

SAE8620H等齿轮渗碳钢疲劳强度的提升

王彩，谢立湘，马军，潘晓东

摘要：针对SAE8620H等齿轮渗碳钢，主要考虑合金元素、表面状态对疲劳强度的影响，通过材料选取、渗碳淬火工艺优化、喷丸强化、以及强喷后磷化、高能等离子弧喷涂等工艺措施，提升齿轮疲劳强度。结果表明，强喷后高能等离子弧喷涂复合工艺能更有效地提高齿轮的疲劳强度，延长齿轮副的疲劳寿命。

关键词：疲劳强度；喷丸强化；高能等离子弧喷涂；磷化处理

设计开发六档轿车变速器时，最大输入扭矩增加到180N·m以上，为了减轻变速器重量，结构更加轻便，仅采用渗碳淬火工艺已无法满足齿轮疲劳寿命的设计要求。为此，我公司从材料、工艺上进行新的尝试来提升齿轮根部的弯曲疲劳强度和齿轮表面的接触疲劳强度。而影响疲劳强度的因素有受力状态、工作温度、材料的化学成分及显微组织、表面质量和残余应力等。现主要考虑合金元素、表面状态对疲劳强度的影响，通过工艺开发，充分发掘材料的性能来提高疲劳强度，满足疲劳寿命的设计要求。

1. 增加低碳合金钢中Ni含量

变速器齿轮可采用SAE8620H材料代替20CrMoH来提高齿轮根部的弯曲疲劳强度，表1为SAE8620H与20CrMoH材料主要化学成分的区别。SAE8620H材料Ni含量增加了约0.50%，Cr含量减少约0.50%，即用0.50%的Ni代替0.50%的Cr。Ni能中等强化铁素体，增加Ni能很好地提高

表1 20CrMoH与SAE8620H主要化学成分（质量分数）要求 （%）

牌号	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni
20CrMoH	0.17～0.23	0.17～0.35	0.55～0.90	0.85～1.25	0.15～0.35	—
SAE8620H	0.17～0.23	0.15～0.35	0.60～0.95	0.35～0.65	0.15～0.25	0.35～0.75

均符合图样要求。因此，在生产上可选用其中任一种炉型为生产炉，另一炉型为备用炉。

3. 展望

零件经过热处理后发生变形是不可避免的，由于热处理过程中产生的热应力、组织应力，以及热处理之前机械加工、锻造、轧制等所引起的残余应力、组织分布不均匀等，均可能导致热处理过程中产生零件变形[2]，因此，对于非对称、薄壁等异形结构零件的热变形规律需要经过大量试验、长期跟踪才能掌握。根据热处理变形规律，合理设计机加工艺，冷加工工艺和热加工工艺相互配合，才能更好地满足产品设计要求。

参考文献

[1] 侯增寿，卢光熙.金属学原理[M].上海：上海科学技术出版社，1990.

[2] 刘云旭，王淮，季长涛.正火影响渗碳齿轮热处理畸变的一个重要因素[J].金属热处理，2005，30（3）：46-49.

作者简介：海侠女、杨扬，陕西法士特齿轮零件有限责任公司。

MW 20170523

心部铁素体组织的强度。分别抽取不同炉号的10个试样，进行力学性能试验，见表2，SAE8620H试样屈服强度明显高于20CrMoH试样10%以上，有利于齿轮根部弯曲疲劳强度的提升。

2. 控制齿轮淬火后的心部硬度

Ni对淬透性的影响弱于Cr，在其他主要成分相差不大时，SAE8620H的淬透性明显低于20CrMoH，J9端淬值通常低3HRC左右，即使轿车变速器齿轮模数≤3mm，但对心部硬度造成的影响很明显。为了充分发挥SAE8620H材料的韧性，提高齿轮根部弯曲疲劳强度，通过台架试验发现轿车变速器齿轮的心部硬度最佳控制在35～40HRC。SAE8620H材料可以采取如下措施来提高齿根心部硬度：选取合适的端淬值；适当冷速的淬火油；提高淬火温度；提高淬火时淬冷烈度及均匀性等。

3. 选取合适的喷丸强化工艺

对扭矩要求更高的齿轮副，在齿部精加工后增加强力喷丸工艺，在齿轮表层形成一塑性变形层即强化层，当前我公司喷丸强化工艺强化层深度约为0.15mm。利用该表面塑性变形层分别从残余压应力场、变形显微组织、残留奥氏体向马氏体转变、机加工刀痕的有效消除等方面来改善齿轮的疲劳强度。

但喷丸强化是具有动能的高速钢丸喷打到齿面，使齿部产生塑性变形，对齿面存在较大的损伤。对于研磨齿面，表面粗糙度变差约0.2μm、齿部精度下降一级以上。通过选取较低的喷丸强度（弧高值0.2～0.3mmA），配合圆度G2级以上的切丝钢丸，能有效减少齿面塑性变形量，而表层残余压应力又能达到600MPa以上的设计要求。在正常喷丸强化后，采用直径0.2mm的切丝钢丸再进行一次更低强度的喷打，能进一步优化齿面的表面粗糙度，减少表层疲劳微裂纹源。

4. 喷丸强化后磷化处理

针对喷丸强化后齿面损伤问题，可在喷丸强化后再增加锰系抗磨磷化工艺。齿面在喷丸强化过程中产生了大量的凹坑，磷化膜能很好地覆盖凹坑，减小齿面表面粗糙度值，同时磷化膜具有多孔结构可吸附大量润滑油，改善齿面润滑状况。为了获得较好的存油效果，采用90～98℃的高温磷化工艺，磷化膜厚度10～25μm，磷化膜晶粒度3～16μm，表面腐蚀深度控制在0～4级。经试验测量，磷化后齿面摩擦因数约为0.151，优于普通磨齿齿面摩擦因数，改善了齿面啮合时的润滑状态，从而延长了齿轮副疲劳寿命。

5. 喷丸强化后高能等离子弧喷涂处理

（1）表层显微组织相变强化　高能等离子弧喷涂工艺致使表层约20μm深度区域化学成分及显微组织发生改变，从20μm～0.15mm处依然是喷丸强化层。高能等离子弧喷涂，采用Mo等合金元素组成的复合材料，Mo能使钢的晶粒细化，提高力学性能。在高温高压的条件下撞击并渗透进母材的20μm以内深度表面，使金属表面20μm以内深度的金相组织发生改变（见图1、图2），图2表面波纹度很小，几乎没有晶界氧化，疲劳微裂纹就不易从表面产生，有利于齿面疲劳强度的提高。

经过高能等离子弧喷涂后，表面显微硬度有所提升（见表3），虽影响较小，但能适当提升齿面接触疲劳强度。

（2）残余压应力增加　从残余应力检测（见表4）可看出，次表层残余压应力增加量达到10%以上，进一步强化了压应力场，从而提升疲劳强度。

表2　20CrMoH和SAE8620H屈服强度对比

材料牌号	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#	10#	平均值
20CrMoH	842	847	851	853	860	854	854	858	862	855	853.6
SAE8620H	954	960	963	956	944	951	972	978	957	950	958.5

表3　输入轴喷涂前后表面硬度值

测量点	热喷涂前表面硬度 HV0.010	热喷涂后表面硬度 HV0.010	硬度变化值 HV0.010	提高比例（%）
1#	851.7	1015.3	163.6	19
2#	876.6	1016.8	140.2	16
3#	880.3	1006.6	126.3	14
4#	868.3	1008.4	140.1	16
5#	903.9	1011.5	107.6	12
平均值	876.16	1011.72	135.56	15

（3）齿面摩擦因数的改善

在加工过程中加入固体润滑剂，固体润滑剂渗入金属表面后，使表面具有自润滑的效果，摩擦阻力减小。经过摩擦试验测试（见图3），干摩擦因数下降12.1%，湿摩擦因数下降7.8%，齿轮副在啮合过程中，齿面运转状况得到进一步改善。

经过高能等离子弧喷涂后，齿形轮廓偏差、渐开线轮廓偏差值下降4～6μm；对于0.8～1.6μm的磨、剃齿面，齿面表面粗糙度改善约50%（见表5）。高能等离子弧喷涂能很好地弥补喷丸强化给齿面带来的损伤，优化齿轮表面质量，从而提升疲劳强度。



图1 渗碳淬火后金相组织（500×）

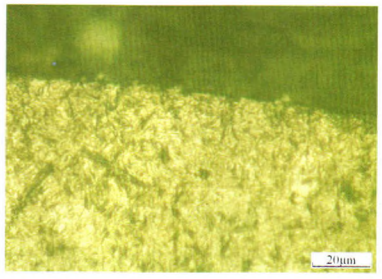


图2 喷涂后金相组织（500×）

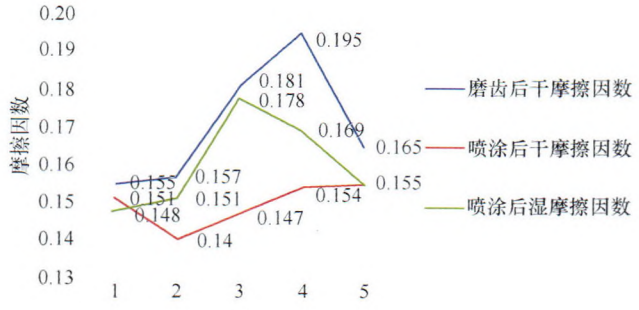


图3 齿面摩擦因数折线图

表4 输入轴齿部喷涂前后残余应力值

齿根深度/μm	A样			B样		
	强喷/MPa	强喷后热喷涂/MPa	增加比例（%）	强喷/MPa	强喷后热喷涂/MPa	增加比例（%）
0	-822	-861	4.7	-835	-877	5.0
20	-1176	-1319	12.2	-1093	-1202	10.0
50	-1233	-1259	2.1	-1169	-1317	12.7

表5 输入轴喷涂前后表面粗糙度变化

热喷涂前处理工艺	热喷涂前表面粗糙度/μm	热喷涂后表面粗糙度/μm	表面粗糙度变小值/μm	下降比例（%）
强力喷丸+磨齿	0.7919	0.4128	0.3791	48
插齿+渗碳淬火+强力喷丸	1.8824	0.8088	1.0736	57
剃齿+渗碳淬火+强力喷丸	1.7302	1.0375	0.6927	40

6. 结语

综上所述，提高低碳合金钢齿轮的疲劳强度，可以采取以下措施：

（1）选取韧性较好的SAE8620H等含Ni低碳合金钢。

（2）采用合适的渗碳淬火工艺，控制齿轮心部硬度。

（3）采取适当的喷丸强化工艺，提升表层残余压应力值。

（4）强喷后增加高温等离子弧喷涂等复合工艺。

参考文献

[1] 成大先.机械设计手册[M].5版.北京：化学工业出版社，2007.

[2] 王广生，等.热处理手册[M].北京：机械工业出版社，2001：39-42.

[3] 徐锦康.机械设计[M].北京：高等教育出版社，2004：22-56.

[4] 姚卫星.结构疲劳寿命分析[M].北京：国防工业出版社，2003.

[5] 高玉魁.喷丸强化对渗氮40Cr和30CrMo钢疲劳性能的影响[J].金属热处理，2008.

[6] 付杰，董炎峰，付广柱.热处理对提高疲劳强度与修复疲劳裂纹的影响[J].热处理技术与装备，2014（12）.

作者简介：王彩、谢立湘、马军、潘晓东，株洲齿轮有限责任公司。

MW 20170521