

遵义某钼镍矿矿渣自燃机理及防治方法探讨

唐广, 江攀和, 陈磊, 张明思, 杨再良, 梁劲松, 闫文清

(贵州省地矿局102地质大队, 贵州遵义 563000)

[摘要]为对自燃钼镍矿矿渣开展综合治理,通过遵义某钼镍金属矿矿渣现场调查及样品采集分析,查明了钼镍矿矿渣的矿物成分、元素含量及主要自燃气体成分,初步确定钼镍矿矿渣自燃的引燃物为黄铁矿,提供可持续燃烧的可燃物主要为炭质,当矿渣自身属性满足要求,供氧及聚热条件达到某一平衡时,便会发生自燃;提出了“降温+切断供氧通道”,“注浆+覆盖”综合治理措施以及尚未自燃矿渣的预防建议。工程验证治理取得了良好的效果,研究成果为同类型工程问题提供了一定的解决经验和思路。

[关键词]钼镍矿矿渣;自燃机理;黄铁矿;防治方法;预防措施

[中图分类号]TD75⁺1;P618.65;P618.53 [文献标识码]A [文章编号]1000-5943(2024)02-178-07

1 引言

钼镍矿属黑色岩系多金属共生矿,具有明显的硫化金属矿特征,矿体及附近常发育伴生黄铁矿,这种矿藏由于有机碳含量高也被称为“石煤”(董允杰,2008;胡廷辉等,2008;杨光龙,2010;杜小全等,2011;杨剑,2012;杨旭等,2013;李坤等,2018),以往钼镍矿矿山开采不规范,钼镍矿矿渣大量堆放在斜坡或冲沟地带,未采取防渗、防自燃等治理措施,部分钼镍矿矿渣出现自燃现象,释放了大量的 H_2S 、 SO_2 、 CO 等有毒气体,严重威胁矿渣堆周边民众的生命健康安全(孙亚莉,2012;梁成等,2015)。

目前对矿渣自燃的研究主要集中在煤矸石,其成因包括有黄铁矿氧化说和煤氧复合自燃说,黄文章(2004)、李松(2005)、岳超平(2007)、陈思涵(2018)等学者认为黄铁矿氧化说是目前煤矸石自燃的主要理论,认为煤矸石中的黄铁矿在低温下发生氧化,产生热量并不断聚积,使煤矸石内部

温度逐步升高,引起煤矸石中的煤和可燃有机物燃烧起来,最终导致煤矸石自燃。魏怀瑞(2009)首次发现贵州天柱早寒武世黑色岩系出现自燃现象,发现时已自燃了七年之久,推测自燃的原因可能是黑色岩系中碳质含量较高;张晓刚(2017)通过对燕子洞弃渣场调查及取样分析,得出弃渣场自燃的本质是含硫铁矿炭质页岩在长时间破碎堆积以后低温氧化升温造成的,采取了“降温-灭火-封堵”的综合防灭火措施进行处理;汪莹鹤等(2023)对张吉怀铁路古阳隧道渣场自燃倾向、矿物成分及渣场自燃形成机理进行分析,采取了“整平封闭、隔氧隔水”的治理思路;梅勇(2016)查明了梁家沟弃土场自燃根本原因是弃渣含硫量较高,而且存在大量炭化泥岩、炭化页岩,制定了表面掏沟灭火、表面挖坑灭火、钻孔注浆喷浆灭火以及表面碾压设置排水沟等多种方法相结合的治理措施进行灭火处理;位蓓蕾等(2016)研究了煤矸石自燃机理,划分出矸石山自燃的孕育期、发生期、发展期、衰退期4个阶段,针对不同阶段提出

[收稿日期]2023-11-11 [修回日期]2024-04-03

[基金项目]由贵州省地矿局地质科研项目(黔地矿科[2022]20号)及遵义市地质环境治理恢复工程项目(GZBS-2022-03)联合资助

[作者简介]唐广(1990—),男,工程师,主要从事水工环地质工作。E-mail:1134491052@qq.com。

[通讯作者]江攀和(1994—),男,高级工程师,注册岩土工程师,主要从事水工环地质工作。E-mail:843895115@qq.com。

了预防及治理措施。

目前国内外钼镍矿矿渣自燃机理及防治方法研究相关文献鲜见报道,仅部分学者在最近研究中开始强调由于钼镍矿矿渣中含硫高,存在自燃现象(孙亚莉,2012;梁成等,2015)。本文借鉴煤矸石及炭质页岩自燃机理研究相关内容,通过采集研究区不同自燃状态的矿渣样及自燃气体样品,测定钼镍矿矿渣的矿物成分及元素含量、主要自燃气体成分等,深入分析钼镍矿矿渣自燃机理,并提出相应的防治方法及预防措施。研究成果对钼镍矿矿渣自燃防治有一定的借鉴意义。

2 研究区概况

研究区位于遵义市汇川区某钼镍金属矿矿渣堆北侧矿渣区域,该矿渣堆2007年开始堆填,2011年停止堆填,纵向长约150 m,横向宽约60 m,总面积为7 420 m²,矿渣平均厚度约8 m。由于地形条件限制,钼镍矿矿渣自然堆放于冲沟中,平台区轻度压实,斜坡区未经压实,机械活化加这种堆积方式使得斜坡区矿渣堆受氧面积增大。2010年在研究区内发现钼镍矿矿渣存在自燃现象,矿渣堆表面出现臭鸡蛋气味的黑烟,随后业主对自燃区域采取局部深部注浆处理,自燃现象得到了缓解,但是未根治;2019年斜坡区上部地表

温度仍在40℃~100℃,现场可见明显黑烟,具有强烈刺激性气味,地表覆土明显干裂,斜坡后缘可见宽2 cm、长约3 m的干裂缝,该区域内原复绿植被因高温已全部死亡,2020年地方政府在斜坡区上部及斜坡区与平台区交界处开展了注浆及覆土治理,现在地表温度已降至22°及以下,自燃基本得到控制。平台区仅采取覆土治理措施,未设计注浆,现平台区内部矿渣温度呈上升趋势,最高温度已达220℃,依然存在自燃的可能性。

3 样品采集与测试

为充分分析钼镍矿矿渣自燃的根本原因,在平台区与斜坡区交界处及平台区内部钻孔中采集了7组矿渣样,测试其矿物成分及元素含量,其中已完全自燃矿渣呈红色,未自燃、未完全自燃及自燃初期矿渣呈黑色。在平台区中部钻孔中顶部底部共采集了2件气体样,并使用便携式气体检测仪对各钻孔孔口气体进行了检测,主要测试H₂S、SO₂、CO、CO₂、O₂等气体。现场采用K型高温热电偶测试了各取样钻孔分层温度数据。钼镍矿矿渣矿物成分及元素含量由湖北省地质实验测试中心完成,气体测试由上海福劳斯检测技术有限公司完成,测试过程及质量控制符合相关规范要求。通过测试分析及统计,测试结果见表1至表4。

表1 钼镍矿矿渣矿物成分分析

Table 1 Mineral composition analysis of molybdenum nickel ore slag

钻孔编号及 取样深度	Z2-1*	Z4-1**	Z4-2**	Z4-3**	Z5-1**	Z6-1**	Z7-1**
	7.5~7.8 m	1.0~1.3 m	4.2~5.2 m	6.2~6.6 m	2.2~2.6 m	2.2~2.6 m	1.6~1.8 m
石英	38	21	27	32	45	36	23
斜长石	6	4	6	5	3	6	7
微斜长石	—	—	—	6	—	—	—
伊利石	21	26	23	6	33	40	26
绿泥石	5	2	4	4	5	3	2
伊-蒙间层矿物	3	8	3	4	5	5	3
黄钾铁矾	—	10	—	—	—	—	—
蒙脱石	2	5	4	5	6	6	4
石膏	2	3	—	—	—	—	3
硬石膏	11	15	14	16	—	—	28
六水镁矾	—	—	13	9	—	—	—
方解石	1	—	3	2	—	1	—
白云石	2	—	—	—	—	—	—
角闪石	—	—	—	4	—	—	—
黄铁矿	5	—	—	—	—	—	—
赤铁矿	—	1	3	7	3	3	1
炭质	4	6	—	—	—	—	3
备注	黑色矿渣	黑色矿渣	红色矿渣	红色矿渣	红色矿渣	红色矿渣	黑色矿渣

注:“—”表示未检出; *表示平台中间孔采集样品; **表示边界孔采集样品。

表2 钼镍矿矿渣元素含量分析

Table 2 Element content analysis of molybdenum nickel ore slag

钻孔编号及 取样深度		Z2-1*	Z4-1**	Z4-2**	Z4-3**	Z5-1**	Z6-1**	Z7-1**
		7.5~7.8 m	1.0~1.3 m	4.2~5.2 m	6.2~6.6 m	2.2~2.6 m	2.2~2.6 m	1.6~1.8 m
As	mg/kg	163	212	183	130	82.7	151	191
Hg	mg/kg	1.48	1.56	0.077	0.088	0.068	0.12	0.22
Se	mg/kg	18.7	24.5	44.5	15	4.57	48.1	33.3
Cu	mg/kg	90.3	98.4	116	106	69.3	104	114
Cd	mg/kg	6.37	3.79	9.82	8.74	1.17	7.05	3.13
Pb	mg/kg	23.4	20.6	29.3	18.1	26.6	24.9	19.9
Mo	mg/kg	235	317	254	285	89.5	324	314
Cr	mg/kg	77.2	97.9	91.8	108	126	92	70.5
Mn	mg/kg	536	138	1180	763	206	555	151
Ni	mg/kg	521	154	831	718	271	735	231
V	mg/kg	1068	1387	1037	1101	444	1075	843
Zn	mg/kg	515	137	758	692	243	533	336
TFe	%	4.33	4.94	4.01	4.67	5.19	4.97	3.89
W	mg/kg	1.63	1.63	1.5	1.81	2.06	1.47	1.41
TC	%	5.87	1.66	0.51	0.13	0.19	0.47	5.22
S	%	4.77	4.17	6.66	4.55	0.49	3.54	4.52
pH	无量纲	6.83	4.54	4.87	2.86	5.71	3.63	3.89
备注		黑色矿渣	黑色矿渣	红色矿渣	红色矿渣	红色矿渣	红色矿渣	黑色矿渣

注：*表示平台中间孔；**表示边界孔。

表3 钼镍矿矿渣自燃气体成分

Table 3 Gas composition of spontaneous combustion of molybdenum nickel ore slag

样品编号	CO	CO ₂	H ₂ S	SO ₂	O ₂	备注
ZRQ2-1*	<0.01%	0.75%	799 ppm	<1 ppm	13.59%	孔口
ZRQ2-2*	<0.01%	0.77%	292 ppm	208 ppm	13.81%	孔底
JY4**	119 ppm	—	0	—	—	孔口
JY5**	105 ppm	—	0	—	—	孔口
JY6**	121 ppm	—	0	—	—	孔口
JY7**	64 ppm	—	0	—	—	孔口

注：“—”表示未检测；*表示平台中间孔；**表示边界孔。

表4 钼镍矿矿渣温度测量数据

Table 4 Temperature measurement data of molybdenum-nickel slag

钻孔编号	不同钻孔测温深度下测点温度/℃									间隔24小时后孔底测温数据
	0.1 m	1 m	2 m	3 m	4 m	5 m	6 m	7 m	8 m	
Z2*	19	59	110	141	168	186	194	220	208	235
Z4**	20	43	55	70	68	73	83	120	110	126
Z5**	19	43	51	55	68	78	—	—	—	87
Z6**	18	29	48	82	87	—	—	—	—	94
Z7**	17	19	49	53	61	75	86	87	—	96

注：*表示平台中间孔；**表示边界孔。

测试结果显示,自燃前后变化量主要为黄铁矿、赤铁矿及炭质,其中自燃后黄铁矿及炭质明显减少,赤铁矿明显增多。

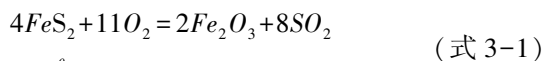
4 自燃机理分析

钼镍矿具有明显的硫化金属矿特征,其矿渣中含有较多的黄铁矿,黄铁矿具强还原性,在低温潮湿的环境中极易与 O_2 发生氧化还原反应,释放大量的热量,使其内部温度升高,当达到炭质燃点时,便会引起自燃;钼镍矿矿渣自燃是一个极其复杂的物理化学过程,其自燃现象并非必然发生,与内外多种因素有关,非单一因素决定,其自燃条件总结起来主要为以下三点:

4.1 具备引燃物及可燃物

通过对比矿渣不同自燃阶段的矿物成分,已完全自燃矿渣中未见黄铁矿及炭质,新增了大量赤铁矿(表1);黄铁矿具有低温氧化特性,氧化过程中会释放出大量的热,同时产生硫磺及赤铁矿等;有研究表明,干燥条件下,黄铁矿并不活泼,在一定比例的氧气和水分共同参与反应时,可以促进黄铁矿低温氧化蓄热,加速反应过程(张慧君等,2013;邓军等,2013),会产生硫酸(矿渣 pH 介于 2.86 至 4.87 之间),同时会释放出 H_2S 、 SO_2 等有毒气体(表3);黄铁矿氧化分解放热后通过热传导及热对流的方式引起炭质燃烧,已完全自燃矿渣呈红色,炭质含量为 0,未自燃、未完全自燃及自燃初期矿渣呈黑色,炭质低温状态下较为稳定,燃点较高(约 $280^\circ C$),不具备引燃物的属性;由此推测黄铁矿为引燃物,炭质为提供钼镍矿矿渣持续燃烧的可燃物。其相关化学反应如下:

氧气充足时:

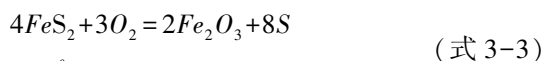


$$\Delta_r H_m^\theta = -3\ 310.24 KJ/mol$$

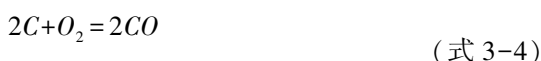


$$\Delta_r H_m^\theta = -393.51 KJ/mol$$

氧气不足时:

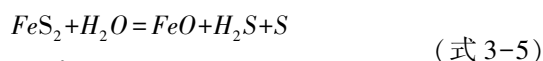


$$\Delta_r H_m^\theta = -935.6 KJ/mol$$

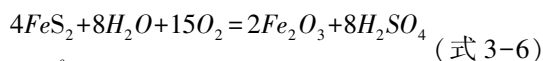


$$\Delta_r H_m^\theta = -221.05 KJ/mol$$

降雨参与反应:



$$\Delta_r H_m^\theta = 131.68 KJ/mol$$



$$\Delta_r H_m^\theta = -1\ 310.24 KJ/mol$$



$$\Delta_r H_m^\theta = 131.3 KJ/mol$$

高温条件下:



$$\Delta_r H_m^\theta = -20.3 KJ/mol$$

4.2 具备供氧条件

钼镍矿开采前,未破碎,岩层结构致密,空气难以进入,处于封闭的还原环境,一般不会发生自燃,开采后,矿渣被机械活化,同时自然堆放于冲沟及斜坡,堆放过程中发生粒度偏析,使得矿渣与氧气接触面增大,由原封闭的还原环境转变为氧化环境;由式 3-1 至式 3-4 可知,黄铁矿接触氧气,会发生氧化放热反应,黄铁矿低温氧化过程中,氧气充足时是不足时释放热量的 3 倍,炭质燃烧时氧气充足时是不足时释放热量的 2 倍,供氧条件影响了反应效率及放热量,决定了矿渣自燃的剧烈程度及自燃的趋势性。研究区内斜坡区与平台区交界处及其附近钼镍矿矿渣已自燃,一是斜坡区具备斜坡面及斜坡顶面两条供氧通道,二是内部矿渣自燃高温作用下,斜坡面及斜坡顶部产生了干裂缝,形成了“烟囱效应”,增加了供氧循环通道,使得钼镍矿矿渣自燃现象进一步加剧,最终自燃;平台区仅平台顶面一条供氧通道,供氧条件相对较弱,现状下钼镍矿矿渣仍处于自燃初期。现场调查情况及钻孔测温数据表明,自燃现象首先发生在斜坡区域,然后自燃中心开始逐步向平台区转移,通过工程治理,现斜坡区温度逐渐降低,而未注浆的平台区温度仍然较高,通过对比间隔 24 小时测量的钻孔孔底温度数据(表 4)证明了氧气充实时,会加剧自燃现象。

4.3 具备聚热条件

聚热条件和供氧条件是对立统一关系,供氧条件好,意味着聚热条件差,反之亦然;现场调查及测试结果表明,浅层 2.0 m 范围内(覆土平均厚度约 1.0 m),Z4-1 及 Z7-1 矿渣呈黑色,矿物成分中未见黄铁矿,但检测到黄铁矿氧化产物赤铁矿(见表 1),Z4、Z7 在 2.0 m 深度温度分别为

55℃及49℃(见表4),证明浅层黄铁矿低温氧化放热后,不具备聚热条件,放热量小于向外的散热量,无法引起炭质可燃物燃烧;斜坡区深部Z4-2、Z4-3、Z5-1及Z6-1矿渣呈红色,黄铁矿及炭质含量为0,检测到黄铁矿氧化产物赤铁矿,证明黄铁矿已全部氧化放热,在良好的聚热条件下,最终引发炭质可燃物燃烧;平台区深部矿渣具备良好的聚热条件,Z2-1矿渣呈黑色,黄铁矿含量5%,炭质含量4%,未检测到赤铁矿(见表1),Z2在7.0 m深度处温度大于200℃(见表4),证明深部虽具备良好的聚热条件,但是供氧不足,黄铁矿处于还原环境未发生化学反应,无法达到炭质燃点。

5 防治措施及预防建议

通过对钼镍矿矿渣自燃机理进行分析,钼镍矿矿渣自燃必须具备引燃物及可燃物、供氧条件、聚热条件等,三者缺一不可,结合自燃机理提出相应的防治措施及预防建议,可以有效的治理自燃钼镍矿矿渣或预防钼镍矿矿渣自燃。

5.1 自燃钼镍矿矿渣防治措施

正在自燃的钼镍矿矿渣,内部温度升高已不可逆,治理思路主要是通过快速降低地表及内部温度,同时切断供氧通道,以达到降温灭火的效果。目前在自燃钼镍矿矿渣的防治方法研究较少,本文主要参考煤矸石及含硫炭质页岩燃烧治理方法,目前经济适用的方法有覆盖法、注浆法等,其它挖除火源法、注水法等,因灭火成本比较高,运用较少(李松,2005;张爱青,2009;翟小伟等,2015;耿正等,2021;朱闰勤,2023)。此处将重点论述覆盖法及注浆法。

1. 覆盖法

覆盖法原理是利用细颗粒惰性材料(如粘土、黄土等)分层压实覆盖在自燃矿渣上,主要是隔绝氧气,堵塞空气流通通道,使矿渣内部空气消耗殆尽后火源自然熄灭;覆盖法灭火的关键是必须将覆土压实,同时覆土前矿渣必须经一定程度的冷却;该方法成本较低,进行预防自燃可以取得较好的效果,单独采用该方法用于灭火,若矿渣内部温度较高,会导致地表干裂,增加氧气供给促进自燃,治理效果不太理想。

2. 注浆法

注浆法原理就是降低火源中心温度,堵塞矿渣堆填充隙,隔绝氧气,使自燃矿渣内部温度降低直至熄灭。注浆法可表面喷洒,也可钻孔注浆,打孔注浆法采用碱性材料加一定量的水制成石灰乳浆,钼镍矿矿渣自燃后释放的 H_2S 、 SO_2 、 CO 等酸性气体与其反应,生成不(微)溶于水的硫酸钙和碳酸钙不仅能够充填在钼镍矿矿渣的空隙中,隔绝矿渣内部与外界氧气交换的通道,而且这些性能稳定的盐类物质能附着、侵注在钼镍矿矿渣颗粒表层内,包裹在钼镍矿矿渣颗粒表面,从而降低钼镍矿矿渣颗粒的可燃性;另外,石灰乳浆中的水能够充分与高温钼镍矿矿渣接触,起到降低钼镍矿矿渣温度的作用。钻孔注浆对大面积或者深部自燃治理和防止复燃效果较好。

5.2 自燃钼镍矿矿渣预防建议

预防钼镍矿矿渣自燃必须从钼镍矿矿渣堆放初期开始,初期钼镍矿矿渣堆放时需要分层压实堆放,堆放厚度不能过大,最好在堆渣库前修建堆渣坝或挡土墙,避免堆渣形成斜坡区,堆渣完成后及时采取粘土分层压实覆盖,同时修建截排水沟等,避免雨水直接对矿渣堆进行冲刷及浸泡。

6 工程检验

2010年对研究区内斜坡区深部自燃矿渣区域采取了局部注浆处理,表层采取了粘土覆盖,深部注浆区域自燃得到了缓解,深部往上未注浆区域产生了复燃;2020年对复燃区域再次开展注浆及覆盖处理,治理前,斜坡区及顶部产生了干裂缝,地表最高温度达到了100℃,复燃区域及周边区域原复绿植被全部死亡,治理后,原复燃区域地表温度已降低至22°及以下,自燃现象得到了遏制,地表植被有了复苏迹象;平台区(自燃初期)主要采用了覆盖法,由于覆盖层粘土未分层夯实,导致空气流通通道未完全堵塞,现矿渣内部温度呈升高趋势,最高温度达到了220℃(表4)。

总体而言,注浆法对于自燃钼镍矿矿渣的治理起到了较好的效果,复燃原因主要受注浆液配比、注浆压力、注浆范围及施工工艺等限制,确

定自燃区域及火源中心是划定注浆范围的关键;覆盖法未取得较好治理效果原因主要是未分层夯实。工程实践表明注浆法和覆盖法有效实施下,将会使渣场从“氧化环境”转变为“还原环境”,可以从根本上防治矿渣出现自燃现象。

7 讨论与结论

7.1 讨论

钼镍多金属矿产于磷块岩上之碳质页岩中,梁成等在冉村沟钼镍矿矿渣中检测到磷的存在,矿渣发热值有 4 606.584 kJ,是标煤发热量的 15.73%(梁成等,2015);本次矿物成分及元素含量中未检测到磷及其氧化产物,通过钼镍矿矿渣矿物成分、元素含量及主要自燃气体成分综合分析,推测黄铁矿为引燃物,炭质为提供钼镍矿矿渣持续燃烧的可燃物;关于黄铁矿自燃界限含量及含磷钼镍矿矿渣中磷对自燃的贡献有待进一步研究。

钼镍矿矿渣自燃受多因素影响,其自燃主要受引燃物及可燃物、供氧条件、聚热条件控制;江攀和等在研究区测温结果表明,在 0.1~2.0 m 深度范围内矿渣温度快速升高,2.0 m 以后温度升温率逐渐降低,高温区主要分布在矿渣与下伏基岩界面之上约 1.0 m 位置,随着深度继续增加,温度开始逐渐降低(江攀和等,2023),证明供氧条件和聚热条件是对立统一关系,两者是互斥的,供氧和聚热条件达到某一平衡时,温度将达到最高点。此外,钼镍矿矿渣自燃还受到矿渣粒径、堆积方式、水分、风压等多种因素影响,关于自燃模型建立和影响因素有待进一步研究。

7.2 结论

(1)通过现场调查及测试结果,初步确定钼镍矿矿渣自燃的引燃物为黄铁矿,提供可持续燃烧的可燃物主要为炭质。

(2)钼镍矿矿渣自燃受多因素影响,其自燃主要受引燃物及可燃物、供氧条件、聚热条件控制,引燃物及可燃物为钼镍矿矿渣自身属性,供氧条件与聚热条件是对立统一关系,当矿渣自身属性满足要求,供氧及聚热条件达到某一平衡时,便会发生自燃。

(3)研究区已采取“降温+切断供氧通道”,“注浆+覆盖”的综合治理措施,取得了较好的效果;自燃钼镍矿矿渣预防需从矿渣堆放初期开始,建议采取“矿渣分层压实+堆渣坝或挡土墙+覆盖法+截排水沟”的治理措施。

[参考文献]

- 陈思涵,白向飞,方全国. 2018. 黄铁矿促进煤低温氧化作用机理研究[J]. 洁净煤技术,24(06):14-19.
- 邓军,黄鸿剑,金永飞,等. 2013. 高湿环境下高硫煤低温氧化特性试验[J]. 煤矿安全,44(12):32-35.
- 杜小全,赵远由,张志强. 2011. 贵州遵义地区钼镍矿规模远景及开发中存在的问题[J]. 矿产勘查,2(04):376-382.
- 董允杰,廖加坦. 2008. 我国钼镍矿及生产现状[J]. 中国铝业,138(02):60.
- 耿正,姚兴柏,李小刚,等. 2021. 煤矸石山高温自燃机理与治理技术研究[J]. 地下水,43(04):178-179.
- 胡廷辉,曾昭光,余崇玺. 2008. 遵义松林地区钼镍多金属矿床地质特征及找矿远景分析[J]. 贵州地质,(02):95-98.
- 黄文章. 2004. 煤矸石山自然发火机理及防治技术研究[D]. 重庆:重庆大学:1-111.
- 江攀和,陈磊,张明思,等. 2023. 自燃钼镍矿矿渣内部温度分布特征及拟合研究[J]. 金属矿山,(08):291-296.
- 梁成,卢益平,程胜高. 2015. 遵义松林镇冉村沟钼镍矿矿渣化学成分分析[J]. 环境污染与防治,37(08):111.
- 李坤,刘波,卢贺达. 2018. 贵州纳雍地区牛蹄塘组钼镍多金属矿床地质特征及找矿前景[J]. 中国铝业,42(04):24-30.
- 李松,万洁. 2005. 煤矸石自燃机理及其防治技术研究[J]. 环境科学与技术,(02):82-84+119.
- 梅勇. 2016. 梁家沟弃渣场自燃灭火治理技术研究[J]. 煤炭技术,35(10):227-229.
- 孙亚莉,王砚耕. 2012. 贵州钼镍钒矿资源开发及其环境问题[J]. 矿床地质,31(S1):951-952.
- 位蓓蕾,胡振琪,王晓军,等. 2016. 煤矸石山的自燃规律与综合治理工程措施研究[J]. 矿业安全与环保,43(01):92-95.
- 魏怀瑞,杨瑞东. 2009. 贵州天柱早寒武世黑色岩系自燃现象的发现[J]. 地质论评,55(02):189-190.
- 汪莹鹤,李时亮,李炜,等. 2023. 张吉怀铁路古阳隧道炭质页岩弃渣自燃机理及治理研究[J]. 铁道标准设计,67(12):163-167+195.
- 岳超平. 2007. 我国煤矿自燃矸石山治理技术[J]. 矿业安全与环保,(S1):73-75.
- 杨光龙,崔登伟. 2010. 黔北牛蹄塘组黑色岩系中的矿产特征及找矿远景分析[J]. 贵州地质,27(03):208-212.
- 杨剑,易发成. 2012. 黔北下寒武统黑色岩系元素赋存状态及富集模式[J]. 矿物学报,32(02):281-287.
- 杨旭,杨捷,向文勤,等. 2013. 贵州下寒武统黑色岩系中镍、钼、钒成矿作用与区域成矿模式[J]. 贵州地质,30(02):107-113.
- 张爱青. 2010. 大同矿区煤矸石山自燃防治及高效灭火技术[J]. 洁净煤技术,16(01):110-112+31.
- 张慧君,王德明,戚绪尧,等. 2012. 干燥条件下高硫煤低温氧化特性研究[J]. 中国安全科学学报,22(04):127-131.

朱闰勤,刘永团. 2023. 煤矸石自燃机理及防治[J]. 能源与节能, (04):109-111.
张晓刚. 2017. 含硫炭质页岩隧道弃渣自燃机理分析及防治研究

[J]. 铁道建筑技术, (02):120-123.
翟小伟,马灵军,朱国忠,等. 2015. 煤矸石山自燃治理技术研究与实践[J]. 煤炭科学技术, 43(04):53-56.

Discussion on Autoignition Mechanism and Prevention Method of Slag Spontaneous Combustion of A Molybdenum Nickel Ore in Zunyi

TANG Guang, JIANG Pan-he, CHEN Lei, ZHANG Ming-si, YANG Zai-liang,
LIANG Jin-song, YAN Wen-qing

(No. 102 Geological Party, Guizhou Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development,
Zunyi 563000, Guizhou, China)

[Abstract] In order to carry out comprehensive treatment of molybdenum nickel ore slag spontaneous combustion, the mineral composition, element content, and main self igniting gas composition of molybdenum nickel ore slag were identified through on-site investigation and sample collection analysis. It was preliminarily determined that the igniting material for self igniting molybdenum nickel ore slag was pyrite, and the combustible material that provided sustainable combustion was mainly carbon. When the slag's own properties met the requirements, and the oxygen and heat supply conditions reached a certain balance, Spontaneous combustion will occur; Proposed comprehensive treatment measures such as "cooling+cutting off oxygen supply channels", "grouting+covering", and prevention suggestions for slag that has not yet self ignited. The engineering verification governance has achieved good results, and the research results provide certain solutions and ideas for similar engineering problems.

[Key Words] Molybdenum nickel ore slag; Autoignition mechanism; Pyrite; Control methods; Preventive measures

(上接第 177 页)

the study area were explored by examining the relationship between factors such as geological structures, landforms, lithology, and river distribution. The results indicate that landslides in the study area mainly develop in regions with severe intersecting geologic structures. They are predominantly found on longitudinal and oblique slopes with a height difference of 100~300 m and a gradient of 25°~35°, while the dominant landform type is eroded-karst valley terrain. The lithology of the landslide-prone strata shows a tendency, mainly consisting of mudstone and shale from the Silurian Liandoverly Hanjiadian formation, shale and sandy shale from the Lower-Middle Ordovician Meitan formation. The average influence range of rivers on landslides in the study area is 900 m, with a decreasing number of landslides farther away from the rivers.

[Key Words] Geological structure; Landslide; Geological hazard inducing condition