

基于强度梯度的传动轴热处理-硬度梯度匹配研究*

HEAT TREATMENT-HARDNESS GRADIENT MATCHING STUDY OF DRIVE SHAFT BASED ON STRENGTH GRADIENT

陈俊良** 卢曦*** 张健

(上海理工大学机械工程学院, 上海200093)

CHEN JunLiang LU Xi ZHANG Jian

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

摘要 以某汽车等速万向传动中间轴承受扭转载荷为例,提出了基于强度梯度的热处理-硬度梯度设计方法,即根据结构危险截面最大应力及其梯度分布得到理想强度梯度分布,再由硬度-强度转换关系得到理想硬度梯度分布,最后根据理想硬度梯度分布结合材料端淬曲线进行实际硬度梯度匹配。分别对采用40Cr、UC2和38B3三种材料的传动轴进行硬度梯度匹配,并对硬度梯度匹配后的传动轴进行了静强度试验。试验结果表明,采用不同材料的传动轴经热处理-硬度梯度匹配后,其静强度均能满足试验要求。

关键词 硬度梯度 强度梯度 热处理 端淬曲线 静强度

中图分类号 U463.216*.2

Abstract Taking the constant velocity universal joint drive shaft of a car under torsional load as an example, a heat treatment-hardness gradient design method based on the strength gradient was proposed. That was, the ideal strength gradient distribution was obtained according to the maximum stress and its gradient distribution of the dangerous section of the structure. Then, the ideal hardness gradient distribution was obtained from the hardness-strength conversion relation. Finally, the actual hardness gradient was matched according to the ideal hardness gradient distribution combined with the material end quenching curve. The hardness gradient matching of the drive shafts made of 40Cr, UC2 and 38B3 materials was carried out respectively, and the static strength test of the transmission shaft after the hardness gradient matching was carried out. The test results show that the static strength of the transmission shafts made of different materials can meet the test requirements after the heat treatment-hardness gradient matching.

Key words Hardness gradient; Strength gradient; Heat treatment; End quenching curve; Static strength

Corresponding author: LU Xi, E-mail: luxi_usst@163.com

The project supported by the National Science Foundation of China (No. 51975379).

Manuscript received 20220923, in revised form 20230306.

0 引言

热处理是机械制造中的重要工序,常用来提高零件硬度、强度和耐磨性等力学性能^[1-2]。现有结构热处理强度设计,以危险点强度为目标进行整体硬度匹配。在结构硬度分布设计过程中,无法定量确定硬度梯度分布,导致结构硬度设计过程中无法避免地出现危险截面局部硬度冗余,最终造成强度过剩。因此,进行基于强度梯度的热处理-硬度梯度匹配研究对于实现结构硬度梯度分布定量匹配设计,解决原有按整

体强度观点进行设计所导致的危险截面局部强度冗余问题具有重要意义。

目前,国内外学者针对结构热处理-硬度的研究大都集中在材料组织成分或具体工艺参数对结构硬度、强度以及耐磨性等力学性能的影响上^[3-6]。SAHIN Y等^[7]研究了不同淬火温度对等温淬火球墨铸铁(Austempered Ductile Iron, ADI)材料强度的影响,得到了高强度高韧性ADI材料的热处理参数,但研究过程中并未考虑热处理后材料的硬度梯度分布情况。KIM H S等^[8]通过高频淬火提高汽车凸轮轴的硬度和

*20220923收到初稿,20230306收到修改稿。国家自然科学基金项目(51975379)资助。

**陈俊良,男,1999年生,河南南阳人,汉族,上海理工大学机械工程学院硕士研究生,主要研究方向为零件强度与可靠性。

***卢曦,男,1968年生,湖北老河口人,汉族,上海理工大学机械工程学院教授,博士研究生导师,主要研究方向为机械结构强度学、旋锻近净成形理论和技术。

耐磨性,以满足凸轮轴对硬度和耐磨性的高要求,并通过磨损试验验证了强化后的凸轮轴是合乎要求的,但研究过程中是通过整体硬度匹配来保证硬度和耐磨性要求的,这样就不可避免地导致结构危险截面局部硬度过剩。郑业方等^[9]研究了不同的热处理工艺对EA4T钢组织和性能的影响,并讨论了组织与性能的关系,并未对结构热处理后其组织和相应的硬度分布进行研究。肖来斌等^[10]采用正交试验对45钢半轴套管进行热处理工艺试验,研究了淬火温度、保温时间、淬火介质对显微组织和硬度的影响,得到半轴套管的最佳热处理工艺参数,但在确定最佳热处理工艺参数时,未考虑结构硬度梯度分布设计。

本文提出了一种基于结构强度梯度的热处理-硬

度梯度分布设计方法,并以某汽车等速万向传动中间轴为例,根据静扭转强度试验要求,分别对采用40Cr、UC2和38B3材料的传动轴进行了热处理-硬度梯度分布设计,并通过试验验证表明,不同材料的传动轴经热处理-硬度梯度设计后,其强度均能满足要求。

1 材料与方法

以某汽车等速万向传动中间轴为例,该传动轴为两端开有花键的实心轴,左端为固定端,右端为滑移端,传动轴最小直径为26.5 mm。传动轴的静强度试验要求为:固定端摆角40°、滑移端摆角10°时,破坏转矩≥3 500 N·m。传动轴材料为40Cr、UC2和38B3,三种材料的化学成分和端淬曲线分别如表1~表3和图1所示。

表 1 40Cr 化学成分

Tab. 1 Chemical composition of 40Cr						%	
C	Si	Mn	Cr	P	S		
0.37~0.44	0.17~0.37	0.50~0.80	0.80~1.10	≤0.040	≤0.040		

表 2 UC2 化学成分

Tab. 2 Chemical composition of UC2									%	
C	Si	Mn	Cr	P	S	Cu	Al	V		
0.45~0.50	0.15~0.35	0.60~0.80	0.15~0.25	≤0.035	0.015~0.025	≤0.25	0.015~0.040	≤0.05		

表 3 38B3 化学成分

Tab. 3 Chemical composition of 38B3										%	
C	Si	Mn	Ti	P	S	Cu	Al	B	N		
0.36~0.39	0.10~0.40	0.70~1.10	0.03~0.06	≤0.035	0.010~0.025	≤0.25	0.02~0.06	0.000 8~0.005	≤0.012		

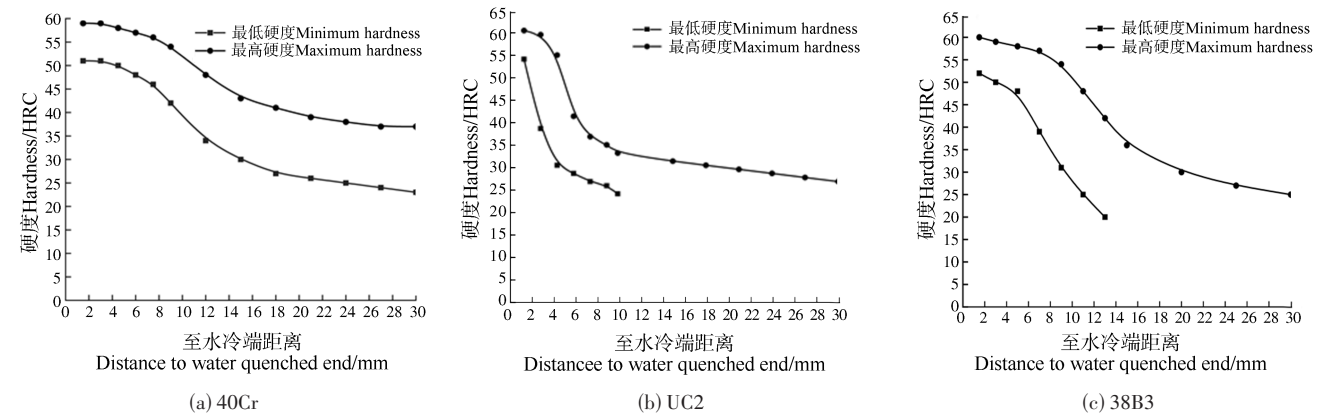


图 1 不同材料的端淬曲线

Fig. 1 End quenching curve of different materials

基于强度梯度的传动轴热处理-硬度梯度设计方法如下:

- 1)确定极限静载荷下结构危险截面的最大应力及其梯度分布。
- 2)根据结构最大应力及其梯度分布,确定危险截面的理想静强度梯度分布,由硬度-强度转换关系得到理想硬度梯度分布。
- 3)以理想硬度梯度为目标,结合材料端淬曲线,

确定传动轴表面硬度、硬化层深度、淬硬层转折点以及心部硬度等热处理要求。

- 4)根据热处理要求,确定结构危险截面的实际硬度梯度分布。

2 结果与分析

2.1 危险截面理想强度梯度分布

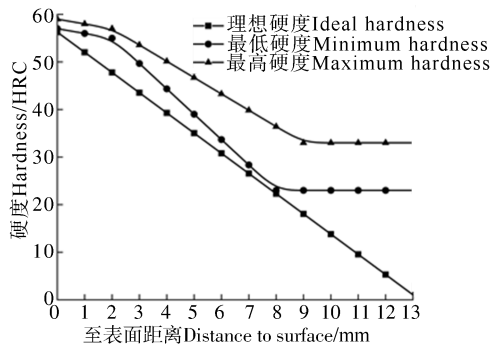
在等速万向传动轴传递转矩过程中,由于等速万

表 4 三种材料对应的热处理要求

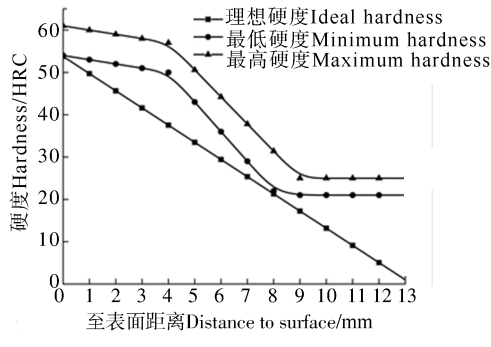
Tab. 4 Heat treatment requirement corresponding to three materials

材料 Material	表面硬度 Surface hardness/ HRC	硬化层深度 Hardened layer depth/ mm	心部硬度 Centre hardness/ HRC	淬硬层 转折点 Hardened layer turning point Q
40Cr	57~59	2~3.5	23~33	距表面 8 mm 处 8 mm from the surface
UC2	54~61	3.5~4	21~25	距表面 8.5 mm 处 8.5 mm from the surface
38B3	55~60	3~3.5	21~24	距表面 9 mm 处 9 mm from the surface

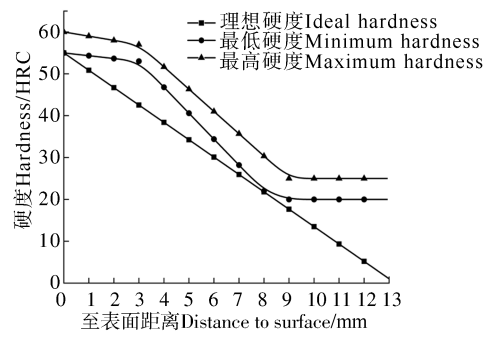
根据表 4 得到相应的实际硬度梯度分布,如图 5 所示,并分别给出了相应的理想硬度梯度分布。



(a) 40Cr



(b) UC2



(c) 38B3

图 5 理想与实际硬度梯度分布

Fig. 5 Ideal and actual hardness gradient distribution

2.3 强度梯度校核

根据所匹配的不同材料的最低实际硬度分布,结合相应的硬度-强度转换关系,得到不同材料的实际强度分布,并将它们与结构的极限应力分布和理想强度分布放在同一坐标系中,得到结构全场应力-强度干涉模型,如图 6 所示。

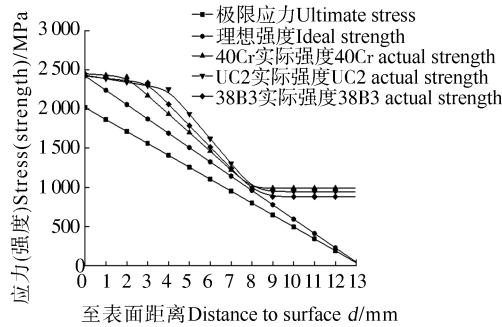


图 6 全场应力-强度干涉模型

Fig. 6 Full-field stress-strength interference model

由图 6 可知,传动轴表面理想强度为 2 420 MPa, 40Cr、UC2 和 38B3 对应的实际表面强度分别为 2 451、2 430、2 420 MPa。说明三种材料经热处理-硬度梯度匹配后结构表面强度均满足要求,且都得到充分发挥。

对于 40Cr,淬硬层转折点在距离表面 8 mm 处,该点实际强度为 1 219 MPa,理想强度为 1 142 MPa;对于 UC2,淬硬层转折点在距离表面 8.5 mm 处,该点实际强度为 1 148 MPa,理想强度为 1 050 MPa;对于 38B3,淬硬层转折点在距离表面 9 mm 处,该点实际强度为 968 MPa,理想强度为 959 MPa。综上可知,三种材料对应的淬硬层转折点处的强度均满足要求,且都基本得到充分发挥。

传动轴心部理想强度为零,40Cr、UC2 和 38B3 对应的实际心部强度分别为 989、945、880 MPa,因此,三种材料对应的心部强度都过剩,在传动轴结构允许的情况下可设计为空心结构,以减小结构心部强度过剩。

上述分析结果表明,分别对不同材料的传动轴进行热处理-硬度梯度匹配后其强度均能满足要求。

2.4 试验验证

分别对使用三种材料的传动轴,根据所匹配的热处理要求进行热处理,对热处理后的传动轴根据静强度试验要求,即固定端摆角 40°、滑移端摆角 10°,进行静强度试验。三种材料对应的传动轴静强度试验结果如表 5 所示,相应的传动轴试验后破坏照片如图 7 所示。试制 3 次后发现结果都接近,对静强度设计的技术是成熟准确的,出于节约成本和材料的考虑只进行了 3 次试制来验证,但其结果仍具有代表性。

由表 5 可知,使用 40Cr、UC2 和 38B3 三种材料的传动轴,当转矩对应的应力大于结构强度时,结构发生破坏,对应的平均破坏转矩分别为 3 933、4 548、4 377 N·m,均满足传动轴破坏转矩 $\geq 3\,500$ N·m 的试验要求;传动轴断裂位置均位于直径最小处,即结构

的危险截面,这是因为危险截面危险点处的应力最先大于该点强度。这说明,不同材料的传动轴经热处理-硬度梯度匹配后其强度均能满足要求,且结构的失效位置位于危险截面。

表 5 不同材料传动轴的破坏转矩

Tab. 5 Breaking torques of drive shafts with different materials

材料 Material	编号 No.	破坏转矩 Breaking torque/ (N·m)	平均破坏转矩 Average breaking torque/(N·m)
40Cr	01	3 910	3 933
	02	3 932	
	03	3 956	
UC2	01	4 564	4 548
	02	4 537	
	03	4 543	
38B3	01	4 384	4 377
	02	4 376	
	03	4 372	



图 7 传动轴试验后破坏图

Fig. 7 Failure diagram of drive shafts after the test

其中传动轴破坏转矩远高于 $3\,500\text{ N}\cdot\text{m}$,是因为在设计过程中考虑到力学分析的可能误差、材料强度指标的误差及其他不可预知的误差,将试验要求的破坏转矩乘以安全系数 1.2,故传动轴实际设计的破坏转矩为 $4\,200\text{ N}\cdot\text{m}$,与 40Cr、UC2 和 38B3 三种材料传动轴的试验平均破坏转矩误差分别为 6.36%、8.29%、4.21%。这说明根据本文所提出的热处理-硬度梯度设计方法所设计的结构理论强度与真实强度较为接近。

3 结论

本文以某汽车等速万向传动中间轴为例,根据基于强度梯度的热处理-硬度梯度设计方法,按照传动轴静强度试验要求分别对三种不同材料传动轴进行了热处理-硬度梯度匹配,主要获得了以下结论:

1) 采用 40Cr、UC2 和 38B3 三种不同材料的传动轴通过热处理-硬度梯度匹配后其强度均能满足试验要求。

2) 根据传动轴试验强度要求,提出了基于强度梯度的结构热处理-硬度梯度设计方法,实现了机械结构和零部件硬度分布的定量匹配设计,解决了原有按整体强度观点进行设计所导致的与局部硬度不匹配而

产生的局部强度过剩问题。

3) 为热处理表面硬度、心部硬度、硬化层深度、硬度梯度分布等的制定提供了理论依据。

4) 通过传动轴总成的静扭转试验验证了本文所提出的基于强度梯度的热处理-硬度梯度设计方法的可行性。

参考文献 (References)

- [1] 卢曦. 轿车等速万向传动中间轴热处理工艺强化[J]. 材料热处理学报, 2015, 36(增刊 2): 41-44.
LU Xi. Heat treatment strengthening of constant velocity universal intermediate shaft [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2015, 36(Suppl. 2): 41-44 (In Chinese).
- [2] HAMMI H, OUAFAI A E, BARKA N. Study of frequency effects on hardness profile of spline shaft heat-treated by induction [J]. Journal of Materials Science and Chemical Engineering, 2016, 4(3): 1-9.
- [3] SMOLJAN B, ILJKIĆ D, TRAVEN F. Mathematical modelling of mechanical properties of quenched and tempered steel [J]. International Heat Treatment and Surface Engineering, 2013, 7(1): 16-22.
- [4] PESSARD E, MOREL F, ABRIVARD B, et al. A new methodology for designing heat treated components in fatigue [J]. Procedia Engineering, 2013, 66: 292-299.
- [5] KROTKOVA O V, POLYAKOV S G, PIS' MENNYI A S, et al. Influence of inductive heating on the corrosion resistance of thin-walled chromonickel-steel pipe [J]. Steel in Translation, 2011, 41(3): 256-259.
- [6] 杨星地. 含钒 LZ50 车轴钢的热处理工艺[J]. 金属热处理, 2014, 39(7): 107-110.
YANG XingDi. Heat treatment process for LZ50 railway axle steel containing vanadium [J]. Heat Treatment of Metals, 2014, 39(7): 107-110 (In Chinese).
- [7] SAHIN Y, KICICLI V, DZER M, et al. Comparison of abrasive wear behavior of ductile iron with different dual matrix structures [J]. Wear, 2010, 268(1/2): 153-165.
- [8] KIM H S, KIM J H. A study on mechanical property of SM53C steel by high frequency induction hardening [J]. Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineer, 2010, 9(6): 7-15.
- [9] 郑业方, 杨军, 苏立武, 等. 热处理工艺对 EA4T 钢车轴组织与性能的影响[J]. 金属热处理, 2011, 36(12): 38-40.
ZHENG YeFang, YANG Jun, SU LiWu, et al. Effect of heat treatment process on microstructure and properties of EA4T steel axle [J]. Heat Treatment of Metals, 2011, 36(12): 38-40 (In Chinese).
- [10] 肖来斌, 刘宁, 于虎, 等. 基于正交试验的半轴套管热处理工艺研究[J]. 热处理, 2014, 29(3): 24-26.
XIAO LaiBin, LIU Ning, YU Hu, et al. Research on heat treatment process of semiaxis bush based on orthogonal test [J]. Heat Treatment, 2014, 29(3): 24-26 (In Chinese).
- [11] 卢曦, 张振东. 球笼式等速万向节的振动分析[J]. 轴承, 2002(8): 28-30.
LU Xi, ZHANG ZhenDong. Analysis on vibration of ball basket constant velocity universal joint [J]. Bearing, 2002(8): 28-30 (In Chinese).
- [12] 黄嘉炜, 卢曦. 基于强度场的八球万向节内套结构与静强度设计匹配研究[J]. 机械强度, 2021, 43(3): 686-692.
HUANG JiaWei, LU Xi. Research on the 8-ball universal joint inner sleeve structure and static strength design matching based on strength field [J]. Journal of Mechanical Strength, 2021, 43(3): 686-692 (In Chinese).