear[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(6): 151~154.
- 9 梁艳, 张琳, 李仕春, 等. 弧齿锥齿轮齿面坐标法测量的研究[J]. 工具技术, 2006, 40(13): 120~123.
Liang Yan, Zhang Lin, Li Shichun, et al. Study on spiral bevel gears measurement in coordinate system[J]. Tool Engineering, 2006, 40(13): 120~123. (in Chinese)
- 10 长春第一汽车制造厂工艺处机械加工实验室. 圆弧齿伞齿轮加工手册[M]. 长春:吉林人民出版社,1980.
Changchun First Automobile Works of China. Handbook of spiral bevel gear processes[M]. Changchun: Jilin People's Press, 1980. (in Chinese)
- 11 Visual Numerics Company. Stat/Library manual[M]. 1997:107~117.
- 12 Litvin F L, Kuan C, Wang J C, et al. Minimization of deviation of gear real tooth surface determined by coordinate measurements[J]. Journal of Mechanical Design, ASME, 1993, 115(4): 995~1 001.