

在构造应力场中采动对底板运输巷道稳定性的影响

单晓云^{1,2}, 梅海斌³, 徐东强⁴, 赵毅鑫¹

(1. 中国矿业大学(北京校区), 北京 100083; 2. 河北理工大学, 河北 唐山 063009;
3. 开滦集团有限责任公司, 河北 唐山 063000; 4. 河北工业大学, 天津 300132)

摘要: 利用有限元软件, 建立了底板运输巷道锚喷支护稳定性分析的三维计算模型, 分析了在范各庄煤矿构造应力场条件下不同工作面回采顺序对底板运输巷道稳定性的影响。提出在构造应力场中, 开采运输巷道上方的煤体使巷道产生拉伸形变是巷道破坏的主要根源。指出在保留上方煤柱使运输巷道处于近似双向等压条件下, 以减轻或避免回采引起的支撑压力的强烈影响, 为在高水平应力场条件下底板运输巷布置的重要原则。经开滦范各庄工程实践检验, 运输巷道使用期间减少了维护量, 并保持了巷道稳定。

关键词: 采矿工程; 构造应力; 底板运输巷; 支护结构; 采动影响; 数值模拟

中图分类号: TD 322

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2005)12 - 2101 - 06

MINING-INDUCED INFLUENCES ON STABILITY OF FLOOR HAULAGE ROADWAY IN TECTONIC STRESS FIELD

SHAN Xiao-yun^{1, 2}, MEI Hai-bin³, XU Dong-qiang⁴, ZHAO Yi-xin¹

(1. Beijing Campus, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China; 2. Hebei Polytechnic University, Tangshan 063009, China; 3. Kailuan Group Limited Liability Company, Tangshan 063000, China;
4. Hebei University of Technology, Tianjin 300132, China)

Abstract: A three-dimensional computational model is applied to analyze the stability of rock-bolting and shotcreting support in the floor haulage roadway. The mining sequence effects in different working faces on stability of floor haulage roadway in high tectonic stress field in Fangezhuang Coal Mine are discussed. The main factor causing destruction of roadway in tectonic stress field is found to be the high tensile strain, which appears after the coal seam above haulage roadway is mined. In addition, the key principle of laying floor haulage roadway in high-level stress field is proposed in this paper to keep pillars above the haulage roadway unmined. In this way, the obvious influences of high abutment pressure induced by coal mining can be alleviated or avoided for the roadway is at nearly equal pressure on both directions. It is proved by engineering practices in Fangezhuang Coal Mine of Kailuan Group Limited Liability Company that the key principle is capable of reducing maintenance of haulage roadway in service and maintaining the stability of the roadway.

Key words: mining engineering; tectonic stress; floor haulage roadway; support structure; mining-induced influence; numerical simulation

1 引言

国内外煤炭开采实践表明: 煤矿中许多巷道都

受到回采的影响。上部煤层的跨越回采对底板岩巷或邻近煤层巷道的稳定性影响问题一直是煤矿开采研究中的热点之一。由于巷道与上部煤层回采空间的相对位置关系不同, 在跨采过程中, 被跨巷道受

收稿日期: 2004 - 06 - 18; **修回日期:** 2004 - 07 - 20

作者简介: 单晓云(1957 -), 女, 1982年毕业于安徽大学物理系, 现为教授、博士研究生, 主要从事固体力学等方面的教学与研究工作。E-mail: shxy-mail@163.com.

跨采的影响程度也有较大差别。同时，构造应力水平对巷道围岩的稳定性也有着重要影响。在构造应力水平较高时，巷道顶板冒落，底板底鼓以及两帮内挤等灾害均时有发生。因此，掌握在构造应力场中受采动影响巷道的矿压显现规律，对研究和改善巷道的稳定性有着重要的意义^[1~7]。

本文建立了底板运输巷道锚喷支护稳定性分析的三维计算模型。利用有限元软件，分析了在范各庄煤矿构造应力场条件下不同工作面回采顺序对底板运输巷道稳定性的影响。提出在构造应力场中，开采运输巷道上方的煤体使巷道产生拉伸形变是巷道破坏的主要根源。指出保留上方煤柱使运输巷道处于近似双向等压条件下，以减轻或避免回采引起的支撑压力的强烈影响，为在高水平应力场条件下底板运输巷布置的重要原则。

2 问题的提出

开滦井下运输大巷一般布置在底板稳定的岩石中，大多为半圆拱形。采用的支护形式主要为锚喷支护，煤层的开采引起采空区及其周围岩层的应力重新分布，该应力还会向底板深部传播而引起底板内的应力重新分布，在回采工作面周围形成应力降低区、应力升高区及原岩应力区。因此，底板运输巷道在整个服务区内都会受到采动影响。

开滦矿区受构造应力控制，在采深 410~830 m 范围内：最大水平主应力为 27.4~34.3 MPa，方位角为 131°~148°；最小水平主应力为 12~18 MPa，方位角为 41°~53°；垂直主应力为 12.8~20 MPa。设岩体平均容重为 25 kN/m³，则最大水平主应力与

γH 的比值为 1.6~2.7。可见矿区内存在较大的构造应力，它对巷道的布置、工作面的回采顺序等将产生较大的影响。在自重应力场中，上方保留煤柱的底板运输巷道，长期处于两侧采空区引起的叠加支承压区下，维护困难，但在构造应力场中，底板运输巷道的布置、工作面回采对巷道稳定性的影响需要进行深入研究^[3]。

开滦运输大巷锚喷支护在现场应用中，由于对巷道围岩应力，尤其是对受构造应力作用的巷道围岩应力分布规律认识不足，对巷道受采动影响在理论上研究不够，巷道锚喷支护设计主要采用类比法。运输大巷在使用一段时间后，经常需要加固或重新全部锚喷，这在技术上和经济上都不尽合理。因此，研究在构造应力条件下，不同工作面回采顺序对巷道稳定性的影响，对确定合理的锚喷支护结构参数有很大现实意义。

3 范各庄煤矿三水平运输大巷计算模型的建立

根据开滦矿区应力测量与构造应力场研究报告^[8]，范各庄煤矿三水平运输大巷如图 1 所示。范各庄煤矿三水平运输大巷位于 12 煤层底板砂岩中，埋藏深度 680 m，巷道走向 NE13°，第 1 水平主应力 24.34 MPa，方位角 103°，倾角 -3.78°；第 2 水平主应力 16.10 MPa，倾角 78.67°；第 3 水平主应力 13.90 MPa，方位角 193°，倾角 10.66°。最大水平主应力与巷道走向垂直。3071 工作面已经开采，三水平运输大巷受采动影响，如图 1 所示。各岩层及混凝土物理力学性质如表 1 所示^[9]。



图 1 范各庄煤矿三水平运输大巷示意图(单位: m)

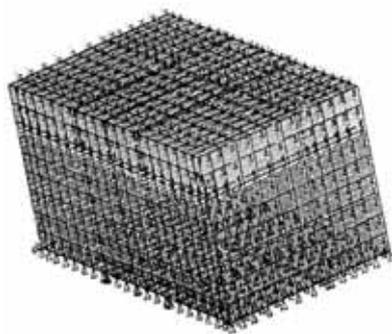
Fig.1 Sketch of haulage roadway of third level in Fanggezhuang Mine(unit: m)

表 1 岩层及混凝土力学参数

Table 1 Mechanical parameters of rock-strata and concrete

岩层名称	水平弹性模量 /MPa	垂直弹性模量 /MPa	泊松比
底板	4 000	2 500	0.25
煤体	600	600	0.30
老顶 1	3 000	2 000	0.28
老顶 2	4 000	2 500	0.25
混凝土	3 500	3 500	0.28

为了准确模拟巷道围岩受力的实际情况，反映复杂的应力状态，利用 ANSYS 有限元软件进行二次开发，建立了 2 个三维立体模型(大模型和子模型)，如图 2 所示。根据计算模型的选取原则，保证子模型的位置远离模型边界和应力集中区，避免模型边界效应和应力集中区的影响^[10]。



(a) 三维实体大模型



(b) 三维实体子模型

图 2 三维计算模型

Fig.2 3D model of numerical simulation

本次计算所用的大模型包括整个 3071 工作面 and 相邻的 2 个采区工作面，模型为 530 m×214 m×138 m(长×宽×高)。大模型主要用于计算开挖前的应力状态和对地应力场进行模拟。大模型的主要输入参数包括：上覆层厚度、水平应力大小、岩石的

各项物理力学参数、模型的几何尺寸等。子模型以开挖巷道为中心，长(沿巷道横断面方向)40 m，宽(沿垂直方向)52 m，厚(沿巷道走向)20 m，在子模型中考虑锚杆和喷射混凝土厚度。因为受锚杆影响的应力范围非常有限，采用这种做法可避免在整个模型上进行非线性分析。子模型的主要输入参数包括：锚杆安装载荷、锚杆的直径和长度、岩石及混凝土的力学性质、喷射混凝土厚度及锚杆间距等。

4 底板运输巷锚喷支护稳定性有限元计算结果分析

根据建立的大模型和子模型，以及范各庄煤矿的开采实际，进行如下计算分析：

(1) 分析回采前范各庄煤矿三水平运输大巷围岩应力分布规律、围岩变形规律。

(2) 分析 3071 工作面跨采时，围岩应力重新分布规律；保留三水平运输巷上方煤柱，各工作面开采采动影响围岩应力和围岩变形情况。

(3) 分析不同锚杆支护结构，不同喷层厚度巷道围岩应力和位移变化规律。

4.1 运输大巷未受采动影响时的围岩应力

范各庄煤矿三水平底板运输大巷尺寸为 3.5 m×4.0 m(宽×长)，支护条件为：巷道拱顶加 7 根锚杆，锚杆长度为 1.58 m，直径为 16 mm，锚杆排距为 0.8 m，在巷道两侧直壁和拱顶喷射混凝土，厚度为 100 mm。

由大模型计算可知，运输大巷开挖前，巷道走向方向水平切向应力 S_x 为 24.460 MPa，垂直主应力 S_z 为 17.961 MPa，与原岩应力测试结果一致。由于子模型计算巷道周边围岩应力为：垂直主应力 S_z 在拱顶和底板中部产生应力降低区，分别降为 3.123 MPa 和 1.40 MPa； S_x 在拱顶和底板角点处产生最大压应力集中，分别达到 47.308 MPa 和 41.267 MPa；在直壁距底板 0.7 m 处， S_x 产生 4.083 MPa 的拉应力，如图 3，4 所示。这表明在巷道围岩中，最危险的部位是拱顶处的最大压应力集中区和直壁距底板 0.7 m 处的最大拉应力区。由于三水平运输大巷位于 12 煤层底板稳定的砂岩中，其岩石的抗压强度达到 64.70~96.7 MPa，抗拉强度为 3.32~7.78 MPa。因此，在这种支护条件下，巷道能够保持其稳定性。

由以上计算分析可知，巷道围岩最危险的部位是巷道拱顶和直壁中部，这 2 处最危险的应力方向与最大水平主应力方向一致，是由最大水平应力引

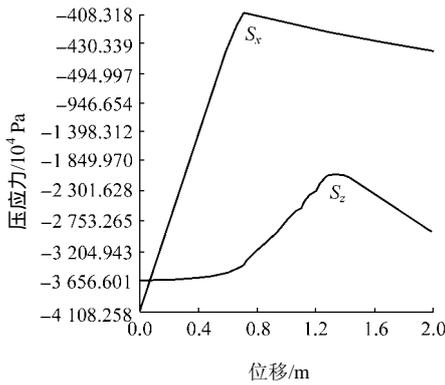


图3 巷道直壁围岩切向应力和垂直应力分布图

Fig.3 Tangential stress and vertical stress distributions in the wall before excavation

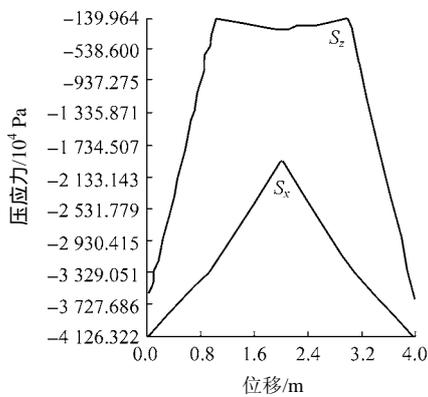


图4 巷道底板围岩水平切向力和垂直应力分布规律图

Fig.4 Tangential stress and vertical stress distributions in the floor rock before excavation

处为 38.389 MPa，距底板 0.7 m 处 S_x 变成拉应力，为 4.225 MPa，与不受采动影响相比有所增加，如图 5 所示。垂直主应力两底角处为 19.379 MPa，水平切向应力两底角处为 38.213 MPa，如图 6 所示。

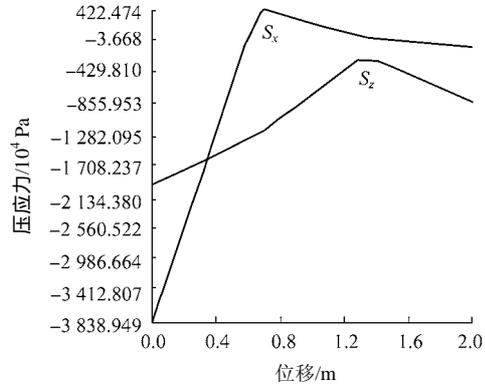


图5 巷道直壁围岩切向应力和垂直应力分布图

Fig.5 Tangential stress and vertical stress distributions in the wall after excavation

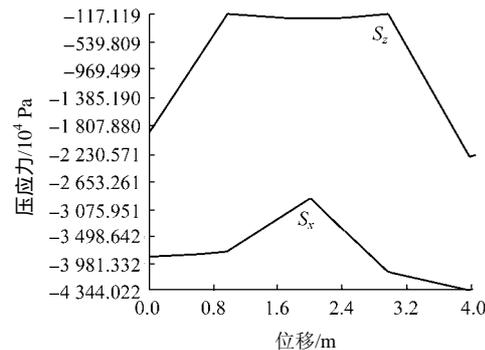


图6 巷道底板围岩水平切向力和垂直应力分布规律图

Fig.6 Tangential stress and vertical stress distributions in the floor rock after excavation

起的。这表明在这种地应力条件下，巷道的稳定性受最大水平主应力控制。

计算求得拱顶中点垂直位移 U_z 为 355.9 mm (包括计算模型中的初始位移)，底板中点垂直位移为 296.3 mm(包括计算模型中的初始位移)，两者之间的差值即为巷道顶底板移近量，等于 59.60 mm。另外，同样的方法可求得巷道两帮移近量为 54.46 mm。

4.2 3071 工作面跨采对运输大巷稳定性的影响

当 3071 工作面跨采以后，打破了原来应力状态的平衡，应力重新分布，三水平运输大巷处于应力降低区内。在开采工作面中间部位，垂直主应力 S_z 降低为 8.909 MPa，距开采边界 20~30 m 的范围内垂直主应力达到最大值，为 20.190 MPa，水平主应力工作面中部略有升高，两边略有降低，分别为 25.739 和 22.373 MPa。受采动影响后，垂直主应力 S_z 进一步降低为 3.048 MPa，水平切向应力 S_x 继续升高，达到 52.912 MPa。巷道直壁上垂直主应力较小，对巷道稳定性影响不大，水平切向应力 S_x 底角

由巷道围岩应力分布规律可知，巷道最危险的部分在拱顶和巷道直壁中部，拱顶主要是最大压应力作用，最大压应力为 52.912 MPa；巷道直壁主要是拉应力作用，最大拉应力为 4.225 MPa。最危险的应力都是在最大水平主应力作用下产生的。计算表明巷道顶底板的移近量为 21.80 mm，巷道两帮移近量为 50.91 mm。

对比 3071 工作面开采前和跨采后运输巷道拱顶中点垂直位移值，工作面开采前巷道拱顶中点垂直位移为 355.9 mm(包括计算模型初始位移)，跨采后巷道拱顶中点垂直位移变化为 195.6 mm(包括计算模型初始位移)。这表明由于 3071 工作面跨采，使三水平运输大巷上方的压力得到释放，包括运输巷道围岩范围内的岩体向上移动。巷道拱顶中点向上移动 160.30 mm。同样可求得巷道底板中点向上

移动的位移值为 122.5 mm。由于 3071 工作面采动影响, 运输大巷拱顶中点向上移动量和底板中点向上移动量不同, 使巷道产生 37.8 mm 的拉伸变形。这种受采动影响产生的拉伸变形, 是巷道破坏的主要根源。

为了寻找在构造应力作用下, 巷道最佳的喷锚支护结构, 又进行了另外 2 种支护参数的计算。第 1 种情况, 在巷道两壁和拱顶喷射较高强度的混凝土, 厚度为 100 mm, 混凝土弹性模量为 2 500 MPa, 锚杆长度为 1.6 m, 直径为 16 mm, 锚杆的弹性模量为 60.7 GPa, 顶板布置 5 根锚杆, 两帮各 3 根, 底板 3 根, 其他参数不变。第 2 种情况, 在巷道两壁、拱顶和底板喷射强度较高、变形量较大的混凝土, 厚度为 100 mm, 混凝土弹性模量为 2 000 MPa, 锚杆采用可塑性锚杆, 长度为 1.6 m, 锚杆的弹性模量为 20.7 GPa, 顶板布置 5 根锚杆, 两帮各 3 根, 底板 3 根, 其他参数不变。2 种情况的计算结果如表 2 所示。由表 2 可知, 第 2 种支护情况下, 无论围岩的最大压应力集中, 还是最大拉应力都小于第 1 种支护的情况。在这种开采的条件下, 应采用第 2 种支护结构。

4.3 保留三水平运输巷上方煤柱各工作面开采对运输大巷稳定性的影响

保留三水平运输巷上方煤柱, 开采运输巷道两侧工作面。在这种条件下, 由大模型计算可得沿煤层倾向方向(垂直运输大巷) S_x 和 S_z 分布规律, 在保护煤柱的下 S_z 产生应力集中, 由原来的 17.691 MPa 增加到 22.442 MPa, S_x 基本保持不变, 为 22.442~24.278 MPa。在两侧采空区, S_z 降至 7.753 MPa, 水平应力 S_x 上升到 26.114 MPa。

利用子模型技术分析了三水平运输巷道围岩的应力分布规律, 由计算结果可知, 在拱顶和底板中

部形成垂直主应力降低区, 垂直主应力分别降至为 1.974 和 1.295 MPa, 在直壁距底板 0.7 m 处, 产生最大垂直主应力集中, 达到 46.718 MPa, 并且在此处也产生水平拉应力, 为 4.219 MPa。底板比较稳定, 两底角处垂直主应力和水平主应力分别为 38.345 和 33.139 MPa。

由于运输巷道上部留有保护煤柱, 使运输大巷处在垂直应力集中区域, 此时在巷道周围的垂直主应力和水平主应力比较接近, 使巷道趋于双向等压状态之下, 这有利于巷道的稳定性。另外, 从巷道围岩应力分布规律亦可知, 开采两侧工作面时, 巷道拱顶最大水平应力 S_x 由 52.912 MPa 降至 42.569 MPa, 巷道直壁上垂直主应力增加至 46.718 MPa, 但总体上巷道围岩应力集中程度降低, 稳定性增强。

从巷道变形来看, 巷道顶底板移近量由原来的 21.80 mm 增加至 76.10 mm, 两帮移近量变化不大, 这似乎对巷道的稳定性不利, 但不进行回采时的围岩位移对比可发现, 保留煤柱开采两侧工作面在拱顶中点处产生 415.1 mm(包括计算模型初始位移)的向下位移, 不进行回采时巷道拱顶中点处的位移为 3 559.0 mm(包括计算模型初始位移), 这表明开采两侧工作面回采后, 巷道围岩向下移动 59.2 mm。这和 3071 工作面跨采时, 由于应力释放使巷道围岩产生 37.80 mm 的拉伸变形更有利于巷道的稳定。

5 结 论

- (1) 在水平应力为主的构造应力场中, 保留中间煤柱对运输大巷的稳定性有利。
- (2) 在水平应力为主的构造应力场中, 由于受采动影响产生的拉伸变形, 是构造应力场中巷道破

表 2 在构造应力场中两种不同巷道喷锚支护参数数值计算结果

Table 2 Results of numerical analysis for different roadway bolt anchor and shotcrete linings in tectonic stress

支护参数	应力/MPa						位移(移近量)/mm	
	拱顶		底板		直壁		顶底板	两帮
	S_z	S_x	S_z	S_x	S_z	S_x		
第 1 种	1.917	34.583	底板中点	底板中点	底脚	底脚	18.72	61.57
			1.283	30.050	19.221	37.458		
			底脚	底脚	距底板 0.7m 处	距底板 0.7m 处		
第 2 种	1.517	28.114	19.220	42.382	2.331	-3.016	22.70	61.90
			底板中点	底板中点	底脚	底脚		
			1.379	29.572	17.186	36.834		
			底脚	底脚	距底板 0.7 m 处	距底板 0.7 m 处		
			17.489	41.654	1.467	-2.463		

坏的主要根源。

(3) 在构造应力场中, 巷道最危险的部位在拱顶和巷道直壁中部, 最危险的应力都是在最大水平主应力作用下产生的。因此, 布置巷道时应尽量避免最大水平主应力与巷道轴向垂直的情况, 以减少对巷道的稳定性的不利影响。

(4) 对于高应力集中区属于变形地压情况下的巷道围岩喷锚支护, 锚杆应选用可伸长锚杆或可塑性锚杆。喷射的混凝土应具有较高的强度和较大的变形量, 以降低底板运输巷道围岩整体应力, 从而增强底板运输巷道的稳定性。

(5) 经开滦范各庄工程实践检验, 运输巷道使用期间减少了维护量, 并保持了巷道稳定。

参考文献(References):

- [1] 陆士良. 岩巷的矿压显现与合理位置[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1984.(Lu Shiliang. Presentation and Rational Position of Underground Pressure of Rock Roadways[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1984.(in Chinese))
- [2] 钱鸣高, 刘听成. 矿山压力及其控制(修订本)[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1996, 235 - 261.(Qian Minggao, Liu Tingcheng. Ground Pressure and Its Control (Revision Edition)[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1996, 235 - 261.(in Chinese))
- [3] 陈炎光, 陆士良. 中国煤矿巷道围岩控制[M]. 北京: 中国矿业大学出版社, 1994.(Chen Yanguang, Lu Shiliang. Control of Surrounding Rock of Coal Roadways in China[M]. Beijing: China University of Mining and Technology Press, 1994.(in Chinese))
- [4] 钱鸣高, 缪协兴. 深部采动岩体中的关键层活动对冲击地压和突水等灾害的影响[A]. 见: 香山科学会议第 175 次学术大会[C]. 北京: [s. n.], 2001. 10 - 13.(Qian Minggao, Miao Xiexing. Effect of critical strata activities in deep mining-induced rocks on hazards including impact ground pressure and water burst etc.[A]. In: The 175th Symposium of Xiangshan Science Meeting[C]. Beijing: [s. n.], 2001. 10 - 13.(in Chinese))
- [5] 赵悼义. 构造应力与井巷工程稳定性[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1984.(Zhao hengyi. Tectonic Stress and Stability of Underground Engineering[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1984.(in Chinese))
- [6] 朱维申, 何满潮. 复杂条件下围岩稳定性与岩体动态施工力学[M]. 北京: 科学出版社, 1995.(Zhu Weishen, He Manchao. Stability of Surrounding Rocks and Dynamic Engineering Mechanics of Rock Mass under Complicated Conditions[M]. Beijing: Science Press, 1995.(in Chinese))
- [7] Martin C D, Kaiser P K, Christiansson R. Stress, instability and design of underground excavations[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2003, (40): 1 027 - 1 047.
- [8] 开滦矿务局. 开滦矿区应力测量与构造应力场[R]. 开滦: 开滦矿务局, 1998.(Kailuan Mining Administration. Stress measurement and tectonic stress field in Kailuan coal mines[R]. Kailuan: Kailuan Mining Administration, 1998.(in Chinese))
- [9] 美国 ANSYS 公司北京办事处. ANSYS 结构非线性分析指南[R]. 北京: 美国 ANSYS 公司北京办事处, 1999.(Beijing Office of ANSYS Company of America. Guide to non-linear analysis of ANSYS structure[R]. Beijing: Beijing Office of ANSYS Company of America, 1999.(in Chinese))
- [10] Xu D Q, Shan X Y, Qian M G. Numerical simulation analysis of the timbering mechanism of rigidity body with rock bolt[J]. ICETS2000, 2000, 11: 130 - 135.