

强力喷丸在商用车齿轮及乘用车齿轮中的应用效果及实例

■ 杨锴

摘要：论述了强喷工艺涉及到的饱和状态、弧高值、表面覆盖、丸料的要求，强喷过程的实现对于齿轮精度和粗糙度的改变效果，对齿轮齿根部位金相组织的改变和硬度的改变效果，以及对齿轮齿根残余压应力的改变效果。列举了强喷工艺在某商用车齿轮和某乘用车齿轮上的实际应用情况和指标达成情况，强调了应当注意防止的过喷问题和强喷可取得的特有强化效果。

关键词：喷丸；齿轮；强化；应用；残余压应力

强力喷丸工艺是指在一定的气体压力下利用高速喷射的细小钢丸在室温下来撞击受喷工件表面，使得工件表层材料产生弹塑性变形且呈现出比较高的残余压应力，从而提高齿轮齿部弯曲疲劳强度和接触疲劳强度的重要工艺方法，也是改善齿轮抗咬合能力，提高齿轮寿命的重要途径。

强力喷丸一方面可使零件的表面发生弹性变形，另一方面也可促使产生大量孪晶和位错，

使材料表面发生加工强化。强力喷丸对齿轮表面形貌和性能的影响主要表现在改变零件的表面硬度、表面粗糙度、抗应力腐蚀能力和零件的疲劳寿命方面。被强喷状态下的齿轮会有硬度、组织结构、相转变、表层残余压应力场的形成、表面粗糙度的变化等。如图1即为低倍数下观察到的齿轮表面受喷状态。

下面就强喷工艺在我厂的相关应用简要阐述，以作讨论参考。

1. 强喷饱和状态及弧高值

饱和状态是指在同一种设定条件下继续强喷时已经不能够

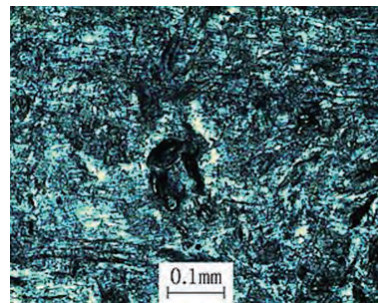


图1 强喷处表面形态

两种钢丸的单个重量

规格	100粒重量/mg	单粒重量/mg
φ0.6mm	113.17	0.113
φ0.8mm	288.6	0.287

得到的结果要明显优于φ0.8mm弹丸。齿面粗糙度影响变速器噪声，粗糙度越小越好。

4. 结语

抛丸后的残余应力主要来

源于表层不均匀的塑性变形，在零件参数允许的范围内，尺寸越大，弹丸消耗相应会更少，成本更低，但需要综合考虑弹丸对零件残余应力和齿面粗糙度的影

响，需根据试验结果选择合适的弹丸。

作者简介：余登位、廖福平、谢宝强、伍复亮、张翼，格特拉克（江西）传动系统有限公司赣州分公司。

MW 20190329

再改变受喷区域机械特性时的状态。图2所示的红色点即为弧高度曲线饱和点，当强喷时间增加一倍后弧高值的增量不能超过10%的状态下，该饱和点处所对应的弧高值即为喷丸强度。通常情况下，强喷时间在达到了饱和时间或是达到了两倍于饱和时间时即可获得最佳强化效果，我厂采用两倍于饱和时间来确保获得最佳强化效果。需要注意的是，若强化时间不够会比强化时间过度更为不利。

弧高值（喷丸强度），是指先将符合AMS2430标准的硬度为44~50HRC的长、宽、高分别约为76mm×19mm×1.3mm阿尔门（Almen）试片固定在专用夹具阿尔门试块上，按照SAEJ442a和SAE443标准规定的方法使之受喷，要在规定的时间内使之达到饱和状态的强弱程度，该强弱程度用标准阿尔明试片弯曲的弧高值来度量。阿尔门试片进行单面喷丸时，表面层在弹丸的喷射作用下会参与拉伸形变，朝向喷丸的那个面会呈现出球面弯曲。喷丸结束后取下试片，然后用阿尔门量规（即阿尔门测试仪）测量试片经过单面喷丸作用下产生的参与拉伸形变量（即弧高度值）。图3a所示为专用夹具阿尔门试块，图3b所示为阿尔门（Almen）试片受喷示意。

2. 强喷表面覆盖率

表面覆盖率指的是齿轮而不是检测强喷强度（弧高值）的阿尔门试片，如果实际生产中采用试片的表面覆盖率来设计齿轮的强喷工艺参数，将会导致齿轮的表面覆盖率达到实际应当要求

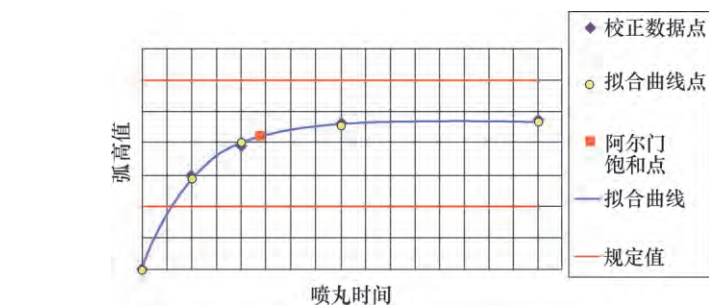
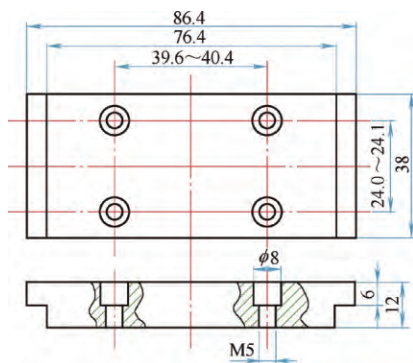
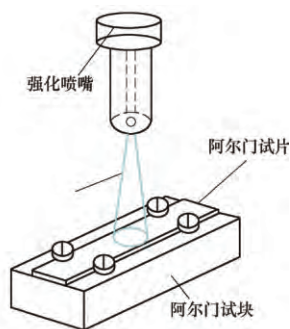


图2 强喷饱和和曲线示意



(a)



(b)

图3 专用夹具阿尔门试块及试片受喷示意

达到的程度。阿尔门试片的硬度只有44~50HRC，与表面硬度达到58~63HRC的齿轮表面相比较而言差的太多，因此齿轮表面达到规定的全覆盖率所需要的强喷时间要比阿尔门试片达到全覆盖率所需要的强喷时间长一些。

我们厂的齿轮产品大多数图样有明确要求200%覆盖率，而因覆盖率的定义里已经说明很难保证覆盖率（即齿轮被强喷后的弹丸压痕面积与被喷齿轮的表面积之比）达到100%，因而用达到98%的有效覆盖率所需要的强喷时间的2倍来实现200%覆盖率。

3. 强喷用丸料要求及对于精度和粗糙度的改变

强喷用丸料在使用的过程中会不断地破损，因此必须及时补充新的丸料，振动筛里必须有相

应的不同规格的筛网加以控制来确保强力喷丸的效果。由于破碎的弹丸会带有尖角，易使齿轮表面产生许多微小的尖切口，从而会降低强化效果。因此必须将破碎的弹丸及时筛选掉，即必须加强强喷设备的巡检和维护保养，防止振动筛里的各层筛网出现破损，如图4所示。

根据AMS2431标准强喷用丸料分为8类，我厂用到的属于AWCH类型。强喷用钢丸直径一般不能超过齿轮齿根过渡区域圆角直径的一半，因为直径过



图4 设备振动筛网常见破损部位及形态

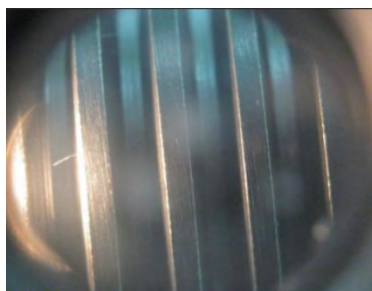
大的钢丸无法喷到齿轮齿根的圆角处。我厂根据实际情况，选用的是AWCH14（直径约为0.35mm）、AWCH23（直径约为0.6mm）、AWCH28（直径约为0.71mm）的钢丸，获得了比较理想的效果。同时选择钢丸时，应使得钢丸的硬度必须大于或等于齿轮受喷表面的硬度。

表面热处理中的渗碳或碳氮共渗淬火且精加工状态后的齿轮表面会留下明显的加工刀痕，而加工刀痕会成为应力集中部位，经过强喷会使表面粗糙度有所增加，切削加工时产生的尖锐刀痕趋于圆滑。强喷会引起齿轮受喷表面的塑性变形，使齿轮的表面粗糙度发生变化，而表面粗糙度对于齿轮的使用性能又有着重要的影响。这些变化将会明显地提高材料的疲劳抗力和应力腐蚀抗力，从而明显地提高齿轮的寿命。从图5对比可反映磨齿后的齿轮强喷前后的状态比较。

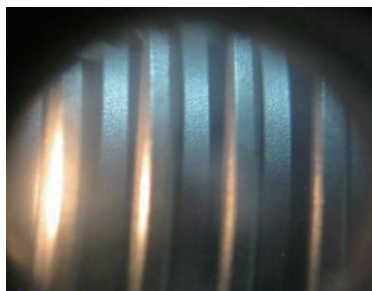
通过对某商用车惰轮的四组强喷试验可观测出，强喷主要影响齿轮的齿向形状偏差 $f_{f\beta}$ 且变化比较大。按表1、表2所示检测的结果综合来分析，零件序号2所对应的6循环状态对齿面粗糙度、齿形、齿向影响最小。

4. 强喷对齿轮齿根部位金相组织和硬度的改变

强喷处理会导致表面粗糙度的改变。过度的强喷必然会导致材料疲劳性能的降低，只有通过控制好强喷工艺的过程参数才可



(a) 磨齿后强喷前



(b) 强喷后

图5 磨齿后的齿轮强喷前后状态比较

减小或避免表面粗糙度的变化所带来的不利影响。但是强喷处理还会带来材料表层的可改善材料组织寿命的变化，比如形变细化组织结构，残留奥氏体向马氏体转变，残余压应力场的引入。比如图6就可反映出强喷对于同一个齿轮齿根部位非马氏体组织的改变。

强喷处理后的齿轮的表层内的残留奥氏体有一部分会转变成马氏体，因相变发生时会有体积膨胀因而会产生压应力，从而使表面的残留奥氏体向着更大的压应力方向变化，导致齿轮的疲劳强度得到提高。在减小或消除热处理应力的同时还可使得缺口敏感性得以改善，把易引起齿轮失效的残留应力转变为了压应力，有效限制了裂纹源的萌生和扩展，较大幅度地提升了齿轮的疲劳寿命。比如图7就可反映出高强度强喷对于齿轮节圆部位和齿

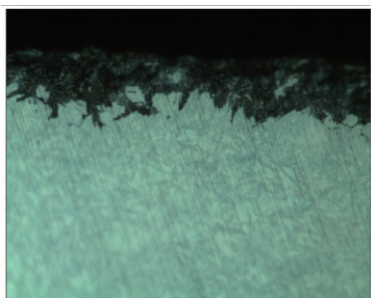
表1 强喷对于齿轮齿形、齿向影响

零件序号	复合强喷工艺		齿向形状偏差 $f_{f\beta}/\mu m$									
	循环	压强/bar	右齿面四齿平均		右齿面四齿数据				左齿面四齿平均		右齿面四齿数据	
1	8+6	5.76	12.45	15.6	8.9	13.9	11.4	12.275	11.4	11.6	13.3	12.8
2	6+0	5	8.45	11.6	7.6	7.7	6.9	9.45	10.7	10.2	8.8	8.1
3	6+3	5	10.425	10.5	11.2	13	7	11.65	13.1	10.3	15.2	8
4	10+0	6.12	11.85	15.3	11.6	8.7	11.8	13.025	10.1	12.4	16.8	12.8

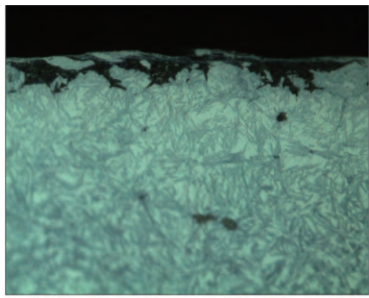
注：1bar=10⁵Pa，下同。

表2 强喷对于齿轮齿面粗糙度影响

零件序号	复合强喷工艺		齿面粗糙度/ μm											
	循环	压强/bar	渐开线				螺旋线							
			$R_{a0.8}$	$R_{z6.3}$	R_z8	R_{p4}	$R_{mr}(-1, 5) \geq 25\%$	$R_{mr}(-2, 5) \geq 60\%$	$R_{a0.8}$	$R_{z6.3}$	R_z8	R_{p4}	$R_{mr}(-1, 5) \geq 25\%$	$R_{mr}(-2, 5) \geq 60\%$
1	8+6	5.76	0.5875	3.2479	4.7894	1.8093	26.19%	77.69%	0.4132	2.6396	3.8949	1.4227	59.02%	98.35%
2	6+0	5	0.576	3.1978	5.6755	1.8414	28.83%	81.62%	0.5404	3.573	5.2993	1.5906	46.88%	93.02%
3	6+3	5	0.5498	2.8735	3.8121	1.5918	37.55%	88.83%	0.4277	2.8679	4.1501	1.4819	57.28%	97.99%
4	10+0	6.12	0.6277	3.6114	5.7498	1.7515	31.50%	79.61%	0.4605	3.661	6.8594	2.1586	49.21%	94.40%



(a) 强喷前：非马氏体26 μm



(b) 强喷后：非马氏体15 μm

图6 强喷对于齿轮齿根部位非马组织的改变

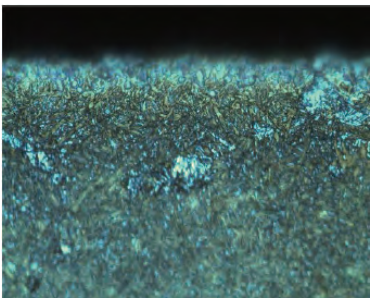
根部位金相组织的改变（组织转变白层的出现）。

强喷件的表层显微硬度也会得到明显的提高（如表3所示），这是受到高的残余压应力、加工硬化和组织细化综合作用的结果，其中残留奥氏体含量的减少对于硬度的提高也有一定的作用。由于强喷使齿轮表层中的残留奥氏体向着马氏体转变，马氏体针细小且致密，起到了细化马氏体亚结构的作用，有利于

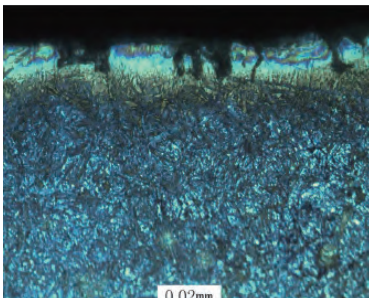
残留压应力的提高即有效提高了齿轮的疲劳性能。

5. 强喷对于齿轮齿根残余压应力的改变

喷丸对渗碳齿轮表层残余应力的影响：当高速运动的钢丸撞击到试样表面，撞击处产生塑性变形而产生一压坑，当越来越多的钢丸撞击到试样表面时，则会在试样表层产生一层均匀的塑变层，由于塑性变形层的体积膨胀会受到来自未塑性变形邻近区域



(a) 节圆



(b) 齿根

图7 强喷对于齿轮齿根部位金相组织的改变

表3 强喷对于齿轮齿根表层显微硬度的影响

距离表面 / μm	D_1 / μm		D_2 / μm		硬度值HV		转换值HRC	
	强喷前	强喷后	强喷前	强喷后	强喷前	强喷后	强喷前	强喷后
25	22.56	20.27	22.37	20.84	734.93	877.85	61.58	66.96
50	21.99	21.03	21.8	21.22	773.69	831.12	63.15	65.33
75	22.18	20.84	21.61	21.61	773.69	823.31	63.15	65.05
100	21.99	21.03	21.8	21.41	773.69	823.7	63.15	65.06
125	21.8	21.22	22.18	21.61	767.02	808.76	62.89	64.49
150	21.8	21.61	22.18	21.8	767.02	787.3	62.89	63.7
180	21.8	21.99	21.8	21.99	780.45	767.02	63.44	62.89

的限制，因此整个塑变层受到一压应力。美国SAE J784a标准中推荐X射线衍射法：X射线的入射和衍射束必须平行于齿轮的齿根，圆柱直齿轮和圆柱螺旋齿轮上的测量位置应当在齿根的宽度中央，照射区域必须集中在齿根圆角的中心，不能横向延伸超出规定的齿根圆角表面深度的测量点，照射区域大小的控制可通过对直光束和适当遮盖齿根表面实现；在每个选定受检的齿轮上，最少要任选两个齿进行评估，两齿间隔180°。

下面列举的强喷工艺在我厂两种齿轮上的应用案例，采用自购AWCH型丸料，采用适合的喷丸流量 α kg/min，强喷压力 β bar，喷枪坐标 (X_{cm}, Y_{cm}) ，循环次数 γ ，喷枪移动速度 δ cm/min，行星转台转速 ε r/min等工艺参数可实现强喷指标满足技术要求。受喷齿轮外委上海交通大学进行检测。检测条件：采用Proto-iXRD型X射线应力分析仪，管电压25kV，管电流5mA，Cr靶Ka辐射，V滤波片，准直管直径1mm，Fe (211) 衍射晶面，双512通道位敏探测器，对应 2θ 范围19°， ϕ 角 $\pm 45^\circ$ 内优化设置17站，同倾衍射几何方式，X射线弹性常数取 $S_2=5.92 \times 10^{-6} \text{MPa}^{-1}$ 及 $S_1=-1.28 \times 10^{-6} \text{MPa}^{-1}$ ，检测执行ASTM-E915—2010、EN15305—2008及GB7704—2008标准。借助Proto-8818电解抛光机对检测部位电化学腐蚀，参数15V、2A，饱和NaCl水电解液，数显千分尺测量材料腐蚀深度。

案例一：强喷在某商用车桥

齿轮上的应用

某商用车桥齿轮，材料20CrMnTiH3，最大外径168mm，齿高83mm，要求表面硬度58~63HRC，心部硬度30~40HRC，有效硬化层深成品为节圆处0.9~1.3mm（550HV），磨削部分层深不允许<0.7mm（550HV），模数为7，弧高值 $\geq 0.6\text{mm}$ ，表面覆盖率 $\geq 200\%$ ，图8为强力喷丸对于某商用车桥齿轮的强喷示意，在采用单种丸料强喷后可以达到表4所示的残余压应力效果。该齿轮送至客户处进行疲劳试验时收到反馈试验载荷中值可达到规定界限，且无异常情况发生。

案例二：强喷在某乘用车齿轮上的应用

该乘用车齿轮总高70.3mm，内花键孔径28.5mm，最大外径62.3mm，其他热处理指标要求：材料为27MnCr5，齿顶硬度680~900HV10，有效硬化层深（650HV10）=0.40~0.65mm，齿根心部硬度380~530HV50，齿根处表面氧化深度 $E \leq 25\mu\text{m}$ ，金相组织为无碳氮化合物，残留奥氏体深度 $\leq 30\%$

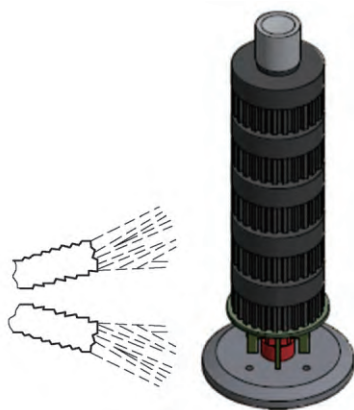


图8 强喷对于某商用车桥齿轮的强喷示意

E650。

对于表面渗碳或碳氮共渗硬度在600HV以上的齿轮，想要通过常规的单种丸料强喷达到比较高的残余压应力是比较难的，因此可采用复合强喷来得到比较高的残余压应力，达到提升疲劳强度的目的。即首先使用将近60HRC（713HV）的高硬度丸料进行较高强度的强喷，使得A型阿尔门试片获得可观的弧高值，获得一定深度的表面强化层，然后再用细小的丸料进行第二次较低强度的强力喷丸，在齿根部位的表面和次表面引入比较高的残余压应力，以达到减轻表面加工硬化，改善表面粗糙度，提高表面残余压应力，进一步提高齿轮的疲劳性能的目的。图9为强力

喷丸对于某乘用车齿轮的强喷示意，在采用复合强喷后可以达到表5所示的残余压应力效果。

需要注意的是，并不是说强喷的强度越高则齿轮的强化效果越好，一方面强度太高时高硬

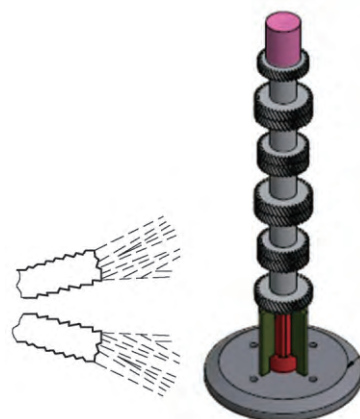


图9 强喷对于某乘用车齿轮的强喷示意

表4 某商用车桥齿轮单种丸料强喷前后残压指标对比

齿轮齿根处距离表面深度/ μm	强喷前残余压应力/-MPa	强喷后残余压应力/-MPa
0	267	464
25	385	870
50	554	933
75	520	891

表5 某乘用车用齿轮复合强喷后残压指标

齿轮齿根处距离表面深度/ μm	强喷前残余压应力/-MPa
10	964.8
15	1013.9
20	1076.3
25	1124.7
30	1157.2
35	1184
70	1128.5
80	1095.3
90	1057.4
100	1009.8

度状态的丸料破损率会很高；另一方面齿轮表面的组织在很大的离心力作用下也会受到一定的损伤即过喷，此时反而对于齿轮有害。其损害程度已经不仅仅是表面粗糙度的加大了，很可能会出现微小裂纹源，使残余压应力产生一定幅度的降低。因此，选择合适的强喷工艺参数很重要。强喷强度不足时带来的问题是无法得到较大的残余压应力和足够深的表面强化层。而强喷强度太高（即过喷）时带来的问题是会产生微小裂纹（疲劳源，应力集中源）甚至是表面硬化层剥落。

常规的气体表面渗碳或碳氮共渗淬火、回火后往往会存在不可避免的晶界氧化层（IGO）软层，其在强力喷丸处理后易产生应力集中，在IGO层深度比较严重的情况下会成为疲劳裂纹源的起点。因此必须要采取相应的管控措施来有效地控制IGO层深度，才能使得强力喷丸提高齿轮疲劳强度的作用真正得到充分发挥。在热处理过程控制不好时如果在齿轮的齿尖部位出现了比较严重的网络连网状态的碳化物时，强力喷丸处理后也易出现微裂纹。

在强力喷丸过程中齿轮的表面会发生塑性形变，形变的表面逐步连接成片，则使工件表面逐步形成一层均匀的塑性变形层。如果再继续过度的强力喷丸会使塑性变形层因继续延伸而厚度逐步变薄，同时塑性变形层的径向延伸会因为受到邻近区域的限制而导致重叠致使部分发生破坏，最终塑性变形层因为持续不断的强力喷丸而发生剥落。因此，

必须对喷丸的时间加以严格的控制。图10是从相关资料上收集的四种强喷工艺不当或过度强喷造成的典型缺陷示意。

6. 结语

与其他各种表面强化工艺相比，强喷工艺体现出了特有的强化效果明显、操作简便、成本低廉的先进节能特性。针对硬齿面齿轮其基体硬度较高，在实施正确适当的强喷工艺处理后可有效地提高齿轮的疲劳寿命。

（1）通过选择合适的强喷工艺，表面残余压应力可超过-1000MPa，最大残余压应力可超过-1100MPa，残余压应力深度

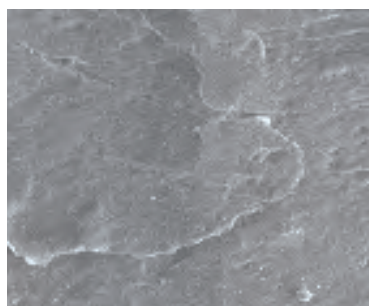
可超过100 μm 以上。

（2）强喷后残留奥氏体向马氏体转变，并且齿根非马氏体深度大幅度得到缩减。

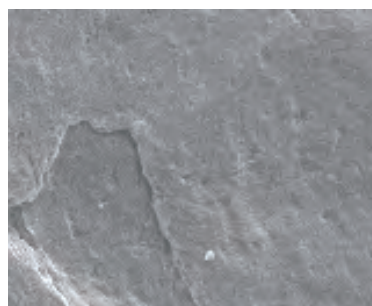
（3）齿根表面的显微硬度可以从强喷前的726HV（60.5HRC）提高到830~850HV（65~66HRC）。距离表面150 μm 以内区域都可观测到明显的强化效果。

（4）强喷工艺得当时可确保在获得比较明显的强化效果的同时又不会明显增加表面粗糙度。

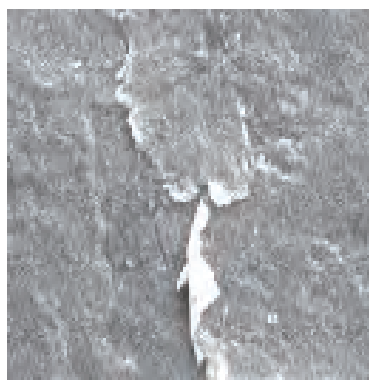
（5）由于强力喷丸处理可达到表层金相组织发生转变且硬度得以有效提升的效果，在齿轮



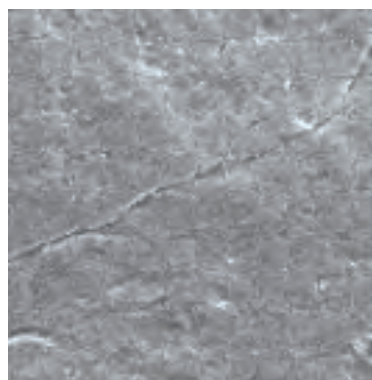
(a) 起皮



(b) 脱落



(c) 折叠



(d) 裂纹

图10 强喷典型缺陷示意

出现有轻度的磨削烧伤时适当地引入强喷工艺就可适度弥补。

程师，东风汽车有限公司刃量具厂，技术开发部，负责齿轮热处理及齿轮表面处理工作。

作者简介：杨镭，高级工

MW 20190318