第 44 卷第 6 期 煤 炭 学 报 Vol. 44 No. 6
2019 年 6 月 JOURNAL OF CHINA COAL SOCIETY June 2019

移动阅读

吴延鹏,王志华. 太阳直射下反光片提高导光管效率的模拟与实验分析[J]. 煤炭学报,2019,44(6):1941-1948. doi:10. 13225/j. cnki. jccs. 2018. 1307

WU Yanpeng,WANG Zhihua. Simulation and experimental analysis of light pipes with reflector under direct sunlight [J]. Journal of China Coal Society,2019,44(6):1941-1948. doi:10. 13225/j. cnki. jccs. 2018. 1307

太阳直射下反光片提高导光管效率的模拟与实验分析

吴延鹏,王志华

(北京科技大学 土木与资源工程学院,北京 100083)

摘 要:导光管作为一种利用天然光的照明方式,被越来越多的用于地下空间采光,如果这一技术能够用于矿区地下空间,必将极大改善矿井的光环境。然而目前导光管传光效率较低,在早晨、傍晚及整个冬季,由于太阳高度角较低导致入射光线较少,采光效果不理想。在采光罩内增加反光片可以将更多的天然光引入室内,通过增加入射光通量的方式改善采光效果。以北京地区为例,综合考虑太阳高度角及方位角变化,用 TracePro 软件模拟分析晴天直射光下不同结构的采光罩及反光片对导光管采光效率的影响。模拟结果表明球型采光罩内增加反光片后,在春分日和冬至日采光效率可分别提高 13. 52% 和 79. 56% ,但在夏至日会降低 4. 11% ;在圆柱型采光罩中,反光片的应用可使各个典型日期的采光效率均得到提高。以北京市通州区的两间办公室为研究对象进行了实验及模拟分析,测量时的天气条件包括晴天、多云天及阴天。在晴天,增加反光片后可以使平均入射光通量提高 8. 67% ,并且模拟结果与实测结果误差均在±20% 之间,验证了模拟结果的可靠性。在阴天,增加反光片后引入室内的光通量均减少,表明反光片不利于对漫射光的收集。

关键词:导光管;天然采光;照度;TracePro;反光片;直射光

中图分类号:TU96. 4 **文献标志码**:A **文章编号**:0253-9993(2019)06-1941-08

Simulation and experimental analysis of light pipes with reflector under direct sunlight

WU Yanpeng,WANG Zhihua

(*School of Civil and Resources Engineering*,*University of Science and Technology Beijing*,*Beijing* 100083,*China*)

Abstract:Light pipes are more and more used for underground lighting as a way of daylighting. The luminous environment of mine will be greatly improved if this technology can be applied in the mine underground spaces. However,the tube transmission efficiency is low in the morning,evening and the whole winter because of the low solar altitude. More sunlight was introduced into the room by adding reflectors inside the dome of light pipes. Considering the change of solar altitude angle and azimuth angle,TracePro software was used to simulate the influence of different domes and reflectors on the daylighting efficiency of light pipes under direct sunlight in sunny days. The simulation results show that after adding reflector into spherical dome,the daylighting efficiency can be improved by 13. 52% on the vernal equinox and 79. 56% on the winter solstice,while drop by 4. 11% on the summer solstice. Experimental measurements were carried out in two offices in Tongzhou,Beijing,China including clear and cloudy days. On sunny days,the average incident luminous flux could be increased by 8. 67% by adding reflectors,and the error between the simulation results and the measured results was less than 20% ,which verified the reliability of the model. On cloudy days,the incident luminous flux introduced was reduced after adding reflectors,indicating that reflectors are not conducive to the collec-

收稿日期:2018-09-29 **修回日期**:2018-12-17 **责任编辑**:毕永华
基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFB0601700)
作者简介:吴延鹏(1972—),男,河北唐山人,副教授,博士。E-mail:wuyanpeng@126. com
通讯作者:王志华(1994—),男,河南新乡人,硕士研究生。E-mail:wzh155601@163. com

tion of diffuse light. Besides weather and solar movement rules, the length of the light pipes also has a great impact on the daylighting efficiency of light pipes. How to ensure the daylighting efficiency under the condition of long-distance needs further research.

Key words: light pipes; daylighting; illuminance; TracePro; reflector; direct sunlight

煤矿井下需要全年进行人工照明,较地面上的工业企业,照明用电时间至少需延长一倍以上,约占全国总发电量的 12%[1-2]。天然光包含强度、方向和光谱组成的一致变化,用天然光照明有助于提高工作效率,有利于井下工作人员的健康[3]。谢和平院士提出矿井建设与地下空间利用一体化的煤炭革命新理念,构建以空气、阳光、洁净水、生态植被组成的生态圈是人类地下生存、休闲的先决条件,在废弃矿井的地下空间尝试建设地下城市、旅游观光、军事设施等利用形式[4-6]。如果把阳光导入地下将为地下空间的开发利用特别是地下城市的建设提供极为有力的科技支撑。导光管技术适用于各种地下空间和矿井的采光照明,尤其是对电、火敏感的矿井,利用导光管照明比电力照明更加安全可靠。

导光管的采光性能和效率是研究热点。OAKLEY 等[7] 分别在车间、住宅及小办公室内测试了不同导光管的性能,结果表明大直径且长度较短的导光管有较高的采光效率;PARONCINI 等[8] 以及 VASILAKOPOULOU 等[9] 分别对导光管的采光性能进行了长时间的监测;吴延鹏等[10] 测试了北京冬季晴天条件下导光管侧采光的采光性能;王伟、李双菊等[11-12] 分别测试了三种典型天气条件下导光管在冬夏两季的采光性能,结果表明夏季晴天时室内光通量值是冬季时的 3 倍多,多云天与阴天时都为冬季的 2 ~3 倍;高民东等[13] 通过 HOLIGILM 软件对导光管在辽宁大连地区的采光效率及照度分布进行了模拟研究,结果表明在标准阴天条件下,导光管的效率随着长径比的增大而减小。通过上述研究表明该系统对低角度入射的天然光采集能力较差,也就导致该系统在早晨、傍晚及整个冬季的采光效果要明显低于正午和夏季;对于需要长距离导光的场所如隧道、矿井等,由于传输路程长,损耗大而导致采光效果差。针对此现象,在采光罩内增加反光片,提高对低角度入射光线的传输效率。

利用 TracePro 光学模拟软件分析北京地区直射光线条件下反光片对导光管采光效率的影响。采用非序列光线追迹和蒙特卡罗方法进行模拟,当光线在实体中沿不同路径传播时,对光路中的每一条光线进行有效和准确的分析。

1 仿真设计

1.1 模型建立

导光管的主要结构为:采光罩、导光筒、漫射器及反光片。导光管管径 350 mm,长 1 200 mm;实验房间尺寸为 2 000 mm×2 000 mm×2 000 mm,如图 1 所示,其中,采光罩透射率 90%,导光管内壁镜面反射率 98%,反光片反射率 98%,漫射器漫射系数 73%,房间内墙面及顶面反射系数 60%,地面为 30%。设定光源为格点光源,格点图形为圆形,环数 80,辐照度为 500 W/m^2,光束密度均匀分布,角分布设定为 solar。根据北京地区(116°E,40°N)太阳高度角及方位角的变化(表 1),设置不同的光线入射方向。

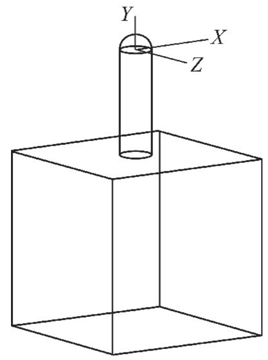


图 1 实验房间示意

Fig. 1 Test room

表 1 不同时段北京的太阳高度角及方位角

Table 1 Solar elevation angle and azimuth angle at different time periods in Beijing (°)

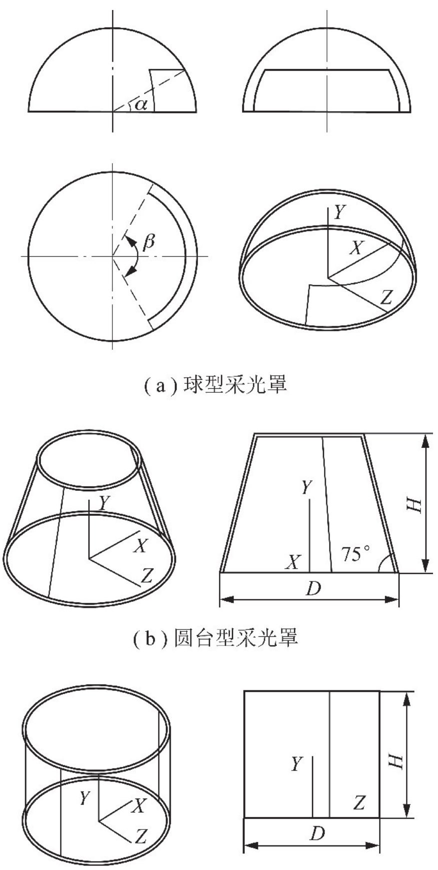
时刻	春分(3 月 21 日)		夏至(6 月 22 日)		冬至(12 月 22 日)	
	高度角	方位角	高度角	方位角	高度角	方位角
8:00	18.44	74.07	33.94	93.50	3.26	55.41
9:00	29.13	62.53	45.41	83.58	12.07	44.74
10:00	38.62	48.49	56.61	70.75	19.25	32.55
11:00	45.98	30.75	66.66	50.62	24.23	18.74
12:00	49.94	9.04	73.00	14.25	26.47	3.72
13:00	49.43	-14.23	71.21	-31.28	25.68	-11.58
14:00	44.61	-35.16	62.88	-60.04	21.97	-26.06
15:00	36.68	-52.02	52.20	-76.43	15.78	-39.05
16:00	26.87	-65.41	40.83	-87.77	7.69	-50.42

1.2　模拟内容

模拟的原始方案为半球型采光罩,在此基础上模拟研究了反光片在半球采光罩、圆台(柱)采光罩中的应用,方案设计及研究内容如下。

方案 1:反光片在球型采光罩中的应用。

在球型采光罩内部设置不同参数的放光片如图 2(a)所示,模拟研究直射光线条件下反光片对应的高度角 α 和圆心角 β 对导光管采光效率的影响;找出各典型日期反光片的最佳参数;研究反光片在不同管径导光管中应用的效果。模拟中 α 分别取值 15°,30°,45°和 60°,β 分别取值 90°,105°,120°,135°和 150°;导光管管径分别取 350,530 和 750 mm。



(a)球型采光罩

(b)圆台型采光罩

(c)圆柱型采光罩

图 2　反光片与采光罩结合形式

Fig. 2　Type of dome with reflector

方案 2:反光片在圆台(柱)型采光罩中的应用。

在圆台型采光罩内部设置不同参数的反光片,如图 2(b)所示,圆台母线与水平面夹角为 75°,当该夹角等于 90°时则为圆柱型采光罩,如图 2(c)所示,反光片对应圆心角为 150°,模拟研究直射光线条件下反光片的高度对导光管采光效率的影响;找出各典型日期反光片的最佳参数。模拟中导光管管径 D = 350 mm,反光片高度 H 分别取值 0.25D,0.5D,0.75D 和 D。

2　模拟结果与分析

2.1　模拟计算结果

利用 TracePro 建立的模型对直射光下原始方案在春秋分、夏至日及冬至日各时刻导光管的采光进行模拟。典型日室内地面的平均照度可按式(1)进行计算,为分析反光片对导光管采光效率的影响,引入采光效率提高百分比 η,可按式(2)进行计算,η 值越大,则反光片越有利于采光。

$$\bar{E}_1 = \frac{\sum \bar{E}_2}{9} \tag{1}$$

$$\eta = \frac{\bar{E}_3 - \bar{E}_4}{\bar{E}_4} \times 100\% \tag{2}$$

式中,$\bar{E}_1$ 为典型日地面的平均照度值,lx;$\bar{E}_2$ 为典型日各时刻的平均照度值,lx;$\bar{E}_3$ 为增加反光片后典型日的平均照度值,lx;$\bar{E}_4$ 为无反光片时典型日的平均照度值,lx。

由式(1)可得原始方案在春秋分、夏至日及冬至日室内地面的平均照度分别为 373.48,529.64 和 139.41 lx。对方案 1 和方案 2 分别进行模拟,所得结果见表 2,3。

表 2　直射光下地面平均照度(方案 1)

Table 2　Average illuminance under direct light of project one　　lx

典型日期	α	β				
		90°	105°	120°	135°	150°
春分日	15°	400.09	403.66	406.52	408.64	410.00
	30°	411.59	416.84	420.65	423.05	423.99
	45°	412.16	416.73	419.50	420.07	418.64
	60°	406.64	408.89	409.25	407.53	403.21
夏至日	15°	530.78	530.56	530.05	529.23	528.37
	30°	522.50	519.49	516.03	512.11	507.86
	45°	502.43	494.74	486.31	477.40	468.31
	60°	478.81	464.72	450.11	435.46	420.75
冬至日	15°	181.57	187.06	191.72	195.67	198.56
	30°	219.50	229.80	238.25	245.41	250.32
	45°	240.55	253.12	264.53	273.29	278.92
	60°	247.39	261.87	273.34	282.30	287.65

2.2　反光片在球型采光罩中的应用

根据方案一在采光罩内增加不同大小的反光片后,经过模拟得到的在各个典型日 8:00 和 12:00 地面的平均照度如图 3 所示。从图 3 可以看出,在春分

表 3　直射光下地面平均照度(方案 2)

Table 3　Average illuminance under direct light of project two　lx

采光罩	典型日期	H/D 0.25	0.5	0.75	1
圆台型	春分日	429.72	472.42	507.48	540.62
	夏至日	497.30	477.65	463.57	447.61
	冬至日	254.83	350.73	408.09	454.19
圆柱型	春分日	451.14	531.47	600.66	649.29
	夏至日	551.34	577.30	605.17	611.28
	冬至日	226.67	277.15	278.56	295.70

日,增加反光片后,地面平均照度都随着 α 的增大呈现出先增后减的趋势,并且照度值均大于原始方案;在 $\alpha=30°$,$\beta=150°$时存在明显的峰值,其中 8:00 时地面平均照度为 182.82 lx,相较于原始方案采光效率提高 25.93%,12:00 时地面平均照度为 554.83 lx,采光效率提高 10.32%,说明直射光下反光片的使用有助于春分日采光效率的提高。在夏至日,地面平均照度都随着 α 与 β 的增大而逐渐减小;在 8:00 由于太阳方位角较大(南偏东 93.5°,表 1),反光片会阻碍光线,故此时照度值均要小于原始方案;在中午 12:00 时由于直射光线入射角较大,故当 α 大于 30°时,反光片的使用会阻碍光线,降低采光效率。在冬至日,增加反光片后,地面平均照度都随着 α 的增大而增大,并且照度值均大于原始方案;在 $\alpha=60°$,$\beta=150°$时照度值最大,此时 8:00 的地面平均照度由 0.43 lx 增加到 135.38 lx,12:00 的地面平均照度由 251.13 lx 增加到 398.75 lx,可见反光片的应用极大的改善了冬至日的采光效果。

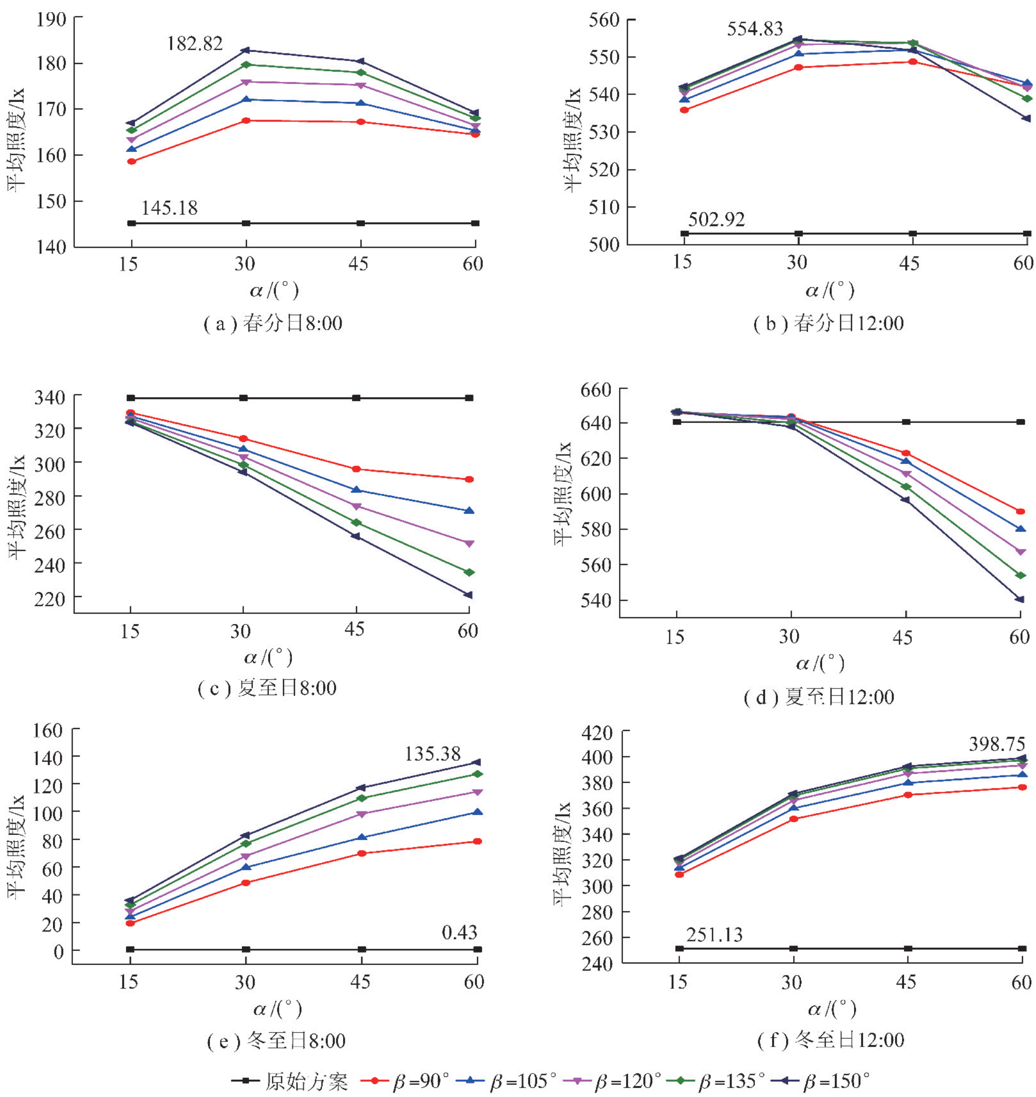


图 3　典型日期 8:00 和 12:00 时地面平均照度

Fig. 3　Average illuminance at 8:00 and 12:00 on typical day

此外,从图 4 可以看出,在春分日平均照度最高为 423.99 lx,采光效率提高 13.52%,对应的反光片尺寸为 $\alpha=30°$,$\beta=150°$;在夏至日平均照度最高为 530.78 lx,采光效率提高 0.22%,对应反光片尺寸 $\alpha=15°$,$\beta=90°$;在冬至日平均照度最高为 287.65 lx,效率提高 106.33%,对应反光片为 $\alpha=60°$,$\beta=150°$。通过图 3 与图 4 可以看出反光片在春分日及冬至日对采光效率的提升比较明显,在夏至日则几乎没有提升,甚至会降低采光效率。

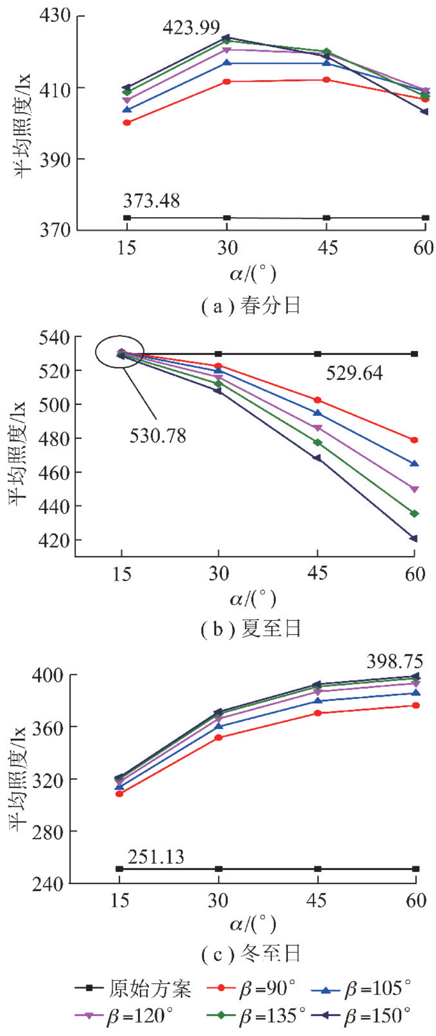


图 4　典型日期全天平均照度

Fig. 4　Average illuminance on typical day

当以春分日反光片的最佳尺寸作为全年使用的方案时,各个典型日期的平均照度如图 5 所示(假设秋分日与春分日平均照度值相同)。从图 5 可以看出增加反光片后,在春秋分及冬至日室内平均照度均有所提高,其中在春分日由 373.48 lx 增加到 423.99 lx,提高 13.52%,同样冬至日也在原有基础上提高了 79.56%,而在夏至日,反光片的使用使得室内平均照度从 529.64 lx 降低到 507.86 lx,减少了 4.11%。另外从全年来看,反光片的使用使得全年室内地面平均照度随季节的变化波动变小,有利于改善室内光环境。

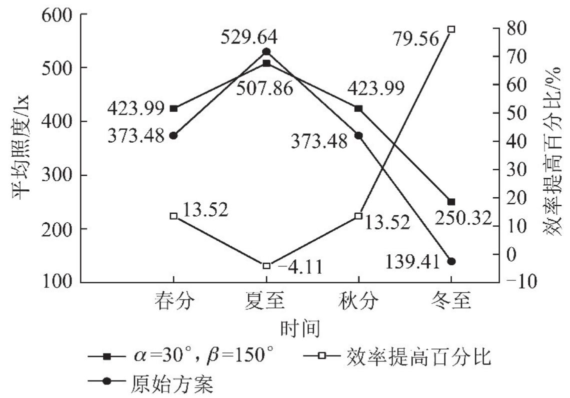


图 5　反光片 $\alpha=30°$,$\beta=150°$时各典型日的平均照度

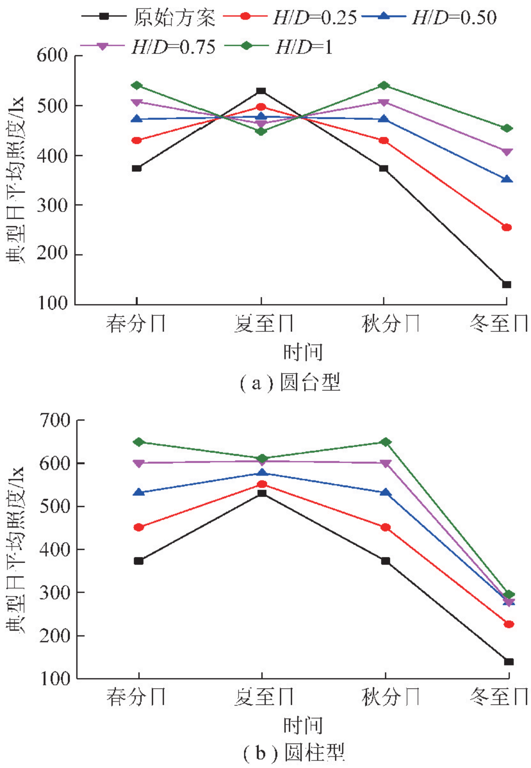
Fig. 5　Average illuminance on typical day with the reflector of $\alpha=30°$ and $\beta=150°$

2.3　反光片在圆台(柱)型采光罩中的应用分析

根据方案二改变采光罩的形状,通过模拟得到增加不同高度的反光片后在各个典型日期的地面平均照度如图 6 所示。由图 6(a)可知,与原始方案相比,圆台型采光罩及反光片的使用使春秋分及冬至日的地面平均照度值明显提高,并且随着 H/D 的增大而逐渐增大,而夏至日与之相反,地面平均照度随着 H/D 的增大而逐渐减小;综合考虑地面的平均照度及其随季节的变化波动,认为当 H/D 为 0.5 或 0.75 时采光效果较为理想。从图 6(b)上可以看到圆柱型采光罩及反光片的应用使得各个典型日期的采光效果都得到了改善,并且地面平均照度值随着 H/D 的增大而逐渐增大;在冬至日,当 H/D 大于 0.5 时,照度值虽有增长但变化不大;当 H/D 取值 0.5 或 0.75 时,采光效果较为理想。

2.4　不同方案的比较

当采用不同的方案时,地面的平均照度随时间变化如图 7 所示,图 8 为各个典型日平均照度。由图 7,8 可知,在春秋分以及冬至日,所有方案均可使采光效率提高。其中采用圆台型采光罩及反光片在春分日 8:00 时采光效果要优于其他方案,而随着时间的变化,圆柱型采光罩及反光片的采光效果变为最优,当 $H/D=0.75$ 时,在春分日全天平均照度最高;在冬至日,圆台型采光罩及反光片的采光效果明显优于其它方案,并且当 $H/D=0.75$ 时采光效果最佳,说明此方案对于低角度入射光线的收集能力较强。在夏至日,圆台型和球型方案相似,均会使采光效率降低,而圆柱型虽然在早晨 8:00 会使地面照度小幅度下降,但在 9:00 之后,地面平均照度均要明显高于原始方案,同时全天的平均照度值也是最高的。因此,



(a) 圆台型

(b) 圆柱型

图 6 反光片高度对采光的影响

Fig. 6 Effect of the height of reflector on daylighting

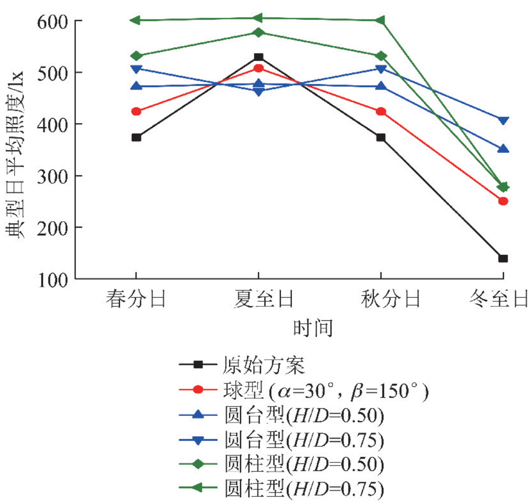


图 7 不同方案在各个典型日期的平均照度

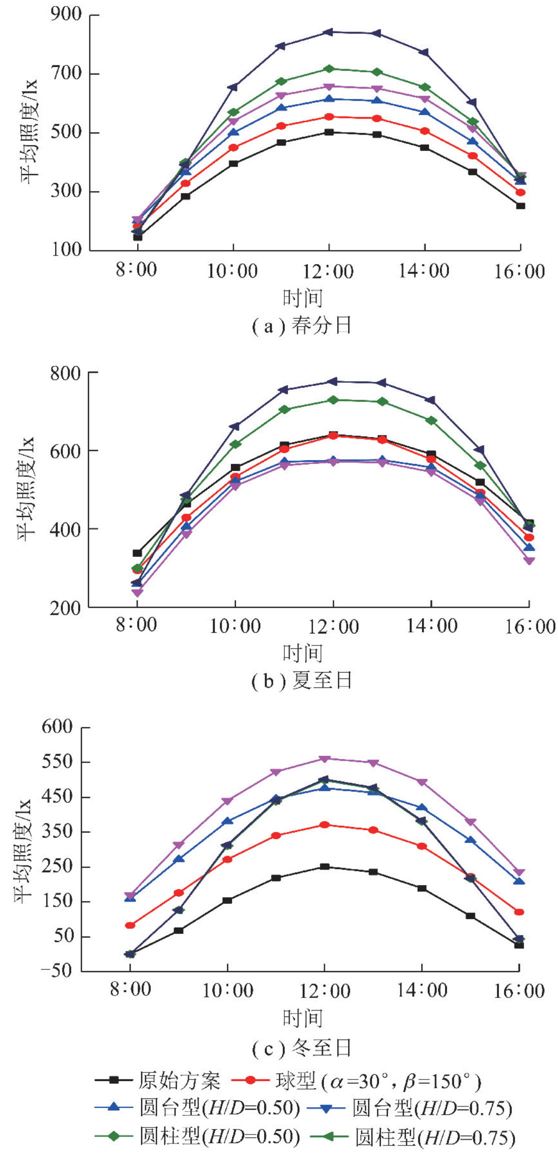
Fig. 7 Average illuminance of different projects on each typical date

综合考虑不同方案在各个典型日期的照度,通过对比可知直射光线条件下,采用圆柱型采光罩及反光片是最佳的方案。

3 实 验

3.1 实验条件及数据处理

本实验在北京通州区的两间办公室进行,四周无其他建筑遮挡,能保证导光管的充分采光,适宜作为采光研究对象。办公室 A 的大小为 2.8 m×2.2 m×2.8 m(长×宽×高),办公室 B 为 2.8 m×2.6 m×2.8 m。实验用导光管的直径为 530 mm,长 800 mm,导光管内表面反射率大于 99%。其中办公室 A 为对照实验,采用球型采光罩,办公室 B 则在采光罩内增加 $\alpha=15°$,$\beta=150°$的反光片。



(a) 春分日

(b) 夏至日

(c) 冬至日

图 8 不同方案地面平均照度随时间的变化

Fig. 8 Change of average illuminance with time

由于两间办公室的面积不同,故从导光管在各个时刻引入的光通量的变化来分析导光管的采光性能。

分布光度计法是一种适合于任何光源的测量光通量的方法,其基本公式为

$$\Delta\varphi = E\Delta S \tag{3}$$

式中,$\Delta\varphi$ 为照射小区光通量,lm;ΔS 为照射小区间面积,m^2;E 为照射小区平均照度,lx。

总光通量为

$$\varphi = \sum_{n=1}^{m}\Delta\varphi_n = \sum_{n=1}^{m}E_n\Delta S_n \tag{4}$$

本实验根据式(4)进行计算,以距地面 0.75 m 为测试平面,根据房间大小划分网格,如图 9 所示。每个网格中心布置一个测点,两个办公室共计 50 个测点,将测点照度看做所在网格区域的平均照度值,并将其和网格面积代入式(3),依次计算各个网格的光通量并代入式(4)算出总光通量。实验在北京 8 月份的晴天、多云天及阴天 3 种典型天气下进行,实验仪器采用 TES-1339r 型全数字照度计,测量误差为±3%。

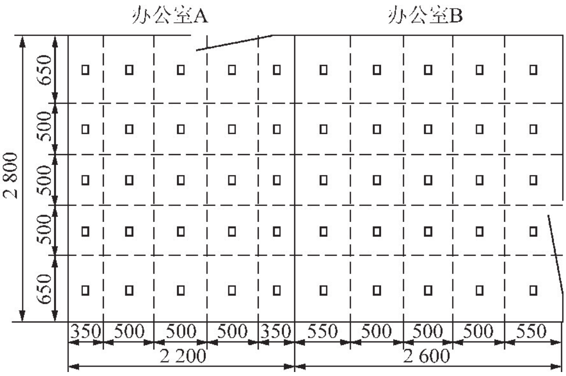


图 9　网格划分

Fig. 9　Grid drawing

3.2　模拟与实验的对比

根据实验时房间的大小、导光管规格、太阳高度角及方位角变化重新建立模型,其他参数不变,在直射光下对两间办公室的采光情况进行模拟,导光管在各时刻引入光通量的模拟值与实测值见表 4 和图 10。

表 4　导光管在各时刻引入的光通量

Table 4　Luminous flux introduced by light pipe

时刻	办公室 A			办公室 B		
	实测值/lm	模拟值/lm	误差/%	实测值/lm	模拟值/lm	误差/%
10:00	5 034	5 699	13.21	5 475	6 437	17.55
11:00	7 276	7 109	-2.30	8 026	7 957	-0.86
12:00	8 987	8 089	-9.99	9 554	9 012	-5.67
13:00	8 087	7 298	-9.76	8 584	8 160	-4.94
14:00	5 970	6 096	2.11	6 780	6 860	1.17

从表 4 及图 10 可以看出,增加反光片后,在各时刻办公室 B 的光通量均大于办公室 A,实测结果与模拟结果相符,表明此时反光片的应用有利于改善采光性能;在 10:00 和 14:00 时,模拟值要大于实测值,而在 11:00 至 13:00,模拟值均小于实测值,主要是因为模拟时不同时刻直射光的辐照度均为 500 W/m^2,实际情况下该值随时间而变化,中午较高,早晚较低;

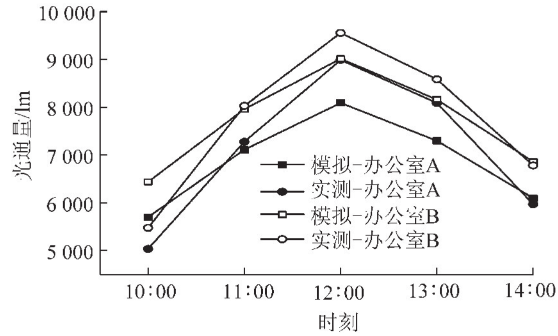


图 10　模拟值与实测值的对比

Fig. 10　Comparison of simulated and measured lumen values

模拟值与实测值的误差均在±20%之间,认为模拟结果是比较可靠的,其中最大误差为 17.55%,出现在 10:00。在 10:00—14:00,实验结果表明反光片的应用使平均入射光通量提高了 8.67%。

3.3　不同天气条件下光通量变化

根据实验结果得到的在晴天、多云天及阴天 3 种典型天气下光通量随时间的变化曲线如图 11 所示。由图 11 可知,晴天时,导光管引入的光通量变化曲线较为光滑,有明显的峰值,最大值为 8 987 lm(办公室 A)、9 554 lm(办公室 B),均出现在 12:00,并且办公室 B 的光通量均要大于办公室 A;在阴天时,光通量变化曲线较为平缓,并且办公室 A 的光通量要略大于办公室 B,主要原因在于阴天时均为漫射光,而采光罩内的反光片起到了遮挡的作用,不利于采光;在多云天时,随着天空中云层厚度及位置的变化,直射光与漫射光也随之变化,导致采光情况比较复杂多变,曲线存在不规则变点。

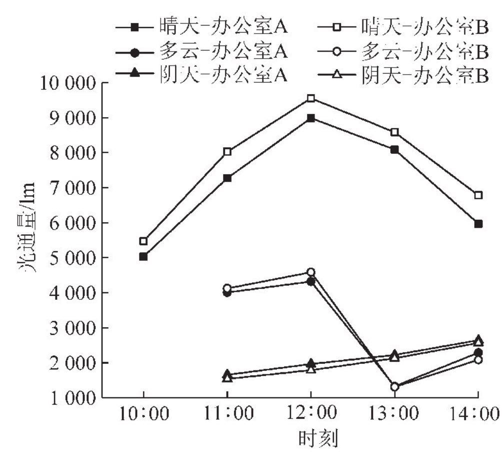


图 11　不同天气下光通量随时间的变化

Fig. 11　Hourly luminous flux variation on different weather

4　结　　论

(1)在半球型采光罩中,反光片的最佳大小为 $\alpha=30°$,$\beta=150°$,在春分日和冬至日可分别使采光效

率提高 13.52% 和 79.56%，但在夏至日会降低 4.11%。

(2)圆台型采光罩及反光片的应用可以加强对低角度入射光线的收集，有效地提高春分日及冬至日的采光效率，并且随着 H/D 值增加而增加，但会小幅度降低夏至日的采光效率；圆柱型采光罩及反光片的应用可使各个典型日期的采光效率均得到提高，并且采光效率提高百分比是 H/D 值的增函数。

(3)不同方案中，当采用圆柱型采光罩并且反光片 $H/D=0.75$ 时，采光效果最为理想。

(4)模拟结果与实验结果规律一致，在晴天直射光下反光片可有效改善导光管采光性能，在阴天时则相反。

除了天气、太阳运动规律等因素外，传光距离对导光管采光效果也有较大影响，如何在长距离传光的情况下仍能保证采光效果还需要进一步的研究。

参考文献(References)：

[1] 谢兵. 煤矿井下照明设备节能技术的研究[J]. 电子世界，2012，47(23)：31-32.
XIE Bing. Energy-saving technology of underground lighting equipment in coal mine[J]. Electronics World，2012，47(23)：31-32.

[2] 张少波. 煤矿能耗现状分析及节能技术发展方向[J]. 煤炭科学技术，2009，37(5)：83-85.
ZHANG Shaobo. Energy consumption status analysis and energy saving technology development tendency in coal mine[J]. Coal Science & Technology，2009，37(5)：83-85.

[3] HRASKA J. Chronobiological aspects of green buildings daylighting[J]. Renewable Energy，2015，73：109-114.

[4] 谢和平，王金华，王国法，等. 煤炭革命新理念与煤炭科技发展构想[J]. 煤炭学报，2018，43(5)：1187-1197.
XIE Heping，WANG Jinhua，WANG Guofa，et al. New ideas of coal revolution and layout of coal science and technology development[J]. Journal of China Coal Society，2018，43(5)：1187-1197.

[5] 谢和平，高峰，鞠杨，等. 深地科学领域的若干颠覆性技术构想和研究方向[J]. 四川大学学报(工程科学版)，2017，49(1)：1-8.
XIE Heping，GAO Feng，JU Yang，et al. Novel idea and disruptive technologies for the exploration and research of deep earth[J]. Advanced Engineering Sciences，2017，49(1)：1-8.

[6] 谢和平，高明忠，刘见中，等. 煤矿地下空间容量估算及开发利用研究[J]. 煤炭学报，2018，43(6)：1487-1503.
XIE Heping，Gao Mingzhong，Liu Jianzhong，et al. Research on exploitation and volume estimation of underground space in coal mines[J]. Journal of China Coal Society，2018，43(6)：1487-1503.

[7] OAKLEY G，RIFFAT S B，SHAO L. Daylight performance of lightpipes[J]. Solar Energy，2000，69(2)：89-98.

[8] PARONCINI M，CALCAGNI B，CORVARO F. Monitoring of a lightpipe system[J]. Solar Energy，2007，81(9)：1180-1186.

[9] VASILAKOPOULOU K，KOLOKOTSA D，SANTAMOURIS M，et al. Analysis of the experimental performance of light pipes[J]. Energy & Buildings，2017，151：242-249.

[10] 吴延鹏，马重芳. 冬季晴天侧采光光导管实验研究[J]. 工程热物理学报，2004，25(S1)：181-183.
WU Yanpeng，MA Chongfang. Experimental research on side lighting light pipe under sunny conditions in winter[J]. Journal of Engineering Thermophysics，2004，25(S1)：181-183.

[11] 王伟，李双菊，马重芳. 光导管冬季采光性能的实验研究[J]. 太阳能学报，2008，29(12)：1489-1493.
WANG Wei，LI Shuangju，MA Chongfang. Experimental study on lighting performance of light pipe in winter[J]. Acta Energiae Solaris Sinica，2008，29(12)：1489-1493.

[12] 李双菊，王伟，马重芳. 光导管采光性能实验研究与分析[J]. 太阳能学报，2009，30(5)：586-590.
LI Shuangju，WANG Wei，MA Chongfang. Experimental study and analysis on lighting performance of light pipe[J]. Acta Energiae Solaris Sinica，2009，30(5)：586-590.

[13] 高民东，徐广强，曹冠英，等. 辽宁大连地区标准阴天条件下光导管效率与照度分布的模拟分析[J]. 太阳能学报，2017，38(8)：2303-2308.
GAO Mingdong，XU Guangqiang，CAO Guanying，et al. Simulation analysis of efficiency and illumination distribution of light guide under CIE overcast sky condition in Dalian area，Liaoning[J]. Acta Energiae Solaris Sinica，2017，38(8)：2303-2308.