汽车渗碳淬火齿轮的表面残余应力研究

东风汽车有限公司刃量具厂 （湖北十堰 442023） 刘建明 朱小清

【摘要】 研究了汽车齿轮生产中渗碳热处理过程中淬火冷却和回火状况，以及磨削加工对汽车齿轮表面残余应力的影响。研究表明，充分淬火冷却有利于表面残余压应力的提高，正确的磨削工艺不改变残余应力的分布，但过多的磨削热会在次表层产生高的拉应力。

我国汽车齿轮生产近些年来发展很快，但与发达国家相比技术上仍有一定的差距。许多汽车齿轮对表面残余应力都有一定的要求，国外在这方面进行了大量的研究，我国在这方面不太重视，尽管采用强力喷丸提高表面压应力技术在汽车行业已用于高负荷齿轮，但对热处理和磨削工艺对残余应力的影响缺乏足够的重视。近年来，在与美国康明斯公司的合作中，美方对我厂提供的齿轮表层残余应力提出了严格要求，为此，我们进行了一系列的试验和研究。本文主要就热处理过程中的冷却和回火状况，以及磨削工艺方面对齿轮表面残余压应力的影响进行了分析研究。

一、影响齿轮表面残余应力的因素

表面残余应力分为残余拉应力和残余压应力，通常情况下表面残余拉应力对齿轮性能是有害的，而表面残余压应力则对提高齿轮抗疲劳寿命十分有利。渗碳淬火齿轮表面残余应力主要是在渗碳淬火过程中产生的，但磨削加工过程对表面残余应力也有很大的影响。齿轮表面残余应力可以采用X射线衍射仪来测定。

1. 渗碳热处理

齿轮渗碳后，表层由于碳原子的渗入，碳含量高，而心部碳含量低，这将导致齿轮淬火时表层和心部马氏体转变顺序不一致。通常情况下，心部由于Ms点高，首先发生马氏体转变，体积膨胀，此时表层仍为塑性较好的奥氏体状态，产生塑性变形；当齿轮进一步冷却至表层的Ms点以下时，表层发生马氏体转变，体积膨胀，但由于心部已变成马氏体，很难产生塑性变形，因此，最后在表层通常产生压缩残余应力。材料的成分、工艺参数的淬火介质对残余应力均有影响。

2. 磨削加工

对于精度高的齿轮，在热处理后需要采用磨削加工来解决热处理变形的问题，磨削作业会因两个方面的原因而改变齿轮表面的应力状况：①磨削热造成表面的发热和冷却液的急冷引入新的应力。②磨削热过高时，会造成表面过回火，回火马氏体组织进一步分解，比体积变小，表面产生拉伸残余应力。

因此，通常情况下，齿轮磨削加工时，不正确的磨削作业会在表面产生残余拉应力。

二、试验结果及分析

1. 热处理过程对齿轮表面残余应力的影响

汽车齿轮渗碳后，表面含碳量高，马氏体开始转变温度Ms点低，而心部母材含碳量低，Ms点高。因此，齿轮渗碳后淬火时，一般从接近母材的马氏体开始转变温度Ms点高的部分开始相变，然后，相变向齿轮中心和外表扩散。当外表发生马氏体相变时，由于产生体积膨胀，最终便在齿轮表面形成残余压应力。材料、工艺参数等因素都会有影响，而本文只对冷却和回火状况进行分析。采用康明斯ISX系列发动机齿轮，分3组进行试验。齿轮材料为20CrMoH，在密封箱式多用炉经920℃渗碳后（渗碳层深为1.1mm左右），降温至840℃均温，然后入100℃的分级油中淬火冷却，最后再经180℃回火150min。第1组齿轮渗碳淬火后出炉不空冷，立即回火；第2组齿轮渗碳淬火冷至室温后回火；第3组齿轮正常渗碳淬火后不进行回火。最后，对上述3组齿轮分别切取齿轮试样，对节圆部位进行表层残余应力测试，测试结果见图1。

从图1可知，齿轮渗碳淬火后未冷至室温（第1组）的表面残余压应力为225MPa，而正常冷至室温的齿轮（第2组）表面残余压应力为345MPa，明显比前者大。这主要

是因为淬火时未冷至室温即回火的齿轮表面残余奥氏体量较多，表面相变时体积膨胀较小，因而表面残余压应力较小。因此，汽车齿轮渗碳淬火后，必须冷至室温后才能回火，以确保齿轮表面有较大的残余压应力。另外，如果齿轮正常渗碳淬火后再进行一次深冷处理，则可促使部分残余奥氏体进一步转变成马氏体，从而得到更大的表面残余压应力。齿轮正常渗碳淬火后表面残余压应力为 415MPa（第 3 组），高于上述回火后的应力值。回火过程中马氏体发生分解，析出碳化物，使马氏体的碳含量和正方度下降，从而比体积也变小，最终导致表面残余压应力减小，但回火提高韧性和强度。

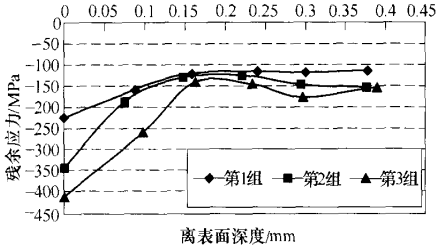

图 1 热处理工艺对残余应力的影响

2. 磨削加工对齿轮表面残余应力的影响

磨削加工实际上是由嵌有许多小刀具的砂轮进行的切削加工，这种磨削所产生的齿轮加工变形层比一般切削更局限于表面，而且伴随有很大的发热。为考察磨削量和磨削状况的影响，取同一批渗碳淬火齿轮，分几组进行试验，试样 1、试样 2 和试样 3 分别从未磨削齿轮、表面磨削深度 0.10mm 和磨削深度 0.15mm 的齿轮上切取。为了更进一步证实磨削工艺的影响，试样 4 取自磨削开裂的齿轮，残余应力测量见图 2。

从图 2 可以看出，渗碳热处理后最表层的压应力最显著，正确的施行磨削作业并不明显产生新的应力，但磨削量的大小直接影响到表面高压应力层的保留程度。而不恰当的磨削操作会强烈改变表层应力分布，从磨削开裂的齿面测量结果来看，最表面由于砂轮的挤压和热的影响压应力反而增大、而紧随着的次表层由于热的作用，产生过回火等因素导致拉应力的产生，超过抗拉强度后便出现磨削开裂。这些磨削拉应力的产生对齿轮的使用性能带来不利的影响。

三、结语

对齿轮最终表面残余应力有较大影响的因素主要是渗碳热处理工艺过程、磨削加工和强化喷丸处理。渗碳

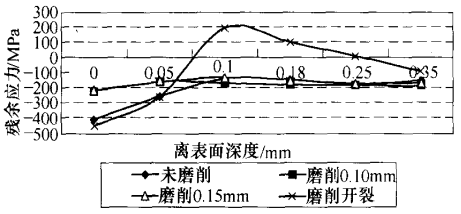

图 2 磨削工艺对残余应力的影响

淬火冷却方式对汽车齿轮表面残余应力影响较大，必须确保齿轮淬火后完全冷至室温才能回火，否则将导致齿轮表面残余压应力减小；渗碳淬火齿轮回火后，表面残余压应力有所下降，但会提高齿轮的综合力学性能。渗碳热处理后高的压应力在最表层，正确的磨削工艺虽不改变应力的分布状况，但磨削深度直接影响到高的压应力层的保留程度，不正确的磨削作业会强烈改变热处理后的应力分布，拉应力的产生不仅容易产生磨削裂纹，而且严重影响齿轮的使用性能。（20050928）

（上接第 49 页）

4. 渗硫层对摩擦副的影响

有关研究人员曾对摩擦副对磨零件的基体硬度对渗硫层固体润滑性能进行了研究。研究渗硫试样的基体硬度：一件为 58HRC，另一件为 40HRC，表面粗糙度均为 $R_a=0.13\mu m$。对磨零件硬度为 50HRC，表面粗糙度 $R_a=4.8\mu m$。研究试验表明，具有高硬度基体的渗硫层比低硬度基体渗硫层对减少摩擦磨损、抗咬合等性能有比较显著的效果。

渗硫层对磨零件具有低的表面粗糙度，可以减轻其对渗硫层的犁削和咬合（擦伤）作用，提高零件渗硫层的减磨作用。

5. 结语

（1）在摩擦副的对磨过程中，渗硫零件应该具有高的基体硬度，对磨零件应该具有低的表面粗糙度。在高硬度的零件表面再有一定厚度的多孔、疏松的渗硫层（固体润滑剂），就能够起到良好的减少摩擦磨损、抗咬合等作用，从而提高摩擦副的使用寿命。

（2）生产中应根据零件的使用性能、零件的批量和加工条件，确定使用哪一种渗硫工艺。

（3）有关部门应尽快制定渗硫层的检验标准和检验规范。（20050918）