

充填材料及其强度研究

黄庆享, 李 亮

(西安科技大学 能源学院, 陕西 西安 710054)

[摘 要] 充填开采是煤矿保水开采的重要技术, 充填材料的强度决定着充填尺寸和充填效果, 也决定着充填工艺和充填成本, 是充填开采的关键因素。为此, 分析了煤矿充填开采充填材料的研究和应用进展, 总结了膏体材料的力学特点和强度性能, 分析了充填开采对充填材料早期强度和后期强度的要求, 提出了确定充填材料强度的方法。

[关键词] 煤矿; 充填开采; 膏体充填材料; 充填体强度

[中图分类号] TD823.7 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1006-6225 (2011) 03-0038-05

Research on Stowing Material and Its Strength

HUANG Qing-xiang LI Liang

(Energy School Xi'an University of Science & Technology Xi'an 710054, China)

Abstract Stowing mining is an important technology for protecting water resource. Stowing material strength determines stowing dimension, stowing effect, stowing technique and stowing cost, so it is the key to stowing mining. Stowing material research and application status in coal mine was analyzed and mechanical characteristic and strength of paste material was concluded. Requirement for earlier strength and later strength of stowing material was analyzed and method of confirming stowing material strength was put forward.

Key words coal mine; stowing mining; paste stowing material; strength of stowing body

充填技术是绿色开采的重要组成部分^[1-2]。发展充填开采技术不仅可以解决煤矿开采带来的环境破坏问题, 同时还能最大程度地提高“三下”压煤采出率。过去我国大部分矿山为控制地表沉陷, 一般采用部分开采、水砂充填和离层区注浆等方法, 然而这些方法都不能很好地解决地表沉陷和资源浪费等问题, 而以水沙充填为基础发展起来的膏体充填技术因其诸多优点而被寄予厚望^[3]。

充填技术主要包括充填材料、充填设备与工艺、采动岩层充填控制理论等方面。与金属体充填比较, 煤矿充填的主要特点是成本要求更低, 充填材料成分复杂, 早期强度要求高^[4]。

充填材料强度是充填技术的核心, 对充填质量的优劣、充填成本的高低以及充填开采控制地表沉陷的效果起着决定性作用, 发展充填技术的关键是研究成本低廉、性能可靠的充填材料。

我国西部浅埋煤层储量和开采规模巨大, 带来的环境问题十分突出。我国学者提出了以保护生态水为目标, 以隔水层稳定性为判据的保水开采分区方法。其中, 最困难的区域为特殊保水开采区, 其科学的开采途径是局部充填开采^[5]。研究充填材

料及其性能, 确定合理的充填材料强度, 对控制充填材料的成本, 保障充填效果, 实现保水保环境开采具有重要的理论和实践意义。为此, 本文总结了国内外煤矿充填材料的研究与应用的发展现状和膏体材料的特点, 分析了确定不同开采条件下充填材料强度的要求和确定方法。

1 充填材料的研究进展

随着矿山充填技术的发展, 充填材料和工艺在不断改进和创新的过程中得到了发展。在水砂充填基础上发展起来的胶结充填技术经历了低浓度胶结充填、高浓度胶结充填和膏体泵送充填及高水速凝材料固结充填 3 个主要阶段。为了提高充填质量, 传统的低浓度胶结充填发展成近十几年出现的高浓度全尾砂胶结充填、块石砂浆胶结充填、碎石水泥浆胶结充填和膏体泵压输送胶结充填, 主要采用水泥作为胶结料。中国矿业大学和西北矿冶研究院分别开发了高水充填材料和全尾胶固充填材料。长期以来, 大量的井下采空区充填需要消耗数以万吨计的水泥。据统计, 充填成本占采矿成本的 $1/3$ 左右, 充填成本中充填材料又占 80% 以上, 昂贵的

[收稿日期] 2011-02-14

[基金项目] 国家自然科学基金项目 (50574074); 榆林市产学研合作项目 (榆政财教发 [2010] 4 号); 陕西省教育厅重点实验室科学研究计划项目 (2010JS019); 陕西省科技厅社发攻关项目: 生态修复与环境治理技术—矸石电厂粉煤灰活化技术及应用 (2010K11-02-08)

[作者简介] 黄庆享 (1966-), 男, 新疆沙湾人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事矿山压力与岩层控制方面的教学和科研工作。

充填成本不仅给矿山造成很大的经济压力,而且严重制约了充填采矿技术的应用和发展^[7-8]。采用新技术,在不降低充填体强度的条件下,降低水泥消耗量是充填技术的主攻方向。

膏体充填所用胶凝材料一般为普通硅酸盐水泥。为了降低充填材料的成本,胶结充填材料中的骨料用尾砂或采矿矸石,我国西北矿区也可采用大量赋存的风积沙。胶结剂采用或部分采用水泥替代品,如高炉矿渣、粉煤灰等作为胶结剂。充填体质量浓度 60%~68%,不仅降低了煤矿的充填成本,而且也能回收矿山固体废弃物,降低对环境的污染。大量的实验表明^[8-9],水泥能够有效地对河砂粉煤灰进行胶结。在相同浓度、相同河砂粉煤灰配合比下,随着水泥用量(灰砂比)的增加,胶结材料的强度不断增加,随着养护时间的延长,强度不断增加。

骨料的选用较为容易,一般就地取材消耗固体废弃物,也可选择天然赋存的风积沙。目前正在国内推广应用的固体废物膏体充填技术就是把煤矿就近的煤矸石、粉煤灰、工业炉渣、城市固体垃圾等在地面加工成膏体浆液,然后用充填泵或自溜通过管道输送到井下,最终胶结充填采空区。

膏体充填技术在国内首先应用到了有色金属矿山,并在后期不断推广应用中取得了较好的效果。为提高煤炭资源采出率,延长矿井服务年限,济宁市太平煤矿首度将膏体充填技术应用到煤炭开采当中,并于 2006 年 5 月建成了我国煤矿第 1 个膏体充填示范工程。自此,膏体充填作为一种新型充填开采技术在煤矿绿色开采中得到重视和推广应用。

2 煤矿充填材料的特点

2.1 充填材料在煤矿应用的要求

2.1.1 煤矿充填材料的一般要求

成本要求低 充填成本增加、充填工艺复杂势必会阻碍充填技术的应用和发展,因此,充填材料和充填工艺是充填技术的重要组成部分。

充填材料要求来源广泛 根据煤矿对充填材料价格低、来源广的基本要求,煤矿一般采用矸石或风积沙等固体废弃物做骨料,以水泥或水泥代用品做胶凝材料来充填。

早期强度要高 充填体充填采空区后,前期不但要有足够的强度保持自立外,还要对顶板起到一定的支撑作用,因此,其早期强度要足够。

地表沉降控制要求高 膏体充填可灵活地运用到控制地表沉降变形的技术当中,其强度及充填参

数的协调配合可调整整个充填开采的效果和费用。

2.1.2 保水开采对充填材料的要求

随着保水开采的重点是保护生态水位,即保障隔水岩组的隔水性^[5]观点的提出,在广阔的陕北、内蒙矿区,由于地表建筑物稀少,充填的目的不再是控制地表的绝对沉降,而是保障隔水层稳定即可。因此,可以采用局部充填方式来降低对材料强度的要求,实现低成本,这为降低水泥使用量,提高煤炭采出率,扩大局部充填保水开采的应用范围提供了可能。基于此,确定合理的充填强度,是降低成本和保障充填效果的关键。

2.2 膏体充填材料的优越性

保水开采可以采用膏体充填材料等对采空区进行局部充填,控制顶板的下沉,保障隔水层的稳定性。可以利用矸石或风积沙作为地下充填的主要材料,配制成膏体材料,其突出优点有^[6,10]:

(1) 水泥需要量可进一步减少,在极少用量条件下就能够使以煤矸石、风积沙等为集料制作的膏体料浆正常凝结固化,达到所需要的强度。

(2) 早期强度高,养护时间短,能够在规定时间内实现自稳,并对顶板起一定支撑作用。

(3) 充填体比普通脱泥尾矿的强度高,充填料在充填区域的析离和由此而损失的强度很少。

(4) 与传统的水沙充填相比,膏体充填料浆在采场中无需脱水,工艺简单,泌水率收缩不明显,能有效地控制覆岩沉降。

(5) 原材料来源广泛、成本低廉、加工简单,生产成本低。

综合分析,膏体充填材料工艺简单,其应用不但能有效控制隔水层变形,且能控制地表沉降,保护水资源和地表生态环境,有利于发展绿色开采。

2.3 膏体充填材料的强度特性

膏体充填材料由于具有真实的黏聚力,其强度特性主要是指抗压强度,特别是单轴抗压强度特性。实验室大量研究表明,膏体充填体具有如下强度特性^[9-10]:

(1) 早期强度高,固结速度快。

(2) 具有一定的强度再生性能。

(3) 弹性模量较高。

(4) 塑性强化特性明显。

膏体充填体的这些特性,对工作面顶板和隔水层稳定性的控制非常有利。在满足一定强度要求的情况下,还有一个塑性流变的过程,可以充分利用膏体充填体的这个性能,在具体的膏体充填开采设计中适当降低对充填材料的强度要求,不但能有效

地控制开采沉陷，而且还降低了充填材料的成本，从而取得更好的经济效益。

3 充填体强度的确定

对于充填开采，充填体强度直接影响围岩和充填体的稳定性。煤矿膏体充填材料除了满足成本低、来源广以及较小的压缩率外，最重要的是充填体的强度要满足要求，使其能够有效地控制采空区顶板的沉降。

采用充填开采的矿山，对膏体充填体的强度均有明确要求。根据具体的开采技术和充填条件，确定技术可行、经济优化的充填体强度是充填开采的前提。确定充填体强度的方法主要有：经验类比法、经验公式法、物理模拟方法、数学力学模型方法和数值分析方法。

3.1 早期强度

充填体的早期强度实际上是指充填体从浇筑、凝结固化至拆掉模板这一段时间内水化产生的使其能够保持自立、不发生垮塌所需要的强度。

刚固化的充填体的强度比较低，而直接顶一般悬伸 6~20m 就会垮落，所以不对顶板起主要支撑作用。因此，在设计充填体早期强度时，不考虑充填体支撑顶板的力学作用，而将其视为一自立性人工矿柱。则充填体要保持自立，必须满足强度条件和抗冲击条件。常用的充填体强度设计方法有经验公式法、托马斯模型、卢平修正模型等，下面分别进行评述。

(1) 经验公式计算法 蔡嗣经教授认为^[10]：胶结充填体的强度与充填体的高度是一种半立方抛物线关系。对矿山充填体强度与充填体高度的实测数据进行回归分析，也可得到类似结果。胶结充填体的强度与充填体高度的关系式：

$$y^2 = ax^3 \tag{1}$$

式中，y 为胶结充填体高度，m；x 为胶结充填体强度，MPa；a 为经验系数，煤矿充填体一般取 600。

根据上式得出煤矿膏体充填早期强度与采高的关系如表 1 所示。当充填体高度为 2.5 m 时，充填体自稳强度为 0.22MPa。经验公式确定的充填体强度比较大，偏于安全。

表 1 根据经验公式得出的充填体早期强度			
充填体高度 /m	充填体强度值 /MPa	充填体高度 /m	充填体强度值 /MPa
2.0	0.19	10.0	0.55
2.5	0.22	15.0	0.72
5.0	0.35	20.0	0.87

(2) Thomas (托马斯) 模型法 Thomas 提出应考虑胶结充填体与围岩壁间的摩擦力所产生的成拱作用，然后利用极限平衡分析法，对充填体的三维楔体进行稳定性分析，提出确定胶结充填体强度的计算公式为：

$$\sigma_c = \frac{\gamma_f h_f}{1 + h_f / b} \tag{2}$$

式中， σ_c 为充填体强度，MPa； γ_f 为充填体体积力，MN/m³； h_f 为充填体高度，m； b 为充填体宽度，m。

托马斯模型法在加拿大、南非的矿山充填开采中得到成功应用。但是，托马斯模型法得到的充填体强度要求过低，与经验公式法的结果出入很大。

(3) 卢平修正模型 Thomas 模型只考虑了充填体的几何尺寸和充填体料的密度，没有考虑充填体自身的强度特性，所以，卢平于 1987 年提出了如下修正模型：

$$\sigma_c = \frac{\gamma_f h_f}{(1 - k) \left[\tan \alpha + \frac{2h_f C_1}{l C} \sin \alpha \right]} \tag{3}$$

式中，k 为侧压系数， $k = 1 - \sin \varphi_1$ ； α 为充填体滑动面与水平面的夹角， $\alpha = 45^\circ + \varphi / 2$ ； C_1 ， φ_1 为充填体与围岩的黏聚力和内摩擦角；C， φ 为充填体黏聚力和内摩擦角。

合理的充填体强度应既能保证工作面的充填效果和安全生产，又能充分降低充填开采的成本。上述几种计算方法都完全没有考虑覆岩重量对充填体早期强度的要求。在现场施工中，充填体构筑 8h 后充填区域的直接顶将会下沉变形或是发生部分离层垮落，充填体除必须有足够的强度保持自稳外，还需对直接顶提供适当的支撑作用。出于安全考虑，充填体对直接顶的支护载荷应该为其正上方直接顶下分层的岩层重量，则对龄期 8h 的膏体充填体强度要求为：

$$\sigma_c = B(a\gamma H_1 + \sigma_v) \tag{4}$$

而满足充填体能够自立的强度 σ_v 可由下式计算^[12-13]：

$$\sigma_v = \frac{\frac{Lh_f\gamma_f}{2} \cos \alpha - h_f C_1 \tan \alpha - \frac{LC}{\sin \alpha}}{L + h_f k \tan \alpha \tan \varphi_1} \tag{5}$$

式中，a 为充填体试块与现场临界立方体试件单轴抗压强度的比值，一般取 1.1~1.3；B 为安全系数，取 1.5~2.0； H_1 为直接顶的下分层厚度，一般取 1.5~2.0m；L 为早期充填体的长度，m。

当直接顶下分层厚度为 1.8 m，体积力为 0.02

MN/m^3 ，则当充填体高度为 2.5 m 时充填体自稳所需的强度为 0.05 MPa。对龄期 8 h 的充填体强度要求为不低于 0.18 MPa。可见在通过此方法得出的充填体强度要求要比通过经验法得到的 0.22 MPa 要小。

3.2 后期强度

(1) 全部充填开采 一般通过自然垮落法处理采空区，上覆岩层移动、破坏都将会出现“三带”现象。而采用全部充填法处理采空区则不同，在该种情况下膏体充填工作面的顶板可简化为受不等刚度弹性基础上的梁式结构，采空区上覆岩层只会出现裂缝带和弯曲下沉带，而且上覆岩层中对地表沉陷起主要控制作用的关键层不会发生破断，而会结合充填体共同组成一个支撑体系对覆岩加以控制。但前提首先是充填体的强度应足以支撑位于关键层下覆岩的全部重量，另外充填体还应该具有较高的弹性模量和不能过大的压缩量，然后施工时尽量不留有欠接顶量，这样最终才能更好地控制地表下沉量。

对于全部充填时膏体充填体的强度设计，可根据工作面支架的类型及支架的工作阻力，依照比压与轴向抗压强度的关系来初步确定充填体的强度，并结合理论解析法确定充填体的最终的强度要求。

(2) 局部充填开采 局部充填开采时对充填体的强度要求与全部充填开采时有所不同。当采用局部充填法开采时，采空区内除直接顶冒落外，基本顶一般不冒落，但随着充填体两侧顶板垮落，垮落高度范围内的覆岩重量基本上由充填体来承担。

由于冒落矸石不接顶，所以采空区矸石并不承载。假定充填体上受到的载荷相同，充填体强度也相同，则可以利用有效面积理论来计算充填体载荷，即在充填体载荷计算时将非充填区域的覆岩重量全部转移到充填体上。利用有效面积理论来计算充填体载荷则其载荷大小主要取决于地层层数、地层厚度以及各岩层的体积力等地质因素，其计算过程如下^[14]：

$$P = (b + c)\gamma \cdot H/b = \gamma \cdot H(1 + K) \quad (6)$$

式中， b 为充填体宽度，m； c 为充填间距，m； K 为充填间距与充填体宽度的比值， $K = c/b$ ； γ 为覆岩密度， t/m^3 ； H 为采深，m。

在采用局部充填法开采的情况下，充填体两侧会出现不同深度的塑性区，而随着充填体两侧顶板逐渐垮落，充填体所处的应力状态由单轴应力变为三轴应力状态，充填体两侧冒落的矸石会给充填体提供一定的侧压力，减少充填体塑性区的深度，进

而可以提高充填体的承载能力。当采出宽度较大时，即采充比超过某一范围时，采空区冒落矸石会接顶，进而会承担充填体一部分的载荷。因此，在计算充填体强度时，不能忽略这些现象。

对局部充填开采时充填体的稳定性研究与条带开采法时煤柱稳定性计算相似。煤柱强度的计算公式，最常用的有以下几种：

Obert-Dwvill/Wang (欧伯特-德沃/王) 公式 (适用于宽高比为 1~8 的煤柱)：

$$\sigma_p = \sigma_m \left[0.778 + 0.222 \frac{b}{h} \right] \quad (7)$$

Holland (浩兰德) 公式 (适用于宽高比为 2~8 的煤柱)：

$$\sigma_p = \sigma_m \sqrt{\frac{b}{h}} \quad (8)$$

Bieniawski (比涅乌斯基) 公式：

$$\sigma_p = \sigma_m \left[0.64 + 0.36 \frac{b}{h} \right]^n \quad (9)$$

式中， h 为煤柱高度，m； b 为煤柱宽度，m； σ_m 为现场临界立方体试件单轴强度，MPa； σ_p 为煤柱强度，MPa。

当 $b/h > 5$ 时， $n = 1.4$ ；当 $b/h < 5$ 时， $n = 1$ 。

实验证明，煤体试样的强度随着试样尺寸增加，呈指数规律减小。Hustulid (赫斯特里) 建议用以下的方法将试验室煤样强度转换为现场临界立方体试件的强度，以消除尺度效应^[15]。

立方体煤柱边长 $d < 0.9\text{m}$ 时：

$$\sigma_m = \sigma_c \sqrt{\frac{D}{d}} \quad (10)$$

立方体煤柱边长 $d > 0.9\text{m}$ 时：

$$\sigma_m = \sigma_c \sqrt[3]{\frac{D}{0.9}} \quad (11)$$

式中， σ_m 为现场临界立方体单轴抗压强度，MPa； σ_c 为试验室煤样单轴抗压强度，MPa； D 为试验室煤样试件直径或立方体边长，m。

通过上式计算表明，现场煤柱临界立方体试件强度远低于实验室试块的强度，说明这种方法不能适用于煤矿充填体强度的换算。

金属矿山充填体强度与煤矿充填体的强度相差不多，根据金属矿已有的充填经验，现场临界立方体试件的单轴抗压强度一般为试验室充填体试块的 1.2~1.3 倍，煤矿膏体充填效果较好，可取 1.2 的系数。因此，结合煤矿充填体的宽高比范围，现场充填体的整体强度可按式 (9) 得出：

$$\sigma_p = 1.2\sigma_c \left[0.64 + 0.36 \frac{b}{h} \right]^{1.4} \quad (12)$$

式中, σ_c 为试验室充填体单轴抗压强度, MPa; b 为充填体宽度, m; h 为充填体高度, m; σ_p 为充填体强度, MPa.

则充填体强度至少应该满足:

$$\sigma_c = \frac{p}{1.2 \left(0.64 + 0.36 \frac{b}{h} \right)^{1.4}} \tag{13}$$

根据极限强度理论, 要保持充填体的稳定性, 一般应有 1.5~2.0 倍的安全系数, 对煤矿局部充填取 2.0, 并将式 (6) 带入上式即可得到保持充填体长期稳定性对试验室充填试块的强度要求:

$$\sigma_c \geq \frac{5(1+K)}{3 \left(0.64 + 0.36 \frac{b}{h} \right)^{1.4}} \cdot \gamma \cdot H \tag{14}$$

4 结论

(1) 充填开采是绿色开采的主要途径之一, 局部充填是保水开采的发展方向。充填材料的强度, 直接决定充填尺寸和充填效果, 也决定着充填工艺与成本, 合理确定充填强度是局部充填保水开采的首要工作。

(2) 确定充填材料强度时, 应既能保证充填开采的要求, 又能降低充填开采的成本, 从而最大程度地获取环境效益和经济效益。

(3) 充填体早期强度的确定除保持自稳外, 还需对直接顶提供适当的支撑作用。

(4) 充填体后期强度可以利用有效面积理论按照充填体承受的最大载荷进行确定。

[参考文献]

[1] 钱鸣高, 许家林, 缪协兴. 煤矿绿色开采技术 [J]. 中国矿业大学学报, 2003, 32 (4): 343—348.

[2] 黄庆享. 煤炭资源绿色开采 [J]. 陕西煤炭, 2008 (1).

[3] 郭文兵, 邓喀中, 邹友峰. 岩层与地表移动控制技术的研究现状及展望 [J]. 中国安全科学学报, 2005, 15 (1).

[4] 周华强, 侯朝炯, 孙希奎, 等. 固体废物膏体充填不迁村采煤 [J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33 (2): 154—158.

[5] 黄庆享. 浅埋煤层覆岩隔水性与保水开采分类 [J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29 (S2): 3622—3627.

[6] 孙恒虎, 黄玉诚, 杨宝贵. 当代胶结充填技术 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002.

[7] 杨宝贵, 崔希民, 孙恒虎. 煤矿采空区胶结充填控制采动损害的可行性探讨 [J]. 煤炭学报, 2000, 25 (4): 262—265.

[8] 牛海丽, 胡术刚. 煤矿膏体充填胶结材料试验研究 [J]. 混凝土, 2009 (12): 79—82.

[9] 蔡嗣经. 矿山充填力学基础 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009.

[10] 赵才智. 煤矿新型膏体充填材料性能及其应用研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2008.

[11] 刘建庄, 赵春景, 浑宝炬. 胶结充填体自立的受力分析与研究 [J]. 有色矿冶, 2008, 24 (4): 12—14.

[12] 杨宝贵, 孙恒虎, 庄百宏. 高水固结充填体的自立 [J]. 有色金属, 2000, 52 (2): 7—10.

[13] 朱志彬, 刘成平. 充填体强度计算及稳定性分析 [J]. 采矿技术, 2008, 8 (3): 15—17.

[14] 胡炳南. 条带开采中煤柱稳定性分析 [J]. 煤炭学报, 1995, 20 (2): 205—210.

[15] 谢和平, 段法兵, 周宏伟. 条带煤柱稳定性理论与分析方法研究进展 [J]. 中国矿业, 1998, 7 (5): 37—41.

[责任编辑: 邹正立]

(上接 18 页)

题进行了研究分析, 研制开发出了大功率、矮机身、高可靠性薄煤层滚筒式采煤机; 大工作阻力、高可靠性薄煤层电液控制液压支架; 大断面、高可靠性工作面输送设备。在此基础上满足合理和必要的行人和工作空间, 研究开发出适应淮南矿区具有代表性的薄煤层赋存特点的薄煤层综采机组。该技术和装备分别在谢一矿、新庄孜矿、潘二矿等 5 个工作面进行了试验和推广应用, 最高日产 3847t, 最高月产 85kt, 年产量约 800kt, 最高年开采保护层面积 130000m²。基本达到了采高 1.4m、适应煤层最大倾角 30°、年产 1.0Mt 的攻关要求。

[参考文献]

[1] 袁 亮. 淮南矿区现代采矿关键技术 [J]. 煤炭学报, 2007, 32 (01): 8—12.

[2] 袁 亮. 松软低透煤层群瓦斯抽采理论与技术 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2004.

[3] Yuan Liang. Dong Gongli-Gas Control Practices in Huainan Mining Community. China Coal 2005 (Safety Special).

[4] 袁 亮. 深井巷道围岩控制理论及淮南矿区工程实践 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2006.

[5] 吕文玉. 国内外薄煤层开采技术和设备的现状及其发展 [J]. 中国矿业, 2009 (01).

[6] 盛国军, 孙启生, 宋华岭. 薄煤层综采的综合创新技术 [J]. 煤炭学报, 2007 (03).

[7] 乔红兵, 吴 淼, 胡登高. 薄煤层开采综合机械化技术现状及发展 [J]. 煤炭科学技术, 2006 (02).

[8] 王国法. 薄煤层安全高效开采成套装备研发及应用 [J]. 煤炭科学技术, 2009 (09).

[9] 杨怀敏. 复杂地质条件下薄煤层综采技术的研究与实践 [J]. 矿业研究与开发, 2009 (01).

[责任编辑: 邹正立]