

矿区防护林带动力效应的预测分析

詹水芬¹, 丛晓春²

(1. 交通部天津水运工程科学研究所 水路交通环境保护技术实验室, 天津 300456; 2. 山东科技大学 土木建筑学院, 山东 青岛 266510)

摘要: 为了更好地发挥防护林带在矿区生态环境保护中的效用, 采用数值模拟的方法预测防护林带的绕林流场, 其中将气流-树木相互作用视为阻力项添加到动量控制方程中, 由障碍物表面对空气流动的阻力来描述林带的遮蔽效应。通过对雷诺时均控制方程的离散求解, 得到了通风型条状林带、疏透型网状林带、紧密型块状林带各自对应的流场、压力场和湍流动能场的分布。结果表明: 不仅林冠疏透度对防护林带的遮蔽防风有明显影响, 而且树木间的株距对林带整体的遮蔽效果也有比较显著的影响, 为避免穿流风对遮蔽效应的影响, 林带宽距比不宜超过1.3; 疏透度为31%的网状林带的有效防护范围大, 防风效果好而且水土保持性强; 紧密型块状林带, 林后速度衰减幅度大, 可抑制附着在叶片上粉尘的再次扬尘。

关键词: 防护林带; 矿区环境保护; 绕林流场; 数值计算

中图分类号: X173

文献标识码: A

Prediction on dynamical effect of tree belts in mine area

ZHAN Shui-fen¹, CONG Xiao-chun²

(1. Laboratory of Environmental Protection in Water Transport Engineering, Tianjin Research Institute of Water Transport Engineering, Tianjin 300456, China; 2. Civil Engineering and Architecture College, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510, China)

Abstract: In order to practically predict the effect of the tree belt windbreak in mine-area environment protection, the flow through porous tree belts was numerically made. The airflow-tree canopy action was considered into the momentum equation as the resistance term, and then the resistance between obstruction and airflow was expressed numerically. The each velocity, pressure and kinetic energy distribution of the sparse strip belt, draught meshy belt and tight nubby belt were obtained by calculation based on time-average Renoyld equations. The results show that not only the porosity does greatly affect the windbreak, but also the tree distance does. The distance is not beyond 1.3 to avoid air leak. The tree belt with porosity 31% has bigger windbreak range and better characteristics for abating wind erosion. The tight nubby tree belt is advised to restrain the particles adhering on the leaves refloating for large velocity deficit in trees.

Key words: tree belt; mine environment protection; air flow through trees; numerical calculation

近几十年来, 煤炭开发利用活动中所产生的污染和生态环境破坏已成为人们关注的焦点。就煤矿矿区而言, 由于大量的采矿活动及开采后的复垦还田程度低, 使很多矿区的植被破坏, 水土流失, 生态环境遭到严重破坏。生物措施尤其是植被恢复和绿化复垦一直是研究的热点, 作为减小风力, 削弱风强的环保型措施, 防护林带在矿区生态环境保护中得到了应用。它不仅增加了地表的粗糙度, 同时在一定范围内达到

了抑尘的效果.

防护林带的首要功能是减弱风速, 风速的减小将影响湍流传递过程, 并改善林带遮蔽区的微气象条件. 遮蔽程度和遮蔽区范围的大小由林带的孔隙度、高度、形状以及环境条件决定. 掌握防护林带结构与防风效应的关系, 对于最大程度地发挥防护林的防护效应显得尤为重要.

防护林带的系统研究从 20 世纪 30 年代至今, 主要是实验和现场观测方面的研究. 对防护林动力学的研究一直进展缓慢^[1]. 在计算机模拟技术的带动下, 防护林带的动力学模拟技术正逐渐兴起^[2]. 本文采用计算流体动力学的方法, 对防护林带绕林流场进行数值研究, 研究不同林带结构下的遮蔽效应, 为防护林动力效应的应用提供新的方法.

1 防护林流场计算的数学处理

空气穿过林带的流动过程是以削弱来流速度和改变湍流结构为特征的, 是动能转化成较多的脉动耗散为特点的复杂流动现象.

1.1 树木计算模型的处理

对于天然树木的防护林带和大多数人工防风体, 树冠固体边界元千变万化, 极不规则, 无法精确描述. 对于防护林的研究可忽略林带内部复杂固体边界元结构的影响, 由障碍物表面对空气流动的阻力来描述它们的整体效应^[3]. 本文选用大桥他风洞实验的树木模型, 具体参数见文献 [4].

1.2 空气-林带的阻力项处理

空气通过多孔隙刚性障碍物流动是一个气固两相系统. Wilson & Shaw 等^[5]对物理量实施了包括固体元在内的空间平均, 得到一组包含固体元影响、在整个空间上适用的方程组. 平均后的时均控制方程为

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} u_i u_j = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} - \frac{1}{\rho V} \int_A p dA + \frac{1}{V} \int_A \tau_i dA, \quad (2)$$

式中, u_i 为 x_i 方向上的速度, m/s; u_j 为 x_j 方向上的速度, m/s; p 为压强, Pa; ν 为运动黏滞系数, m^2/s ; ρ 为气流密度, kg/m^3 ; V 为林带容积, m^3 ; A 为气流与林带冠层的界面面积, m^2 ; τ 为黏滞应力, N/m^2 .

式 (2) 中最后 2 项分别代表平均体积内的压力和表面风剪切力的积分, 它们由障碍物产生的压差阻力和摩擦阻力造成的动量损失 (Momentum Sink) 组成. 这 2 项总称为空气-林带的阻力项 F_x , 由 Thom 引用的通用公式表示^[6], 即

$$F_x = -\rho C_d A(z) \bar{u} u_i, \quad (3)$$

式中, C_d 为单位叶面积密度的阻力系数; $A(z)$ 为叶面积密度, m^2/m^3 ; $\bar{u}$ 为平均风速, m/s.

2 防护林带防风效应的计算

本文研究的矿区地处东经 $113.68 \sim 115.08^\circ$, 北纬 $30.96 \sim 31.07^\circ$, 矿区气候为典型的盆地亚热带湿润气候, 四季分明, 雨量充沛. 矿区良好的生态条件利于植物的成活、生长与繁育. 矿区土壤呈酸性, 土层浅薄, 立地条件差, 需要良好的造林技术和养护措施.

2.1 林带结构参数的设定

树种的选择关系到矿区生态环境治理的成效. 根据“适地适树, 生态价值”的原则, 以适应性强, 抗逆性好和满足矿区绿化为要求, 在乡土树种中选用黑松、龙柏、青杉、香樟以及臭椿、刺槐、火炬树等树种, 分别营造上层乔木速生丰产林、中层灌条类低矮林, 乔灌混植的立体复合结构. 林带结构列选 3 种: 结构 1 为整体通风型条状林带; 结构 2 为整体疏透型网状林带, 结构 3 则为整体紧密型块状林带.

林带树种间均为长方形配置，配置参数见表1。

2.2 防护林带绕林流场的计算与分析

紊流模式采用雷诺时均模型（RANS），微分控制方程采用有限容积法将方程离散成1个3对代数方程组，压力项采用中心差分，对流项采用迎风格式，湍流通量项采用 Grank - Nicholson 格式。代数方程采用交替方向隐格式（ADI）求解，收敛判据为 $|P_{\max}| \leq 10^{-4}$ 。

上边界和侧边界视为无穷远边界；出口边界视为无回流边界；固壁处采用壁面函数法处理。图1为进口风速3.3 m/s时各工况的流场分布。来流风受到了林带的横向阻截后，流向分成两部分：一部分阻挡抬升，绕过林带向上游流走；另一部分则直接穿过林带的枝干进入背风区。间距越大，穿过林带的风量就越大，林带的阻挡功效就越低。各疏透度下的防护林，林后沿流风速均有一定的衰减。

表1 林带各结构参数配置

Table 1 Configuration parameters of each tree belt

结 构	参 数			
	疏透度 $\beta/\%$	林带高度 H/m	林带宽度 L/m	株间距 l/m
1	52	12	4	4
2	31	10	6	5
3	19	8	8	6

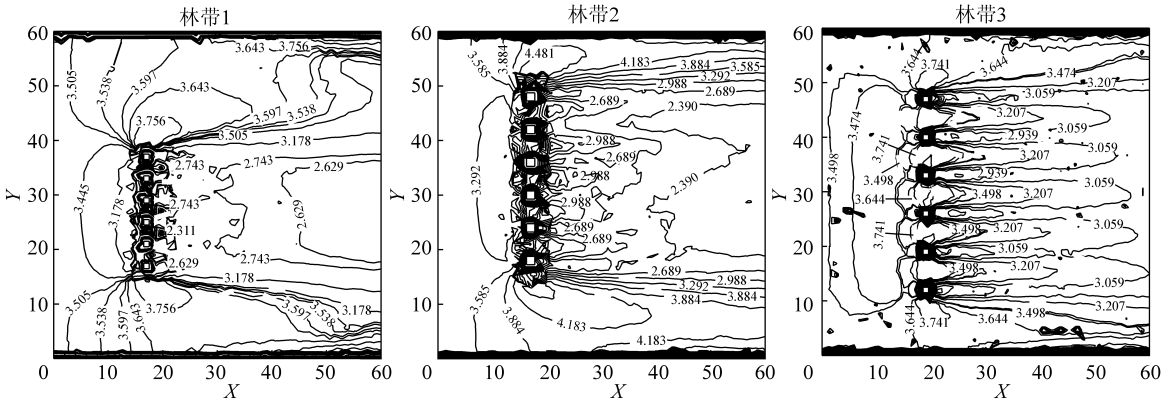


图1 风速的水平分布（单位：m/s）

Fig.1 The velocity distribution in horizontal view (unit: m/s)

林带的遮蔽效应不仅仅表现于林冠的树冠的背风面处，株距对其影响也很明显。结构1和结构2的林带宽距比（即林带宽度与株距之比）分别是1.0和1.2。这2种情况下，林带的屏障作用很显著，遮蔽区域为林带背后的大片区域。

当林带宽距比增为1.3时，透过树木间隙处的气流明显增多，林带的遮蔽区被分成“纺锤状”子域，气流之间的混合作用很明显，林带的遮蔽功效大为降低。所以在林带防风设计中，株距不宜过大，宽距比控制在1.2范围内。

林带与空气相互作用的阻力项构成了压力的扰动源项。流场的收缩与扩张所产生的动压力改变了扰动压力场。扰动的压力场不仅控制分离流动的产生，还控制流线的弯曲程度。压力的变化时刻影响着风速的分布。图2显示了各工况流场所对应的压力场分布。

由于林带的整体多孔性，使得在林带的迎风面，主要是在靠近林带进口处，压力分布就呈现出负压的情况，文献[7]认为这是林带的通透卷吸作用导致的。林带背风面处，随着防护区域的沿展，风压值又逐渐恢复。林带阻挡了气流通过，使防护林前气流急剧抬升，越过林冠；而林带后形成剧烈的湍流区，分布着大小不同的旋涡。湍动能不仅表征了大气湍流特征对流场的影响，而且也反映了流场的运动波动状况。各工况的湍动能分布如图3所示。由于树叶、干以及树木之间的相互交织、牵连作用，大尺度的涡流被打碎，林带入口湍动能的等值线被分割成若干个零星分布的状态。湍动能分布越分散，越碎小，则表明气流的脉动性越强，产生波动的可能性就越大^[8]。

通过图4的比较可知：疏透度为31%的网状林带，其湍动能分布得最为均匀，表明涡尺度相对较大，这预示着风对地面扰动最小，水土保持性相对最好。

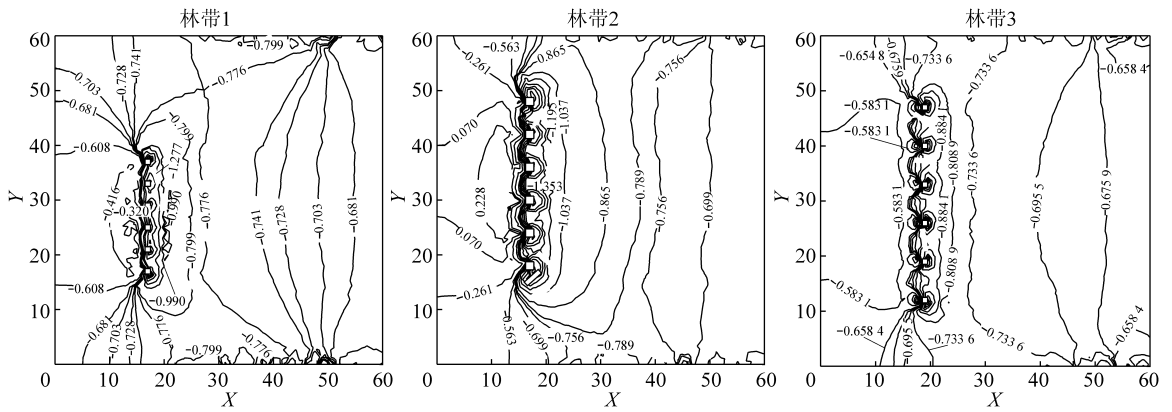


图 2 风压系数的水平分布
Fig. 2 The pressure field in horizontal view

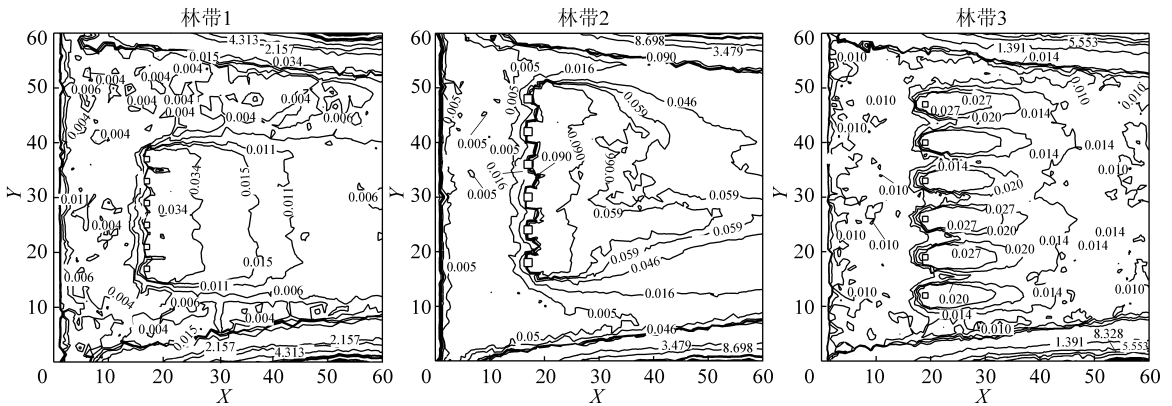


图 3 湍动能的水平分布 (单位: m^2/s^2)
Fig. 3 The turbulent kinetic field in horizontal view (unit: m^2/s^2)

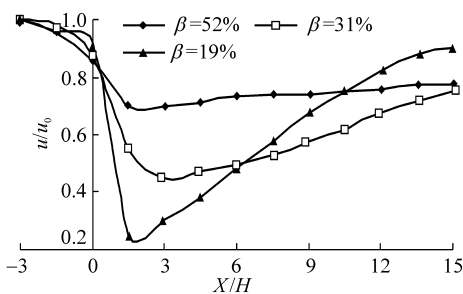


图 4 各种林带防风效应的比较
Fig. 4 The windbreak effect comparison of tree belts

2.3 防护林带效用的比较分析

在林带的防护作用下, 绕林流场对风速均有不同程度的衰减. 这种衰减表现为“先抑后扬”. 以林带所在位置为原点, 前后防护距离分别取 $3H$ 和 $15H$, 3 种结构林带的速度衰减情况如图 4 所示, u_0 为无穷远处的来流风速.

疏透度为 52%, 即通风型林带, 由于林带的通透性良好, 气流易从林带间隙中通过, 遮挡性不显著. 由图 4 可知: 林后气流速度最大衰减了 30%, 之后速度逐渐恢复, 在有效防护距离内, 速度平均衰减率为 21.8%.

当林带疏透度为 31% 时, 林带的遮蔽性增强, 表现为林后速度的明显衰减, 最大衰减幅度为 55%, 即来流风速被削减了一半. 随着有效防护距离的外延, 林后气流速度逐渐恢复. 这种林带不仅防风遮蔽效应显著, 而且有效防护范围大, 易在矿区主区域中作为防风林使用.

当林带为紧密型林带, 疏透度降为 19% 时, 屏障作用尤为突出. 速度最大衰减幅度可达到 75%. 从图 4 可以看出: 这种林带速度衰减度虽然大, 但是速度恢复也很快, 有效防护距离短, 到长度为 $9H$ 时, 速度就恢复到来流风速的 80%, 防风效果已经不明显了. 对于这种林内速度很低的林带, 可用于矿区防治大气粉尘, 抑制飘尘扩散的场合. 因为林内速度很小, 沉积在林带上的粉尘不易再次扬尘, 这种林带多

由吸尘能力好, 抗毒性强的树种组成.

3 结 论

防护林带对矿区生态环境的修护有很大的作用. 在实际应用中, 需结合使用的场所、目的、用途来进一步考虑林带的结构配置和树种的选取, 使之发挥最大的功效.

(1) 对防护林进行计算时, 将气流-树木相互作用视为阻力项添加到动量控制方程中, 由障碍物表面对空气流动的阻力来描述它们的整体效应, 这样克服了林冠固体元边界的复杂性, 实现了用数值计算的方法对林带绕流流场的预测.

(2) 通过对3种不同结构林带下的流场、压力场和湍流动能场的分析表明, 林带的株距对林带整体的遮蔽效果也有比较显著的影响, 为避免穿流风对遮蔽效应的影响, 林带宽距比不宜超过1.3.

(3) 疏透度为31%的网状林带, 林后气流的脉动性小, 涡尺度相对较大, 表明风对该区域的扰动最小, 林带的水土保持性最好. 同时这种林带有效防护范围大, 易在矿区大面积地作为防风林使用.

(4) 紧密型块状林带, 因林内速度很小, 可用于防治矿区内的粉尘, 也可抑制林带上的粉尘再次扬尘.

参考文献:

- [1] Heisler G M, Dewalle D R. Effects of windbreak structure on wind flow [J]. Agriculture Ecosystem Environment, 1988 (22-23): 41-69.
- [2] 李家春, 谢正桐. 植被层湍流的大涡模拟 [J]. 力学学报, 1999, 31 (4): 406-414.
Li Jiachun, Xie Zhengtong. Large simulation of canopy turbulence [J]. Acta Mechanica Sinica, 1999, 31 (4): 406-414.
- [3] 王 浩. 防护林带: 湍流的数学模型与计算模拟 [J]. 力学进展, 2003, 33 (4): 119-137.
Wang Hao. Tree belt: turbulence model and computation simulation [J]. Advances in Mechanics, 2003, 33 (4): 119-137.
- [4] Eugene S Takle, Wang Hao. A numerical simulation boundary-layer flows near shelterbelts [J]. Boundary-layer Meteorology, 1997, 85: 151-159.
- [5] Wison N R, Shaw R H. A high order closure model for canopy flow [J]. J. App. Meteorol., 1977, 16: 1 197-1 205.
- [6] Thom A S. Momentum, mass and heat exchange of plant communities [J]. Academic, 1975, 1: 1-8.
- [7] 刘和平, 刘树华. 森林冠层湍流结构的特征研究 [J]. 北京大学学报, 1997, 33 (2): 246-253.
Liu Heping, Liu Shuhua. Turbulence structure characteristics within and above Changbai Mountain forest [J]. Journal of Peking University, 1997, 33 (2): 246-253.
- [8] 丛晓春, 张 旭. 风障外流场风速的预测 [J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2004, 32 (1): 31-34.
Cong Xiaochun, Zhang Xu. Numerical prediction of airflow around windbreak [J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2004, 32 (1): 31-34.