

国家自然科学基金(41572244、41372290)

山东省自然科学基金(ZR2015DM013)

教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20133718110004)

泰山学者建设工程专项经费资助

损伤底板破坏深度



预测理论及应用

于小鸽 施龙青 韩进 魏久传 ⊙ 著

SUNSHANG DIBAN POHUAI SHENDU
YUCE LILUN JI YINGYONG



煤炭工业出版社

国 家 自 然 科 学 基 金(41572244、41372290)
山 东 省 自 然 科 学 基 金(ZR2015DM013)
教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20133718110004)
泰 山 学 者 建 设 工 程 专 项 经 费 资 助

损伤底板破坏深度预测理论及应用

于小鸽 施龙青 韩 进 魏久传 著

煤 炭 工 业 出 版 社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

损伤底板破坏深度预测理论及应用/于小鸽等著. -- 北京:
煤炭工业出版社, 2016

ISBN 978-7-5020-5044-3

I. ①损… II. ①于… III. ①煤层—底板压力—研究
IV. ①TD322

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 292756 号

损伤底板破坏深度预测理论及应用

著 者 于小鸽 施龙青 韩 进 魏久传
责任编辑 尹忠昌
编 辑 康 维
责任校对 邢蕾严
封面设计 盛世华光

出版发行 煤炭工业出版社 (北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)
电 话 010-84657898 (总编室)
010-64018321 (发行部) 010-84657880 (读者服务部)

电子信箱 cciph612@126.com

网 址 www.cciph.com.cn

印 刷 北京市郑庄宏伟印刷厂

经 销 全国新华书店

开 本 880mm × 1230mm^{1/32} 印张 6 字数 152 千字

版 次 2016 年 1 月第 1 版 2016 年 1 月第 1 次印刷

社内编号 7895 定价 26.00 元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,本社负责调换,电话:010-84657880

内 容 提 要

本文在充分了解国内外煤层底板破坏深度规律、评价及预测理论和方法的基础上,以新汶煤田良庄井田、肥城煤田白庄井田为例,在充分收集井田勘探、物探、地质等相关资料的基础上,以地质学、岩石力学及矿山压力控制理论为基础,采用统计学、模糊数学、人工智能、数值模拟等方法,分析了采场底板损伤对底板破坏深度的影响,推导了底板破坏深度计算公式,模拟了完整型、损伤型及渗流状态下损伤型的底板破坏深度,并结合工程实践对采场损伤底板破坏深度进行了预测。

本书可供煤矿工程技术人员阅读,也可供大专院校相关专业师生参考。

前 言

煤炭是我国国民经济发展的主要能源之一, 在我国的能源结构中占据主导地位。影响煤炭安全高效开采的因素很多, 其中矿井水害多年来一直是制约我国采矿工程建设的主要因素之一, 特别是我国华北型石炭二叠纪煤田绝大多数矿区已进入深部开采, 随着矿山压力增大, 底板损伤更加严重, 底板突水频繁发生, 严重影响煤矿安全生产。矿井底板损伤破坏深度预测是国内外地质研究中的焦点问题之一, 是服务于矿井工作的广大科技人员普遍关注且长期以来一直难以突破的课题, 损伤底板破坏深度预测问题已成为现场迫切需要解决的关键问题。为此, 广大地质工作者在长期生产实践中探索了许多预测底板破坏深度的思路与方法。

基于损伤岩体裂纹起裂判据和矿山压力控制理论, 推导了应力-损伤耦合及渗流-应力-损伤耦合两种状态下的底板破坏深度计算公式, 给出了基于岩石力学试验参数和底板岩体损伤指数的损伤变量计算方法, 并用其计算了新汶煤田良庄井田 51302 工作面 and 肥城煤田白庄井田 7105 工作面的底板破坏深度。利用 RFPA 软件将 51302 工作面底板分别设定为完整型、损伤型及渗流状态下损伤型, 并对底板破坏深度进行数值模拟, 验证了利用推导出的理论公式计算的 51302 工作面底板破坏深度结果; 通过对 51302 工作面及 7105 工作面的底板破坏深度现场实测, 进一步验证了所推导的损伤底板破坏深度理论计算公式的可应用性。在归纳出影响底板破坏深度的主要影响因素基础上, 构建了基于优化 BP 神经网络的底板破坏深度预测模型, 运用 MATLAB 软件

获得了底板破坏深度预测优化网络模型，并将该模型应用到51302工作面和7105工作面底板破坏深度的预测，预测结果与现场实测结果相对比证明：该网络模型的计算结果比应用相关规程中给出的底板破坏深度计算公式获得的结果更接近实测值。运用多源信息融合技术对多种底板破坏深度计算方法的计算结果进行融合，提高了预测结果的精度，并在肥城煤田进行应用。

在本书的撰写过程中，得到了郭建斌副教授、李守春副教授、王敏副教授、尹会永副教授、杨思通讲师，山东新汶矿业集团有限责任公司刘同彬副总工程师、李子林副总工程师、阎勇处长、郭全龙副处长，以及山东肥城矿业集团曲修术处长、冯兆安副总工程师、袁明旺副总工程师、张秀军工程师等专家和领导的支持，在此表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，书中错误在所难免，敬请广大读者指正。

著 者

2015年8月

目 次	
1 绪论	1
1.1 问题的提出及研究意义	1
1.2 底板突水机理及预测方法研究现状	3
1.3 岩体损伤力学的研究现状	20
1.4 主要研究内容及研究方法	22
1.5 本章小结	25
2 底板岩层应力状态分析	27
2.1 底板岩体应力特征	27
2.2 采场应力变化数值模拟	30
2.3 本章小结	43
3 损伤底板破坏深度及损伤变量研究	44
3.1 底板岩体的损伤描述	44
3.2 损伤岩体裂纹起裂判据	48
3.3 采场损伤底板破坏深度确定	52
3.4 损伤变量的确定	61
3.5 应用实例	80
3.6 本章小结	82
4 基于应力-渗流-损伤耦合分析的底板破坏深度研究	83
4.1 岩石应力-渗流-损伤耦合作用分析	84
4.2 不同损伤状态底板破坏深度模拟	92
4.3 本章小结	105
5 损伤底板破坏深度现场实测	107
5.1 51302 工作面底板破坏深度现场实测	107
5.2 7105 工作面底板破坏深度现场实测	114

5.3	结果比较	127
5.4	本章小结	128
6	采场损伤底板破坏深度预测研究	130
6.1	基于 BP 神经网络的底板破坏深度预测	130
6.2	基于多元信息融合的底板破坏深度预测	153
6.3	应用实例	163
6.4	本章小结	166
7	结论	168
7.1	主要成果	168
7.2	主要创新点	169
7.3	展望	170
	参考文献	171

1 绪 论

1.1 问题的提出及研究意义

矿井水害多年来一直是制约我国矿井生产建设的主要因素之一。依据突水水源,将煤矿突水分为5种^[1]:地表水体突水、冲积层水突水、薄层灰岩水突水、厚层灰岩水突水、砂岩含水层突水。其中,灰岩水水害是我国华北型石炭二叠纪煤田防治的重点,煤系基底为奥陶系石灰岩,岩溶发育,富水性强,矿井在开采过程中都受到不同程度的岩溶水的威胁。随着开采水平的延伸和开采范围的扩大,这种威胁越来越严重,煤矿水害已经成为威胁煤矿安全的第二大杀手。据统计,2000—2006年煤矿重特大突水事故435起,死亡及失踪人数2199人。仅2007—2008年,全国煤矿发生水害事故122起,死亡518人,其中发生重大以上(死亡10人以上)水害事故11起,死亡190人。2010年全国发生了多起重特大透水事故,2010年3月1日内蒙古骆驼山煤矿透水事故,造成32人死亡;2010年3月28日,王家岭煤矿发生透水事故,造成38人死亡;2010年7月31日,黑龙江鸡西市恒山区鑫源煤矿发生透水事故,造成24人死亡。矿井水害事故发生的原因是多种多样的,除了安全管理方面的原因外,对水害发生机理认识不清,对水害预测预报缺乏足够的依据也是重要原因。

近年来,矿井突水事故呈不断上升趋势,近5年所发生的矿井突水事故比前10年还要多。统计资料表明,煤矿突水造成的直接经济损失一直排在各类煤矿灾害之首。过去20年间,有250多对矿井被水淹没,直接经济损失高达350多亿元。在华北

型煤田煤矿突水灾害中,煤系及其下伏奥灰水突水次数占突水事故的90%以上,重大的灰岩岩溶类突水事故大多表现底板突水。如1984年6月开滦范各庄矿发生突水事故,突水量达 $123180\text{ m}^3/\text{h}$,造成淹井事故,直接经济损失近5亿元。1993年1月5日发生在山东肥城国家庄煤矿奥灰突水,突水量达到 $32970\text{ m}^3/\text{h}$,造成整个矿井被淹,停产半年,直接经济损失1.35亿元。

在众多的煤层底板突水机理研究中,以山东科技大学(原山东矿业学院)提出的“下三带”理论^[3,4]影响最大。该理论将开采煤层底板划分为3个带:底板破坏带(导水裂隙带)、承压水导高带和完整岩层带。完整岩层带虽然受矿压的影响,但其特点是仍保持岩层的连续性,其阻水性能未能发生变化;承压水导高带受开采矿压的影响,原始导高有可能再导升,但上升值很小。多年来,人们对底板破坏深度进行了大量探查和统计,给出了多种计算底板破坏深度的公式,但这些公式基本上只考虑了工作面斜长、开采深度及开采煤层倾角等因素,而忽略了底板坚固性系数对底板破坏深度的影响,底板坚固性系数越大,底板破坏深度越小^[5]。煤层底板岩体是一个损伤体,具有初始损伤,煤田浅部资源开采殆尽,今后的煤层开采将以深部开采为主,随着开采深度的增加,矿压增大,底板岩体中的裂隙相互贯通并进一步扩展,这就使得底板岩体损伤更加严重,底板岩层更容易遭到破坏。王则才^[5]列举了肥城煤田多个工作面的生产案例,指出8、9煤层在采动之后,矿山压力破坏了底板岩层及含水层,使原生裂隙进一步扩展,并产生了大量的新裂隙,裂隙相互贯通,形成新网络,矿压对底板岩层的破坏深度在30 m以上,而不是原来的9~12 m。施龙青^[1]从现代损伤力学及断裂力学理论出发,建立采场底板的“下四带”理论,并将损伤变量引入到底板破坏深度中来,为研究底板损伤状态下的底板破坏深度提供了参考。

具有初始损伤的底板岩层是如何在矿山压力、构造应力及渗

流作用下进一步破坏,使原生裂隙进一步扩展进而达到贯通,造成底板破坏发生透水事故的,成为矿井水害防治研究领域的一个重要研究内容。

1.2 底板突水机理及预测方法研究现状

矿井突水灾害是在采矿活动的影响下,底板遭到破坏,高压水突破隔水层涌入矿井。几十年来,国内外许多学者对矿井突水机理进行了一些研究,取得了大量的研究成果。这些成果从各个方面揭示了突水发生的机理和预测方法,对于矿井安全生产起到了积极的指导作用。

1.2.1 底板突水机理及预测方法国外研究现状

煤矿底板突水实质是下伏承压水冲破底板隔水层的阻碍,沿采煤工作面底板隔水层岩体内部导水通道,以突发、缓发或滞发的形式向上涌入工作面采空区的过程。作为一种综合水文地质现象,它受到许多因素的影响,例如下伏含水层承压水的水压、水量、工作面底板的岩性组合、底板隔水层岩体的构造及采煤工艺方法等^[4]。

底板突水机理研究可以追溯到 20 世纪初,当时国外就有人注意到底板隔水层的作用,只要煤层底板有隔水层,突水次数就少,突水量也小,隔水层越厚则突水次数及突水量越少。20 世纪 40—50 年代,匈牙利学者韦格弗伦斯第一次提出底板相对隔水层的概念,他指出煤层底板突水不仅与隔水层厚度有关,而且还与水压力有关,突水条件受相对隔水层厚度的制约,相对隔水层厚度是等值隔水层厚度与水压力值之比。20 世纪 60—70 年代,匈牙利将相对隔水层厚度的概念列入《矿业安全规程》,并对不同矿井条件作了规定和说明。20 世纪 70—80 年代,许多国家的岩石力学工作者在研究矿柱的稳定性时研究了底板的破坏机理。C. F. Santos、Z. T. Bieniawski 等人基于改进的 Hoek - Brown 岩体强度准则,引入了临界能量释放点的概念、岩石性质和承受破

坏应力前岩石已破裂的程度、岩体指标 RMR 相关的无量纲常量 M_s , 分析了底板的承载能力, 对研究采动影响下的底板破坏机理有一定参考价值。在 20 世纪 80 年代末, 苏联矿山地质力学和测量科学研究院突破传统线性关系, 指出导水裂隙和采厚呈平方根关系。实质上, 对煤层底板突水问题的研究与岩体水力学问题的研究密不可分。岩体水力学是一门始于 20 世纪 60 年代末的新兴学科, 自 1968 年 Show D. T. 通过实验发现平行裂隙中渗透系数的立方定律以后, 人们对裂隙流的认识从多孔介质流中转变过来。1974 年 Louis 根据钻孔抽水实验得到裂隙中水的渗透系数和法向地应力服从指数关系。德国的 Erichsen 又从裂隙岩体的剪切变形分析出发建立了渗流和应力之间的耦合关系。1986 年 Oda 用裂隙几何张量统一表达了岩体渗流与变形之间的关系。1992 年 Derek Elsworth 将似双重介质岩石格架的位移转移到裂隙上, 再根据裂隙渗流服从立方定理的关系, 建立渗流场计算的固-液耦合模型, 并开发了有限元计算程序。目前, 在矿井水害研究方面, 澳大利亚有些学者主要从事地下水运移数学模型的建立。

1.2.2 底板突水机理及预测方法国内研究现状

我国对底板突水规律的研究始于 20 世纪 60 年代, 借助于匈牙利学者的研究经验, 提出了突水系数概念。20 世纪 70 年代后期, 修改了原来的突水系数公式, 并应用于实践。20 世纪 80 年代开始, 底板突水机理及预测预报的研究开始走上了蓬勃发展的道路, 煤矿科研人员相继提出了突水系数公式、“下三带”理论、原位张裂与零位破坏理论、薄板模型关键层理论、突水概率指数法、模糊数学法、专家系统方法等。

1. 突水系数法^[4,6]

早在 60 年代, 焦作矿区水文地质大会战中, 以煤炭科学研究总院西安分院为代表, 提出了用突水系数作为预测预报底板突水与否的标准, 并且取得了峰峰、焦作、淄博、井陘四大矿区的

临界突水系数经验数据。突水系数就是单位隔水层所能承受的极限水压值, 即

$$T_s = P/M \quad (1-1)$$

式中, T_s 为突水系数; P 为含水层水压, MPa; M 为隔水层厚度, m。

进入 20 世纪 70 年代, 借鉴匈牙利的防治水经验, 通过统计、整理和分析大量的突水资料, 得出了考虑矿压因素的突水系数经验公式。新的经验公式在安全、经济开采以及分析突水水量和突水次数方面发挥过重要的作用, 并以安全水头的形式写入煤炭工业部 1986 年制定的《煤矿防治水工作条例(试行)》中。突水系数经过两次修改后改为

$$T_s = P / \left(\sum M_i a_i - C_p \right) \quad (1-2)$$

式中, M_i 为隔水层第 i 分层厚度, m; a_i 为隔水层第 i 分层等效厚度的换算系数; C_p 为矿压对底板的破坏深度, m。

在引入“下三带”理论后, 突水系数是指每米有效隔水层厚度所承受的水压值。可由式(1-3)进行计算^[7], 计算公式为

$$T_s = P / (M - M_1 - M_2) \quad (1-3)$$

式中, M 为底板隔水层实际厚度; M_1 为开采后底板破坏带厚度; M_2 为奥灰顶界面原始导水带厚度。

2009 年新的《煤矿防治水规定》又重新定义突水系数, 回归最初的突水系数定义。

然而, 在实际应用中发现突水系数公式存在着一些难以克服的固有缺陷, 尤其随着采深的进一步加大, 底板损伤越严重, 这种矛盾更加明显地暴露出来, 这主要是因为突水的发生与否与隔水层的阻水性能、采掘活动、矿山压力、含水层的富水性、地质构造、原始地应力及水动力学特征等多种因素有关^[8-14], 而突水系数公式中所包含的信息与采煤过程中所能够揭露的信息差距

较大。

2. “下三带”理论及“下四带”理论

“下三带”理论最早由原山东矿业学院、峰峰矿务局等一批科技人员在实践中提出的。该理论认为开采煤层底板也像上覆岩层一样从煤层底面到含水层顶面分为三带^[15,16]：底板导水破坏带 h_1 、完整岩层带（或保护层带） h_2 、承压水导升带 h_3 。

在导水破坏带岩层中一般分布3种裂隙：竖向张裂隙、层向裂隙、剪切裂隙。3种裂隙相互穿插无明显分界，当它们与含水层，或承压水导升带，或导水断层沟通则可发生底板突水。底板破坏深度在理论上与多种因素有关，如工作面尺寸、开采方法、煤层厚度及倾角、开采深度、顶底板岩性及结构等。

施龙青^[20,21]根据“下三带”理论分析提出底板突水的必要条件是矿压对底板的破坏使底板有效隔水层厚度降为零；突水的充分条件为水压不小于卸压区的侧向压力。在内外应力场形成之前，突水位置在采空区；内外应力场形成之后，突水位置在煤壁附近。

在承压水的富水区存在着一定高度的天然导升，在开采过程中，在水压和二次应力的共同作用下，承压水沿裂隙递进地向上入侵。通过现场观测和模拟试验，王经明^[22]发现导升高度的变化主要是发生在采煤工作面的前方，突水判据为

$$H_0 + \Delta H + h \geq M \quad (1-4)$$

式中， H_0 为原始导升高度； ΔH 为递进导升高度； h 为底板破坏深度； M 为底板全厚。如果 $H_0 + h = M$ ，称为原始导升突水；如果 $H_0 + h > M$ ，则称为超越导升突水。

“下三带”理论比较符合煤层底板破坏、突水规律，在生产实践中得到了较为广泛的应用，但理论研究尚有待于深入^[20]。施龙青^[21]根据研究指出，阻碍这一理论发展和广泛应用的主要原因有两点：一是底板破坏带的理论计算公式是基于弹性力学理论推导出的，而弹性力学是建立在一些基本假定基础上的，所有

这些假定是不适合岩体的力学特征的；二是“下三带”理论没有考虑承压水对底板岩层的破坏作用。施龙青以现代损伤力学及断裂力学理论为基础，提出了开采煤层底板的“下四带”划分理论，即开采煤层底板可以划分为矿压破坏带、新增损伤带、原始损伤带、原始导高带。推导出开采煤层底板“四带”理论中各带厚度的计算公式，给出了底板突水判别方法，并结合肥城煤田开采煤层底板探测实例，说明开采煤层底板“下四带”存在的客观性。

3. 原位张裂与零位破坏理论

王作宇、刘鸿泉^[22]提出的“原位张裂与零位破坏”理论认为，被开采的煤层在矿压与水压的联合作用下，工作面相对于底板的影响范围在水平方向上分为三段：超前压力压缩段（Ⅰ段）、卸压膨胀段（Ⅱ段）和采后压力压缩—稳定段（Ⅲ段）。在垂直方向上同样分为三带：直接破坏带（Ⅰ带）、影响带（Ⅱ带）、微小变化带（Ⅲ带）。在水平挤压力及矿压与水压的作用下，使超前压力压缩段（Ⅰ段）内整体上半部分受水平挤压，下半部分受水平拉张，岩体呈整体上凹的形状。在超前压力压缩段（Ⅰ段）中部附近中和层下面产生张裂隙，并沿着原岩节理、裂隙发展扩大，但不发生岩体之间较大的相对位移，仅在原位形成张裂隙。若底板受较大水压的作用，克服结构岩体的结构面阻力，产生超前渗流破坏，使张裂隙进一步扩大。同一岩性的张裂度大小与底板承压水的水压力、渗透力、采动应力场作用强度密切相关。张裂隙发生在底板岩体的影响带（Ⅱ带）范围内，形成煤层开采底板岩体的原位张裂破坏，张裂破坏产生后随着工作面推进逐渐向上发展，在接近卸压膨胀段（Ⅱ段）处于稳定。底板岩体由超前压力压缩段（Ⅰ段）向卸压膨胀段（Ⅱ段）的过渡引起其结构状态的质变，处于压缩的岩体急剧卸压，围岩的贮存能大于岩体本身的保留能，则以开裂破坏的形式释放残余弹性应变能，以达到岩体能量的重新平衡，从而引起岩体发生自

上而下的破裂,其破坏位置一般发生在工作面附近,靠近工作面零位的3~5 m范围内,破坏基本上一次性达到最大深度,并很快稳定。煤层底板岩体移动的这种破坏即所谓的“零位破坏”,该理论认为,底板岩体的内摩擦角是影响零位破坏的基本因素,并进一步引用塑性滑移线场理论分析了采动底板的最大破坏深度。

杨映涛^[23]采用1:100的平面应力模型,利用物理模拟技术研究煤层底板的突水机理,表明完整底板破坏突水是沿“零位破坏”线发生的。但“原位张裂与零位破坏理论”仅仅从矿山压力及水压力角度解释了煤层开采过程中的底板破坏过程,并没有从本质上简明地说明突水发生的机理,现场实用性不强。

4. 板模型理论^[24,25]

刘天泉、张金才等提出了底板岩层由采动导水裂隙带和底板隔水带组成的概念,并采用半无限体上一定长度上受均匀竖向载荷的弹性解,结合莫尔-库仑强度理论和格里菲斯强度理论分别求得了底板受采动影响的最大破坏深度。采用薄板理论结合弹塑性理论得到了以底板岩层抗剪强度准则,拉强度为强度基准的底板所能承受的极限水压力的计算公式。但煤层底板很难满足薄板理论的基本条件(厚宽比小于1/5~1/7)。由于厚板理论尚不成熟,所以计算时可以选择其中较薄的一层进行分析,应用薄板理论可以得出足够满足精度的解,这就使得应用范围受到限制,特别是现在主要开采下组煤,底板厚度大。

5. 关键层理论^[26-29]

钱鸣高、黎良杰等将采场底板覆岩关键层理论引入到底板突水研究中,从而认为关键层是控制突水的主要因素。将煤层底板至含水层之间承载能力最大的一层岩层看作底板关键层,从而将采场底板突水的研究转化为对底板关键层破断机制的研究。将关键层看作受水压等均布载荷作用的弹性薄板,得出了它的极限破断垮距公式,并提出了利用已知突水事故资料反演预测岩体强度

的方法,分析了底板关键层破断后的块体平衡条件,解释了突水点的分布特点与突水时产生的底鼓现象。

尽管底板关键层的力学特征与顶板关键层具有相同的意义,但底板突水与否不是由所谓的关键层所控制,恰恰相反是由一些承载能力不很强、但阻水性能很好的岩层所控制,而关键层往往因裂隙闭合度差而成为导水层。因此,该理论模型与实际地质环境相关甚远,实用性不强。

6. 非线性动力学理论

矿井煤层底板突水系统是人类和环境组成的复杂开放系统,呈现出非平衡开放系统的特征,也就是为一非线性系统。煤层底板隔水岩层的变形破坏、失稳,也就是形成一种非平衡耗散结构。因此,人们可以借助非线性力学的理论和方法来研究底板的突水机理。

靳德武^[20]、王延福^[30]认为在底板突水的形成中,存在快、慢两种过程。用塞子模型模拟突水岩块,建立了动力学方程,提出突水的物理判据,并对实例进行了检验。周辉^[31]在薄板理论的基础上,建立了立井井筒底板突水的尖点突变模型,运用突变理论的分析方法,求得了井筒底板隔水层的最小理论安全厚度,根据在大涨落存在的前提下突变发生所遵循的 Maxwell 规则,对理论值和实际值的偏差作了合理的解释,为井筒突水的预测及确定隔水层的安全厚度,提供一种新的理论方法和途径。

白晨光^[32]应用突变理论的方法,对底板关键层的力学模型进行分析,推导出了关键层系统的总势能函数表达式,建立了底板关键层的尖角(CUSP)型突变模型,分析了承压水底板关键层失稳的力学机制。王凯^[33]针对煤层底板突水预测指标监测信号,分析了单变量序列尖点突变模型及其稳定判据,提出了煤层底板突水的突变理论预测方法。

王连国^[34,35]得到煤层底板尖点突变模型的突水势函数,发现煤层底板突水具有突变、缓慢两条路径,并在突水临界点附近