

文章编号:1007-6735(2013)02-0183-04

典型表面工艺强化对材料强度特性的影响

卢 曦, 徐 艳

(上海理工大学 机械工程学院, 上海 200093)

摘要: 以标准材料试样和实际汽车零件为对象,探索两种比较典型的表面工艺强化对材料强度特性的影响. 研究表明:材料经工艺强化后强度特性发生较大的变化,不能用先前在工程上广泛应用的查图表法准确预测工艺处理后材料强度特性. 40Cr 材料经中频淬火后静强度提高 197%,疲劳强度提高 89.8%. 20 MnCr5 材料经碳氮共渗后静强度提高 145%,疲劳强度提高 73.5%,S-N 曲线向上移动,其斜率变大,转折点循环数降低. 从而设计时有限寿命区域减少,无限寿命区域增大.

关键词: 表面工艺强化; 静强度; 疲劳强度; S-N 曲线
中图分类号: TG 14; U 463 **文献标志码:** A

Investigation on the Strength Characteristics of Material After Typical Surface Strengthen

LU Xi, XU Yan

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

Abstract: Taking the standard material specimen of a vehicle joint and an actual auto part as study objects, the strength characteristics of materials after two typical surface strengthening processes were investigated. The results show that the material's strength can be greatly developed after surface strengthening. However, the checking charts method which is used widely in engineering cannot accurately forecast material's strength characteristics after surface treatment. The 40Cr material's static strength and fatigue strength can be increased by 197% and 89.8% respectively after medium frequency induction hardening. The 20MnCr5 material's static strength and fatigue strength can be increased by 145% and 73.5% respectively after carbonitriding hardening and S-N curve moves up, the slope becomes steeper and the turning point reduces after strengthening technology. The limited life area reduces and the unlimited life area increases.

Key words: surface strengthening; static strength; fatigue strength; S-N curve

收稿日期: 2012-07-01
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51175346); 上海市科委基础研究重点资助项目(12JC1407000); 上海市汽车工业科技发展基金会资助项目(1210)
第一作者: 卢 曦(1968-), 男, 教授. 研究方向: 疲劳与可靠性、汽车结构强度学、可回收汽车零件强度与可靠性评价理论和技术. E-mail: luxi@163.com

工艺强化是提高材料硬度、耐磨性、耐腐蚀性和抗高温氧化性的有效措施,很早以前就被人们认识并广泛应用于机械工业中. 工艺强化的方法有很多,主要分为表面热处理、表面化学处理和表面冷作强化^[1]. 根据各种工艺处理的特点及材料不同的成分,各种汽车零件采取的工艺处理方式也不同. 表面热处理包括火焰淬火和感应淬火. 中频淬火是比较典型的表面热处理,适用于钻杆、花键轴、汽车后桥、曲轴和齿轮等零件,通过硬化层相对厚度影响光滑钢试件疲劳强度的相对增量. 表面化学热处理包括渗氮、渗碳和氰化. 氰化即碳氮共渗,是在 510~570℃ 下在氰化钠和氰化钾的浴盐中进行,适用于低质量钢,由于所需时间短成本低,因此在工程上也得到广泛应用. 表面冷作强化包括喷丸、滚压、锤击等,通过在表面引入残余应力使疲劳强度提高. 一直以来,以赵少汴等^[1]实验提出的一系列方法和以图表为准预测热处理后材料的强度特性. 但是这种方法预测准确性如何及工艺强化后材料的强度特性到底变化多少,还需进一步深入的研究. 本文选取具有代表性传递

动力的传动轴标准试样和实际汽车零件作为研究对象,选择中频淬火和氰化两种比较典型的热处理方法,研究工艺处理后材料强度特性的变化.

1 材料与方法

传动轴标准试样材料为国产 40Cr 材料,根据 GB12443-90 金属扭转应力疲劳试验方法进行选择 and 加工. 试样热处理为中频淬火加回火,热处理后表面硬度 52~58 HRC,心部硬度≤30 HRC,试样硬化层深度最小 1.9 mm(最小直径为 12 mm).

汽车零件选取某轿车变速器齿轮,齿轮材料为 20 MnCr5,模数 2.3 mm,齿数 20,压力角 17.5°,变位量 1.5 mm. 表面采用碳氮共渗工艺强化,渗层深度 0.5 mm. 齿面硬度为 58~62 HRC,心部硬度为 40 HRC. 两种材料化学成分的质量分数 ω 如表 1 所示. 材料静强度 σ_b 、屈服强度 σ_s 、伸长率 δ_5 及断面收缩率 ψ 等机械性能如表 2 所示. 其中 * 为淬火后低温回火疲劳极限. 40Cr 的扭转疲劳极限 τ_{-1} 与弯曲疲劳极限 σ_{-1} 比值约 0.58^[1].

表 1 材料的化学成分
Tab.1 Chemical composition of materials %

材料	ω						
	Cr	si	p	Mn	S	C	Cu
40Cr	0.80-1.10	0.17-0.37	≤0.020	0.50-0.80	≤0.015	0.37-0.44	≤0.30
20 MnCr5	1.00-1.30	≤0.12	≤0.035	1.10-1.40	0.02-0.035	0.17-0.22	

表 2 材料的机械性能
Tab.2 Mechanical properties of materials

材料	σ_b /MPa	σ_{-1} /MPa	σ_s /MPa	τ_{-1} /MPa	δ_5 /%	ψ /%
40Cr	940	422	780	245	9	45
20 MnCr5	930	634 *	785		13	57

试验包括静强度试验和疲劳试验. 在 NZ-1000 JN-100 扭转试验机上对 40Cr 试样采取静扭断方式,试验 3 个试样测定抗扭静强度值. 具体方法是不断增加载荷级数,直至试样被扭断,记录下试样扭断时对应的扭矩 M ,可得相应的静扭强度 σ_b . 做 3 组试验取平均,得到 M_m, σ_{bm} . 如记录数值接近,停止试验,否则再作一组. 在 RoellAmsler HFP 100 型高频疲劳试验机上对齿轮材料采取静压断方法,试验 3 个齿测定单齿断裂载荷 F . 具体方法与 40Cr 材料静强度测定方法相同.

40Cr 标准试样疲劳试验在日本鹭宫 TT08 扭转疲劳试验机上完成,采用非对称循环(循环比 $r=0.1$)

正弦波加载. 利用两个精确的点确定出位于中寿命段的 S-N 曲线. 选取高低两级载荷进行疲劳寿命试验,小载荷幅值 F_{a1} 为 135.45 N·m,均值 F_{m1} 为 165.55 N·m;大载荷幅值 F_{a2} 为 151.2 Nm,均值 F_{m2} 为 184.8 Nm. 每组试验 2~4 个试样直到断裂,测得断裂循环数 N . 齿轮材料疲劳试验仍在 RoellAmsler HFP 100 型高频疲劳试验机上完成. 试验加载频率为 74 Hz,循环比 $r=0.11$. 选取适当应力 σ 对齿轮静压直到断裂. 所有齿轮疲劳试验都以齿轮断裂或加载频率下降 5 Hz 作为齿轮失效判据,将失效时的应力循环次数 N_0 作为单齿弯曲疲劳寿命. 当 N_0 超过 300 万次后停止,认为该应力下齿轮不发生疲劳破坏.

2 试验结果与分析

2.1 静强度

两种材料的静扭试验结果分别如表 3、表 4

所示.

表 3 40Cr 静强度试验结果

Tab.3 Test results of static strength of 40Cr

试样	$M/(\text{N} \cdot \text{m})$	σ_b/MPa	$M_m/(\text{N} \cdot \text{m})$	σ_{bm}/MPa
001	520	1 532		
002	520	1 532	521.7	1 537
003	525	1 547		

表 4 20 MnCr5 材料静强度试验结果

Tab.4 Test results of static strength of 20 MnCr5

齿号	F/kN	σ_b/MPa	F_m/kN	σ_{bm}/MPa
004	26.36	2 276.2		
016	26.24	2 265.8	26.4	2 279.6
017	26.60	2 296.9		

热处理前,根据扭转强度和抗拉强度关系可得 40Cr 材料扭转强度 τ_b 约为 517 MPa. 经中频淬火后强度提高系数为 1.9^[1],可预测热处理后抗拉强度 σ_b 约为 1 786 MPa,估算扭转强度 τ_b 值为 982 MPa. 根据硬化层深度和热处理条件查得齿轮材料热处理后抗拉强度值为 1 847 MPa.

对比预测值和试验值可发现,预测的 40Cr 材料扭转静强度误差为 56.5%,齿轮材料静强度误差为 23.4%. 说明采取查图表和热处理系数法预测热处理后材料静强度存在问题,需采用另一种比较准确的方法来预测.

从硬度方面考虑,根据硬度强度对应关系可以预测材料静强度. 40Cr 材料热处理后最大抗拉强度为 1 800 MPa,扭转强度为 990 MPa. 20 MnCr5 材料最大抗拉强度为 2 305 MPa.

对比齿轮材料预测值和试验值,误差仅为 1.1%,说明通过硬度强度转化关系预测准确性很高. 但预测热处理后 40Cr 扭转强度时误差仍然很大,说明不能根据预测的抗拉强度简单取估算系数 0.55 估计扭转抗拉强度.

热处理前,材料试样 $\tau_b/\sigma_b = 0.55$,热处理后, $\tau_b/\sigma_b = 0.854$. 可以初步认为,40Cr 经淬火处理后,表面产生了硬化层,淬透深度导致硬度增加,材料可能显示部分脆性的性质,也验证了根据硬度来估算抗拉强度比较准确的原因. 但材料的性质到底是否发生了变化,还需进一步的实验研究证明.

通过比较热处理前后 40Cr 材料和 20 MnCr5 材料静强度值,可发现经热处理后材料静强度分别提高了 197% 和 145%. 因此,工艺处理能显著提高

材料静强度.

2.2 疲劳特性

40Cr 材料工艺强化后,疲劳试验结果如表 5 所示.

表 5 40Cr 材料疲劳试验结果

Tab.5 Fatigue test results of 40Cr

序号	$F_m/(\text{N} \cdot \text{m})$	$N/\text{次}$	$\lg N$
101	151.20	104 900	5.021
102	151.20	124 000	5.093
103	151.20	112 000	5.049
201	135.45	339 200	5.530
202	135.45	191 000	5.281
203	135.45	250 400	5.399
204	135.45	184 800	5.267
205	135.45	367 700	5.565

20 MnCr5 材料工艺强化后疲劳试验结果如表 6 所示. 表 6 中 * 表示为超过该循环未失效.

表 6 20 MnCr5 材料疲劳试验结果

Tab.6 Fatigue test results of 20 MnCr5

序号	σ/MPa	$N/\text{次}$	$\lg N$
101	1 900	5 011	3.700
102	1 900	8 912	3.950
103	1 900	10 000	4.000
201	1 650	19 952	4.300
202	1 650	29 512	4.470
203	1 650	39 810	4.601
301	1 400	70 794	4.850
302	1 400	100 000	5.000
401	1 150	90 100	4.955
501	1 100	500 000 *	
502	1 100	300 000 *	

利用表 5 中的载荷幅值以及试验寿命,即可拟合出工艺处理后试样中寿命段 S - N 曲线的函数表达式为

$$\lg \sigma = 3.376\,6 - 0.236\,6 \lg N$$

(1)

可估算热处理后 40Cr 材料扭转疲劳强度为 465 MPa. 材料经热处理疲劳强度提高了 89.8%.

由表 6 可知,应力为 1 150 MPa 时,疲劳寿命为 90 100 次,但应力稍微降低到 1 100 MPa 时,两次试验,循环数都超过了 300 万次而未失效,所以可认为热处理后齿轮疲劳强度为 1 100 MPa,与热处理前相比提高了 73.5%.

对表 6 疲劳试验数据进行拟合,可得碳氮共渗

热处理后 S-N 曲线方程为

$$\sigma = 3\,598.006 - 438.973 \lg N \quad (2)$$

热处理前材料的 S-N 曲线为

$$\sigma = 1\,551.649 - 145.388 \lg N \quad (3)$$

在应力-对数疲劳寿命坐标下,两条曲线如图 1 所示.碳氮共渗后,材料的 S-N 曲线向上移动,斜率由 -145.388 变为 -438.973.原材料转折点的 N_0 为 135 万次^[2],碳氮共渗后材料转折点 N_0 变得较小,疲劳寿命为 39 万次.

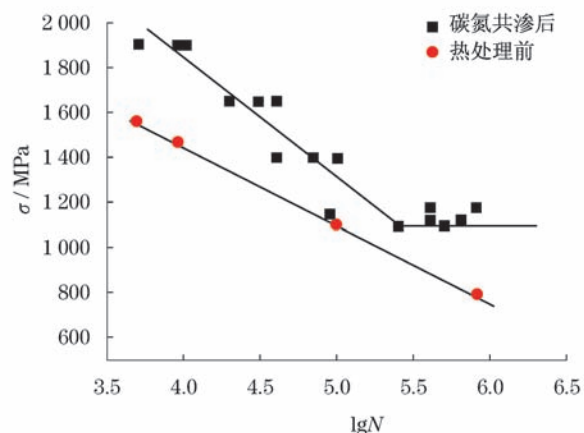


图 1 工艺强化前后齿轮材料的 S-N 曲线

Fig.1 Change of S-N curve after surface strengthening

由此可以得到,热处理后材料疲劳强度增大,有限寿命区会减小且在有限寿命区设计时所能承受的应力变大,无限寿命区增大.经过热处理强化后的高强度齿轮的 S-N 曲线转折点循环数 N_0 不能用其材料的试验值来估算,否则会造成较大的估算误差.

文献[3]初步解释了高强度齿轮的 S-N 曲线转折点循环数 N_0 降低的微观原因.零件经表面强化处理后,裂纹形成门槛值变高,疲劳极限变大,裂纹萌生阶段的寿命也就越强.高强度、超高强度材料及经过表面强化处理的材料,疲劳寿命主要由裂纹萌生阶段决定^[4-6].只要出现裂纹,裂纹扩展并最终断裂的机会很大.疲劳裂纹萌生寿命决定了高强度

齿轮的总循环寿命.

3 结 论

中频淬火和碳氮共渗这两种工艺处理能使材料的强度特性发生很大的变化.采用查图表方法预测工艺处理后材料强度特性,预测结果存在很大的误差,可能由于材料性质发生了变化,应用硬度强度转化关系预测.

传动轴试样经中频淬火处理,静强度能提高 197%.疲劳强度能提高 89.8%.齿轮材料经碳氮共渗强化,静强度提高 145%,疲劳强度提高 73.5%.静强度和疲劳强度提高比例不同说明经工艺处理后,材料存在应力集中系数.齿轮材料经碳氮共渗后,S-N 曲线向上移且斜率由原来的 -145.388 变为 -438.973,转折点循环数 N_0 变小.因此不能用材料的 S-N 曲线近似代替工艺处理后零件的 S-N 曲线,最好重新进行测定.

适当工艺处理对材料强度特性有很大的影响,在设计时需要充分考虑各个影响因素.

参考文献:

- [1] 赵少汴,王忠保.抗疲劳设计——方法与数据[M].北京:机械工业出版社,1997.
- [2] 卢曦,李萍萍,郑松林.高强度圆柱齿轮 S-N 曲线转折点循环数 N_0 的初步研究[J].中国机械工程,2007,18(3):324-327.
- [3] 卢曦,郑松林,冯金枝.齿轮疲劳强度与裂纹萌生区域的预测研究[J].材料热处理学报,2008,29(1):80-84.
- [4] 才庆魁.金属疲劳断裂理论[M].沈阳:东北工学院出版社,1989.
- [5] 郑修麟.屈服强度与裂纹形成寿命的关系[J].航空学报,1989,10(8):339-442.
- [6] 郑修麟.屈服强度与裂纹起始寿命间的关系[J].机械强度,1989,11(1):35-39.

(编辑:金 虹)