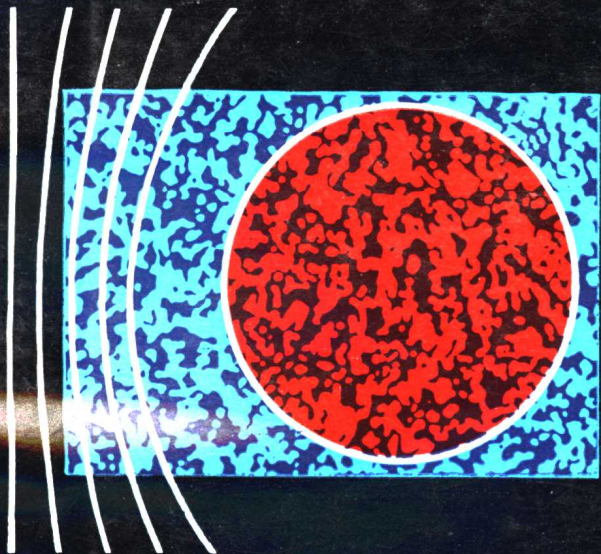


受控喷丸与残余 应力理论

方博武 著



受控喷丸与残余应力理论

方博武 著

山东科学技术出版社

鲁新登字05号

受控喷丸与残余应力理论

方博武 著

*

山东科学技术出版社出版

(济南市玉函路 邮政编码250002)

山东省新华书店发行

山东新华印刷厂印刷

*

850×1168毫米32开本 8.125印张 4插页 160千字

1991年9月第1版 1991年9月第1次印刷

印数：1—1000

ISBN 7—5331—0900—7/TH·20

定价 4.80 元



“泰山科技专著出版基金”顾问、评审
委员会、编辑委员会

顾 问 宋木文 伍 杰 苗枫林

评审委员会 (以姓氏笔画为序)

卢良恕 吴阶平 杨 乐 何祚庥

罗沛霖 高景德 唐敖庆 蔡景峰

戴念慈

编辑委员会

主任委员 杜秀明 石洪印

副主任委员 梁 衡 邓慧方 王为珍

委 员 (以姓氏笔画为序)

邓慧方 王为珍 卢良恕 石洪印

刘韶明 吴阶平 杨 乐 何祚庥

杜秀明 罗沛霖 林凤瑞 唐敖庆

高景德 梁 衡 梁柏龄 蔡景峰

戴念慈

我们的希望(代序)

进行现代化建设必须依靠科学技术。作为科学技术载体的专著，正肩负着这一伟大的历史使命。科技专著面向社会，广泛传播科学技术知识，培养专业人才，推动科学技术进步，对促进我国现代化建设具有重大意义。它所产生的巨大社会效益和潜在的经济效益是难以估量的。

基于这种使命感，自1988年起，山东科学技术出版社设“泰山科技专著出版基金”，成立科技专著评审委员会，在国内广泛征求科技专著，每年补贴出版一批经评选的科技著作。这一创举已在社会上引起了很大反响。

但是，设基金补助科技专著出版毕竟是一件新生事物，也是出版事业的一项改革。它不仅需要在实践中不断总结经验，逐步予以完善；同时，也更需要社会上有关方面的大力扶植，以及学术界和广大读者的热情支持。

我们希望，通过这一工作，高水平的科技专著能够及早问世，充分显示它们的价值，发挥科学技术作为生产力的作用，不断推动社会主义现代化建设的发展。愿“基金”支持出版的著作如泰山一样，耸立于当代学术之林。

泰山科技专著评审委员会

1989年3月

前 言

受控喷丸是一种以强化为目标的新型表面处理方法。机械零、构件经过这种喷丸处理后，大幅度提高了疲劳强度和抗应力腐蚀能力。在理论上，受控喷丸又与残余应力的形成过程有紧密联系，其中涉及的问题非常广泛，因此，无论在理论探讨或技术实践上，都有大量工作要做。我国在受控喷丸的研究方面起步相对较晚，任务还很艰巨。不过可以肯定，受控喷丸的广泛采用，必将使我国机械工业获得显著效益。

本书重点论述受控喷丸强化金属的基本理论和最新技术，内容包括：喷丸介质、喷丸层金属的力学性能、喷丸金属表层弹塑性变形和残余应力、喷丸表层的形貌和组织结构、喷丸残余应力对金属疲劳性能的影响、受控喷丸与金属应力腐蚀、喷丸强度控制和喷丸残余应力场、残余应力测定。

作者从事受控喷丸和残余应力理论的研究和实验已十余年，鉴于目前国内有关受控喷丸的理论方面论著较少，故不揣浅陋，编著本书，以期抛砖引玉，并期望专家和生、产、科、研厂所，齐心协力，使机械制造领域中受控喷丸这一重要技术能在短期内取得突破，赶超国际先进水平。

作者水平有限，书中疏漏之处在所难免，敬请专家、广大读者不吝指正。

本书写作过程中承蒙谢颖武大力相助，谨致谢意。

方博武

1991年于中国纺织大学

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 受控喷丸技术的发展	(1)
第二节 受控喷丸原理和工艺特点	(3)
第三节 受控喷丸对零件的表层材料及性能的影响	(10)
第二章 喷丸介质	(17)
第一节 喷丸过程中弹丸的状态	(18)
第二节 铸铁弹丸	(20)
第三节 铸钢弹丸	(24)
第四节 钢丝切割弹丸	(32)
第五节 玻璃弹丸	(34)
第六节 弹丸的选用	(42)
第三章 喷丸金属的力学性能	(47)
第一节 金属材料的强度和塑性	(47)
第二节 金属的硬度	(53)
第三节 金属的抗冲击韧性	(58)
第四节 金属变形的力学特性	(59)
第四章 喷丸金属表层弹塑性变形和残余应力	(64)
第一节 喷丸表面的塑性变形层	(64)
第二节 金属塑性变形的机理	(67)
第三节 金属塑性变形和强化	(70)
第四节 喷丸表面层的残余应力	(79)
第五章 喷丸表层的形貌和组织结构	(89)

第一节	喷丸表层的形貌·····	(89)
第二节	喷丸表层的组织变化·····	(105)
第六章	喷丸残余应力对金属疲劳性能的影响·····	(112)
第一节	疲劳强度·····	(113)
第二节	金属的疲劳断裂·····	(122)
第三节	表面加工和疲劳强度·····	(129)
第四节	钢和有色金属合金喷丸后的疲劳强度·····	(135)
第五节	典型零件的受控喷丸·····	(143)
第七章	受控喷丸与金属应力腐蚀·····	(158)
第一节	金属应力腐蚀的特征·····	(159)
第二节	钢的应力腐蚀·····	(162)
第三节	有色金属的应力腐蚀·····	(175)
第八章	喷丸强度控制和喷丸残余应力场·····	(184)
第一节	喷丸强度和覆盖率·····	(184)
第二节	弹丸特性和残余应力场·····	(197)
第三节	喷丸工艺参数的选择·····	(211)
第四节	喷丸设备的选择·····	(215)
第九章	残余应力测定·····	(225)
第一节	应力松弛法测定残余应力·····	(225)
第二节	X射线衍射法测定残余应力·····	(233)
第三节	应力敏感性测应力方法·····	(244)

第一章 绪 论

喷丸工艺广泛地用于国内外机械工程,已有较长的历史,其中,特别值得重视的是受控喷丸(Controlled shot-peening),它完全不同于清理喷丸或喷砂(Sand blasting)。受控喷丸以强化为目标,因此,也称强化喷丸,是指机械零、构件通过喷丸手段而得到强化、大幅度地提高疲劳强度和抗应力腐蚀能力的一种先进方法。

第一节 受控喷丸技术的发展

受控喷丸最早出现于本世纪20年代,先是应用于汽车工业,随后扩大到飞机制造业和其它军事工业,时至今日,这种方法已成为国际机械工程界普遍感兴趣的一种表面处理新工艺,具有广阔的发展前景。

受控喷丸的机理是与残余应力分布密切相关的。近年来,国内外不少科学研究部门和生产厂商对存在于机械零件表层的残余应力场日益关注。众所周知,利用残余应力场的合理结构(应力的合理分布)提高机械零件的性能是一种比较经济的手段,特别适用于承受交变载荷的零、构件。机械零件工作时各点应力值很不相同,其中表面层多半会碰到不理想的高应力值情况(例如杆形件承受扭、弯载荷时),而金属材料的表面偏偏较弱,缺陷集中,很易形成疲劳源。受控喷丸就是利用金属

的不均匀塑性变形来形成合理的应力场，强化金属表面，以达到充分发挥金属材料潜在能力的目的。这对节约材料，减轻重量，有重大意义。从喷丸后的不均匀塑性变形，到形成理想的应力场分布，中间涉及的问题相当广泛，牵扯的因素很多，因此，有关受控喷丸和残余应力理论的内容十分丰富。

受控喷丸与其它表面强化技术相比，占有明显优势。第一，强化效果显著；第二，成本低，能源消耗少；第三，适应性好，用途广泛。当今一些工业发达的国家都竞相研究，并将成果尽快付诸实践，步调很快，资金投入也多，国际间交流频繁。1981年9月，由法国、美国的一些研究部门发起在巴黎召开了第一届国际喷丸强化会议，此后每隔三年都召开了这样的会议。

我国从60年代起，开始了受控喷丸的研究和应用，此后进展迅速。1976年，国防工业办公室在上海召开了国防工业喷丸强化技术交流会，在整个国防工业系统中推广这种新工艺，同时也促进了它在民用工业中的发展。1987年9月，我国在南京召开了中日国际喷丸技术学术交流会议。

根据目前国内、外机械工程的现状分析，喷丸技术今后可能在强化喷丸机理的理论研究和实践、喷丸设备的新设计和自动化、弹丸品种的开发等方向向前发展。

喷丸强化能提高零件疲劳强度的机理，目前研究得较多，也不乏有价值的成果，国内、外报导资料较丰。但是，对于接触疲劳性能的研究相对较少，而且还没有出现已形成一致看法的结果。

喷丸使残余奥氏体转变成马氏体，涉及硬度、耐磨性和腐蚀等多方面问题，尚有待于更广泛深入地研究。

喷丸一是使表层金属形成切屑，即具有切削的作用，二是使表层材料发生弹塑性形变，即具有变形作用，有关这两方面问题对加工表面质量可能产生的影响，也缺乏系统的研究。

喷丸强度的量度，除目前通用的弧高度方法外，已出现其它新方法和新标准。但各个喷丸工艺参数往往相互制约，对单个参数影响的分析仍是一个复杂问题。

关于喷丸后的残余应力场的试验研究，目前已有较系统的结果，希望能整理归纳成可供广大设计、工艺人员使用的手册。

喷丸机具设备今后趋向自动化，特别是加强计算机控制方面的应用。新结构喷丸机的设计有广阔前景。喷丸机喷嘴内腔形状和尺寸直接影响喷丸效果和动力消耗，目前国内、外已有不少新型喷嘴问世，努力的目标是批量生产既实用又节能的新喷嘴，供用户选用。

弹丸的硬度将影响应力层深度和应力值；弹丸的韧性能减少破损，降低成本。铸钢丸能否出现低合金、高强度、高硬度的弹丸品种，以代替目前普遍采用的易破碎的铸铁丸，可能是改进钢铁类弹丸质量和降低弹丸成本的关键。

大力发展非金属弹丸是必然趋势，这里包括球形丸和规则的多角形丸。法国和其它一些国家已在研究和生产这类弹丸，我国也已在计划研制之中。

第二节 受控喷丸原理和工艺特点

一、受控喷丸的基本原理

受控喷丸是利用高速喷射的细小弹丸在室温下撞击受喷工

件的表面,使表层材料在再结晶温度下产生弹、塑性变形,呈现理想的组织结构和残余应力分布,从而提高其强度和抗应力腐蚀能力的一种表面处理方法。一般,变形层深度在0.1~0.8mm之间,视所选择的工艺参数而定。

弹丸流撞击受喷工件时,每一个弹丸颗粒都按一定方向撞上工件表面,然后从另一个方向弹出,它的一部分动能为工件所吸收。工件表层产生弹、塑性变形,其结果除在外表留下凹穴外,主要体现在组织结构和残余应力场的变化。喷丸后的表面残余应力场都呈现一定深度的压应力,有利于提高疲劳强度和抗应力腐蚀能力。

受控喷丸与表面辊压在原理上近似。但与辊压相比,喷丸工艺可以不受工件几何形状的限制。辊压只适用于形状简单的表面处理,如轴类零件。喷丸则可用于各种形状复杂的表面,如各类弹簧和齿轮轮齿表面等。喷丸也不受工件尺寸的限制,小尺寸零件可在喷丸室内处理,大尺寸零件则可在外场接受喷射。

二、喷丸设备和弹丸

受控喷丸采用专门的喷丸机。按照驱动弹丸的方式,可分成叶轮式喷丸机和压缩空气式喷丸机两大类。

在叶轮式喷丸机中,弹丸由高速旋转的叶片驱动送出,动力消耗较低,但是弹丸流的位置和速度都不易改变。叶轮式喷丸机常在批量较大的生产中使用,如汽车钢板弹簧的生产(图1—1)。

在压缩空气式喷丸机中,弹丸经喷嘴由压缩空气驱动。压缩空气可以利用柔性的橡皮管输送,喷嘴移动方便,弹丸流位置能随意改变,还可以根据需要设置多个喷嘴。弹丸的速度则

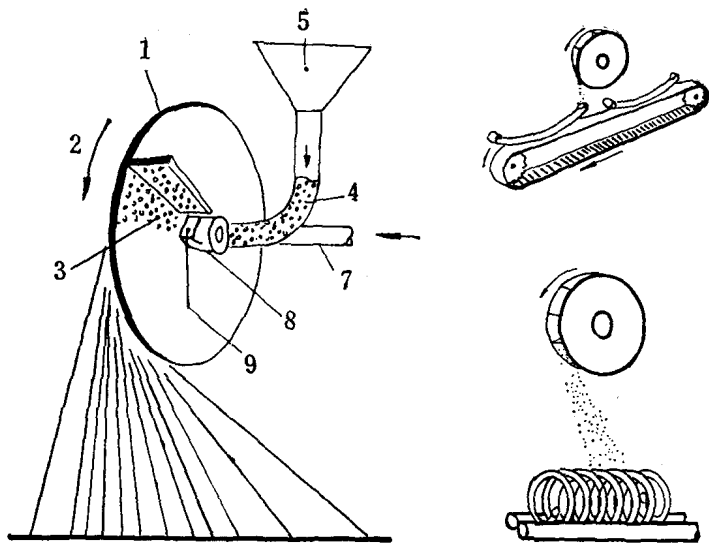


图 1—1 叶轮式喷丸机工作示意图

1. 叶轮； 2. 叶轮转向； 3. 接触叶片前的弹丸；
 4. 弹丸输送管； 5. 漏斗； 6. 压缩空气；
 7. 喷射管； 8. 90°弯曲喷管； 9. 弹丸

依靠调节压缩空气压力来改变。

压缩空气式喷丸机适用于表面形状复杂的零件和批量较小的生产条件。

此外，喷丸机还有干喷式和湿喷式之分。干喷式工作条件差，喷丸后表面较粗糙。湿喷式是将弹丸混和在液体中成悬浮状，然后喷射工件表面。喷丸后表面粗糙度较低。

受控喷丸使用的弹丸有铸铁丸、铸钢丸、不锈钢丸、钢丝切割丸、玻璃丸和陶瓷丸等。选择弹丸的种类时，主要考虑受喷零件的要求和喷丸设备条件，以及弹丸的损耗（即弹丸的成本）。受喷零件的要求包括喷丸面预期的塑性变形层深度、最

大残余应力数值和表面粗糙度，这些因素将直接影响零件的质量，即疲劳寿命和抗应力腐蚀能力。喷丸设备与一定种类弹丸的配合，决定了在预定喷丸时间内能达到的喷丸强度。弹丸损耗则与受喷零件的材料、硬度等状况有关。

通常，钢制零件喷丸选用铸钢丸或铸铁丸，以得到较深的塑性变形层和较大的残余压应力值。但在表面光洁度要求较高的情况下，则以玻璃丸湿喷为宜（湿喷法都应选用玻璃丸）。铝合金和钛合金喷丸都选用玻璃丸。不锈钢喷丸的目的是提高抗应力腐蚀能力时也应采用玻璃丸，金属丸容易有碎片残留在工件表面，引起电化学腐蚀。

受控喷丸的弹丸形状以球形为宜，以避免工件表面因弹丸的锐边冲击而形成应力集中点。如果选择钢丝切割丸，在使用前应除去棱角。

三、喷丸工艺特点和工艺参数控制

1. 喷丸工艺的特点

（1）喷丸后，表层材料在再结晶温度以下发生弹、塑性变形，属冷加工性质，表面有加工硬化现象。

（2）受喷表层内塑性变形程度并不一致，这种不均匀塑性变形将引起弹性应变，使表层形成残余应力，而表面常为压应力。

（3）喷丸后，表面是由半球形凹穴包络面形成的新加工面。

喷丸工艺的上述特点也是直接或间接地决定受喷零件性能的主要因素，特别是对交变载荷下工作的零、构件的抗疲劳和抗应力腐蚀性能有决定性的影响。

2. 喷丸工艺参数的控制

受控喷丸的效果，除了与受喷零件材料有关外，还受到许多工艺参数的影响，其中有弹丸的种类、大小、硬度、弹丸喷射时的速度，喷嘴与受喷面的距离和喷射角度，以及喷丸时间和覆盖率。众多工艺参数相互制约，要想精确控制各个工艺参数以达到预定的喷丸目标是很困难的，实际生产中常采用国际通用的弧高度测试法来衡量喷丸的强度。

弧高度测试时采用标准化的弧高度试片 (Almen intensities)。试片分、N、A、C三种，其材料和硬度都有规定，长度和宽度也固定，只是厚度不同。其中应用较多的为 A 试片 (厚1.27mm)，适用于中等喷丸强度。试片在专用的夹具中，接受一组选定的工艺参数条件下的喷射，然后测量其变形后凸弧的高度作为喷丸强度的量度。弧高度单位用 mm 表示或者以0.01mm表示。例如，30A 表示 A 试片弧高度为 0.3mm。

图 1—2 为不同弹丸速度和喷丸时间的弧高度值曲线。当

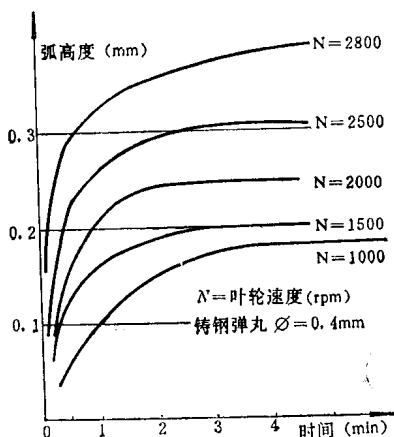


图 1—2 弹丸速度和喷丸时间对弧高度的影响

喷丸时间延长时，弧高度起先增大，之后逐渐平稳，呈饱和趋势。弹丸速度提高（喷丸机叶轮转速提高），则弧高度全面增大。生产实际中以弧高度的饱和值作为喷丸强度。

以弧高度值表示的喷丸强度是所有工艺参数的综合反映，不同的工艺参数组合可能会得到相同的喷丸强度，而这时受喷面变形层深度和残余应力分布都有差异，另一方面，同一组工艺参数对于不同材料的工件，喷丸强度也明显不同。因此，弧高度测试方法固然简单，但不能反映各个工艺参数对喷丸效果的影响。

四、采用受控喷丸应考虑的因素

1. 喷丸强化的主要作用在于提高疲劳强度和抗应力腐蚀能力。对于接触疲劳强度的喷丸强化效果尚未得到充分的验证。

2. 喷丸对高周次的应力疲劳效果较佳，而在低周次高应力的工作条件下，零件在工作过程中可能发生应力松弛，使喷丸后得益的表层残余压应力减弱。图 1—3 为喷丸试样在

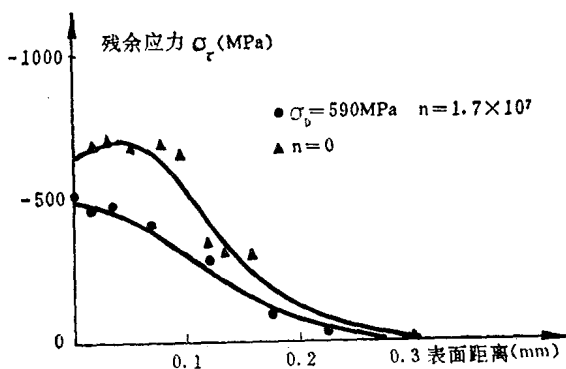


图 1—3 交变载荷对喷丸残余应力场的影响

$\sigma_0 = 590\text{MPa}$ 交变载荷作用下, 经过 $n = 1.7 \times 10^7$ 次循环后表面压应力值下降的幅度。

在可能的情况下, 可对应力已松弛的零件进行第二次喷丸, 以恢复降低了的表层残余压应力。

3. 喷丸可能改变表面的粗糙度。通常, 喷丸工序都安排在最后进行, 但对表面粗糙度要求很低的零件, 可在喷丸后再进行磨削加工, 这时的磨削余量切不可太多, 此外, 还需设法避免磨削引入不应有的残余拉应力。

4. 喷丸可能使零件的几何形状发生变化, 影响零件的几何精度。

5. 零件喷丸后重复受热会使喷丸残余压应力减弱。因此, 对于在较高温度下工作的喷丸零件, 或者喷丸后再需进行热处理的零件, 设计时必须特别注意受热对残余压应力的影响。图1—4为零件喷丸后加热条件下残余压应力的变化。试样为45SCD 6钢, 890°C 油淬, $425 \sim 450^\circ\text{C}$ 回火, 硬度为HRC45。此后, 试样经过喷丸处理, 然后在 $100 \sim 600^\circ\text{C}$ 范

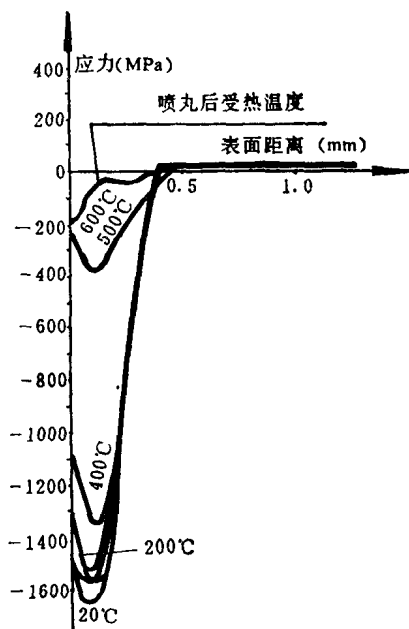


图1—4 温度对喷丸残余应力场的影响