齿轮喷丸强化的研究现状与若干问题

北京航空材料研究院 （北京 100095） 高玉魁

近年来，我国制造加工的齿轮零件的质量和使用寿命与国际相比相差很大，这一方面与中国现行的生产管理模式及体系有关；另一方面涉及到齿轮的设计、选材、加工工艺等存在的问题。对齿轮零件的长寿命使用性能指标而言，设计是关键，材料是基础，工艺是保障。本文主要从表面强化加工制造工艺技术角度来浅谈齿轮喷丸强化的现状及存在的问题。

一、齿轮的使用性能及国外现状

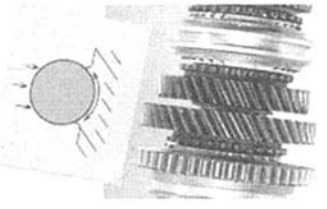
在航空工业，齿轮是传递功率和运动的重要部件，发动机的减速器、调速器和尾减速器等都需要齿轮进行动力的输入和输出。在机械工业，齿轮是汽车、轿车和机车发动机的主要组件。齿轮的功能与性能首先以实现传递动力与运动为目标，其次是高强度、长寿命、抗疲劳和耐磨损。近年来，随着石油燃料价格的提高，小型轻量、高输出功率、高耐蚀耐温性、低能耗、低噪声也成为了齿轮的性能指标要求。

从现有的齿轮失效模式来看，疲劳和磨损为齿轮零件发生事故的主要形式。为了提高齿轮的使用寿命，实现小型轻量化，国外各大汽车公司和合金钢材料公司开展了高强度齿轮技术研究。高强度齿轮技术包括了齿轮的设计、加工、材料的选择、热处理、表面强化、润滑、磨损和摩擦等技术，从设计、选材、生产、使用、维护和修理等多方面、多过程进行整体管理和综合控制。国内齿轮行业还没有进行细节管理和整体管理的结合，虽然我国齿轮技术的某一方面（如渗层深度和质量控制技术等）可能处于世界领先水平，但可能由于整体设计或材料选择或某一工艺存在问题而难以发挥潜在的优势作用。

近10年来，国内外齿轮强度的研究主要集中在弯曲疲劳强度的提高上，以解决齿轮的断齿/折齿问题。国外的汽车齿轮材料多数为 $w_C=0.2\%$ 的添加 Ni、Mn、Mo、Cr 等合金元素的渗碳合金钢，一方面通过提高淬火速率和降低合金的内部氧化，以控制表面层的非马氏体组织或黑色异常组织、残余奥氏体含量；另一方面通过渗碳工艺控制实现了齿轮的齿根与啮合齿面等部位的不同深度渗层。在齿轮渗碳化学热处理后，国外还对齿轮采用了喷丸强化来确保其弯曲疲劳强度的提高。国内由于对喷丸强化的认识不足和重视不够，目前主要侧重对齿轮的选材和热处理工艺进行研究，对表面喷丸强化的研究较少，在工业上的应用也存在很多问题。因此本文结合作者的研究成果和工作经验，浅谈一下齿轮的喷丸强化工艺技术。

二、齿轮喷丸强化的作用及质量要求

喷丸是一项非常传统的表面强化技术，主要借助于高速运动的弹丸冲击零件的表面，使其发生弹塑性变形，从而产生残余压应力、加工硬化和组织细化等有利的变化，以提高零件的疲劳性能和改善应力腐蚀开裂性能。齿轮的喷丸强化示意见附图。



喷丸强化是一种受控喷丸技术，不同于喷丸清理与喷丸成形处理。喷丸清理以去除表面油污、氧化皮、锈蚀和机械加工毛刺为目的，喷丸成形是对薄板材进行喷射以获得所需的曲率形状为目标，喷丸强化以引入残余压应力和组织结构强化提高疲劳寿命为目的。喷丸强化工艺对弹丸的形状、尺寸和硬度等要求较高，用喷丸强度和表面覆盖率来控制喷丸工艺，用残余应力和疲劳试验来检测表面强化效果。

目前国外对齿轮的表面残余应力要求为压应力800～1200MPa，单纯采用渗碳是很难达到此应力指标要求的，即使采用喷丸强化工艺也需要一定的工艺参数才能保证此应力范围。对机车齿轮的喷丸工艺研究表明，采用铸钢丸一次喷丸，齿轮的表面残余压应力为500～700MPa；进行两次喷丸，齿轮的表面残余压应力为860

~1100MPa。因此需要对喷丸工艺进行严格控制和确保工艺的正确实施与操作。

三、齿轮喷丸存在的问题与解决措施

喷丸工艺技术虽然在齿轮行业已被应用了多年，但在工程应用中多数是被用来进行清理和去毛刺处理，在强化喷丸的应用中还存在很多问题。主要表现为以下几个方面：

1. 选择弹丸的合理性问题

齿轮经过化学热处理后，表面硬度多数已达到58~62HRC，工厂实施喷丸强化时，采用的弹丸硬度多数为45~52HRC，这一方面导致齿轮喷丸区域得不到充分的强化，另一方面弹丸在喷射撞击零件时，由于硬度低而易破碎或变形。在喷射齿轮零件时，应采用高于或等于表面硬度的硬弹丸来进行强化，以确保表面的残余压应力数值和表面强化层深度。此外，弹丸尺寸的选择应确保齿轮的根部得到强化，在工厂实施喷丸强化过程中，由于选择的弹丸直径过大常常导致小半径的齿根部位得不到喷射。为了确保喷射到齿轮的齿根部位，在选择弹丸规格时，应确保弹丸直径小于齿根半径的一半。

2. 表面覆盖率的检测问题

表面覆盖率是指受喷零件表面上弹坑占据的面积与受喷表面总面积的比值，通常用百分数表示。在此需要强调的是表面覆盖率指的是零件而不是检测喷丸强度用的弧高度试片（Almen试片），所以在工程应用中如果采用弧高度试片的表面覆盖率来对零件进行喷丸工艺，将导致齿轮表面覆盖率达不到应有的要求。弧高度试片的硬度为44~50HRC，与齿轮表面的硬度58~62HRC相比差的较多，因此齿轮喷丸达到100%的覆盖率所需要的时间要长于弧高度试片达到100%覆盖的时间。

3. 二次喷丸问题

国内目前由于没有对表面残余压应力给以指标要求，所以对表面残余应力的检测和表面质量问题还没有引起重视，为了提高表面残余压应力数值，降低表面粗糙度，国外发展的二次喷丸工艺技术已在齿轮行业得到广泛应用。二次喷丸主要是指首先采用高强度喷丸工艺获得一定深度的表面强化层，然后再采用低强度喷丸工艺使表面残余应力得到提高，并改善表面粗糙度。国内对喷丸的认识不足，重视不够，对工厂而言，能够对齿轮进行喷丸强化已属不易，再购置一台设备进行二次喷丸强化由于费用问题多数难以实施。随着国际竞争的加速和对齿轮寿命要求的不断提高，二次喷丸强化工艺技术将难以避免地应用到齿轮零件。

4. 喷丸强度选择问题

对齿轮的喷丸目前在工厂实施过程中存在一些错误认识，在实际喷丸时，操作人员和技术人员常常认为，喷丸强度越高，零件的喷丸强化效果越好，所以喷射的速率很高，而事实上这并不科学。一方面是喷丸强度越高，冲击力越大，弹丸的破损率就越高；另一方面是喷丸强度较高时易在零件表面产生微裂纹。对于任何一种材料或零件而言，都存在一个适宜的喷丸强度范围。喷丸强度低时无法得到较大的残余压应力和足够深的表面强化层；喷丸强度太高易产生表面微裂纹或齿轮硬化层的剥落等问题。热 （20070816）

（上接第33页）

的冷却曲线的交点所对应的值，就是该介质可能处理的该钢种棒料的最大容许直径。表3汇集了这几种钢在不同介质中冷却的最大容许直径值。

表3 前期快冷用“钢种－介质－最大容许直径”

钢种	可处理的最大棒料直径/mm			
	普通风冷	高速风冷	匀速冷却液	油冷
20CrMnTi	12	20	32	60
20CrNi3	17	50	65	110
20CrMo	37	95	140	218

在任何介质中冷却，直径超过表3所示的最大值的工件，其等温正火就不可能得到完全符合要求的组织和性能，且组织和性能的差异也必然增大。

七、几点说明

（1）本文建立的只是粗略估算法。建立本方法主要依据的是钢的等温转变曲线、油等介质的冷却曲线和棒料冷却曲线。而这些曲线或特性本身又受多种因素影响。即便钢种、介质和棒料尺寸都相同，所获得的这三项特性也不可能完全一致。同时，在建立本方法的过程中还采用了一些简化问题的假定。因此，本文介绍的只是粗略的估算方法。

（2）多个工件装挂在一起冷却时，锻坯获得的冷却速度通常比估算值要慢。

（3）其他形状的锻坯，需先凭经验换算成棒料直径，再用此法。热 （20070808）