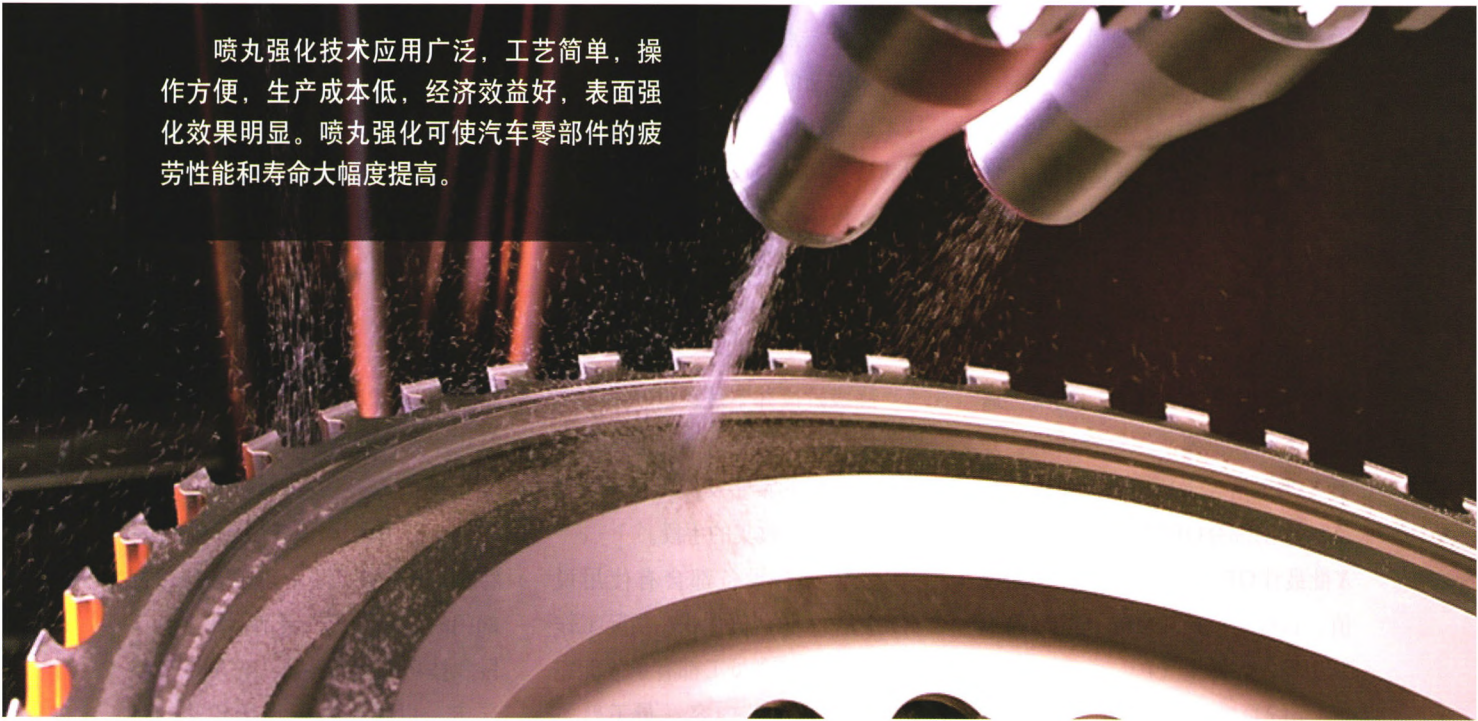


喷丸强化技术在汽车制造业的应用

□ 哈尔滨汇隆汽车箱桥有限公司/金荣植

喷丸强化技术应用广泛，工艺简单，操作方便，生产成本低，经济效益好，表面强化效果明显。喷丸强化可使汽车零部件的疲劳性能和寿命大幅度提高。



目前，喷丸强化技术已广泛应用于汽车制造行业。如汽车的螺旋弹簧、板簧、齿轮、摇臂、扭杆、传动元件、轴承、凸轮轴、曲轴和连杆等承受交变载荷的零部件强化处理，可提高零部件的疲劳强度和使用寿命，降低生产成本和能源消耗。许多最初在航空领域应用的喷丸强化技术都相继引入F1赛车和普通汽车制造过程中。

汽车零件在热处理硬化后表面进行喷丸强化处理，不仅可以消除金属加工过程中所产生的拉应力，还能把零件表面在热处理过程中形成的不良组织（如轻微氧化层、锈蚀、脱碳层及过多的残留奥氏体组织、渗碳零件表面的非马氏体组织等）产生的影响，降低到最小程度；同时改善零件因金属加工刀痕或凹槽、孔和过渡圆角等结构因素

所导致的应力集中现象，从而提高了零件的疲劳性能和使用寿命。

喷丸强化技术原理

喷丸强化技术就是用大量的弹丸以足够的速度冲击工件的表面，使其表面强化的工艺。喷丸强化不同于表面清理、喷丸成形、喷丸校形等一般的喷丸工艺，它要求喷丸过程中严格控制喷丸工艺参数，

使工件在受喷后具有预期的表面形貌、表层组织结构和残留应力，从而大幅度地提高工件的疲劳寿命和抗应力腐蚀能力，因此喷丸强化又称受控喷丸强化。

喷丸强化是在受喷材料的再结晶温度以下进行的一种加工方法，是利用高速喷射的细小弹丸在室温下撞击受喷工件表面，使其材料表层发生弹性和塑性变形，在工件表面产生一定厚度的加工硬化层，并呈现较大的残留压应力，从而提高工件表面强度、疲劳性能、抗应力腐蚀能力的表面强化技术。

喷丸处理后工件的表面硬度增加，距离工件表面越近，效果越明显，喷丸造成的工件表面硬度增加是由于表层组织加工硬化及残留压应力值增大的综合结果。此外，喷丸还能促使工件表层的组织发生转变，残留奥氏体诱发转变为马氏体，并且能够细化马氏体的亚结构，进一步提高了工件表面硬度和耐磨性，从而延长工件的疲劳寿命。

弹丸材料

弹丸是喷丸强化中使用的重要工艺材料，常用的弹丸材料有铸铁丸、铸钢丸、钢丝切割丸、玻璃丸和陶瓷丸等。表1为常用弹丸的特点与用途。

应当指出，喷丸强化用的弹丸与清理、成形、校形用的弹丸不同，必须是圆球形，不能有棱角和毛刺，否则会损伤工件表面。

选择弹丸时不仅要考虑受喷工件的工艺要求，包括喷丸预期的塑性变形深度、最大残留应力值和表面粗糙度，还要考虑喷丸设备的条件和弹丸的损耗等。

喷丸强化设备与喷丸强化质量

(1) 喷丸强化设备。喷丸强化所用的设备有机械式和气动式两大类。喷丸强化的全过程都必须实现自动化，而且喷嘴距离、冲击角度和移动（回转）速度等的调节都

要稳定可靠。

近年来，随着计算机技术的发展，带有信息反馈监控的喷丸强化技术已在实际生产中得到应用，使强化的质量得到了进一步提高。例如数控喷丸机可实现高精度喷丸强化处理，有数控机械手喷丸机和数控机器人喷丸机两种。

现代喷丸强化设备必须满足以下要求：同步监测喷丸工艺参数；具有储存和复制操作程序的功能；自我诊断维护，能检测到设备磨损和破损情况；通用的操作原理，可适应不同用户的要求；完全可编程控制；恒定的覆盖率；稳定、可重复得到的产品性能；低噪声和低粉尘释放。

(2) 喷丸强化质量与影响因素。表征喷丸强化效果和质量的指标主要有喷丸强度、覆盖率和喷丸后工件的表面粗糙度值等，每一项指标都受多项工艺参数的影响，合适的喷丸强化工艺参数要通过喷丸强度试验和表面覆盖率试验来确定。

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，用残留应力和疲劳试验来检测表面强化效果。

1) 喷丸强度。喷丸强度通常采用弧高值测定法，其要点是用一定的弹簧钢试片，又称阿尔门试片（Almen试片），通过检测喷丸强化后的形状变化来反应喷丸效果，具体操作是用试片固定在夹具上，经单面喷丸后取下试片，然后用检具测量弯曲弧的高度。该试片有3种规格：A（厚度1.3mm）、C（厚度2.4mm）和N（厚度0.8mm），分

表1 常用弹丸的特点与用途

弹丸名称	特点
铸铁丸	铸铁丸硬度为58~65HRC，但冲击韧度低，故质脆而易碎，使用寿命短，损耗量大。主要用于喷丸强度高的场合
铸钢丸	铸钢丸的韧性较好，其硬度为40~50HRC，加工硬金属时，可把硬度提高到57~62HRC，其使用寿命为铸铁丸的几倍，主要用于喷丸强度高的场合
钢丝切割丸	其是用 $w_c=0.7\%$ 的弹簧钢丝或不锈钢丝切割制成小段，再经磨圆加工而成的。其直径为0.4~1.2mm，硬度为45~50HRC时最佳，钢丝切割丸的组织最好为回火马氏体或下贝氏体，使用寿命比铸铁丸高20倍。表面强化专用滚圆钢丝丸用于弹簧、齿轮、轴类等，可以获得较好的喷丸效果
玻璃丸	其硬度高，但脆性较大，当工件要求获得低的表面粗糙度值时常采用玻璃丸处理。玻璃丸也可用于钢铁丸喷丸后的二次喷丸处理
陶瓷丸	1) 在处理高硬度的渗碳、渗氮零件（如齿轮）时，采用陶瓷弹丸（如圣戈班陶瓷弹丸）在喷丸强化中有显著优势：稳定的阿尔门强度；更有利于残留压应力分布；更高效的处理速度；更低的生产成本；能够同时消除齿轮磨齿痕迹；更加环保 2) 陶瓷弹丸用于齿轮的齿根强化，可显著提高齿轮疲劳寿命。目前，陶瓷弹丸已用于意大利菲亚特汽车集团和美国一些汽车制造商

别用于3种不同喷丸强度要求的场合。

2) 表面覆盖率。在被喷丸工件表面的规定部位上,弹痕占据的面积与要求喷丸强化的面积之间的比值称为表面覆盖率。表面覆盖率以百分数表示。

3) 喷丸工艺参数。喷丸强度和表面覆盖率等决定着喷丸质量,而喷丸强度和表面覆盖率又受其他多种工艺参数制约。

弹丸尺寸越大,冲击能量越大,则喷丸强度也越大。但大的弹丸使覆盖率降低,因此生产上在保证产生所需喷丸强度的前提下,应尽量减小弹丸的尺寸。弹丸尺寸的选择也受工件形状的制约,弹丸的直径不应超过工件沟槽或内圆半径的1/2。

当弹丸的硬度大于工件的硬度时,弹丸硬度的变化不影响喷丸强度;反之,弹丸硬度值的降低,将使喷丸强度降低。

喷丸速度提高,则喷丸强度加大,但速度过高,弹丸的破碎量会增加,可用控制压缩空气压力等办法控制喷丸速度。喷丸的角度一般选用垂直直角状态,这时喷丸角度最高,喷丸强度大。但当受工件形状限制必须以小角度喷丸时,则应适当加大弹丸的尺寸与喷丸速度。

4) 弹丸的破碎量。应经常清除破碎弹丸,保证弹丸的完整率不低于85%。

喷丸强化技术的应用

喷丸强化技术应用广泛,工艺简单,操作方便,生产成本低,经济效益好,表面强化效果明显。喷丸强化可使钢制汽车零部件的疲劳性能和寿命大幅度提高。实践证明,喷丸强化是提高汽车钢板弹簧疲劳强度的重要手段,经喷丸强化后汽车钢板弹簧的疲劳寿命可延长5倍左右;汽车齿轮渗碳淬火后再经喷丸强化处理,其相对寿命可提高4倍左右。

(1) 发动机零件的喷丸强化。喷丸强化技术对普通汽车和赛车制造最重要的作用是改善零部件的疲劳性能。喷丸强化能防止发动机零件,如曲轴、连杆、活塞、阀门和弹簧等由于高强度应力作用而过早失效。

例如,45钢连杆调质处理后,其硬度为228~269HBW,未强化喷丸连杆表面应力仅为-50MPa,甚至有的表面处于拉应力状态。而18Cr2Ni4W连杆热处理后,距表面深度0.3~0.4mm处还有294~392.3MPa的拉应力。当喷丸强度为0.18C时,45钢连杆表面残留压应力提高到-350MPa。用±374MPa交变应力在高频疲劳试验机上试验时,连杆疲劳寿命由未喷丸时的48万次提高到190万次。表2为几种连杆喷丸强化的工艺参数。图1为喷丸强化处理后的连杆。



图1 喷丸强化处理后的连杆

(2) 齿轮和其他传动元件的喷丸强化。通过对齿轮和其他传动元件进行强化以改善其疲劳强度,提高转矩性能。喷丸强化就是通过引入一个残留压应力,防止齿轮断裂的发生。另外一个作用是每个齿轮齿根表面上受到无数弹丸打击而产生的“小凹槽”增强润滑保持力,进一步提高使用寿命,降低噪声。图2为齿轮喷丸强化处理设备。图3为喷丸强化处理后的齿轮(轴)。



图2 齿轮喷丸强化处理设备



图3 喷丸强化处理后的齿轮和齿轴

表2 几种连杆喷丸强化的工艺参数

材料	钢丸直径/mm	喷丸速度/m·s ⁻¹	钢丸流量/kg·min ⁻¹	喷丸强度(弧高)	喷丸时间/min	覆盖率(%)
45	1.0~1.2	70	140~160	0.18C	1.5	≥98
18Cr2Ni4W	0.8~1.2	70~80	—	—	4	—
18Cr2Ni4W	1.0~1.2	75~82	300	0.38~0.44A	3~4	—
42CrMoA	0.8~1.0	70~80	200	0.46~0.76A	1~1.2	≥98

表3 喷丸强化对汽车变速器一档齿轮疲劳寿命的影响（单位：次）

处理状态	转矩为450N·m弯曲疲劳寿命		转矩为370N·m接触疲劳寿命	
	平均值	相对值	平均值	相对值
未喷丸	0.75×10^6	100%	3.85×10^6	100%
强化喷丸	3.42×10^6	456%	$>5.06 \times 10^6$	$>131\%$

1) 为了提高渗碳齿轮的疲劳强度，延长齿轮的使用寿命，一汽对喷丸强化工艺进行了细致的研究，并将研究成果应用于生产。用解放牌汽车变速器一档齿轮进行台架疲劳试验，了解强化喷丸对弯曲疲劳寿命和接触疲劳寿命的影响，其结果见表3。装车使用表明，喷丸强化工艺可以显著提高齿轮的疲劳寿命。

2) 近几年轿车用自动变速器渗碳齿轮的齿面在工作中的实际温度约达300℃，远高于正常的回火温度（150~200℃），如此高的温度将导致齿轮硬度降低，引发点蚀的产生，因此应提高齿轮抗回火软化性能。SCM420H钢变速器齿轮经通NH₃等进行碳氮共渗，随着含氮量的增加ΔHV（硬度降）提高，即抗回火性能提高，回火温度达300℃。齿轮采用碳氮共渗后喷丸硬化提高疲劳强度和寿命，解决了常规渗碳变速器齿轮齿面接触疲劳破坏问题。

(3) 汽车轴类零件的喷丸强化。喷丸强化工艺对于受扭力零件的疲劳强度改善同样有效。汽车齿轮轴、扭杆和半轴是典型的零件，一些非承受扭力零件，如转向轴同样有效。

(4) 汽车悬挂系统的喷丸强化。喷丸强化工艺的另一个应用是对于汽车悬挂元件的校直，如使用在F1赛车悬挂系统中的横臂。

在薄壁零件的生产过程中，可

能会因应力使薄壁零件产生变形。通过增加一个压应力，能够反作用于该扭曲变形，恢复其原来的形状。

(5) 汽车板簧的预压强化——喷丸强化。“预压”强化是指对一个负载下的零件，如板簧进行喷丸强化。喷丸强化后，零件应力释放，恢复到原来形状，结果是增加了残留压应力，提高了整个强化效果。图4为弹簧预压强化示意。



图4 弹簧预压强化示意

汽车行业规定，板簧必须进行喷丸处理后才能使用。喷丸处理应用在汽车弹簧钢板的加工上，是为了减少被加工材料的塑性变形。喷丸强化分为一般喷丸和应力喷丸。一般处理时，钢板在自由状态下，用高速钢丸打击钢板的表面，使其表面产生预压应力，以减少工作中钢板表面的拉应力，增加使用寿命。应力喷丸处理是将板簧在一定的作用力下的预先弯曲，然后进行喷丸处理。

某汽车弹簧厂针对60Si2Mn钢板簧（规格为7mm×65mm×560mm、经920℃淬火、480℃回火、硬度为42~47HRC）进行喷丸处理（采用65冷拔钢丝丸、弹丸直径0.8~1.2mm，新弹丸占50%。采用离

心式喷丸机，叶轮转速2 500r/min、喷射弹丸速度70m/min，叶轮中心至试样喷射表面的距离为0.5m，喷射角45°，喷射作用时间24s），同时放入Almen C试片来测定其喷丸强度；再对每片板簧进行疲劳试验，所得平均疲劳寿命见表4。由表4可见，在该试验条件下，喷丸强度为0.18C时，单片板簧的疲劳寿命最长。

应力喷丸可进一步提高板簧的疲劳极限，见表5。

表4 喷丸强度对60Si2Mn钢汽车板簧疲劳寿命的影响

序号	喷丸强度	疲劳寿命（10片平均值）/次
1	未喷丸	37 500
2	0.16C	116 250
3	0.18C	193 500
4	0.20C	172 500

注：疲劳试验机频率：15 000次/h，预加载荷：4.5min。

表5 55Si2Mn钢板簧喷丸及应力喷丸后的疲劳极限

试样厚度/mm	试样类型	疲劳极限/MPa		
		未喷丸	喷丸	应力喷丸 ^①
13	带槽平板	363	461	784
10	平板	343	686	833

注：55Si2Mn钢热轧表面淬火、回火后的硬度为40HRC。

① 试样在弯曲状态下喷丸，喷丸面受弯曲拉应力：784~882MPa。

(6) 喷丸强化新技术。

1) 二次喷丸技术。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对其进行第二次低强度的再喷丸，使工件表面残留应力和强化效果得到提高，并改善表面粗糙度。

目前国外对齿轮的表面残留应力要求为压应力800~1 200MPa，

（下转第66页）

头外圆端面→精车长头外圆端面并切槽→精车大端端面镗孔→打印标识→滚矩形花键滚渐开线花键→去渐开线花键毛刺→钻油孔去毛刺→清洗→热处理→校直→研中心孔及60°锥面→磨外圆靠端面磨轴头外圆→车外圆 车15°锥面，尖角倒钝→磨内孔→清洗→最终检验→涂



(a) 技改前



(b) 技改后
图 4

油入库。最后，在各个工序之间，“单件传送”。输入轴精益化生产通过滑道和小车，实现输入轴的与机群化生产的对比见表2。

表2 生产系统对比

对比项	机群化布局	精益化布局
下线	产品一批批的下线，库存大	产品一件一件下线
产品流动	没有固定的流动方向	产品流动的方向固定
资源	所需资源非常多	所需资源较少：小车、场地
生产方式	按照自己的想法生产	按统一的节拍生产
质量监控	质量难以监控，事后把关	质量容易监控

结语

在竞争越来越激烈的今天，成本和质量决定着企业的发展。小批量、成本低、多样性、可靠性等的个性化需求，将是未来工业生产的

发展趋势。通过输入轴精益化生产与机群化生产的对比，不难看出，精益化生产符合工业4.0的基本方针，满足市场个性化的需求。所以，我公司已经逐步在生产线推进精益化生产。 **AUTO1950**



贺冬冬
工程师，陕西法士特汽车传动工程研究院工艺研究所所长，主要从事生产线整体规划及生产线自动化、智能化、信息化的推广工作。

(上接第63页)

单纯采用渗碳工艺是很难达到这一应力指标要求的，即使采用喷丸强化也需要一定的工艺参数才能保证此应力范围。对齿轮的喷丸工艺研究表明，采用铸钢丸一次喷丸，齿轮的表面残留压应力为500~700MPa；进行两次喷丸，齿轮的表面残留压应力为860~1 100MPa。

2) 感应淬火零件的喷丸强化。澳大利亚纽卡斯尔大学在试验中得到证实，对高频淬火的齿轮只要实施适当的喷丸处理，承载能力可提高50%以上。表6为纽卡斯尔大学对模数8mm的齿轮试验数据。

表6 渗碳淬火及高频淬火齿轮经喷丸强化后齿根弯曲疲劳强度

齿轮热处理工艺	材料	脉动试验		根据ISO6336品质ME	
		未喷丸强化 σ_F /MPa	喷丸强化 σ_F /MPa	1%损失率 σ_{FE} /MPa	中间疲劳强度 σ_F /MPa
渗碳淬火	16MnCr5	700	1 200	—	—
	17CrNiMo6	740	1 200	1 050	1 196
高频淬火	SAE4140	650	1 000	800	911

AUTO1950



金荣植
高级工程师，副总工程师，黑龙江省热处理学会理事，中国热处理协会理事，已在专业杂志上发表论文80余篇，其中有5篇被美国工程索引(Ei)收录，1篇获中国热处理行业协会优秀论文奖，已出版4部热处理著作，获省、市科技成果各一项，获4项发明专利和2项实用新型专利。