

T/GRM

中关村绿色矿山产业联盟团体标准

T/GRM 146—2026

矿山设备动态纳米增材（DNPA）修复材料应用技术要求

Technical requirements for dynamic nanoparticles additive(DNPA) repair materials
for mining equipment

2026-02-06 发布

2026-02-09 实施

中关村绿色矿山产业联盟 发布

目 次

前言 II

1 范围 3

2 规范性引用文件 3

3 术语和定义 3

4 磨损程度评估 3

5 应用条件 5

6 修复效果评价 5

附录 A（资料性）矿山设备磨损与失效分类 9

附录 B（资料性）设备磨损评估参数表 10

附录 C（资料性）矿山设备磨损情况示例 11

参考文献 12

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中关村绿色矿山产业联盟提出并归口。

本文件起草单位：中科宝鹿新材料（辽宁）有限公司、中科宝鹿纳米新材料（沈阳）有限公司、信峰智造技术（海南）有限公司、沈阳理工大学、哈尔滨工业大学、中煤平朔集团有限公司、中煤天津设计工程有限责任公司。

本文件主要起草人：吴国峰、郑群、姜晓飞、郑林、冯天、陶一鸣、孙建立、赵晖、梁海成、李闯、侯明昊、刘国志、杨瑞峰。

本文件为首次发布。

矿山设备动态纳米增材（DNPA）修复材料应用技术要求

1 范围

本文件规定了矿山设备动态纳米增材（DNPA）修复材料技术应用的磨损程度评估、应用条件和修复效果评价。

本文件适用于矿用地质矿产勘查设备、采掘设备、选洗、筛分设备、破碎、粉磨设备、矿山支护设备、提升贮运设备以及矿用车辆等矿山设备动态纳米增材（DNPA）修复材料技术应用。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB/T 3767 声学 声压法测定噪声源声功率级和声能量级 反射面上方近似自由场的工程法
- GB/T 12444 金属材料磨损试验方法—环块摩擦磨损试验
- GB/T 17754 摩擦学术语
- GB/T 23904 无损检测 超声表面波检测方法
- GB/T 26951 焊缝无损检测 磁粉检测
- GB/T 28705 无损检测 脉冲涡流检测方法

3 术语和定义

GB/T 17754界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

动态纳米增材（DNPA）修复材料 dynamic nanoparticles additive(DNPA)repair materials

一种利用动态纳米增材技术，实现在金属摩擦面再生新质增材层以修复受损表面的纳米量级活性组分智能型修复材料。

3.2

动态纳米增材（DNPA）修复技术 dynamic nanoparticles additive(DNPA)repair technology

利用动态纳米增材修复材料中的高活性纳米成分在设备动态运转过程中利用摩擦热能，自主响应摩擦闪温，自适应工况条件继而发生智能型微焊接与微烧结反应，最后在摩擦副表面增材出新型磨耗层保护设备安全可靠运行。

4 磨损程度评估

4.1 通用要求

通过对待修复设备的磨损评估，界定设备的磨损程度等级，3级磨损及以下的矿山设备可用动态纳米增材（DNPA）修复材料实现表面修复以及设备更新。

4.2 磨损分类

4.2.1 矿山设备磨损与失效分类应根据矿山服役设备的功能、用途、使用年限、投入率、设备维保周期等，见附录表 A.1 确定。

4.2.2 动态纳米增材（DNPA）修复材料可修复范围是应根据摩擦损失和其他损伤带来的表面受损情况确定，损伤程度不超过 40 μm 的表面，经修复期后可实现完全修复，损伤程度不超过 60 μm 的表面，经理论修复期后可实现基本修复，待持续延长修复期可实现完全修复。

4.3 评估方式

4.3.1 目视观察

目视观察应检查设备表面是否有裂纹、划痕、锈蚀、剥落、变形、磨损痕迹等。

4.3.2 尺寸测量

待修复设备关键尺寸检测应测量轴径、孔径、厚度等磨损部位尺寸变化；测量工具应采用游标卡尺、千分尺、三坐标测量仪等。

4.3.3 材料分析

待修复设备的材料分析应通过以下几项进行：

- a) 金相分析：应通过显微镜观察晶粒粗化、疲劳剥落等金属微观结构变化；
- b) 硬度测试：应检测磨损可能导致硬度下降等材料表面硬度变化；
- c) 成分分析：应分析金属成分是否因磨损发生合金元素减少等流失，可采用光谱分析、能谱分析等方法。

4.3.4 性能测试

待修复设备的性能测试可通过以下项目的分析进行：

- a) 振动、噪声分析：异常振动和异常噪声可表明轴承或齿轮磨损；
- b) 温度升高：摩擦副磨损可导致接触面温度异常；
- c) 效率下降：加注设备输出功率降低、动力源输出功率增加，可表明效率下降。

4.3.5 无损检测（NDT）

待修复设备首要排除其他内部机械缺陷和故障，可采用以下方式检测：

- a) 超声波检测：探测内部裂纹或孔洞，检测方法见 GB/T 23904；
- b) 磁粉检测：发现表面或近表面裂纹，检测方法见 GB/T 26951；
- c) 涡流检测：用于导电材料表面缺陷检测，检测方法见 GB/T 28705。

4.3.6 历史数据分析

待修复设备可通过历史数据分析磨损情况，包括以下项目：

- a) 运行时间：设备累计运行时长与预期寿命对比；
- b) 维护记录：历史维修中发现的磨损问题及频率。

4.3.7 金属材料抗磨性能分析

实验室方法检测摩擦副材料的抗磨性能，试验方法见GB/T 12444。

4.4 磨损程度评定

磨损等级划分可按表1确定，根据不同磨损程度由轻到重分为以下五级，具体磨损现象和效果参见附录C表C.1设备磨损情况示例。

表 1 磨损等级划分

设备磨损等级划分		
磨损等级	现象描述	维保处理措施
0级	除磨合期外正常磨损：表面无磨损压痕、划痕，尺寸无变化，设备状态良好	日常养护，定期巡检
1级	轻微磨损：表面轻微划痕，尺寸变化小于1%，不影响功能	继续观察，定期维护
2级	中度磨损：局部磨损，尺寸变化1%~3%，性能略有下降，但未超标	局部修复
3级	严重磨损：关键部位磨损，尺寸变化3%~5%，异常振动、噪音显著增加，功能明显下降	停机检修，更换部件或局部更换
4级	失效磨损：磨损超限，尺寸变化大于5%，设备功能丧失或存在严重安全隐患	立即停机，更换设备或全面维修

注：实际应用中的注意事项：

- a) 多维度综合评估：单一指标可能不准确，应结合外观、尺寸、性能等多维度数据；
- b) 测量精度与重复性：单次测量要求尺寸变化测量误差不大于 0.01mm；每组数据测量不少于 3 次，且重复性偏差≤5%；
- c) 环境因素：宜考虑腐蚀性环境可能加速磨损；
- d) 数据记录与趋势分析：通过长期监测建立设备磨损曲线，预测剩余寿命；
- e) 经济性权衡：对于接近寿命极限的设备，应评估维修成本与更换新设备的性价比。

5 应用条件

5.1 环境条件

动态纳米增材（DNPA）修复材料应用环境条件主要是指环境温度，环境温度受海拔和地理位置及地形的影响，其中海拔应符合下列规定：

- a) 海拔不高于 1000m 区域，环境温度下限-20℃；
- b) 海拔不高于 3000m 区域，环境温度下限-25℃~30℃；
- c) 高海拔和极寒地区，环境温度下限-45℃~50℃。

5.2 运行条件

要保证修复过程累计运行时长满足要求，详见表2。

表 2 修复过程设备累计运行时长

修复过程设备运行时长要求			
修复位置	机构类型	每日运行时长	累计运行时长
轴承	各种型号	≥10小时/日	≥5000小时
齿轮箱	高精度齿轮箱	≥8小时/日	≥5000小时
	轻中载齿轮箱	≥8小时/日	≥5000小时
	重载齿轮箱	≥8小时/日	≥5000小时
内燃机	车辆汽油机	≥20公里/日	≥15000公里
	轻型车辆柴油机	≥50公里/日	≥50000公里
	重型车辆柴油机	≥8小时/日	≥5000小时
	重型设备柴油机	≥8小时/日	≥5000小时

5.3 载荷条件

- 5.3.1 设备载荷应按设备出厂时文件规定的载荷运行，在设备安全系数允许范围内运行。
- 5.3.2 待磨损修复完成后，设备可短时超负荷运行；根据设备运行状态不同，设备润滑介质极压性能提升系数为 1.3~1.5。

5.4 修复设备条件

- 5.4.1 使用动态纳米增材进行矿山设备修复前，按照设备相关技术标准和设备出厂相关技术文件规定按时维护和保养，保证修复前设备油箱清洁，确保目视范围内无油泥和脏污。
- 5.4.2 使用动态纳米增材进行矿山设备修复前，按照设备相关技术标准和设备出厂相关技术文件规定清洗和更换过滤系统的滤网和滤芯等备件，保证修复前设备的过滤系统符合技术要求。

6 修复效果评价

6.1 修复与养护

修复对象应是设备磨损评估等级为1级和2级的设备，养护对象是设备磨损评估等级为0级的设备，以及修复完成的1级和2级的设备；修复过程中的修复效果评价，参照本节内容；养护期的效果主要体现在设备运行状态的改善，设备最佳运行期的延长，设备安全可靠性的提高。

6.2 磨损修复增材效果

表面磨损修复增材效果详见表3。

表3 表面磨损修复增材效果

表面修复效果		
修复阶段	表面效果	增材层厚度a (单位: μm)
初期	未修复	$a < 5$
中前期	修复中	$5 \leq a < 10$
中后期	修复中	$10 \leq a < 20$
后期	基本修复	$20 \leq a < 40$
完成期	完成修复	$a \geq 40$
注: 实际应用中的增材厚度的测量方法可采用无损测厚仪测量或涂层测厚仪测量等的一种方式。		

6.3 核心性能效果评价

设备养护期核心性能指标没有明显的衰减,所以不能用以下公式衡量养护效果,养护效果的体现主要集中在设备维持最佳运行状态,提高设备的安全可靠性;设备修复完成后,核心性能指标的修复效果评价应按下列情况评价:

- 综合计算公式结果大于零,表示性能指标对应修复效果是增加和提升;
- 综合计算公式结果等于零,表示性能指标对应修复效果是没有修复;
- 综合计算公式结果小于零,表示性能指标对应修复效果是减少和降低。

6.3.1 最大承载能力

最大承载能力修复效果应按式(1)计算:

$$\% \Delta G = (G - G_0) / G_0 \quad (1)$$

式中:

$\% \Delta G$ ——最大承受能力修复修复效果,单位为%;

G ——修复后最大承载能力,单位为t;

G_0 ——修复前最大承载能力,单位为t。

设备效果最大承载能力 $\% \Delta G \geq 1\%$,应视为有效提升; $\% \Delta G \geq 3\%$,应视为显著提升。

6.3.2 转数

转数修复效果应按式(1)计算:

$$\% \Delta n = (n - n_0) / n_0 \quad (1)$$

式中:

$\% \Delta n$ ——转速修复效果,单位为%;

n ——修复后特定工况下转速,单位为r/min;

n_0 ——修复前特定工况下转速,单位为r/min。

设备采用智能控制系统,相同负载的情况下,考虑动力拖动设备的输出转速(即执行系统的输入转速),修复效果转速 $\% \Delta n \geq 1\%$,应视为有效提升; $\% \Delta n \geq 3\%$,应视为显著提升。

6.3.3 输出压力

输出压力修复效果应按式(1)计算:

$$\% \Delta p = (p - p_0) / p_0 \quad (1)$$

式中:

$\% \Delta p$ ——输出压力修复效果,单位为%;

p ——修复后输出压力,单位为MPa;

p_0 ——修复前输出压力,单位为MPa。

设备修复效果输出压力 $\% \Delta p \geq 1\%$,应视为有效提升; $\% \Delta p \geq 3\%$,应视为显著提升。

6.3.4 输出有功率

输出有效功率修复效果应按式(1)计算:

$$\% \Delta P = (P - P_0)/P_0 \cdots \cdots (1)$$

式中:

$\% \Delta P$ ——输出有效功率效果, 单位为%;

P ——修复后输出有效功率, 单位为kW;

P_0 ——修复前输出有效功率, 单位为kW。

设备修复效果输出有功功率 $\% \Delta P \geq 1\%$, 应视为有效提升; $\% \Delta P \geq 3\%$, 应视为显著提升。

6.3.5 扭矩

扭矩修复效果应按下式计算:

$$\% \Delta T = (T - T_0)/T_0 \cdots \cdots (1)$$

式中:

$\% \Delta T$ ——输出扭矩修复效果, 单位为%;

T ——修复后扭矩, 单位为N·m;

T_0 ——修复前扭矩, 单位为N·m。

设备采用智能控制系统, 相同负载的情况下, 考虑动力拖动设备的输出扭矩(及执行系统的输入扭矩), 修复效果扭矩 $\% \Delta T \geq 1\%$, 应视为有效提升; $\% \Delta T \geq 3\%$, 应视为显著提升。

6.3.6 运行温度

运行温度修复效果应按下式计算:

$$\% \Delta \text{Temp} = (\text{Temp} - \text{Temp}_0)/\text{Temp}_0 \cdots \cdots (1)$$

式中:

$\% \Delta \text{Temp}$ ——运行温度修复效果, 单位为%;

Temp ——修复后运行温度, 单位为°C;

Temp_0 ——修复前运行温度, 单位为°C。

设备修复效果运行温度 $\% \Delta \text{Temp} \geq 3\%$, 应视为有效提升; $\% \Delta \text{Temp} \geq 5\%$, 应视为显著提升。

6.3.7 噪音

噪音修复效果应按下式计算:

$$\% \Delta L = (L - L_0)/L_0 \cdots \cdots (1)$$

式中:

$\% \Delta L$ ——噪声修复效果, 单位为%;

L ——修复后的噪声, 单位为dB;

L_0 ——修复前的噪声, 单位为dB。

其中噪音测量依据标准GB/T 3767执行。

设备修复效果运行时噪声 $\% \Delta L \geq 3\%$, 应视为有效提升; $\% \Delta L \geq 5\%$, 应视为显著提升。

6.3.8 振动

振动修复效果应按下式计算:

$$\% \Delta a = (a - a_0)/a_0 \cdots \cdots (1)$$

$$\% \Delta v = (v - v_0)/v_0 \cdots \cdots (2)$$

$$\% \Delta d = (d - d_0)/d_0 \cdots \cdots (3)$$

式中:

$\% \Delta a$ ——振动加速度修复效果, 单位为%;

$\% \Delta v$ ——振动速度修复效果, 单位为%;

$\% \Delta d$ ——振动位移修复效果, 单位为%;

a ——修复后振动加速度, 单位为 m/s^2 ;

a_0 ——修复前振动加速度, 单位为 m/s^2 ;

- v——修复后振动速度，单位为m/s；
- v₀——修复前振动速度，单位为m/s；
- d——修复后振动位移，单位为μm；
- d₀——修复前振动位移，单位为μm。

设备修复效果运行时振动%Δa≥5%，应视为有效提升；%Δa≥10%，应视为显著提升。

注：设备振动、噪声以及温度的测量，应结合待修复设备的传感器系统布局与实际设备情况，保持修复前后测量点位一致，使用工具仪器等相同，即使不同要保证精度一致。

6.4 修复成果养护

6.4.1 修复期界定与修复用量

矿山设备经过磨损评估后，可根据设备的工况条件，按照表4确定待修复设备修复期，并按下列规定执行：

- a) 修复设备短期不换油或终身不换油，评估磨损后可适当上调加注比例，上调校正系数为 1.1~1.5；
- b) 设备短时内不换油，采取随时补油方式维护，可按照修复比例在补油过程中持续使用修复材料，以保证修复过程持续进行。

表 4 表面磨损修复增材效果

修复期期限界定	
磨损评估等级	最短修复期
1级磨损	1~2维保换油周期
2级磨损	2~3维保换油周期

6.4.2 养护期界定与养护用量

矿山设备修复完成后或磨损评估为0级磨损设备，应持续养护修复成果，修复后的使用寿命内持续减量使用修复材料，可保证修复成果发挥保护设备功能，延长设备使用寿命，修复期与养护期用量应符合下列规定：

- a) 养护期同步设备维护周期；
- b) 养护期用量为修复阶段用量的 50%；
- c) 三个换油周期之后减少到修复阶段用量的 30%，一直持续维持此时用量。

附 录 A
(资料性)
矿山设备磨损与失效分类

表 A.1 矿山设备磨损与失效分类

设备磨损与失效	
磨损与失效类型	具体形式和表现现象
摩擦损伤	磨光磨损
	擦伤
	磨料磨损
	胶合
	黏着磨损
	微动腐蚀
	干涉磨损
疲劳损伤	疲劳裂纹
	接触疲劳
	弯曲疲劳
非疲劳断裂	齿根折断
	齿端折断
	轮齿剪断
塑性变形	压痕
	冷流动
	热流动
	齿根圆角屈服
	塑性变形后折断
	滚压塑变
	起皱、起脊
	剥落、剥层
	飞边
	干涉变形
制造问题	锻造裂纹
	硬化裂纹
	磨削裂纹
	内部残余应力
	烧伤
	缺口
	磷蚀
	表心分离
	氧化磨损、腐蚀磨损
其他表面损伤	点蚀、气蚀
	冲蚀
	电蚀
	过热


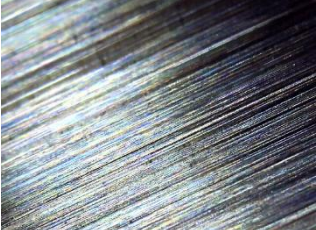








附 录 B
(资料性)
设备磨损评估参数表

表 B.1 设备磨损评估参数表

设备磨损评估参数表																	
序号	设备名称	出厂日期	使用年限	使用频率	运行时长(h/日)	设备定期检修频次	单机润滑油容量(L/台)	换油/换件周期	滑油补充量(L/月)	末次保养时间	设备痛点	易损坏部位	备/换件成本(元/年)	是否有历史数据	数据监控采集方式	配套过滤方式	过滤精度(μm)
例如	减速机	2018/6/1	10	每日	20	1次/3月	95L	换油/3月、换件/36月	10L/3月	2021/9/1	温度过高	齿轮	1000	是（可提供前两年至今）	中控数据可实时采集导出	过滤器	20

附录 C
(资料性)
矿山设备磨损情况示例

表 C.1 矿山设备磨损情况示例

磨损等级评估	磨损现象	图片示意	
0级磨损	无明显痕迹		
1级磨损	微磨损，表面轻微压痕		
2级磨损	中度磨损，表面点蚀，明显压痕		
3级磨损	严重磨损，鱼鳞状裂纹，剥落		
4级磨损	失效磨损，裂缝，断裂，变形		

参 考 文 献

- [1] GB/T 3481 齿轮轮齿磨损和损伤术语
- [2] GB/T 12444 金属材料磨损试验方法—环块摩擦磨损试验
- [3] GB/T 17754 摩擦学术语
- [4] GB/T 2390 无损检测 超声表面波检测方法
- [5] GB/T 26951 焊缝无损检测 磁粉检测
- [6] GB/T 28705 无损检测.脉冲涡流检测方法
- [7] GB/T 37400 重型机械通用技术条件
- [8] GB/T 38274 润滑系统 能效评定方法
- [9] GB/T 3767-2016 声学 声压法测定噪声源声功率级和声能量级 反射面上方近似自由场的工程法
- [10] JB/T 8820 摩托车传动链条 磨损性能试验规范
- [11] AGMA 01FTM7-2001 Chemically Accelerated Vibratory Finishing for the Elimination of Wear and Pitting of Alloy Steel Gears合金钢齿轮的磨损和点蚀的消除用化学加速振动修整
- [12] STB 1233-2000 Tribo-fatigue. Wear-fatigue tests methods. Accelerated mechano-rolling fatigue tests摩擦疲劳 磨损疲劳试验方法 加速机械滚动疲劳试验
-