

战略性非金属矿产

重晶石防辐射原理与应用

何宇豪¹, 任子杰^{1,2*}, 黄向阳³, 彭国煌³, 王增仔¹, 高惠民^{1,2}

1. 武汉理工大学 资源与环境工程学院, 湖北 武汉 430070;
2. 矿物资源加工与环境湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430070;
3. 湖南楚天钼业有限公司, 湖南 石门 415300

中图分类号: TD985; TL941 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2020)06-0041-06
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2020.06.006

摘要 随着核技术在医疗、军事和电子等领域的飞速发展, 由其带来的放射性污染和辐射损伤已不容忽视。论文对重晶石防辐射的原理及其应用进行了比较详细的阐述。由于重晶石具有较大的内核元素钡和较高介电常数的钡离子, 故能够明显减少射线穿透和削弱电磁波。重晶石还具有显著的资源优势和加工成本优势, 是一种极具前景的防辐射材料。

关键词 重晶石; 防辐射; 钡离子; 应用

引言

人们很难觉察到身边的辐射, 但其实辐射无处不在。日常生活中的辐射可分为电离辐射与电磁辐射。但在国外, 更多称它们为非电离辐射与电离辐射。电离辐射主要指能量依靠粒子以及电磁波形式向外部扩散, 间接或者直接作用于物质时发生电离的辐射, 如现代医学中的X射线、核医学、肿瘤的放射性治疗等。非电离辐射是指从辐射源发射, 以电磁波形式传向空间的一种现象, 如通信基站、高压电力线路、变电站、广播电视发射塔等^[1]。显而易见, 两种辐射的最大区别在于是否引起电离。

辐射是一把双刃剑, 合理地利用少量辐射是有益的, 但超量的辐射会影响人体健康: 首先表现为使神经系统失调, 出现头晕、头痛、失眠以及记忆力消退的症状; 其次长时间高剂量地受到微波辐射, 会造成免疫系统功能出现障碍, 也会使得人体大脑细胞壁的透性升高, 病菌更容易入侵^[2]。现有的电离辐射防护措施有减少受辐射时间, 增大与辐射源之间的距离, 使用屏蔽材料削弱辐射强度等。非电离辐射防护技术有电磁屏蔽技术、吸波材料、接地技术以及线路滤波技术^[2]。现

有的辐射防护材料主要是以下几类: (1) 金属防护材料, 最常见的就是铅材料。铅材料不仅对低能和高能的X光子和 γ 光子均具有优异的屏蔽性能, 而且加工方便, 产量充足^[3]; (2) 辐射防护玻璃, 张兴祥等^[4]将碳酸钡、甲基丙烯酸、甲基丙烯酸甲酯先后混合, 经自由共聚制备出防辐射性能、硬度以及耐热性优良的有机钡玻璃。Singh KJ等^[5]制备的 $\text{PbO}-\text{SiO}_2$ 系玻璃也表现出对 γ 射线的高效防护; (3) 金属基复合防护材料, 金属基复合屏蔽材料是一类以轻金属为基体, 具有抗辐射强化相的复合材料^[6]。

重晶石是一种以硫酸钡为主要成分的非金属矿物, 密度为 $4.3 \sim 4.5 \text{ g/cm}^3$, 莫氏硬度为 $3 \sim 3.5$, 化学性质稳定, 不溶于水和盐酸, 无毒性、磁性, 易吸收X射线和 γ 射线。我国重晶石资源非常丰富, 储量虽为全球第三, 但产量却是世界首位, 是世界上最大的重晶石出口国, 在国际市场上处于不可替代的地位^[7]。

重晶石被美国、欧盟和中国列为战略关键矿产, 越来越受到重视, 但重晶石防辐射原理的深入分析以及与其它防辐射材料对比研究比较缺乏, 因此本文对重晶石防辐射的原理、相对其它材料的优势以及在防辐射领域的应用进行了详细的总结与阐述。

收稿日期: 2020-11-19
作者简介: 何宇豪(1998-), 男, 河南安阳人, 硕士研究生, 主要从事非金属矿物加工研究, E-mail: 1807099935@qq.com。
通信作者: 任子杰(1987-), 男, 山西孝义人, 博士, 副教授, 硕导, 主要从事非金属矿物分选和非金属矿物材料的研究, E-mail: renzj@whut.edu.cn。

1 防辐射原理

1.1 电离辐射防护原理

电离辐射包含人工辐射以及天然辐射。其中天然辐射主要是指外层空间宇宙射线,还包括自然界中食物、岩石、土壤、水以及空气的放射性。而人工辐射来源广泛,例如医学 X 射线、介入放射学等的放射性医疗;工业上核电厂的核能发电,工业探伤等的无损检测工作,核测量工作以及石油测井等的水文地质放射性勘探;农业方面的保存、消毒、育种以及改性等产生的辐射;另外还有军事上的核潜艇以及核武器辐射等^[2]。

以 X 射线为例,已知 X 射线的能量范围为 10 ~ 100 keV,而普遍的辐射能量范围为 10 ~ 10 000 keV。物质能够防辐射主要依靠其所含的元素性质。防辐射的元素能够与光子作用,作用时会产生电子对效应(图 1)、康普顿效应(图 2)和光电效应(图 3),过程中也会发生散射、俄歇效应和荧光辐射^[8]。

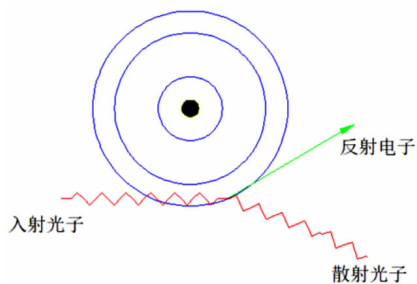


图 1 电子对效应示意图

Fig. 1 Schematic diagram of electron pair effect

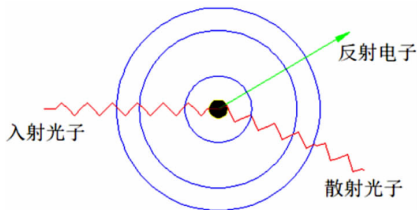


图 2 康普顿效应示意图

Fig. 2 Schematic diagram of Compton effect

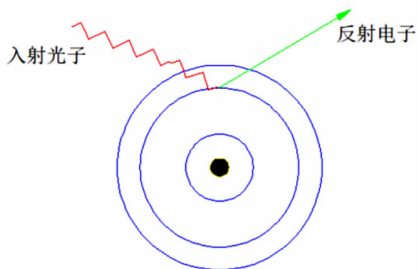


图 3 光电效应示意图

Fig. 3 Schematic diagram of photon effect

辐射光子遇到屏蔽材料时,会与材料中的防辐射元素的电子或核子发生碰撞,光子的能量转化为逸出带有动能的电子或者散射出能量较小的光子。假定 Z 为原子序数,在射线能量一定的情况下,光电效应的发生截面(σ_{PE})与 Z^4 成正比,康普顿效应发生截面(σ_c)与原子序数 Z 成正比,电子对效应的发生截面(σ_p)与 Z^2 成正比^[8],具体公式:

$$\sigma_{PE} = NZ^4 \lambda^3 \quad (1)$$

$$\sigma_c = KZ/E \quad (2)$$

$$\sigma_p \propto Z^2 \quad (3)$$

式中: N —单位体积内原子数; λ —入射波长; E —入射光子能量; K —常数。

故物质阻挡辐射的能力大小主要取决于两个方面:元素种类与单位体积内的原子数。即物质密度越大,发生光电效应的概率就越高。因此元素的原子序数越高,该元素防辐射的能力就越强。

由元素周期表可知,铅的相对原子量比金和银大,是很好的防辐射元素。由于比铅原子量大的元素本身带有辐射,因此,铅为自然界中唯一几乎没有放射性的最重的元素。而且铅在地球的含量比较高,不属于贵金属,自然而然地成为较好的防辐射材料。但铅的质量很大,作为防护服材料长期穿戴会对人体有很大损伤,而且铅元素具有毒性,因此需要一种质轻且无毒的辐射屏蔽材料^[9]。于是原子量低于铅,本身无毒的钡元素就可以代替铅元素应用于屏蔽与防护 X 射线等电离辐射。重晶石的主要成分为硫酸钡,钡元素和铅元素一样,其内核质量大,单位体积内原子数多,发生光电效应和康普顿效应等的概率大,射线在其内核的碰撞过程中,能量易被吸收,不易穿透。

1.2 非电离辐射防护原理

非电离辐射包含环境与自然辐射,其中自然辐射指的是自然现象的雷电、地球外表的热辐射以及太阳与其它星球产生的辐射。而环境辐射主要来源有:(1)日常生活中的家用电器、通信基站、广播电视的发射装置、磁悬浮列车、电气化铁路和变电站等;(2)大型工业、军事设备中的射频装置、卫星地球站和雷达等^[2]。

对于非电离辐射,我们以电磁波为例,电磁波是由电磁辐射源的电场和磁场产生的交互变化形成的,以波的形式向远处传播能量。电磁屏蔽的机理是使电磁波经过屏蔽材料时产生感应电流,将电磁能量转化为内能,实现屏蔽的目的^[10]。一般用屏蔽效能 SE (Shielding Effectiveness) 来评价电磁屏蔽材料的屏蔽性能:

$$SE = A + R + B \quad (4)$$

式中: A 为材料吸收使电磁波损耗的能量; B 是电磁波

的多重反射损耗; R 为电磁波的单次反射衰减^[11]。

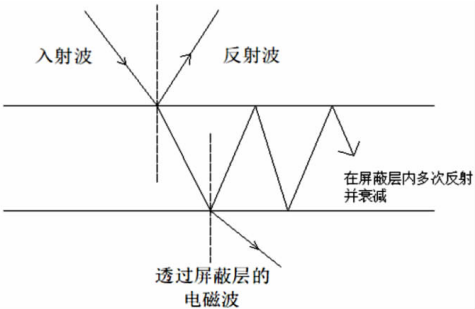


图 4 电磁屏蔽能量消耗
Fig. 4 Energy consumption of electromagnetic shielding

由图 4 知,当电磁波射入,并与矿物材料接触,发生磁损耗并被吸收。设平面电磁波 $E(t) = E_0 e^{i\omega t}$, $H(t) = H_0 e^{i\omega t}$, 沿 X 轴方向垂直于表面进入矿物,由麦克斯韦方程可得出反射波 $E_r(t)$ 、透射波 $E_t(t)$ 分别为:

$$E_r(t) = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} E_0 e^{i\omega t} \tag{5}$$

$$E_t(t) = \frac{2 - \sqrt{ZZ_0}}{Z + Z_0} E_0 e^{i\omega t} \tag{6}$$

其中: Z, Z_0 分别为电磁波在矿物和真空中的波阻抗, E_0 为没有屏蔽材料的点的场强。

$$Z = \sqrt{\frac{\pi_\gamma}{\varepsilon_\gamma}} = \sqrt{\frac{\mu' + i\mu''}{\varepsilon' + i\varepsilon''}} \tag{7}$$

$$Z_0 = \frac{\mu_0}{\varepsilon_0} \tag{8}$$

式中: μ', ε' 分别为磁导率的实部; μ'', ε'' 分别为磁导率的虚部; $\mu_\gamma, \varepsilon_\gamma$ 分别为真空中的磁导率和介电常数; μ_0, ε_0 分别为矿物的磁导率和介电常数。

由于与矿物内部各粒子的相互作用,电磁波进入矿物内部后能量被吸收,此时表达式为:

$$E_x(t) = E_0 e^{i\omega t - \alpha x} = E_0 e^{i\omega t - (\alpha + i\beta)x} = E_0 e^{-\alpha(x)} e^{i(\omega t - \beta x)} \tag{9}$$

$$H_y(t) = \frac{1}{i\omega\mu} \frac{\partial E_x}{\partial x} = \frac{\gamma}{i\omega\mu} E_x = \frac{\gamma}{i\omega\mu} E_0 e^{-\alpha x} e^{i(\omega t - \beta x)} \tag{10}$$

式中: α 为衰减常数; β 为相移常数,并且有:

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu\varepsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2 \varepsilon^2}} - 1 \right)} \tag{11}$$

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{\mu\varepsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2 \varepsilon^2}} + 1 \right)} \tag{12}$$

其中, $\omega = 2\pi f, \mu = \mu' + i\mu'', \varepsilon = \varepsilon' + i\varepsilon''$

经过以上分析可得知:矿物材料对电磁波的吸收损耗率取决于其电磁参数及电磁波的频率^[12],由此说明矿物的电磁参数大小决定对电磁波的吸收程度。由于钡离子具有较高的介电常数或磁化强度,而重晶石的主要成分为硫酸钡,其中钡离子质量分数更是达到了 65.94%,因此重晶石对电磁辐射具有强的磁损耗

作用。

2 含钡化合物的防辐射应用优势

2.1 含钡化合物的防辐射应用优势

钡元素在元素周期表中比铅元素靠前,本身没有放射性,而且相对原子量较大,能够与射线发生光电效应的概率高,对于防电离辐射非常有利。钡离子具有较高的介电常数或磁化强度,对于非电离辐射也有较好的磁损耗作用。

其它防辐射材料,如最早的铅胶材质的防 X 射线服,穿着性能较差、铅氧化物存在毒性。但日本采用硫酸钡加入到粘胶溶液中纺丝的方法,研制出了强度为 0.99 g/d、伸度为 26% 的纤维,不仅穿着舒服而且不具毒性^[13];常用的防辐射水泥有钡水泥、锶水泥,其中锶水泥防离子射线能力较钡水泥要好,但钡水泥相较于锶水泥对 γ 和 X 射线具有更好的屏蔽效果^[14];在作为功能复合纤维板的添加材料中,重晶石粉、沸石粉和磁铁矿粉均具有一定的电磁屏蔽效能,但总体来说,填充重晶石粉稍好,填充沸石粉次之,在 110 kHz 以下的低频段,重晶石粉、沸石粉和磁铁矿粉电磁屏蔽效能最大值分别达到 17.99、17.71 和 16.99 dB,重晶石粉效果最佳^[15]。张兴祥等^[16]系统研究了含钡有机玻璃、含硼有机玻璃的 X 射线、 γ 射线和中子射线防护性能。结果表明,含硼有机玻璃板材对热中子的屏蔽性能较好,而含钡有机玻璃对退化裂变谱中子辐射屏蔽性能较好。何登良等^[17]对矿物材料腻子辐射屏蔽率的影响进行了研究,重晶石制成的腻子对有害放射性射线的防辐射率可达到 42.2%,沸石的防辐射率最高可达到 38.4%,石膏的防辐射率可达到 18.27%,高铝水泥对辐射也有一定的屏蔽效果,防辐射率可达到 18.35%。

表 1 全球重晶石主要资源国储量 / 万 t
Table 1 Reserves of barite in major resource countries in the world

年份	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
中国	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000	3 000
哈萨克斯坦	-	-	-	8 500	8 500	8 500	8 500
土耳其	400	400	400	3 500	3 500	3 500	3 500
印度	3 400	3 200	3 200	3 400	3 200	3 200	3 200
伊朗	-	-	-	-	-	2 400	2 400
美国	1 500	1 500	1 500	1 500	1 500	1 500	-
摩洛哥	1 000	1 000	1 000	1 000	1 000	1 000	-
墨西哥	700	700	700	700	700	700	-
巴基斯坦	100	100	100	100	100	100	1 400
阿尔及利亚	2 900	2 900	2 900	-	-	-	-
德国	100	100	100	100	-	-	-
俄罗斯	1 200	1 200	1 200	1 200	-	-	1 200
其他	2 700	2 900	2 900	5 000	6 500	7 100	2 900
全球	24 000	24 000	24 000	35 000	35 000	38 000	>32000

2.2 我国重晶石资源的优势

全球重晶石资源丰富,到2016年已查明的资源量约为20亿t,并且主要分布在中国、哈萨克斯坦、印度、美国等国。但中国一直是世界最大的重晶石生产国,产量约300万t/a^[18]。全球重晶石主要资源国储量见表1^[19]。

由表1可知,到2016年哈萨克斯坦重晶石储量最多,约占世界总储量的30%。而我国重晶石储量从2015年的10000万t调整为3000万t,暂居世界第三。但我国重晶石矿藏分布非常集中,查明资源储量的82%都分布在贵州(34%)、湖南(21%)、广西(14%)、甘肃(7%)和陕西(6%)五省^[20]。

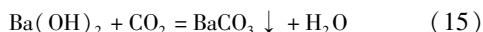
2.3 重晶石的性能优势

碳酸钡的密度是4.2~4.3 g/cm³,氯化钡的密度为3.86 g/cm³,重晶石主要成分硫酸钡的密度为4.3~4.5 g/cm³。物质密度越大,发生光电效应的概率就越高,元素防辐射的能力就越强,故三者中硫酸钡防辐射效果最好,碳酸钡次之,氯化钡最差。

微观上,碳酸钡属于碳酸盐矿物,晶体结构属斜方晶系,钡离子被9个氧离子包围,故配位数为9;而硫酸钡属于硫酸盐矿物,晶体结构属斜方晶系,钡离子位于7个硫酸根离子之间,与12个氧连接,故其配位数为12^[21]。硫酸钡的空间密度更大,钡元素的单位体积内原子数更多,所以硫酸钡防辐射效果最好。

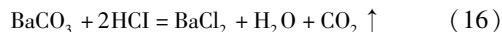
2.4 重晶石的加工成本优势

常见碳酸钡制备是将毒重石粉(主要成分BaCO₃)与铵盐反应生成可溶性钡盐,同时将碳酸铵回收使用,可溶性钡盐加入碳酸铵沉淀出精制碳酸钡,经过滤和干燥,制成成品。反应式下:



但毒重石需在135℃以上的高温下才能煅烧分解,另外其在高温下极易产生玻璃体物质,这就造成加工能耗高,并且影响浸取效果^[22]。

氯化钡的制备是将碳酸钡在搅拌下缓缓加入稀盐酸中,放出二氧化碳并形成氯化钡的水溶液;过滤,除去不溶组分后,将滤液在水浴上加热浓缩至原来体积的1/2,冷却,氯化钡结晶析出;然后用玻璃过滤器过滤,依次用水和乙醇洗涤,在空气中自然干燥后产出二水氯化钡,最后将二水氯化钡在125℃进行脱水就可制得无水氯化钡。此方法要求将体系的pH调至8,导致本身酸量消耗大。反应式如下:



故碳酸钡和氯化钡的制备都属于化工过程,都是以毒重石为原料加入大量的化学物质进行反应而得,过程消耗能源高,化学污染较大。而重晶石是天然矿物,经采矿—选矿提纯后就可得到高纯度的产品,加工工艺简单,成本低,污染小。

3 重晶石防辐射应用研究现状

3.1 国外研究现状

国外利用重晶石制作防辐射材料的应用研究相对较早。如土耳其德米雷尔大学的Akkur课题组^[23]以重晶石为粗细骨料并加入一定量的水,通过改变配比制备了3种不同的重晶石混凝土,经过测试发现,应用重晶石作为集料对γ射线有优良的屏蔽性能。Günther等利用硫酸钡、钛酸钡和氧化铋对X射线吸收的特性,研究出可吸收X射线的复合纤维,用此纤维加工生产的纱线和织物可以有效地屏蔽X射线^[24]。日本提出将硫酸钡加入到粘胶溶液中进行纺丝的方法,研制出一种新型纤维,用其制作的织物对X射线有明显的削弱效果,尤其是对6kV、2mA阴极X射线源的减弱达到了97%^[13]。

3.2 国内研究现状

3.2.1 建筑行业

余子盈^[25]提出以重晶石为重要骨料制作的重晶石混凝土可以增加混凝土表观密度和密实性,因此其对X射线和γ射线有很好的屏蔽能力。高育欣等^[26]将高密度的重晶石砂与水泥配合使用,最终研制出表观密度大于3600 kg/m³、力学性能良好的重晶石防辐射混凝土。杨医博等研究分析出以铁砂和重晶石作为重质骨料,可以配制出满足防中子辐射标准的表观密度大于3600 kg/m³的C30防中子辐射重混凝土^[27]。

3.2.2 医疗行业

刘津玮等^[28]提出用重晶石制作纳米硫酸钡,并将其加入粘胶纺丝液中制备出一种新型复合薄膜,并利用这种薄膜制作新型的医用防X射线服。经测试发现吸收X射线的能力比纯粘胶膜提高了44%。马君志等^[29]利用纺前注射技术将硫酸钡添加到粘胶原液中,并用此乳液浆料进行纺制,得到了新型防辐射粘胶短纤维。硫酸钡在其纤维中分布非常均匀,并且由于硫酸钡的加入,提升了纤维的结晶度。经过测试发现,单独的纤维和用纤维制作的织物都随着硫酸钡含量的增加,吸收的X射线增多,防X射线辐射性能都增强。

3.2.3 其它行业

重晶石可以当作填充材料应用于手机信号屏蔽材料中。袁全平^[15]提出在不锈钢屏蔽材料中填充重晶石粉时,在频率 100 kHz ~ 139 MHz,电磁屏蔽效能均能达到 10 dB 以上,在 22.59 MHz 时最高 17.99 dB;139 ~ 341 MHz 频段,屏蔽值在 5 ~ 9 dB 之间;之后随着频率增加,屏蔽效能下降至 1 dB 以下;然而在 795 MHz ~ 1.25 GHz 间,屏蔽值又上升到 1 ~ 3 dB 之间;杨华明等^[30]以重晶石粉为基体制得重晶石基复合导电粉末(SSB),SSB 用于导电涂料对于频率 < 100 MHz 的电磁波可以达到中等屏蔽值(40 dB)。

4 结论与展望

4.1 结论

(1)重晶石可应用于防辐射是由于其主要成分为硫酸钡,钡元素内核质量大,单位体积内原子数多,发生光电效应等概率大,射线能量易被吸收;同时钡离子具有较高的介电常数或磁化强度,对电磁辐射具有强的磁损耗作用。

(2)相较于其它防辐射材料,重晶石的优势是全球资源储备丰富,我国重晶石产量更是位居世界第一。相较于其它含钡化合物,重晶石晶体结构更紧凑,密度更大,发生光电等效应概率更大,且加工工艺更简单,成本更低,污染更小。

(3)目前重晶石在防辐射上的应用主要为建筑行业中的混凝土材料,医用防护服中的添加剂,以及作为电子信号屏蔽材料的涂料,缺乏在高铁和军工等领域的研究应用。

4.2 展望

目前我国将重晶石应用于防辐射的行业较少,但随着新功能器件和新型材料不断发展,重晶石将成为一种极具前景的防辐射材料。

(1)应用于核工业防辐射材料:防辐射橡胶垫、防辐射密封件、防辐射玻璃等,防止核辐射泄漏。

(2)利用重晶石制作纳米改性硫酸钡,作为隐形涂料主材,吸收电磁波、屏蔽电磁波应用到军工隐形材料,还可以用于建造高铁、地铁、磁悬浮和高压配电设施的电磁辐射屏蔽墙,起到防止和减少电磁辐射的作用。

参考文献:

[1] 吕宗鑫. 对电离辐射与电磁辐射区别的探讨[J]. 低碳世界, 2019(1): 22 - 23.

- [2] 唐振波,干叶. 电磁辐射的污染与防护[J]. 资源节约与环保, 2019(4): 106.
- [3] Erdem M, Baykara O, Dogru M, et al. A novel shielding material prepared from solid waste containing lead for Gamma ray[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2010(9): 917 - 922.
- [4] 张兴祥,段谨源,于俊林,等. 有机钡玻璃的研制与性能[J]. 塑料工业, 1994(2): 62.
- [5] Singh KJ, Singh N, Kaundal RS, et al. Gamma - Ray shielding and structural properties of PbO - SiO₂ glasses[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Material And Atoms, 2008(6): 944 - 948.
- [6] 陈博,姜志鹏,罗青松,等. 核辐射屏蔽材料的研究进展[J]. 西部皮革, 2016(20): 23 - 24.
- [7] 赵义,彭会清. 重晶石矿物的开发与应用研究进展[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2015(6): 3 - 6.
- [8] 张志程. 钡硅酸盐玻璃的设计与防辐射性能评价[D]. 成都:成都理工大学, 2014.
- [9] 薛雯,王福军,王璐. X 射线屏蔽材料设计与制备的研究进展[J]. 产业用纺织品, 2015(6): 1 - 5.
- [10] 倪伟冬. 移动通信基站电磁辐射防护研究[D]. 杭州:浙江工业大学, 2017.
- [11] 杜斌,杨双合,赵团,等. 电磁辐射屏蔽材料的研究进展综述[J]. 科技信息, 2010(26): 418 - 419.
- [12] 管登高,王树根. 矿物材料对电磁波的吸收特性及其应用[J]. 矿产综合利用, 2006(5): 17 - 21.
- [13] 顾琳燕,高强,唐虹. 防核服装及其研究进展[J]. 纺织报告, 2016(6): 29 - 33.
- [14] 田键,朱兵兵,汪洋,等. 防辐射水泥的现状与发展趋势[J]. 环境工程, 2014(7): 119 - 122.
- [15] 袁全平. 复合型电磁屏蔽功能纤维板的研究[D]. 南宁:广西大学, 2012.
- [16] 张兴祥,王学晨,牛津津,等. 防辐射有机玻璃板材的抗辐射性能[J]. 中国安全科学学报, 1997(4): 1 - 6.
- [17] 何登良,董发勤,邓跃全,等. 复合防氢防辐射墙面腻子研究[J]. 化工进展, 2005(8): 930 - 934.
- [18] 徐鹏金. 浅述我国重晶石产业发展现状[J]. 中国粉体工业, 2019(4): 1 - 6.
- [19] 大千. 2016 年全球重晶石产量和储量[J]. 化工矿产地质, 2017(1): 64.
- [20] 袁建国,屈云燕,柳霞丽,等. 中国重晶石资源现状及供需形势[J]. 现代化工, 2017(6): 1 - 4.
- [21] 李胜荣,许虹,申俊峰,等. 结晶学与矿物学[M]. 北京:地质出版社, 2008. 05.
- [22] 何勇,李园丁. 毒重石制备碳酸钡工艺研究[J]. 无机盐工业, 1993(4): 11 - 13.
- [23] Akkurt I, El - Khayat AM. The effect of barite proportion on neutron and gamma - ray shielding[J]. Annals of Nuclear Energy, 2013(51): 5 - 9.
- [24] 项长龙,滕晓波,贾清秀. 高能辐射防护纤维材料的研究进展[J]. 北京服装学院学报(自然科学版), 2020(1): 91 - 99.
- [25] 余子盈. 重晶石防辐射混凝土设计及性能研究[J]. 混凝土, 2013(1): 156 - 158.
- [26] 高育欣,吴海泳,林喜华,等. 重晶石防辐射泵送混凝土的试验研究与工程应用[J]. 混凝土, 2011(10): 90 - 92.
- [27] 杨医博,麦国文,郭文瑛,等. 散裂中子源工程防中子辐射重混凝土

配合比研究[J]. 工业建筑,2019(5):103-108.

[28] 刘津玮,刘优昌. 纳米硫酸钡/再生纤维素共混纤维制备及性能研究[J]. 山东纺织科技,2017(1):5-8.

[29] 马君志,李昌垒. 防辐射粘胶短纤维的研制及性能分析[J]. 人造纤维,2018(6):2-7.

[30] 杨华明,胡岳华,张慧慧. 重晶石基锑掺杂 SnO₂ 导电粉末用于导电涂料及其屏蔽特性[J]. 功能材料,2006(9):1433-1435.

Radiation Protection Mechanism and Application of Barite

HE Yuhao¹, REN Zijie^{1,2*}, HUANG Xiangyang³, PENG Guohuang³, WANG Zengzi¹, GAO Huimin^{1,2}

1. School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China;
2. Hubei Key Laboratory of Mineral Resources Processing and Environment, Wuhan 430070, Hubei, China;
3. Hunan Chutian Barium Industry Co., Ltd, Shimen 415300, Hunan, China

Abstract: With the rapid development of nuclear technology in medical, military, electronic and other fields, the radioactive pollution and radiation damage caused by nuclear technology can not be ignored. In this paper, the principle and application of barite radiation protection were described in detail. Due to the large core element barium and high dielectric constant barium ion in barite, it can significantly reduce the ray penetration and weaken the electromagnetic wave. With the advantages of big resources reserves and low processing cost, it is a promising radiation protection material.

Key words: barite; radiation protection; barium ion; application

引用格式:何宇豪,任子杰,黄向阳,彭国煌,王增仔,高惠民. 重晶石防辐射原理与应用[J]. 矿产保护与利用,2020,40(6):41-46.

He YH, Ren ZJ, Huang XY, Peng GH, Wang ZZ, and Gao HM. Radiation protection mechanism and application of barite[J]. Conservation and utilization of mineral resources, 2020, 40(6): 41-46.