

功能梯度材料应用在齿轮上的可行性分析

吕天杰, 李 强*

(北京航空航天大学 交通科学与工程学院, 北京 100191)

摘要: 为解决齿轮热处理过程中存在畸变、齿根处弯曲应力增加、齿轮的寿命降低等问题,将功能材料技术应用到齿轮工作接触面处(简称功能梯度齿轮)。首先,开展了单质齿轮性能与单质齿轮热处理后性能的对比分析;然后,建立了单质圆柱渐开线齿轮模型与功能梯度材料圆柱渐开线齿轮模型,对其进行了弯曲应力有限元计算,并对其性能进行了对比分析。将未经热处理的单质齿轮作为桥梁,建立了单质齿轮热处理后的性能与功能梯度材料齿轮性能之间的关系。功能梯度材料不仅在轮齿表面硬度与齿根弯曲应力方面比热处理后的齿轮有更好的性能,而且能避免齿轮热处理过程中产生的畸变、渗碳层不均匀等缺陷。分析结果表明:将功能梯度材料应用到齿轮上是可行的。

关键词: 功能梯度材料;齿根弯曲应力;圆柱直齿齿轮;有限元计算

中图分类号: TH132.41;TH122;TB34

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2012)04-0381-04

Feasibility analysis of functionally graded material used on gear

LV Tian-jie, LI Qiang

(School of Transportation Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: In order to solve the problems of distortion, the tooth root bending stress increase, the life of the gear reduction and other issues in gear heat treatment process, functionally graded material (FGM) was used on gear working surface. Firstly, the common gear performance and heat treated gear performance comparison analysis was made; then a common cylindrical involute gear model and a functionally graded material cylindrical involute gear model were created, the finite element calculation of bending stress and analysis of the two models were made. Based on the relationship with the no heat treated common gear, the relationship between the performance of heat treated gear and the performance of FGM gear was established. The FGM gear not only has better performance on the hardness of the working surface and the root bending stress, but also can avoid disadvantages about distortion and uniform carburized layer which might happened in heat treatment process. The experimental results show that FGM can be used on gear.

Key words: functionally graded material (FGM); tooth root bending stress; spur gear; finite element analysis

0 引 言

功能梯度材料(FGM)是以计算机辅助材料设计为基础,采用先进的复合技术,使构成材料的要素沿厚度方向由一侧向另一侧连续变化,从而使材料的性质和功能也呈梯度变化的一种新型材料^[1-2]。功能梯度材料属于非均质材料,作为一种新型材料,近年来研究人员对它进行了广泛的研究并取得了一系列成果。美国密西

根大学的 Kumar 和 Dutta 针对功能梯度材料构成的异向材质零件提出了 r_m -object 模型和相应的设计方法,促进了功能梯度材料的发展^[3]。

本研究基于 ANSYS 建立单质齿轮模型和功能梯度材料模型,对其结果进行比较,并对单质齿轮与热处理后的单质齿轮进行比较,找出功能梯度材料齿轮与处理后的单质齿轮之间的关系。

收稿日期:2011-11-07

作者简介:吕天杰(1988-),男,山东济宁人,主要从事功能梯度材料方面的研究。E-mail:lvtianjie1234@126.com

通信联系人:李 强,男,博士。E-mail:ljzylq@126.com

1 单质齿轮与热处理后的单质齿轮的性能对比

1.1 热处理后单质齿轮的常见缺陷

(1) 渗碳层过厚。使用时齿轮的塑性变形能力降低,耐冲击性减弱,齿根弯曲应力增大,弯曲疲劳强度降低,齿尖角变脆,易于崩裂;渗碳层过薄:齿轮工作面耐磨性和抗疲劳能力降低,对齿面抗摩擦、磨损性能都有不利影响,同时表面硬化层抗剥落性能降低,导致齿轮的使用寿命降低;齿轮渗碳层深度不均匀:渗碳层深度不均匀导致齿轮不同部位性能不能延续,薄弱区域首先损坏,继而导致整个齿轮损坏^[4-8]。

(2) 畸变。在齿轮的热处理过程中,畸变是难以避免的。齿轮畸变对装配后的性能有很大的影响。齿轮的畸变相当复杂,它不仅与原材料、原始组织、热处理工艺有关,还与齿轮的几何形状有关。在其他条件相同的情况下,由于形状的不同,不但畸变的程度不同,而且畸变的方向都会发生改变,这就使得齿轮的畸变规律不易掌握,造成生产中经常因畸变超差而产生废品。

(3) 金相组织缺陷。包括马氏体粗大、残余奥氏体过多、表层碳化物过多、心部铁素体超差及表面氧化脱碳等等。马氏体、残余奥氏体及铁素体超差一方面会造成硬度缺陷,另外还会使得齿轮淬火变形加剧,且在M粗大处易出现研磨裂纹;当出现过剩渗碳,在齿轮的表层尤其顶部会析出块状或网状碳化物。实际生产中后桥齿轮热处理多在连续渗碳炉内进行,当炉内气氛中CO₂和H₂O达到一定比例,渗碳的同时会发生氧化反应,表面氧化及晶界氧化会导致齿轮的耐磨性、耐疲劳性下降。

1.2 热处理后的单质齿轮的优点

热处理后的单质齿轮的轮齿具有更高的硬度,从而具有较好耐磨强度与接触强度。

2 渐开线圆柱直齿齿轮的数学模型

圆柱直齿渐开线齿轮的齿廓由齿顶圆弧、渐开线齿廓曲线、齿根过度圆弧、齿根圆弧4段曲线方程组成,其中齿顶圆弧和齿根圆弧可以在Pro/E软件中自动生成,不需要考虑^[9-13]。齿廓曲线的数学模型为:

$$\begin{cases} x = r \cos \theta + (r\theta - S_h) \sin(\theta + \alpha_i) \cos \alpha_i \\ y = \pm r \sin \theta \mu (r\theta - S_h) \cos(\theta + \alpha) \cos \alpha_i \end{cases} \quad (1)$$

式中: S_h—刀具节线长度的一半, θ—渐开线摆角, α_i—齿轮分度圆压力角。

齿根过度齿廓曲线数学模型:

$$\begin{cases} x = r \cos \theta + (r\theta - S_{hf}) \sin \frac{(\theta + \gamma_1)}{\cos \gamma_1} \\ y = \pm r \sin \theta \mu (r\theta - S_{hf}) \cos \frac{(\theta + \gamma_1)}{\cos \gamma_1} \end{cases} \quad (2)$$

式中: θ—渐开线摆角; S_{hf}—包络点距刀具中垂线的距离, S_{hf} = S_f + ρ_f (1 - ε_f² cos² γ)^{-0.5} cos γ; γ₁—包络点的端面压力角, γ₁ = arctan(-H_f / (rθ - S_f))。

式(1)、式(2)中其他字符的含义详见参考文献[4-6]。

3 渐开线圆柱单质直齿齿轮 ANSYS 仿真

建模的具体过程分析如下:

(1) 选取单元。选择10节点10 node 92单元。

(2) 定义材料。齿轮的材料选用Q235,其弹性模量E=200 GPa,泊松比μ=0.3。

(3) 齿轮的参数。模数m=6 mm、齿数z=28、压力角α=20°,其余均为标准参数。

(4) 建模。齿轮的齿廓为渐开线,在ANSYS中画渐开线比较复杂,本研究先在Pro/E中画出上述齿廓曲线,然后将其导入ANSYS。在ANSYS中建立圆柱齿轮模型如图1(a)所示。为了计算更迅速,本研究截取其中的3个齿,如图1(b)所示。

(5) 单元划分。在平面的图形拉伸之前需要将齿轮的渐开线用布尔操作断开为3段,为之后的加载做准备。网格划分如图1(c)所示。

(6) 加载。因为如果载荷加载到齿轮啮合线上,

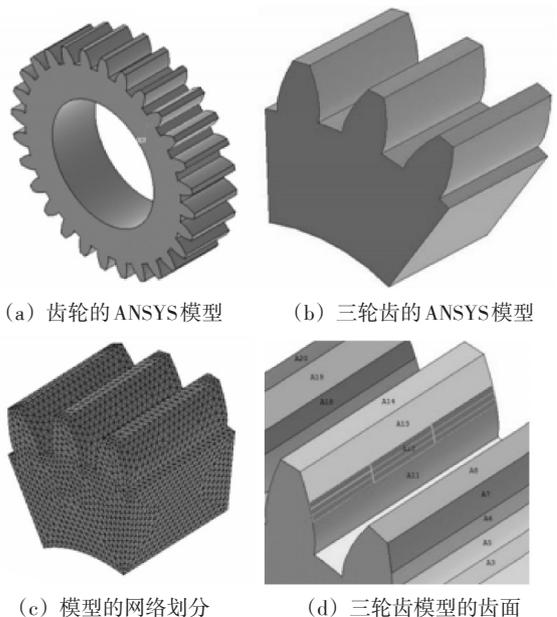


图1 齿轮的三维建模

最大应力将出现在啮合线与齿轮端面的交界处。虽然齿根处也产生应力集中,但是只能靠该处的颜色大致计算出该处的应力值,不利于对其具体的应力值进行数据分析。因此,本研究把25 kN的载荷均匀加载到以啮合线为中心的一个面上,受力面积为一个齿廓面积的1/6。

(7) 求解。齿轮的应力分布情况如图2所示,最大应力出现在齿根处,应力值为48 103 MPa。

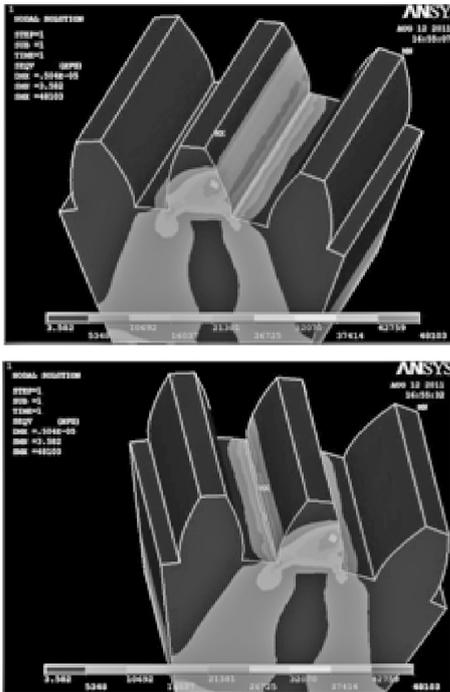


图2 Q235齿轮的应力图

4 功能梯度材料渐开线圆柱直齿齿轮 ANSYS 仿真

建模的具体过程分析如下:

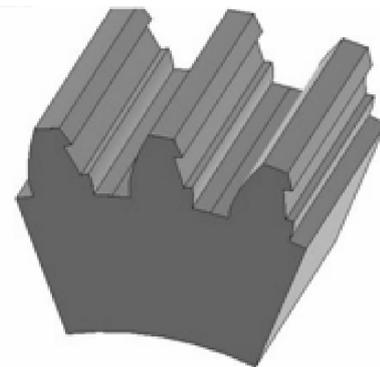
(1) 选取单元。选择10节点10node 92单元。

(2) 定义材料。齿轮的材料选用Q235和20CrMnTiH。查机械手册得20CrMnTiH的弹性模量 $E=207$ GPa,泊松比 $\mu=0.25$ 。

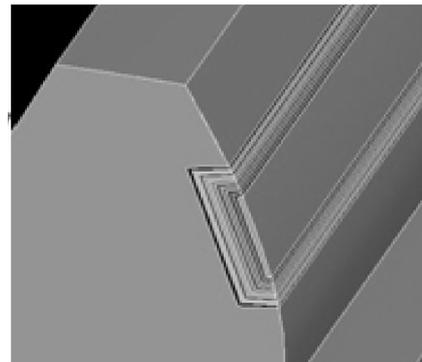
(3) 齿轮的参数。模数 $m=6$ mm、齿数 $z=28$ 、压力角 $\alpha=20^\circ$ 其余均为标准参数。

(4) 建模。本研究将Pro/E中的齿廓曲线导入ANSYS中,建立齿轮三维模型,该三维模型由11个部分组成,这11个部分由booleans操作glue而成。值得注意

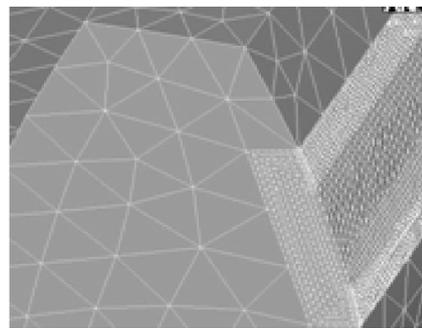
的是如果glue不成功,可以将booleans-settings的最后一项稍微改大一些。最大的部分为齿轮的主体部分,该部分选用Q235,如图3(a)所示。一个齿的功能梯度材料模型如图3(b)所示,轮齿的右侧有10个小的部分,最外侧部分的材料是20CrMnTiH,里面的几个部分是Q235与20CrMnTiH按不同的体积比混合而成的材料,从外向里Q235的体积分数依次为10%、20%、30%、40%、50%、60%、70%、80%、90%。两种不同材料按不同的体积比混合,差值得出的近似弹性模量与泊松比如表1所示。



(a) PGM齿轮的Q235部分



(b) PGM齿轮的一个齿



(c) PGM齿轮的网络划分

图3 FGM齿轮的三维模型

表1 不同体积分数下的弹性模量和泊松比

Q235的体积分数/(%)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
弹性模量 E /GPa	200	200.7	201.4	202.1	202.8	203.5	204.2	204.9	205.6	206.3	207
泊松比 μ	0.3	0.295	0.29	0.285	0.28	0.275	0.27	0.265	0.26	0.255	0.25

(5) 单元划分与加载。本研究将 25 000 N 的载荷均匀加载到以啮合线为中心的一个面上, 受力面积为一个齿廓面积的 1/6。网格划分如图 3(c) 所示。

(6) 求解。齿轮的应力分布情况如图 4 所示, 最大应力出现在齿根处, 最大应力值为 48 959 MPa。

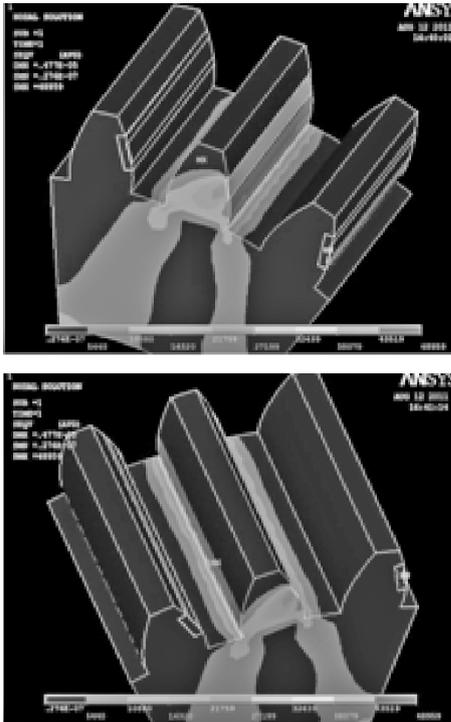


图4 FGM齿轮的应力图

5 结果与分析

(1) 从图 2、图 4 可以看出, 齿轮的最大弯曲应力位于齿根处, 齿轮的最危险部位是齿根, 轮齿接触时受力范围的边缘处次之。在 25 kN 的载荷的作用下普通齿轮的最大应力为 48 103 MPa, 功能梯度材料齿轮的最大应力为 48 959 MPa。

(2) 可以看出采用功能梯度材料后, 在同样的力的作用下, 齿根处的最大弯曲应力变化不大, 增大了 1.7%。而单质齿轮热处理后, 齿根处的弯曲应力会有显著的增加。可见功能梯材料齿轮在齿根弯曲应力方面的性能优于热处理后的单质齿轮。

(3) 选用功能梯度材料后, 由于 20CrMnTiH 的硬度比 Q235 高出很多, 使得齿轮的表面接触强度和摩擦强度有所改善。而且功能梯度材料齿轮的设计比较灵活, 如果 20CrMnTiH 的硬度和耐磨性能不满足要求, 可以更换满足要求的材料。

(4) 选用功能功能梯度材料齿轮, 基本上与普通齿轮渗碳热处理后的功能相似(齿根处的应力略有增加, 齿轮的耐磨性与接触强度增加), 而且不会产生渗碳带来的各种缺陷。

(5) 本研究中的功能梯度材料齿轮只应适单向传动的场合, 若需要双向传动, 需要将轮齿的两侧均做成功能梯度材料。

6 结束语

功能梯度材料齿轮具备热处理后单质齿轮的各种优点, 并且没有热处理畸变的缺点, 该材料在解决热处理后齿轮的弯曲应力不足、热处理工艺精度不满足要求方面具有重大的意义。本研究通过对功能梯度材料齿轮与单质热处理齿轮性能的对比分析, 验证了功能梯度材料应用在齿轮上的可行性, 可以解决我国齿轮热处理水平达不到要求的问题。

接下来的研究工作可以进一步对汽车或机床上的特定齿轮进行相应的对比分析, 以验证是否可用功能梯度材料代替。

参考文献(References):

- [1] 李进, 田兴华. 功能梯度材料的研究现状及应用[J]. 宁夏工程技术, 2007, 1(6): 80-83.
- [2] HIRANO T, TERAOKI J, YAMADA T. On the Design of Functionally Gradient Materials [C]//Proceedings of the First International Symposium on FGM. Sendai, 1990: 5-10.
- [3] KUMAR V, KULKANI P, DUTTA D. Adaptive slicing of heterogeneous solid models for layered manufacturing [J]. *Journal of Material Processing & Manufacturing Science*, 1999, 7(4): 324-342.
- [4] BALENDRA R. Net-shape forming state of the art [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, 115(2): 172-179.
- [5] BORRESEN B, HAGEN G, TUNOLD R. Hydrogen evolution on Ru/Ti-02 in 0.5NH₂S04 [J]. *Electrochimica Acta*, 2002, 47(8): 1819-1827.
- [6] 彭俊, 周述积, 楼芬丽. 汽车渗碳齿轮用钢及热处理工艺的现状和发展趋势[J]. 热处理技术与装备, 2007, 28(1): 3-6.
- [7] 顾敏, 陈国民. 我国齿轮制造中的热处理技术[J]. 金属热处理, 2005, 30(S): 30-37.
- [8] 雷声. 齿轮热处理变形的控制[J]. 机械工程师, 2008(5): 74-76.
- [9] 张志强, 贺静, 唐勇, 等. 任意转角位置的渐开线齿轮齿廓参数方程的研究[J]. 机械传动, 2005, 29(2): 10-13.
- [10] 张志强, 夏尊凤, 唐勇, 等. 任意转角位置的双渐开线齿轮的齿面数学模型[J]. 机械工程学报, 2006, 42(4): 58-63.
- [11] 赵加元. 渐开线齿轮轮齿的修形设计[J]. 机械, 2011, 38(10): 67-72.
- [12] 杨旭, 仲平. 基于 Visual C++ 与 ANSYS 的渐开线齿轮参数化建模[J]. 机械, 2011, 38(9): 47-50.
- [13] 唐勇, 张志强, 许焰, 等. 双渐开线齿轮的精确建模与特征参数选择[J]. 机械传动, 2006, 30(2): 24-27.

[编辑: 罗向阳]