

为了实现对汽车零部件常见强化工艺的有效评估和监控,本文探讨采用X射线衍射法测量强化后零件关键部位的残余应力。在此基础上,并采用电解抛光技术,探测和分析工件距表面一定深度的残余应力。

□ 天润工业技术股份有限公司 孙军 于晓东 吕世杰 鞠志超 迟华强 田柯南

X射线测量残余应力在汽车零部件行业中的应用



AI汽车网—视频频道

汽车零部件在加工过程中常采用表面感应淬火、渗碳淬火、圆角滚压和喷丸等强化工艺。这些工艺可获得较高的强度,并有效延长使用寿命。零部件在这些机械加工及热处理过程中均会出现应力状态的变化,从而影响零部件的工作性能。

随着用户对汽车性能、质量和可靠性的要求越来越高,我们必须了解和掌握零部件残余应力的产生机理、表征方法和分布规律,对产品设计和制造工艺进行优化,从而减少或消除有害残余应力,增加关键部位的有益残余应力,达到提质降本的效果。

目前,测量残余应力的主要方法有钻孔法、环芯法、X射线衍射法、中子衍射法和超声波法等。其中,X射线衍射法是目前应用最广泛的无损检测残余应力的方法。这种方法主要依据为弹性力学理论和X射线衍射理论。本文结合试验测试,论述了X射线衍射仪在曲轴、连杆和齿轮等汽车零部件生产过程中的应用。

检测原理

一定的应力状态会引起材料的晶格应变,这与宏观应变是一致的。当材料中存在残余应力时,晶面间距将发生变化,发生布拉格衍射时,产生的衍射峰也将随之移动,而且移动距离大小与应力的大小相关,符合式1的布拉格定律。X射线衍射角度的几何关系如图1所示。

$$2d\sin\theta = n\lambda \quad (1)$$

式中: d ——晶格间距;

θ ——X射线入射线、反射线与晶面的夹角;

n ——自然数,(1, 2, 3, ……);

λ ——X射线波长。

依据布拉格定律 $2d\sin\theta = n\lambda$, 用波长 λ 的X射线,先后数次以不同的入射角照射到试样上,测出相应的衍射角 2θ , 求出 2θ 对 $\sin^2\psi$ 的斜率 M , 便可算出应力 σ 。目前的X射线衍射法的测量方式主要有同倾法和侧倾法,本文所用均为同倾法。如图2所示,应用场景多以曲轴、齿轮与凸轮轴最为常见。

检测工艺

1. 仪器参数

使用芬兰 STRESS3000 测量仪,采用直径为 75 mm 的测角仪,工作电压为 30 kV,工作电流

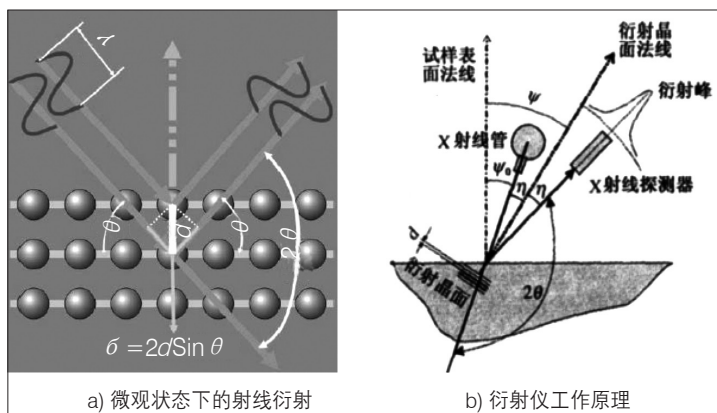


图1 X射线衍射角度的几何关系

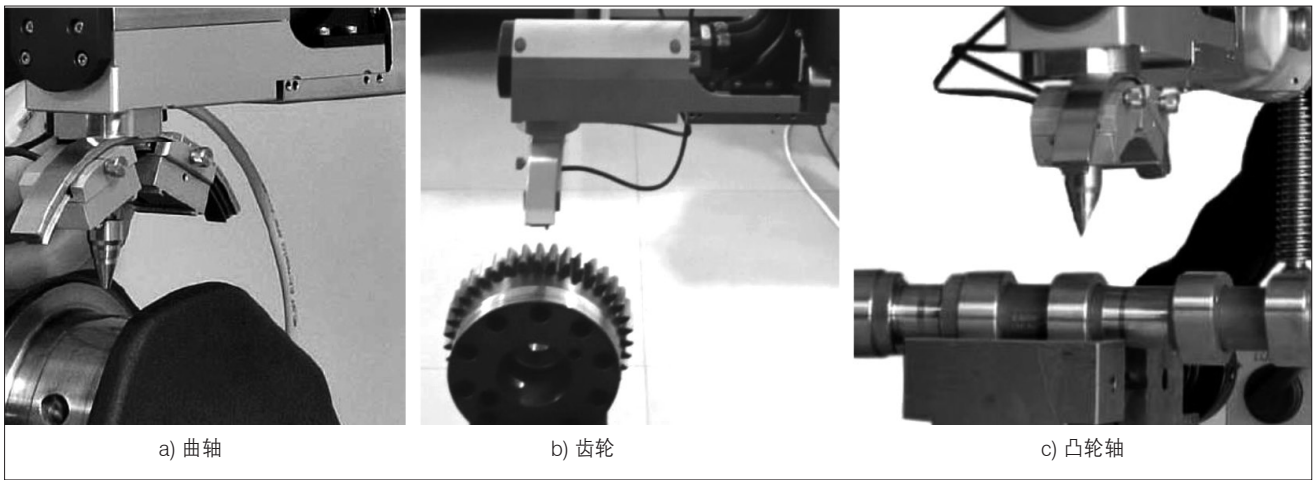


图2 X射线测量残余应力的应用场合

9 mA。采用剥层法对工件表面进行电解抛光腐蚀，用于测量工件内部一定深度的残余应力分布，设备为丹麦 Struers 公司的 Movipol-5 电解抛光仪。

2. 检测条件的选择

X 射线测量残余应力的影响深度仅有约 10 ~ 20 μm ，测量过程中应满足适当的使用条件：①工件表面应光滑平整，对于曲轴，轴颈表面至少要经过精磨，没有油污、锈斑、氧化皮等；规定被测部位表面粗糙度 $Ra < 10 \mu\text{m}$ ；②测量时，确保测角仪摆动时，不会触碰工件，以免准直器、测角仪损伤；③使用合适的波长来减少 X 射线的穿透，选择合适的衍射角或使用较低的入射角；④X 射线测量的残余应力值取决于照射面积大小和位置。如果衍射面积较小，可能会出现衍射晶体数量不足等问题；⑤弯曲表面会导致偏低的残余应力值。

主要应用及结果

1. 淬火曲轴磨削烧伤监控

曲轴表面感应淬火技术是通过固态相变，使得轴颈表面强度、

硬度升高的热处理工艺。硬度升高后的轴颈在砂轮磨削的过程中极易出现磨削烧伤。使用 X 射线衍射法可以无损地对轴颈表面进行残余应力检测，从而达到有效监控工件的磨削状态，取代传统的有破坏性的酸洗法。

图 3 是烧伤、无烧伤曲轴轴颈酸洗后的照片，图 3a 中轴颈出现暗褐色区域为回火型烧伤；图 3b 为无烧伤轴颈，表面为浅灰色。图 4 是采用剥层法对烧伤、无烧伤曲轴轴颈酸洗前的应力梯度测量。通过比较可以看出烧伤轴颈表面压应力出现较大幅度的降低，轴颈表面以下 0.3 mm 以内的压应力降低幅度较大，局部已经出现残余拉应力。

2. 齿轮喷丸强化效果评价

喷丸处理是利用高速喷射出的丸粒，对工件表面进行撞击，使之产生形变硬化层并增大残余压应力，以改善零件表面应力状态的工艺方法。目前，汽车发动机曲轴、连杆及变速器齿轮等均采用喷丸工艺来增加表面对塑性变形和断裂的抵抗能力，从而提高其疲劳强度及使用寿命。某装备齿轮采用

20Cr2Ni4A 钢，并经过渗碳处理后表面硬度为 58HRC，渗碳层约 1.5 mm。在国产 CNC 齿轮强力喷丸机上强喷，丸粒平均粒径 0.6 mm，平均硬度 61HRC。强喷后齿轮根部的残余应力影响深度约 0.5 mm，表面残余应力值为 -856 MPa，最大残余应力深度出现在 0.05 mm 处，最大残

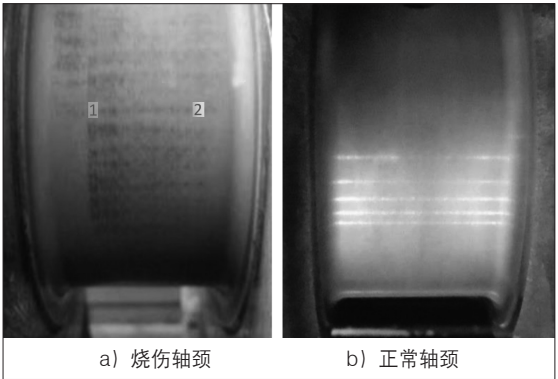


图3 曲轴轴颈酸洗后照片

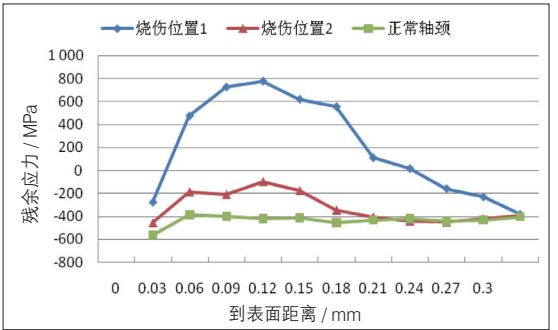


图4 烧伤轴颈与正常轴颈应力梯度曲线

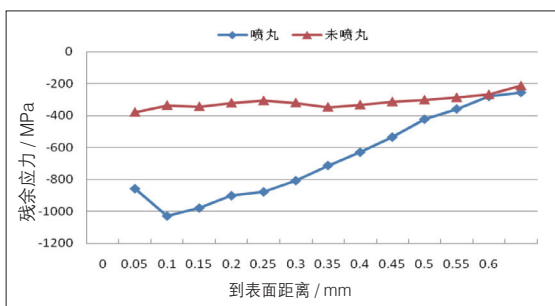


图5 喷丸与未喷丸齿轮应力梯度曲线

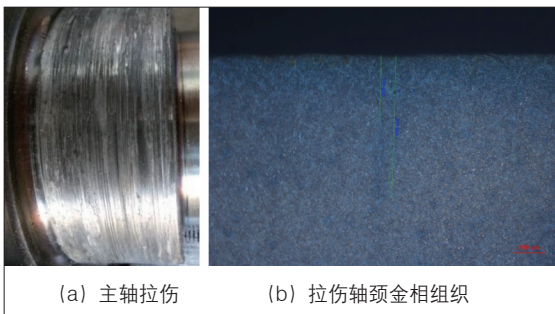


图6 曲轴拉伤轴颈及金相组织

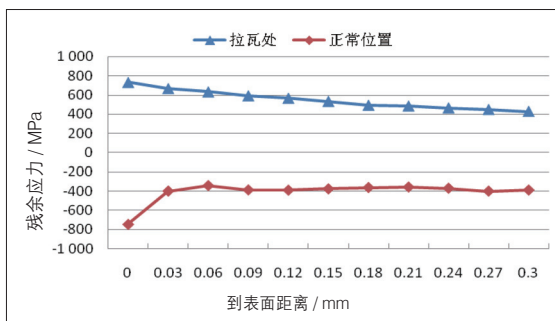


图7 烧伤轴颈与正常轴颈应力梯度曲线

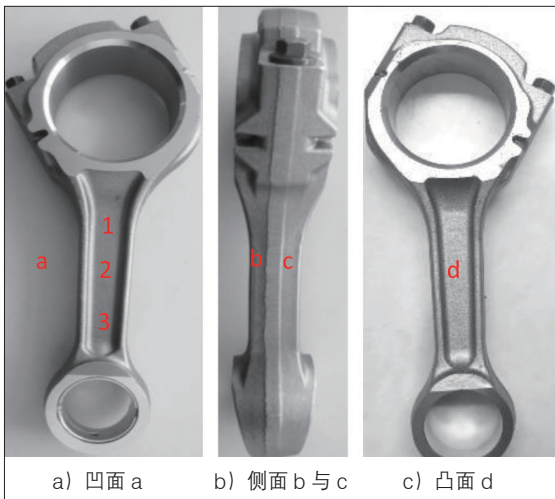


图8 弯曲连杆凹凸面及侧面照片

余应力值为 $-1\ 027\ \text{MPa}$ ，比未喷丸齿轮残余压应力有较大幅度

表 拉瓦轴颈与正常轴颈应力梯度

测量位置	残余应力 / MPa		
	测量点	弯曲连杆	正常连杆
面 a	1	-326	-321
	2	-350	-308
	3	-301	-311
面 b	1	-78	-324
	2	-55	-300
	3	-80	-331
面 c	1	-306	-306
	2	-335	-289
	3	-332	-325
面 d	1	-272	-338
	2	-205	-315
	3	-286	-301

提高。经过此种喷丸处理后与未喷丸齿轮对比如图5所示。

3. 曲轴拉瓦后应力检测

图6是曲轴主轴颈拉伤的宏观照片及金相组织。从金相显微镜下可以观察到拉伤轴颈表面以下约 $0.2\ \text{mm}$ 处可见内部长约 $0.26\ \text{mm}$ 的裂纹。采用X射线衍射法分别对拉伤轴颈与正常轴颈进行残余应力梯度测量。拉瓦的轴颈在 $0.3\ \text{mm}$ 以内均为较大的拉应力，与正常轴颈存在明显差异，差异量如图7所示。较大的拉应力会导致材料开裂，这与金相组织相吻合。

4. 弯曲连杆应力检测

图8是运输过程中包装箱破损后出现的弯曲连杆，表面存在压痕。为进一步鉴定其弯曲的原因来自机械外力，而非热应力的结果，采用X射线对图8所示的连杆毛坯面固定点1~3进行表面应力测量。从表中的数据看，弯曲连杆凸面的压应力出现明显降低，尤其是连杆加强筋处的凸向侧面b各点；而凹面处压应力均略有增大。因热应力的释放过程缓慢，

各处应力相对均衡，不会出现侧面较大幅度的波动，因此判定为机械外力导致的弯曲。

结语

目前X射线测量残余应力的方法因其便捷与无损等优势，已在汽车零部件，如曲轴、连杆、齿轮、弹簧、凸轮轴、涡轮盘、轴承钢圈及钢球等产品上得到广泛应用。其应用场合主要体现在生产过程监控和失效分析两方面：①生产过程监控。比如，监控和指导表面感应淬火强化曲轴的磨削工艺，采用电解抛光技术可以深入研究淬火区域内部的应力分布。针对滚压强化曲轴，通过切割后进行圆角整周的应力测量，建立滚压力残余应力对应关系，据此对不同滚压力下圆角滚压效果粗略评估。针对喷丸强化的连杆、渗碳淬火齿轮、轴承钢球、涡轮盘等均可以通过应力测量对工件的关键部位进行强化效果评估。②失效分析。零件的失效，比如烧伤、变形、开裂、拉伤等方式，均可以通过残余应力测量进行辅助分析与评判。 **A1**