

ICS ***

CCS ***

T/GRM

中关村绿色矿山产业联盟团体标准

T/GRM XXXX—2025

矿山设备用动态纳米增材（DNPA）修复材料 应用技术规范

2025 - 07 - 30 发布

2025 - 08 - 01 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 应用技术条件 5

6 修复效果评价 6

参考文献 8

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。

本文件由中关村绿色矿山产业联盟归口。

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、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、崔磊、冯天、赵晖、梁海成、李闯、刘国志、杨瑞峰。

本文件为首次发布。

矿山设备的动态纳米增材（DNPA）修复材料的应用技术规范

1 范围

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、应用技术条件和修复效果评价。

本规范适用于矿用地质勘探设备、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 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
- NF ISO 10825 齿轮 ISO术语系统 齿牙外观术语:磨损和损害

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）Dynamic Nanoparticles Additive

利用设备动态运转时产生的摩擦热能，纳米增材修复材料与受损的摩擦面金属材料发生智慧型微焊接微烧结，在摩擦面再生新质增材磨耗层的磨损修复机理。

4 磨损程度评估

4.1 磨损分类

矿山设备磨损与失效分类可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，按表1确定。

表 1 矿山设备磨损与失效分类

设备磨损与失效分析	
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
其他表面损伤	氧化磨损、腐蚀磨损
	点蚀、气蚀
	冲蚀
	电蚀
	过热

4.2 评估方式

4.2.1 目视观察

目视观察应检查设备表面是否有裂纹、划痕、锈蚀、变形、磨损痕迹等。

4.2.2 尺寸测量

- a) 关键尺寸检测：应测量轴径、孔径、厚度等磨损部位尺寸变化。
- b) 测量工具：应采用游标卡尺、千分尺、三坐标测量仪等。

4.2.3 材料分析

- 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) 光谱分析：应分析金属成分是否因磨损发生合金元素减少等流失。

4.2.4 性能测试

- a) 振动分析：异常振动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：泵流量降低、电机功率增加，可表明效率下降。

4.2.5 无损检测（NDT）

- a) 超声波检测：探测内部裂纹或孔洞，检测方法见 GB/T23904。
- b) 磁粉检测：发现表面或近表面裂纹，检测方法见 GB/T26951。
- c) 涡流检测：用于导电材料表面缺陷检测，检测方法见 GB/T28705。

4.2.6 历史数据分析

- 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：历史维护中发现的磨损问题及频率。

4.2.7 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/T12444。

4.3 磨损程度评定

磨损等级划分可按表2确定。

表 2 磨损等级划分

磨损等级	现象描述	维保处理措施
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，尺寸变化不小于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：

- 1) 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；
- 2) 环境因素：腐蚀性环境加速磨损；
- 3) 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；
- 4) 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 应用技术条件

5.1 环境条件

动态纳米增材（DNPA）修复材料应用环境条件应符合下列规定：

- a) 海拔不高于 1000m 区域；
- b) 温度-25℃~30℃的区域。

5.2 运行条件

矿山设备修复期间要保证设备运行时长见表3。

表 3 修复过程设备累计运行时长

修复位置	机构类型	每日运行时长	累计运行时长
轴承	-	≥10小时/日	≥1000小时
齿轮箱	高精度齿轮箱	≥8小时/日	≥1000小时
	轻中载齿轮箱	≥8小时/日	≥1200小时
	重载齿轮箱	≥8小时/日	≥1500小时
发动机	车辆汽油机	≥20公里/日	≥10000公里
	轻型车辆柴油机	≥50公里/日	≥30000公里
	重型车辆柴油机	≥8小时/日	≥1200小时
	重型设备柴油机	≥8小时/日	≥1200小时

5.3 载荷条件

设备载荷应按设备出厂时文件规定的载荷运行。待磨损修复完成后，设备可短时超负荷运行，设备承载能力提升系数为1.3~1.5。

5.4 修复设备条件

- a) 待修复矿山设备修复前，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，保证修复前设备的油箱清洁，确保无目视范围内的油泥和脏污。
- b) 待修复矿山设备修复前，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 磨损修复增材效果

表面磨损修复增材效果见表4。

表 4 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： μ m）
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	$a \geq 40$

6.2 核心性能提升效果

修复完成后核心指标的修复效果大于零应表示效果为增加和提升；修复效果等于零应表示没有修复；修复效果小于零应表示减少和降低。

6.2.1 最大承载能力

最大承载能力修复效果应按下式计算：

$$\% \Delta G = (G - G_0) / G_0 \cdots \cdots \cdots (6.2.1)$$

式中：

- %ΔG——最大承载能力修复效果，单位为百分比%；
- G——修复后最大承载能力，单位为吨t；
- G₀——修复前最大承载能力，单位为吨t；

6.2.2 转速

转速修复效果应按下式计算：

$$\% \Delta n = (n - n_0) / n_0 \cdots \cdots \cdots (6.2.2)$$

式中：

- %Δn——转速修复效果，单位为百分比%；
- n——修复后特定工况下转速，单位为r/min；
- n₀——修复前特定工况下转速，单位为r/min；

6.2.3 输出压力

输出压力修复效果应按下式计算：

$$\% \Delta P = (P - P_0) / P_0 \cdots \cdots \cdots (6.2.3)$$

式中：

- %ΔP——输出压力修复效果，单位为百分比%；
- P——修复后输出压力，单位为MPa；
- P₀——修复前输出压力，单位为MPa；

6.2.4 输出流量

输出流量修复效果应按下式计算：

$$\% \Delta Q = (Q - Q_0) / Q_0 \cdots \cdots \cdots (6.2.4)$$

式中：

- %ΔQ——输出流量修复效果，单位为百分比%；
- Q——修复后输出流量，单位为L/min；
- Q₀——修复前输出流量，单位为L/min；

6.2.5 输出扭矩

输出扭矩修复效果应按下式计算：

$$\% \Delta T = (T - T_0) / T_0 \cdots \cdots (6.2.5)$$

式中：

$\% \Delta T$ ——输出扭矩修复效果，单位为百分比%；

T ——修复后输出扭矩，单位为Nm；

T_0 ——修复前输出扭矩，单位为Nm；

6.2.6 噪音

噪音修复效果应按下式计算：

$$\% \Delta L = (L - L_0) / L_0 \cdots \cdots (6.2.6)$$

式中：

$\% \Delta L$ ——噪声修复效果，单位为百分比%；

L ——修复后的噪声，单位为dB；

L_0 ——修复前的噪声，单位为dB；

6.2.7 运行温度

运行温度修复效果应按下式计算：

$$\% \Delta T = (T - T_0) / T_0 \cdots \cdots (6.2.7)$$

式中：

$\% \Delta T$ ——运行温度修复效果，单位为百分比%；

T ——修复后运行温度，单位为℃；

T_0 ——修复前运行温度，单位为℃；

6.2.8 振动

振动修复效果应按下式计算：

$$\% \Delta a = (a - a_0) / a_0 \cdots \cdots (6.2.8)$$

$$\% \Delta v = (v - v_0) / v_0 \cdots \cdots (6.2.9)$$

$$\% \Delta d = (d - d_0) / d_0 \cdots \cdots (6.2.10)$$

式中：

$\% \Delta a$ ——振动加速度修复效果，单位为百分比%；

$\% \Delta v$ ——振动速度修复效果，单位为百分比%；

$\% \Delta d$ ——振动位移修复效果，单位为百分比%；

a ——修复后振动加速度，单位为m/s²；

a_0 ——修复前振动加速度，单位为m/s²；

v ——修复后振动速度，单位为m/s；

v_0 ——修复前振动速度，单位为m/s；

d ——修复后振动位移，单位为μm；

d_0 ——修复前振动位移，单位为μm。

6.3 修复成果养护

矿山设备修复完成后，修复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。

参 考 文 献

- [1] GB/T 3481 齿轮轮齿磨损和损伤术语[S].
- [2] GB/T 12444 金属材料磨损试验方法—环块摩擦磨损试验[S].
- [3] GB/T 17754 摩擦学术语[S].
- [4] GB/T 23904 无损检测.超声表面波检测方法[S].
- [5] GB/T 26951 焊缝无损检测.磁粉检测[S].
- [6] GB/T 28705 无损检测.脉冲涡流检测方法[S].
- [7] GB/T 37400 重型机械通用技术条件[S].
- [8] GB/T 38274 润滑系统 能效评定方法[S].
- [9] JB/T 8820 摩托车传动链条 磨损性能试验规范[S].
- [10] 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[S].
- [11] NF ISO 10825-2006 齿轮 ISO术语系统 齿牙外观术语:磨损和损害Gears - Wear and damage to gear teeth - Terminology [S].
- [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[S].