

岩石磨蚀性指数试验系统对比试验报告

1. 背景概述

在硬岩隧道工程建设中，破岩工具的损耗是施工经济性的一项重要指标。对于钻爆法施工，钻头的消耗是施工成本的一部分。对于应用愈发广泛的硬岩隧道掘进机（TBM）隧道施工而言，滚刀的磨损有两个方面的负面影响，一是滚刀更换的直接费用；二是更换滚刀造成的停机时间，将降低 TBM 的利用率。因此，对于各类破岩工具的磨损机理与预测研究仍是研究热点。

磨损是破岩工具与岩石之间相互作用的结果，而并非是某一特定材料的内在属性。在各种隧道工程建设中，岩石磨蚀性可定义为：岩石在与破岩工具产生硬接触及相对位移的情况下，对工具材料表面造成磨损的性质。虽然逻辑上而言，岩石内硬质矿物构成比例越高，即岩石越硬，其磨蚀性越高。但是单纯采用例如等效石英含量这样的岩石硬度指标作为磨蚀性指标是不适宜的，因为除岩石的矿物成分及硬度之外，岩石本身的结构构造都会对磨损产生影响。目前国际上评价岩石磨蚀性主要试验有三种，包括 Cerchar 试验、LCPC 试验、NTNU/SINTEF 系列试验。其中 Cerchar 试验由于样本易得及试验简易性而应用最多，该试验于上世纪 70 年代由法国 CERCHAR 研究所设计，科罗拉多矿业学院（CSM）于 80 年代率先在美国采用了该试验，其它国家后续也相继采纳并开展该试验，积累了数量可观的试验结果，并形成了数据库，与 Cerchar 试验相关的研究也十分全面。

在国内，Cerchar 试验应用较晚，除北京工业大学 TBM 与盾构试验室从英国引进 WEST 型试验仪之外，仅盾构及掘进技术国家重点实验室自行研制的 ATA-IGGI 岩石磨蚀伺服实验仪较为成熟。目前国内 Cerchar 试验相关流程中，缺少钢针质量检验环节，钢针磨损量的测量仍停留在人工测量的低效、低精度水平上。

2. 岩石磨蚀性指数 (CAI 值) 试验系统介绍

2.1 总体概述

岩石磨蚀性指数 (CAI 值) 试验系统，由 Cerchar 岩石磨擦试验仪、钢针磨损智能测量装置以及控制箱组合集成。试验钢针在试样上的运动由高精度步进

电机驱动，保证试验的一致性；试验流程中增加了钢针质量评价环节，确认试验钢针符合试验要求，增加试验可信度；采用机器视觉技术对钢针尖端部的尖锥角度及磨损量进行测量，提高测量精度，提高测量效率；试验过程数据通过软件平台统一汇总处理，自动生成试验报告。

2.2 设备工作原理

为了测定岩石的磨蚀性，在 Cerchar 试验时把试样固定在试样夹中，然后将试验针从上部孔槽处轻轻放在岩石样本上，试验针为一定硬度的合金钢针，钢针硬度为洛氏硬度 HRC 54~56、尖锥角度为 90° ，再将 70N 的固定荷载轻轻放在钢针上，在 1 分钟内控制步进电机使钢针在试样上移动 10mm，然后在钢针智能测量装置上通过视觉系统测量钢针端部的磨损，最终通过软件平台自动生成试验报告，Cerchar 磨蚀性指数为被磨损的钢针针尖的平均直径（mm）的 10 倍。

2.3 试验装置介绍

岩石磨蚀性指数(CAI 值)试验系统硬件主要由电源部件、控制系统、运动系统及视觉系统组成，如图 2.1 所示。其中电源部件包括断路器，按钮开关、接触器、指示灯及开关电源组成；控制系统包括 PLC 及其相关组件组成；运动系统包括步进电机和步进电机控制器组成；视觉系统包括相机、镜头和光源组成。软件系统安装于电脑上，主要用来测量获取试验钢针端部的相关信息，主要功能有：①评价试验用钢针是否合格，试验规定^[1]钢针尖端应具有 90 度的锥形角，磨损的钢针应重新磨尖，并检查针尖角度，然后再进行进一步的试验，针尖初始磨损量应控制在 $10\ \mu\text{m}$ 以内；②测量钢针端部的磨损，计算出岩石的 CAI 值，典型针尖侧面智能量测如图 2.2 所示；③录入实验信息并生成实验报告。



图 2.2 典型针尖侧面智能测量图

2.4 试验操作及测量步骤

- ①按下系统电源总开关按钮给设备通电。
- ②将试验钢针装夹到钢针磨损智能测量系统的指定位置。
- ③按下测量开关按钮，启动智能测量系统，按下测量启动键进行测量，对钢针进行质量评价。
- ④将岩样及合格钢针放入 Cerchar 岩石磨擦试验仪指定位置，并将 70N 的固定荷载轻轻放在钢针上。
- ⑤按下磨擦启动按钮启动岩石磨擦试验仪，设备会自动运行 1 分钟，使岩样与钢针相对运动 10mm 距离，当设备运行到位后设备会自动停止。
- ⑥取下试验钢针后按下磨擦复位按钮对设备进行复位。
- ⑦对试验后的钢针进行编号，放入钢针磨损智能测量系统指定位置，按下测量启动按钮，测量设备会按程序设定，进行四次测量，每次旋转 90° 进行旋转拍照测量，当钢针旋转一周后，测量设备运行停止，此时测量结束。
- ⑧依次重复以上步骤，直至所有试样试验完毕，同一岩石样本应进行 5 次（5 根钢针）测量。
- ⑨按下总开关，系统运行结束。

3. 岩石磨蚀性评价

Cerchar 磨蚀性指数即 CAI 值是一个无量纲单位值，其大小为被磨损的钢

针针尖平均直径 (mm) 的 10 倍, 根据计算出的 CAI 值来对岩石进行 Cerchar 磨蚀性指数分级。通过检索国际上 Cerchar 试验相关文献, 汇总了下列 5 种分级标准, 分别来自于 Cerchar 试验室、挪威科技大学 (NTNU)、美国科罗拉多矿业学院 (CSM)、美国材料与试验协会 (ASTM) 以及国际岩石力学协会 (ISRM)。详细 CAI 分级区间及描述如表 3.1~3.5 所示。通过对 CAI 值分级所用的钢针硬度、CAI 值对应的破岩工具磨损量、大量试验数据的分布三个方面综合比较, 认为国际岩石力学协会推荐的 CAI 值分级更为合理。

表 3.1 Cerchar 试验室 CAI 分级 (钢针硬度 54~56)

CAI 区间	磨蚀性描述
<0.3	无磨蚀性 not abrasive
0.3 - 0.5	极低磨蚀性 not very abrasive
0.5 - 1.0	低磨蚀性 Slightly abrasive
1.0 - 2.0	中等磨蚀性 medium abrasive
2.0 - 4.0	高磨蚀性 very abrasive
4.0 - 6.0	极高磨蚀性 extremely abrasive

表 3.2 挪威科技大学 CAI 分级 (钢针硬度 43)

CAI 区间	磨蚀性描述
0.3~0.5	极低或无磨蚀性 Not very abrasive or Non-Abrasive
0.5~1.0	低磨蚀性 Slightly abrasive
1.0~2.0	中等至一般磨蚀性 Medium Abrasiveness to Abrasive
2.0~4.0	高磨蚀性 Very abrasive
4.0~6.0	极高磨蚀性 Extremely abrasive
6.0~7.0	石英 quartz

表 3.3 美国科罗拉多矿业学院 CAI 分级 (钢针硬度 56)

CAI 区间	磨蚀性描述
--------	-------

<1.0	极低或无磨蚀性 Not very abrasive or Non-Abrasive
1.0~2.0	低磨蚀性 Slightly abrasive
2.0~4.0	中等至一般磨蚀性 Medium Abrasiveness to Abrasive
4.0~5.0	高磨蚀性 Very abrasive
5.0~6.0	石英 quartz

表 3.4 美国材料与试验协会 CAI 分级

CAI 区间 (钢针硬度 55)	CAI 区间 (钢针硬度 40)	磨蚀性描述
0.30~0.50	0.32~0.66	极低磨蚀性 Very low abrasiveness
0.50~1.00	0.66~1.51	低磨蚀性 Low abrasiveness
1.00~2.00	1.51~3.22	中等磨蚀性 Medium abrasiveness
2.00~4.00	3.22~6.62	高磨蚀性 High abrasiveness
4.00~6.00	6.62~10.03	极高磨蚀性 Extreme abrasiveness
6.0~7.0	N/A	石英 Quartzitic

表 3.5 国际岩石力学协会 CAI 分级 (钢针硬度 54~56)

CAI 区间	磨蚀性描述
0.1~0.4	极低 Extremely low
0.5~0.9	很低 Very low
1.0~1.9	低 Low
2.0~2.9	中等 Medium
3.0~3.9	高 High
4.0~4.9	很高 Very high
≥5	极高 Extremely high

4. 对比试验的意义及计划

4.1 对比试验的意义

虽然 Cerchar 磨蚀试验是广泛使用的岩石磨蚀性测试方法，但全球范围内常用的测试仪器及试验规范仍有许多不足之处：

- ①试验钢针依靠手动控制手柄在 1 分钟内使试验针在试样上移动 10mm，手

动控制手柄过程中运动很难做到匀速，且最终的移动距离也会有偏差，增加试验差异性；

②试验钢针尖锥角度要求为 90° ，针尖初始磨损量要控制在一定水平。若尖锥角度与标准值偏差过大或者针尖初始磨损量较大会影响试验数据准确性，现有测试流程对钢针尖锥角度及针尖初始磨损量的测量环节缺少把控；

③钢针尖端部的磨损量测量依靠高清数码显微镜进行人工测量，实际检测精度低、测量过程中极易出现人为粗大误差且检测效率低；

④缺少试验过程数据的动态自动记录模块，手动或重复性数据获取任务繁重，试验效率低。

而岩石磨蚀性指数(CAI 值)试验系统，组合集成了 Cerchar 岩石磨擦试验仪、钢针磨损智能测量装置以及控制箱。试验钢针在试样上的运动由高精度步进电机驱动，保证试验的一致性；试验流程中增加了钢针质量评价环节，确认试验钢针符合试验要求，增加试验可信度；采用机器视觉技术对钢针尖端部的尖锥角度及磨损量进行测量，提高测量精度，提高测量效率；试验过程数据通过软件平台统一汇总处理，自动生成试验报告。最终实现岩石磨蚀性指数(CAI 值)的自动、智能获取。通过对比试验，可以对岩石磨蚀性指数(CAI 值)试验系统和原有的 Cerchar 试验仪的试验精度进行双向判断。

4.2 对比试验计划

本次对比试验可以按以下流程进行：

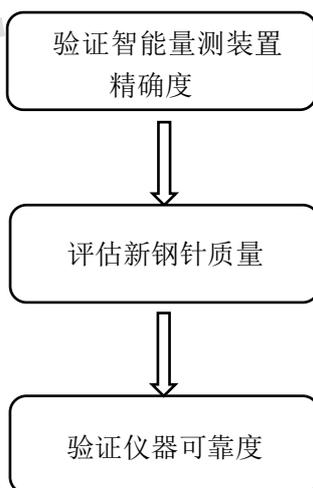


图 4.1 对比试验流程图

表 4.1 对比试验计划表

序号	试验目的	仪器	钢针	读数方法
1	验证钢针磨损智能量测装置精确度	新 Cerchar 岩石磨擦试验仪	同	原有、智能
2	评估新钢针质量	新 Cerchar 岩石磨擦试验仪	不同（新、旧钢针）	智能
3	验证仪器可靠度	新、旧仪器	同	智能

其中，原有读数方法是指，使用由高清数码显微镜和钢针固定装置组成的针尖测量装置，拍照测量试验针端部的磨损。装置与典型针尖图片如下：

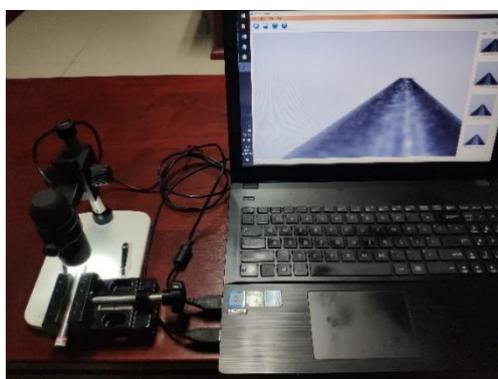


图 4.2 针尖测量装置

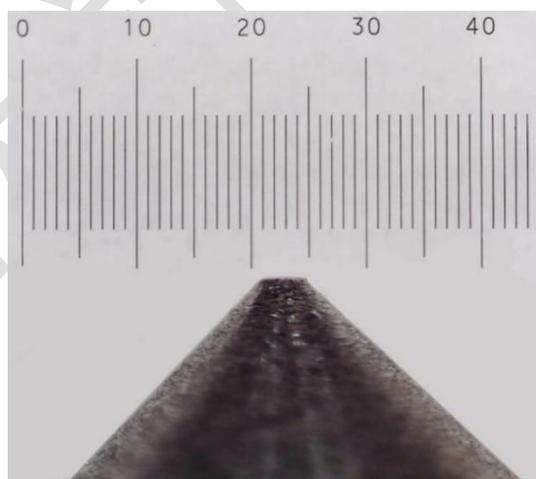


图 4.3 典型针尖侧面图（标定尺 $\text{div}=0.1\text{mm}$ ）

其试验量测步骤如下：

- ①把钢针端部的岩屑清除后，放在测量装置上。
- ②在针尖同一高度摆放显微镜专用标定尺（ $\text{div}=0.1\text{mm}$ ），并进行标定。

③用高清数码显微镜对针尖四个方向的侧面拍照，分别垂直或平行于钢针磨蚀方向。

④更换钢针，重复步骤 3，直至所有钢针读数完毕。

⑤使用测量软件对图片进行量测，读数每张图片中的磨蚀面直径，精确到 0.001mm，如下图所示。

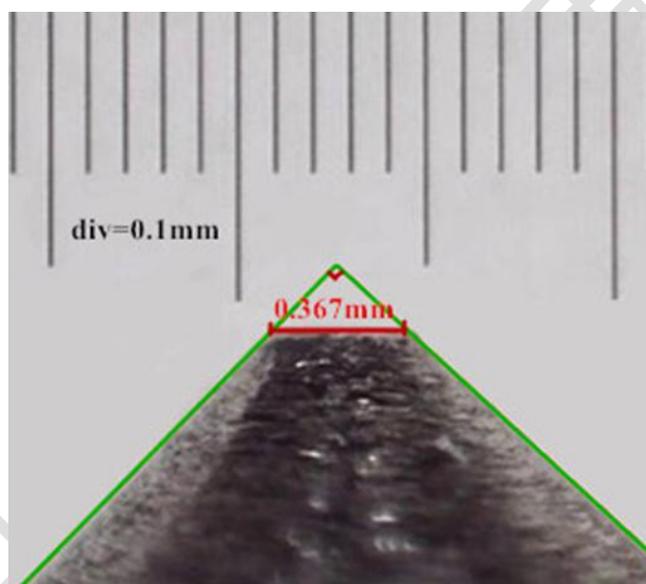


图 4.4 针尖磨蚀面直径测读

4.3 岩样信息

北京工业大学 TBM 与盾构试验室中，用于本次 Cerchar 对比试验的岩样信息如下表所示。

表 4.2 岩样信息表

岩样编号	取样位置	取样深度 (m)	岩性	岩样描述	工程名称	岩石类型
1	太平峪 K47+000	地表	花岗岩	微风化	引汉济渭 工程秦岭 初设阶段 1#隧洞	岩浆岩

2	美纳村 318 国道 旁	地表	闪长岩	中风化	易贡隧道	
3	K41+420	-	安山岩	-	松花江引 水工程	
4	K21+755	-	凝灰岩	-	松花江引 水工程	
5	DK909+50 0 右 16	184.40~18 4.60	砂岩	微风化	邦达隧道	沉积岩
6	DK87+713 .762 左 27.058	782.3~782. 5	炭质页岩	弱风化	Jz-III18- 兴山隧深 6	
7	-	-	泥质岩	-	水科院送 样	
8	DK1131+0 71.41 左 11.96	90.00~90.2 0	片麻岩	微风化	易贡隧道	
9	DK1016+6 83.87 左 1111.75	698.10~69 8.30	板岩	微风化	伯舒拉岭 隧道	变质岩
10	-	-	大理岩	-	水科院送 样	
11	K25+701.3 右 8.50	63.40~63.8 0	片岩	微风化	引汉济渭 工程秦岭 初设阶段 1#隧洞	

5 试验数据结果及结论

5.1 试验数据整理

试验钢针如图 5.1 所示，参照国际岩石力学协会 ISRM 推荐的试验流程，分别使用原有读数方法和钢针磨损智能测量装置对每根钢针的侧面进行 4 次拍照并读取磨蚀面直径 d_1 、 d_2 、 d_3 、 d_4 ，数据记录表如下所示，岩样表面针痕照片如图 5.2 所示。

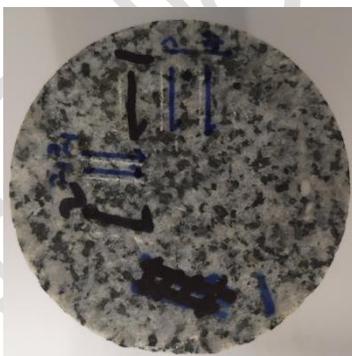


(1) 原有试验钢针



(2) 新试验钢针

图 5.1 试验使用的钢针



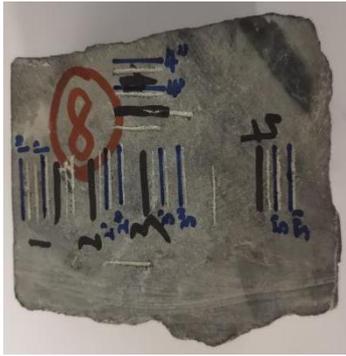
(1) 1-1



(2) 1-2



(3) 2-1



(4) 3-1



(5) 4-1



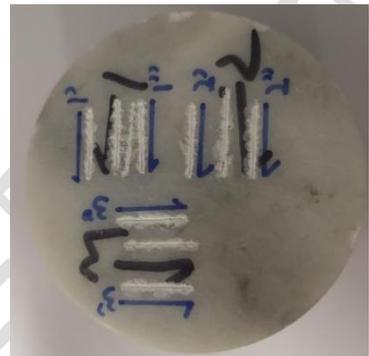
(6) 5-1



(7) 5-2



(8) 6-1



(9) 7-1



(10) 7-2



(11) 8-1



(12) 8-2



(13) 9-1



(14) 9-2



(15) 10-1

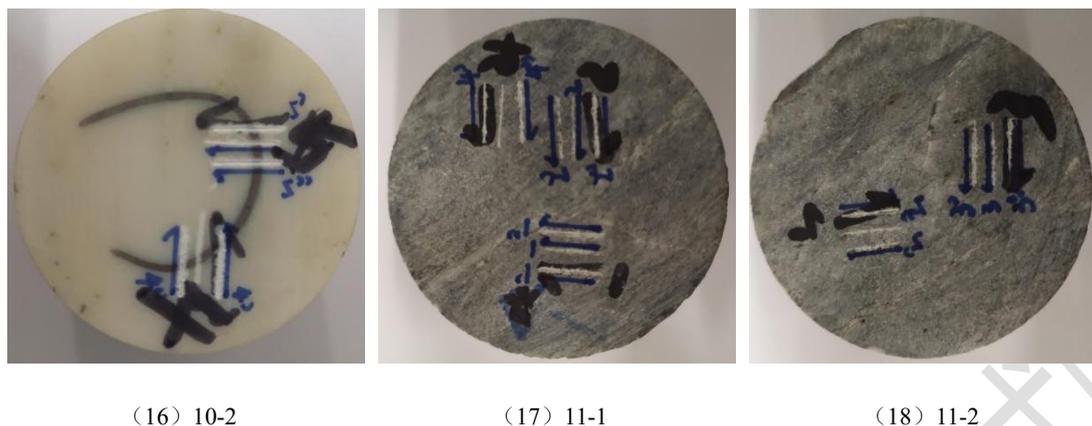


图 5.2 试验岩样及磨痕

5.2 试验结果整理

(略)

5.3 对比试验分析

5.3.1 验证钢针磨损智能量测装置精确度

由表 5.6，分别比较相同钢针两种读数方法下的磨蚀面直径数据，发现其误差可以控制在 10 微米以内，钢针磨损智能量测装置的精确度得到了验证。

表 5.6 钢针针尖磨蚀直径新旧读数对比

岩性	钢针针尖磨蚀直径 (mm)					
	旧针新仪器			新针新仪器		
	旧读数	新读数	读数差异	旧读数	新读数	读数差异
花岗岩	0.333	0.341	0.008	0.375	0.376	0.001
闪长岩	0.245	0.244	0.001	0.259	0.262	0.003
安山岩	0.276	0.282	0.006	0.325	0.326	0.001
凝灰岩	0.301	0.305	0.004	0.325	0.325	0
砂岩	0.236	0.235	0.001	0.244	0.246	0.002
炭质页岩	0.050	0.051	0.001	0.039	0.035	0.004
泥质岩	0.073	0.076	0.003	0.087	0.083	0.004
片麻岩	0.368	0.386	0.018	0.385	0.389	0.004
板岩	0.174	0.177	0.003	0.177	0.181	0.004
大理岩	0.112	0.119	0.007	0.118	0.118	0

片岩	0.280	0.288	0.008	0.302	0.311	0.009
----	-------	-------	-------	-------	-------	-------

5.3.2 评估新钢针质量

图 5.3 为相同岩样，采用新旧两种钢针，在新 Cerchar 岩石磨擦试验仪上进行试验后的钢针磨蚀直径对比图，可用来评估新钢针的质量。经观察后发现，安山岩和片岩的磨蚀评价等级发生改变；使用新钢针进行试验时，岩样的磨蚀性指数偏大。

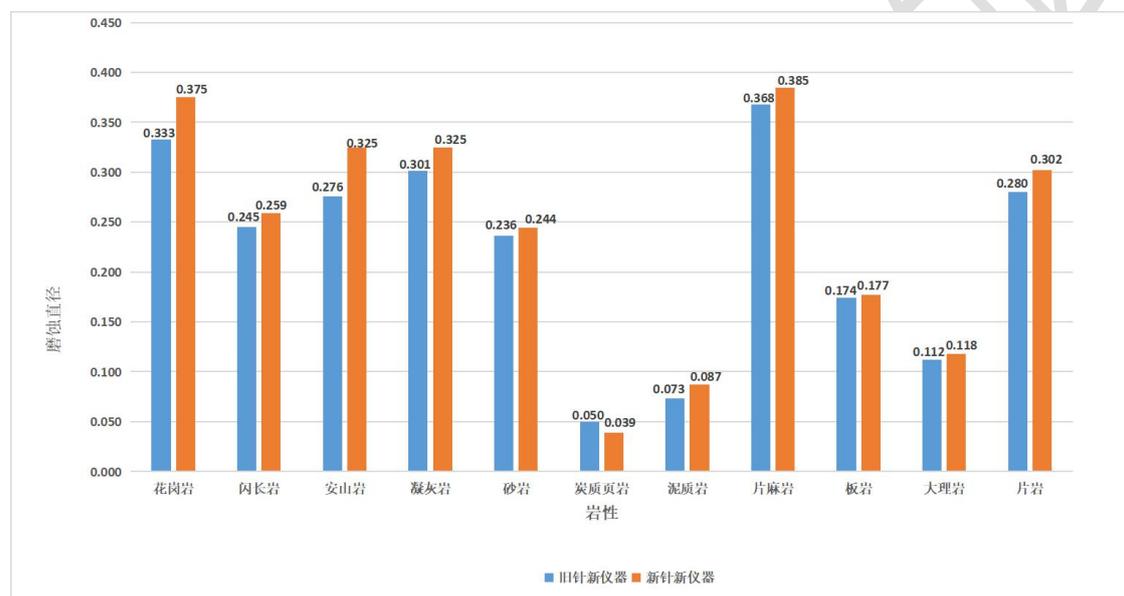


图 5.3 钢针质量评价图

从两个方面考虑造成这种规律性差异的原因，①新旧钢针采用不同类型的合金钢，钢材材料性能之间存在差异；②新旧钢针硬度是否存在差异，对试验造成影响。

Stanford J^[2]将加工钢针所用的钢材类型作为变量，采用相同硬度下七种不同类型的钢针对同一岩石样本进行 Cerchar 试验，发现钢材类型对磨蚀性指数的大小几乎无影响，故并非是加工钢针所用的合金类型不同造成了本次试验的差异。

T. N. Michalakopoulos^[3]使用硬度为 HRC55 和 HRC40 的钢针，分别对 68 个来自 6 种不同岩石类型的样品进行了 Cerchar 试验，其中，HRC55 是正式试验说明中规定的钢针硬度，HRC40 则是 West 的建议。通过对试验获得的 CAI_{55} 和

CAI_{40} 进行比较, 发现所有岩石样品的 CAI_{40} 值都大于 CAI_{55} 值且 CAI_{40} 的值分布在更广的范围内, 这表明钢针硬度对获得的 CAI 值有显著影响, 并且得到了一般合理性结论: 岩石样品的 CAI 值随着所用钢针硬度的增加而降低。T. N. Michalakopoulos^[3] 还对两个 CAI 值的关系进行了检验, 并观察到线性相关性 (如图 5.5), 得出方程:

$$CAI_{55} = 0.110914 + 0.587356CAI_{40} \quad (1)$$

此方程可用于将 CAI_{40} 值转换为 CAI_{55} , 并且关联表二者的分级。

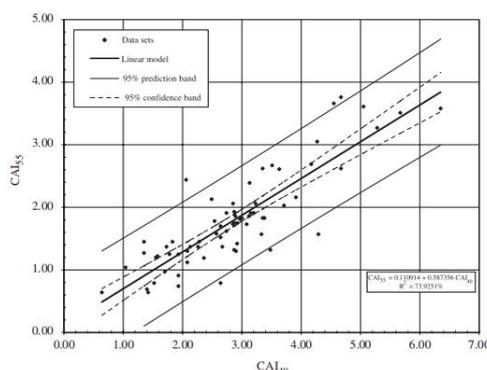


图 5.4 CAI_{40} 与 CAI_{55} 值的曲线图

Rostami^[1] 选定包含从高磨蚀性到低磨蚀性的七种岩石类型的岩样, 其中岩样表面有锯切和粗糙两种类型, 使用不同硬度的钢针 HRC41~43 和 HRC54~56 来对岩样进行 Cerchar 试验。通过试验结果观察到, 对于粗糙和锯切试样, 钢针硬度为 HRC41~43 的 CAI 值均高于硬度为 HRC54~56 的 CAI 值, 如图 5.6, 两种 CAI 值的线性关系也很容易被观察到。

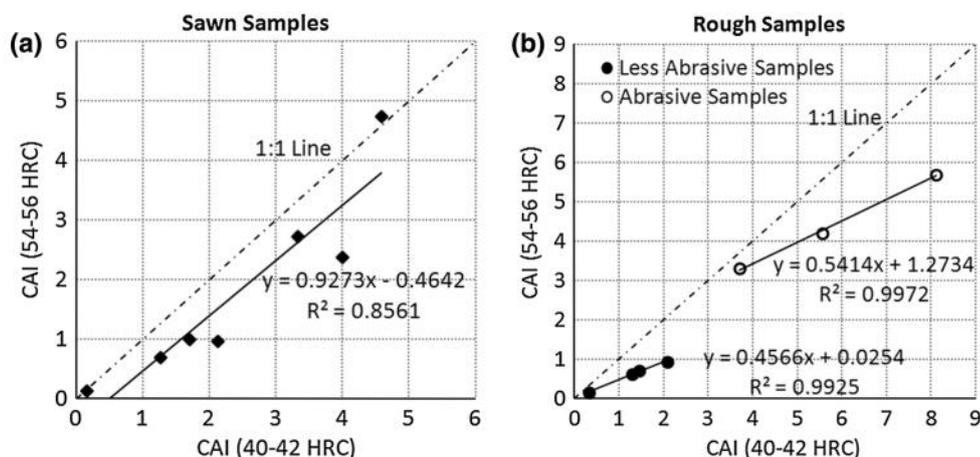


图 5.5 HRC41/43 和 HRC54/56 钢针硬度下不同试样表面的 CAI 值关系图

故可以合理推测，新旧钢针的硬度存在差异，相对于试验标准要求的硬度 HRC54~56，要么部分旧钢针的硬度偏大，要么新钢针的硬度偏小，而这种差异造成了使用新钢针进行试验时的磨蚀直径普遍大于旧钢针的磨蚀直径。因此，对新旧钢针的硬度进行检测，以验证假设。

采用如图 5.6 所示的洛氏硬度计进行钢针的硬度检测，试验钢针测点位置如图 5.7 所示，为准确测试钢针整体硬度分布，对每根钢针的侧面进行 2 次硬度检测，测点 1 位于钢针头部、测点 2 位于钢针中部。

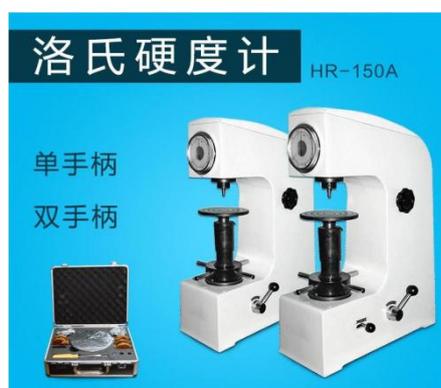


图 5.6 HR-150A 硬度计

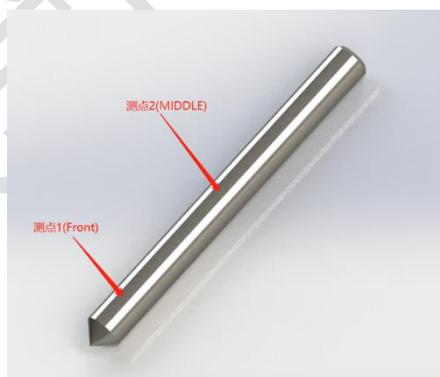


图 5.7 试验钢针测点位置

钢针硬度检测数据如下表 5.7 和 5.8 所示，由表可知，旧钢针硬度均值为 HRC57.6，新钢针硬度均值为 HRC56。Cerchar 试验规定，试验所用钢针硬度应为洛氏硬度 HRC54~56，旧钢针硬度偏高，而新钢针硬度符合标准。

表 5.7 旧钢针硬度检测数据记录表

序号	编号	测点 1 (FRONT)HRC	测点 2	均值
----	----	-----------------	------	----

			(MIDDLE)HRC	
1	1-1	58	57	57.5
2	1-2	57.8	58.2	58.0
3	1-3	57.7	57.5	57.6
4	1-4	58	57	57.5
5	1-5	58	58.5	58.3
6	2-1	57.5	57.5	57.5
7	2-2	57.1	57	57.1
8	2-3	57.5	58.1	57.8
9	2-4	57.5	57.4	57.5
10	2-5	57.5	57.9	57.7
11	3-1	58.2	58	58.1
12	3-2	57	57	57.0
13	3-3	56.5	57	56.8
14	3-4	57.5	57.6	57.6
15	3-5	57.5	57.7	57.6
16	4-1	57.6	57.5	57.6
17	4-2	58	58.1	58.1
18	4-3	57.7	57.5	57.6
19	4-4	57.8	57.5	57.7
20	4-5	56.9	58	57.5
21	5-1	56.5	57.5	57.0
22	5-2	57.4	57.5	57.5
23	5-3	56	56.6	56.3
24	5-4	56.7	57	56.9
25	5-5	57	57.5	57.3
26	6-1	57.6	55.9	56.8
27	6-2	58	58.5	58.3
28	6-3	57.5	58	57.8
29	6-4	58	57.8	57.9
30	6-5	58.5	58.4	58.5
31	7-1	58	58	58.0
32	7-2	56.5	57.5	57.0

33	7-3	56.5	57	56.8
34	7-4	57.8	57.5	57.7
35	7-5	57.6	57.3	57.5
36	8-1	57.5	57.6	57.6
37	8-2	58	57.8	57.9
38	8-3	58	57.8	57.9
39	8-4	56.8	57.7	57.3
40	8-5	57	57.4	57.2
41	9-1	58.1	57.4	57.8
42	9-2	58.2	57.6	57.9
43	9-3	58.1	58	58.1
44	9-4	57.5	57.8	57.7
45	9-5	57.5	57	57.3
46	10-1	58.4	58.5	58.5
47	10-2	57.5	58	57.8
48	10-3	56.5	57.3	56.9
49	10-4	58.3	58.4	58.4
50	10-5	58.1	58	58.1
51	11-1	58	58.5	58.3
52	11-2	57.2	58.1	57.7
53	11-3	57.5	58.1	57.8
54	11-4	58.1	57.5	57.8
55	11-5	58.5	58.5	58.5
均值		57.6	57.7	57.6

表 5.8 新钢针硬度测量数据记录表

序号	编号	测点 1 (FRONT) HRC	测点 2 (MIDDLE) HRC	均值
1	1-1	56	55.5	55.8
2	1-2	56	56	56.0
3	1-3	56.5	56	56.3
4	1-4	56.1	56.4	56.3

5	1-5	55.7	56.1	55.9
6	2-1	56.5	56.5	56.5
7	2-2	56.5	56	56.3
8	2-3	56	56.1	56.1
9	2-4	56	55.7	55.9
10	2-5	56	56.4	56.2
11	3-1	56.5	56	56.3
12	3-2	56.5	56	56.3
13	3-3	56	55.5	55.8
14	3-4	56.4	56	56.2
15	3-5	56	55.6	55.8
16	4-1	56	55.6	55.8
17	4-2	56.5	56.5	56.5
18	4-3	55.5	56	55.8
19	4-4	56	55.7	55.9
20	4-5	55.7	56	55.9
21	5-1	56.5	56.5	56.5
22	5-2	55.5	55.7	55.6
23	5-3	55.8	55.5	55.7
24	5-4	56.4	56	56.2
25	5-5	56	56	56.0
26	6-1	56	55.6	55.8
27	6-2	55.5	55.6	55.6
28	6-3	56.1	56	56.1
29	6-4	56	56	56.0
30	6-5	55.6	56	55.8
31	7-1	56	56	56.0
32	7-2	56.4	56.5	56.5
33	7-3	56.1	56	56.1
34	7-4	56	56.4	56.2
35	7-5	56.1	56	56.1
36	8-1	56.5	56	56.3
37	8-2	55.6	56	55.8

38	8-3	56	56	56.0
39	8-4	56.5	56.4	56.5
40	8-5	56.5	56	56.3
41	9-1	56.5	56.5	56.5
42	9-2	56.1	56	56.1
43	9-3	56.5	56	56.3
44	9-4	55.8	56	55.9
45	9-5	56	55.7	55.9
46	10-1	56	56	56.0
47	10-2	56	56	56.0
48	10-3	55.1	56	55.6
49	10-4	56.4	55.9	56.2
50	10-5	55.8	56	55.9
51	11-1	55.6	55.7	55.7
52	11-2	56	56	56.0
53	11-3	56	56	56.0
54	11-4	56	55.8	55.9
55	11-5	55.5	56.5	56.0
均值		56.1	56.0	56.0

5.3.3 验证仪器可靠度

由于智能读数系统和新钢针的精度得到了验证，故验证仪器可靠度时，需要使用的数据为：相同岩样、新钢针分别在新旧仪器上进行试验，采用智能读数方法量测后的钢针针尖磨蚀直径。

表 5.9 新旧仪器下钢针针尖磨蚀直径对比

岩性	钢针针尖磨蚀直径 (mm)		
	新针新仪器	新针旧仪器	磨蚀直径差异
花岗岩	0.376	0.384	0.008
闪长岩	0.263	0.259	0.004
安山岩	0.326	0.302	0.024
凝灰岩	0.325	0.345	0.020
砂岩	0.246	0.249	0.003

炭质页岩	0.035	0.036	0.001
泥质岩	0.083	0.094	0.011
片麻岩	0.389	0.384	0.005
板岩	0.181	0.165	0.016
大理岩	0.118	0.117	0.001
片岩	0.311	0.329	0.018

由表 5.9 可知，使用新旧仪器进行试验时，在 11 个岩石样品中，超半数岩样的针尖磨蚀直径差异在 10 微米以内，最大差异为 24 微米，但通过对比表 5.4 和 5.5，发现所有岩石样品的磨蚀性评级均未发生改变，故新仪器的可靠度得到了验证。

5.3.4 CAI 值综合评判

由图 5.8 常见岩性的 CAI 值范围^[4]及试验结果统计表可知，绝大部分岩样在不同试验条件下的 CAI 值均在正常范围内。

表 5.10 试验结果统计表

岩石类型	岩性	CAI 值				
		旧读数方法		新读数方法		
		旧针新仪器	新针新仪器	旧针新仪器	新针新仪器	新针旧仪器
岩浆岩	花岗岩	3.33	3.75	3.41	3.76	3.84
	闪长岩	2.45	2.59	2.44	2.62	2.59
	安山岩	2.76	3.25	2.82	3.26	3.02
沉积岩	凝灰岩	3.01	3.25	3.05	3.25	3.45
	砂岩	2.36	2.44	2.35	2.46	2.49
	炭质页岩	0.50	0.39	0.51	0.35	0.36
	泥质岩	0.73	0.87	0.76	0.83	0.94
变质岩	片麻岩	3.68	3.85	3.86	3.89	3.84
	板岩	1.74	1.77	1.77	1.81	1.65
	大理岩	1.12	1.18	1.19	1.18	1.17
	片岩	2.80	3.02	2.88	3.11	3.29

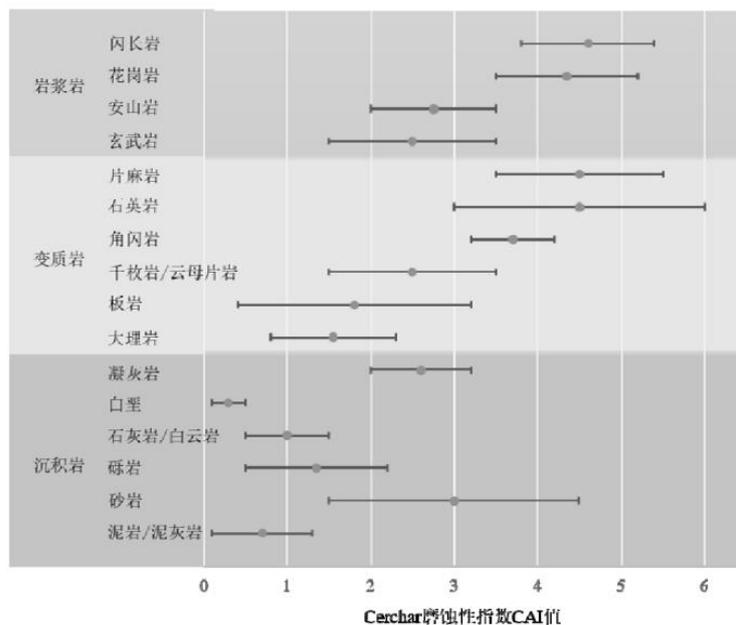


图 5.8 常见岩性的 CAI 值范围

6 结论

①通过对比试验可知，智能读数系统可靠，与原有读数系统的差值不大于 0.01mm。

②采用钢针作为变量，其他试验条件不变，在不同的岩石测试过程中，发现使用新钢针进行试验时，岩样的磨蚀性指数偏大，有个别读数的差值大于 0.1，且个别岩石的磨蚀评价等级发生改变。通过试验分析，造成这种差异的主要原因是原有钢针的硬度值偏高，故得到的结果普遍偏小，与前人的研究结果一致。

③新仪器试验结果与原有仪器的读数结果基本一致，新仪器的可靠度得到了验证。

④以后的试验推荐使用新钢针，在试验开始之前，应对钢针的硬度做硬度检验测试，并对钢针针尖角度及初始磨蚀量进行测试，钢针尖端应具有 90 度的锥形角，针尖初始磨损量应控制在 $10 \mu\text{m}$ 以内。

参考文献

[1] Rostami J. Study of dominant factors affecting Cerchar abrasivity index. [J]. Rock Mech Rock

Eng (2014) 47:1905 - 1919.

[2] Stanford J , Hagan P . An Assessment of the Impact of Stylus Metallurgy on Cerchar Abrasiveness Index. Underground Coal Operators' Conference .2009.

[3] T.N. Michalakopoulos, V.G. Anagnostou. The influence of steel styli hardness on the Cerchar abrasiveness index value.[J] .International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 43 (2006) 321 - 327.

[4] 龚秋明, 许弘毅, 李立民. 岩石磨蚀性指数分级讨论 [J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(03): 748-758.