

# 红外大气透过率的计算模式

陈秀红 魏合理 徐青山

(中国科学院安徽光学精密机械研究所 大气成分与光学重点实验室,安徽 合肥 230031)

**摘要:** 建立了一套具有自主知识产权的红外大气透过率模式 (IATM),光谱分辨率为  $1\text{ cm}^{-1}$ ,可较快速地计算空间任意两点的红外大气光谱透过率。大气分子吸收计算是采用基于精确的 LBLRTM 逐线积分算法而提出的一种非线性拟合算法,结合了最新的 HITRAN2004 数据库中的分子吸收线参数,除了保留 MODTRAN 中的几种气溶胶衰减的计算模式外,还增加了一种根据实测尺度谱分布和气溶胶消光高度分布的计算模式,并嵌入了我国典型地区的逐月平均的大气模式。文中对软件作了详细介绍,并验证了计算精度、速度和可靠性。该软件的研制有利于提高我国区域内应用场景红外大气透过率计算的精度,对于红外系统的设计和性能评估也具有参考价值。

**关键词:** 大气透过率; 红外; LBLRTM; HITRAN2004; 气溶胶尺度谱分布

**中图分类号:** P401 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2011)05-0811-06

## Infrared atmospheric transmittance calculation model

Chen Xiuhong, Wei Heli, Xu Qingshan

(Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics & Fine Mechanics,  
the Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

**Abstract:** A set of infrared atmospheric transmittance model(IATM) with self-determination property right of knowledge was developed with a spectral resolution of  $1\text{ cm}^{-1}$ . It could be used to calculate fast spatial infrared atmosphere transmittance. A non-linear fitting algorithm based on LBLRTM line-by-line integral arithmetic was used to calculate the absorption of atmospheric molecules, which combined newly molecule absorbing line parameters of HITRAN2004 database. An aerosol computation model based on measured size distribution and height distribution of aerosols was added to calculate aerosol extinction, except reserving the aerosol extinction models in MODTRAN. The monthly-averaged atmosphere models in typical regions of China were embedded. The calculation precision of this software is higher than MODTRAN because of these characteristics. The software was introduced in details and its precision, calculation speed and reliability were tested. The development of IATM is beneficial to enhancing the calculation precision of infrared atmospheric transmittance in region of China. It has reference value for the design of infrared system and the performance evaluation.

**Key words:** atmospheric transmittance; infrared; LBLRTM; HITRAN2004;  
size distribution of aerosol

收稿日期:2010-08-02; 修订日期:2010-09-26

基金项目:国家自然科学基金(61077081);中国科学院合肥物质科学研究院青年人才基金和装备预研基金

作者简介:陈秀红(1980-),女,副研究员,博士,主要从事大气辐射传输模式、云辐射传输模式方面的研究。Email: xhchen@aiofm.ac.cn

## 0 引言

红外辐射的大气透过率对红外系统(如跟踪系统、搜索系统、警戒系统和热成像系统等)的设计、性能评估等具有重要影响。在这些方面的研究中,大多数人都是借助于国际上流行的辐射传输软件(如LOWTRAN<sup>[1]</sup>、MODTRAN<sup>[2]</sup>)进行红外大气透过率的计算<sup>[3-4]</sup>,而这些模式采用的是带参数算法,计算精度不是很高。而高精度的逐线积分法LBLRTM<sup>[5]</sup>计算速度较慢,难以满足一些工程应用上的需求。此外,这些软件所使用的大气参数都是美国空军地球物理实验室(AFGL)提供的按纬度划分的6种大气模式,而我国的地理位置十分复杂,大气条件千差万别,将这6种大气模式应用到国内肯定会带来一定的误差。

1995年,魏合理老师等人<sup>[6]</sup>编制了一个红外辐射大气透射率计算的软件包,其中分子吸收采用LOWTRAN7中的单参数带模式的计算方法,气溶胶模式直接采用LOWTRAN7中的计算方法,虽然增加了国内若干地点的大气模式,但是所使用的统计数据来源于1960~1969年10年的观测结果。而大气参数尤其是温度和水汽含量随着时间的变化肯定会有所差异,收集的资料越多,时间越接近当前,计算结果才会越准确。

笔者研制了一套具有自主知识产权的红外大气透过率软件,命名为红外大气透过率模式(IATM),用来快速计算空间任意两点之间的红外大气光谱透过率,光谱分辨率为 $1\text{ cm}^{-1}$ 。软件采用基于精确的LBLRTM逐线积分计算大气分子吸收,同时结合最新的HITRAN2004分子吸收线参数数据库,既保证了计算精度又提高了计算速度;气溶胶衰减部分除了保留MODTRAN中的几种气溶胶衰减计算模式外,还增加了一种根据实际测量的气溶胶尺度谱变化和气溶胶高度分布计算的气溶胶消光模式,使气溶胶衰减计算更准确;另外,还嵌入了我国典型地区1950~2005年56年逐月平均的大气模式,更适用于国内的应用场景研究。利用该软件可以提高我国区域内的红外目标辐射测量的精度,优化红外系统的设计及性能评估。文中对软件作了详细的介绍,并对其计算精度、速度和可靠性进行了比较验证。

## 1 红外大气透过率软件算法

大气透过率计算包括大气分子的吸收、分子连续吸收和散射、气溶胶的衰减3部分。

### 1.1 大气分子吸收算法

大气分子的吸收主要考虑7种吸收气体分子的吸收: $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{O}_3$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{O}_2$ 。对每种分子用LBLRTM逐线积分法计算单色的分子吸收光学厚度,然后按下式平滑到 $1\text{ cm}^{-1}$ 的光谱间隔:

$$\bar{T}_v(t,p,u) = \frac{\int_{v-\Delta v/2}^{v+\Delta v/2} \exp[-k_v(t,p)u] dv}{\int_{v-\Delta v/2}^{v+\Delta v/2} dv} \quad (1)$$

式中: $k_v(t,p)$ 为温度为 $t$ 、气压 $p$ 时用LBLRTM计算的某种气体在波数 $v$ 处的吸收截面; $u$ 为吸收气体含量; $v/2=0.5\text{ cm}^{-1}$ 。

在使用LBLRTM软件计算时,需要用到分子吸收线参数。2004年以前甚至现在,很多人还一直用HITRAN2000数据库中的线参数进行大气透过率的计算。但是笔者在使用该版本的数据库时发现,2000版本的数据在某些谱线上出现了问题,采用2000和2004两个版本的数据库的水汽线参数计算 $3.7\text{ }\mu\text{m}$ 波段的水汽吸收,比较结果如图1所示。图中, $t=293.66\text{ K}$ , $p=16\text{ hPa}$ , $u=11.8\text{ g/m}^3$ , $\text{range}=1.097\text{ km}$ 。

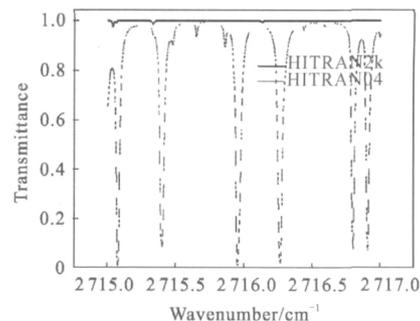


图1 HITRAN2000和HITRAN2004数据库的比较

Fig.1 Comparison of HITRAN2000 and HITRAN2004 database

可以看出,两个版本的数据库计算 $3.7\text{ }\mu\text{m}$ 水汽透过率的结果截然不同,用HITRAN2000数据库计算出来的水汽吸收几乎为0,透过率几乎为1,而用HITRAN2004数据库计算出来的水汽吸收存在着吸收峰,这与魏合理等人<sup>[7]</sup>测量得到的 $3.7\text{ }\mu\text{m}$ 吸收谱线相吻合,说明2004版HITRAN数据库较以前版本更为精确。因此,采用HITRAN2004数据库进行大气透过率的计算。

计算时选取 9 个参考温度 (200、215、230、245、260、275、290、305 和 320 K) 和 9 个参考气压 (1 100、350、100、35、10、3.5、1、0.35 和 0.1 hPa)。在每种气压和温度下,计算 50 种气体含量(跨约 5 个数量级)下的值。这些参考气压、参考温度和 50 种气体含量涵盖了所有有可能的大气条件。然后采用公式(2)4 阶非线性拟合算法来拟合大气吸收随吸收气体含量的关系,得到了 5 个拟合系数  $c_i(t,p)(i=0,\dots,4)$ 。

$$T_{\text{mole},j}(t,p,u)=\exp\{-u_j \cdot \exp(\sum_{i=0}^M c_{i(t,p)}[\log(u_j)]^i)\} \quad (2)$$

式中: $T_{\text{mole},j}(t,p,u)$ 为给定波数  $\nu$ 、温度  $t$ 、气压  $p$  和吸收含量  $u$  下的第  $j$  种分子的吸收透过率。这样,每个波数点上共有  $9 \times 9 \times 5 = 405$  个系数可供使用。在实际计算时,可以用插值法得到任意温度和气压的拟合系数。对于斜程路径大气传输,考虑大气的非均匀性,通常采用 Curtis-Godson(CG) 近似,拟合系数在传输路径上按吸收加权平均,得到  $\tilde{C}_i(t,p)(i=0,\dots,4)$

$$\tilde{C}_i = \frac{\int C_i(t,p) \cdot \bar{k} \cdot du_j(t,p)}{\int \bar{k} \cdot du_j(t,p)} \quad (3)$$

式中: $\bar{k}$ 为温度  $t$ 、气压  $p$ 、吸收含量  $u$  时的等效吸收截面。得到任意加权平均的 5 个吸收系数后,给定传输路径上的吸收气体含量,按

$$T_{\text{mole},j}=\exp\{-V \cdot \exp(\sum_{i=0}^M \tilde{C}_i(t,p)[\log(V)]^i)\}, V = \int du_j \quad (4)$$

即可求得传输路径上的分子吸收透过率。

为了验证分子吸收计算精度的优越性,把 IATM、MODTRAN 计算的结果与 LBLRTM 精确计算的结果进行比较,如图 2 所示。图中上部分别是 MODTRAN、IATM 和 LBLRTM 计算的结果,中间部分是 MODTRAN 与 LBLRTM 的计算结果的差别,下部是 IATM 和 LBLRTM 计算结果的差别。计算条件都是假定中纬度夏季大气模式、地面到大气顶垂直传输,波段范围 800~1000 $\text{cm}^{-1}$ (10~12 $\mu\text{m}$ )。可以看出,图中的下部分曲线比中间部分曲线更平滑,说明所研制的这套软件的分子吸收模块的计算结果比 MODTRAN 软件的计算结果更接近精确计算的结果,计算精度有所提高。

同时还对 IATM 的分子吸收计算速度和 LBLRTM 的计算速度进行了比较,在奔腾 4、2.8G CPU、256M 内存电脑上进行,波段范围 830~3 335  $\text{cm}^{-1}$  (3~12  $\mu\text{m}$ ),

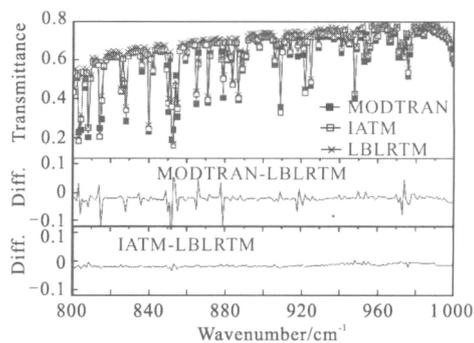


图 2 IATM、MODTRAN 和 LBLRTM 的比较结果

Fig.2 Results of IATM and MODTRAN compared with LBLRTM

计算条件为斜程传输 0~100 km (大气顶)。比较发现: IATM 需要 3.2s,而 LBLRTM 约需要 10min。由此可见, IATM 的计算速度比 LBLRTM 约快 200 倍,计算速度大大提高了。

### 1.2 大气分子连续吸收和分子散射

采用目前国际上比较公认的最新的 MT\_CKD 方法,可计算  $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{O}_2$ 、 $\text{N}_2$  和  $\text{O}_3$  5 种分子的连续吸收,分子散射则用瑞利散射公式进行计算。分子连续吸收和分子散射透过率(记作  $T_{\text{cont}}$ )计算的算法见参考文献[8]。

### 1.3 气溶胶衰减

气溶胶的衰减(吸收和散射)计算除了采用 MODTRAN 中的气溶胶模式外,还增加了一种根据实测气溶胶尺度谱分布和气溶胶高度分布计算的气溶胶模式。实际的气溶胶尺度谱分布可以由仪器(如光学粒子计数器 OPC<sup>[9]</sup>)测得,并按下式拟合 Junge 谱而提供实时的 Junge 指数  $\nu$ :

$$\frac{dN}{dr} = N_0 \cdot r^{-(\nu-1)} \quad (5)$$

给定气溶胶复折射率  $m$  及其随波长变化,用 Mie 程序计算气溶胶衰减效率因子  $Q_e$ ,得到地面上(0km)归一化到 0.55  $\mu\text{m}$  波长气溶胶的相对衰减系数  $\sigma_c^1(\lambda, 0)$ :

$$\sigma_c(\lambda, 0) = \int_{r_1}^{r_2} \pi r^2 Q_e(\lambda, m) \frac{dN}{dr} dr \quad (6)$$

$$\sigma_c^1(\lambda, 0) = \frac{\sigma_c(\lambda, 0)}{\sigma_c(0.55, 0)} \quad (7)$$

给定地面能见度  $vis$ ,则其他波长上的绝对气溶胶衰减系数为:

$$\beta(\lambda, 0) = \sigma_c^1(\lambda, 0) \cdot (3.912/vis - \beta_M) \quad (8)$$

式中: $\beta_M$ 表示近地面分子衰减,在海平面一般近似取 0.001 159  $\text{km}^{-1}$ 。

根据实测的气溶胶高度分布,如激光雷达测量的衰减系数廓线,归一化到近地面的消光系数,得到雷达波长上、地面到雷达测量高度区间各个高度上的相对消光系数  $N(h)$ 。雷达测量高度以上至 30 km,则直接用 MODTRAN 给出的高度分布  $N(h)$ ,30 km 以上可以不考虑气溶胶的衰减。

最后任意波长和任意高度的消光系数近似为地面消光系数  $\beta(\lambda, 0)$  乘以高度分布  $N(h)$ , 即:

$$\beta(\lambda, h) \approx \beta(\lambda, 0) \cdot N(h) \quad (9)$$

从而,地面到  $H$  高度上气溶胶的衰减为:

$$T_{\text{aer}} = \exp\left[-\int_0^H \beta(\lambda, h) \cdot dh\right] \quad (10)$$

以上建立的气溶胶模式由于考虑了实际测量的尺度谱分布和高度分布,计算精度会得到改善。为了验证建立的气溶胶模式计算结果的准确性和优越性,把建立的模式计算值及 MODTRAN 软件计算值和光栅太阳辐射计(pgs100)的实测值进行比较。取 2008 年 8 月 6 日 9:30 在合肥地区测得的大气参数,建立的气溶胶模式输入参数和 MODTRAN 输入参数见表 1,表中的  $rh$  表示相对湿度。激光雷达廓线见图 3。

表 1 两种气溶胶模式的输入参数

Tab.1 Input parameters in the two models

	dN/dr	$N(h)$	vis/km	rh
IATM	Measured $v=3.0$	Measured, see Fig.3	11.3	79%
MODTRAN	Continental	Spring-fall type	11.3	79%

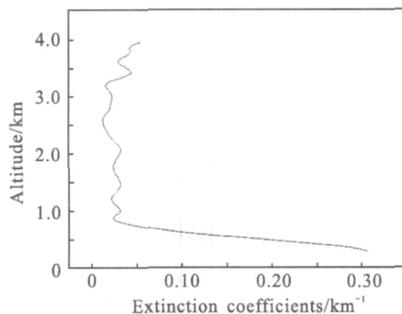


图 3 532 nm 激光雷达实测气溶胶廓线

Fig.3 Aerosol extinction profile measured by 532 nm MPL lidar

同样时刻的整层气溶胶透过率用 pgs100 测得,经定标并扣除大气分子吸收和大气分子连续吸收后得到整层并转换到垂直方向上的气溶胶透过率。图 4 为两种模式计算结果和 pgs100 实测结果的比较,可以看出所建立的气溶胶模式的计算结果与实际结果

更接近,随光谱变化的趋势非常一致,两者的绝对差别的均方根为 0.015 61,而 MODTRAN 计算气溶胶透过率的值偏低(光学厚度偏大),和实际结果的绝对差别的均方根为 0.026 81。表明:所建立模式的计算结果和实测结果是相符合的,且比 MODTRAN 模式有优越性。

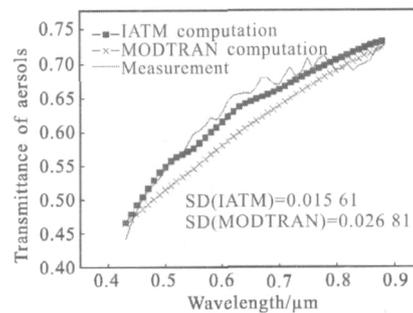


图 4 模式计算值和实测值比较

Fig.4 Comparison of calculated results by models with measured aerosol spectral atmospheric transmittance

#### 1.4 总透过率计算

大气总的透过率为各部分透过率的乘积,即:

$$T = \prod_{j=1}^7 T_{\text{mole},j} \cdot T_{\text{cont}} \cdot T_{\text{aer}} \quad (11)$$

## 2 可靠性验证

为了验证软件计算结果的可靠性,将软件的计算值和红外傅里叶光谱辐射计 FTIR 的实测值进行比较,FTIR 测量水平大气透过率的实验装置如图 5 所示。

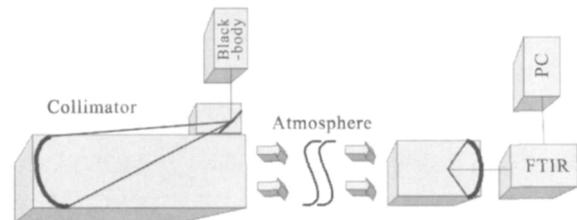


图 5 水平大气透过率测量装置

Fig.5 Measuring equipment of the horizontal atmosphere transmittance

图中,发射系统通常采用高温标准黑体(1 000 °C)作为辐射光源。该光源通过一小孔光阑,经一离轴抛物面准直镜准直后,平行地发射出去,接收系统主要由一台干涉型 Michelson 红外光谱辐射计构成,光谱分辨率可以达到  $1 \text{ cm}^{-1}$ 。FTIR 有 MCT 和 InSb 两个探测器,它们的响应波段各不相同。通过比较一定距离上的测

量信号与出口处信号得到大气的光谱透过率。

文中选取了 2007 年 7 月 18 日在合肥地区利用 FTIR 测得的一组红外大气透过率,同时测量的大气参数如表 2 所示。由于 FTIR 测得的大气透过率光谱间隔和软件计算输出的光谱间隔不一致,为了便于比较,把测量值和计算值的分辨率同时降低到  $5\text{ cm}^{-1}$  分辨率,然后计算两者的差别,比较结果如图 6 所示,两者差的标准偏差小于 0.04。从图上还可以看出,软件计算结果的波数和实测的波数非常一致,几乎没有光谱偏差。可知,软件计算结果是可靠的。Wei 等人<sup>[10]</sup>也曾把此分子吸收算法的计算结果和 AIRS 卫星及机载 HIS 实际观测的结果进行了比较,计算结果和实测结果也符合得非常好。

表 2 2007 年 12 月 19 日在合肥地区实测大气参数  
Tab.2 Atmospheric parameters measured in Hefei on Dec.19, 2006

Range /m	H <sub>2</sub> O density /ppmV	CO <sub>2</sub> density /ppmV	p/hPa	t/K	rh	vis /km
1 000	17 186.9	380	1 017	291	85%	3.6

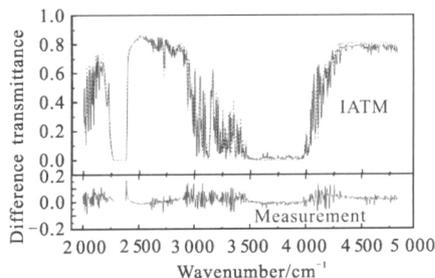


图 6 软件计算值与 FTIR 实测值的比较

Fig.6 Comparison between results calculated by IATM and those measured by FTIR

### 3 我国典型地区的大气模式

我国地理位置复杂,大气条件千差万别,用美国标准大气模式进行我国区域内应用场景的红外大气透过率计算肯定会带来误差。为此,笔者搜集了 3 个典型地区(西北地区、沿海地区和大陆地区)1950~2005 年共 56 年的探空资料(包括气压、温度、水汽等各种分子数密度),对这些资料进行逐月统计,得到 3 个典型地区 1~12 月逐月平均和年平均的大气参数模式,各模式廓线参见参考文献[11]。图 7 比较了用近似大

气模式和我国大气模式计算的红外大气透过率的差别,图中,(a)是用西北地区 1~12 月和用中纬度冬季大气模式近似计算结果的差别,(b)是用沿海地区 1~12 月和用热带大气模式近似计算结果的差别,(c)是用大陆地区 1~12 月和用中纬度夏季近似计算结果的差别。从图上可以看出,最大差别可以达到 50%左右。由此可见,用美国标准模式来近似我国的大气模式将会带来非常大的误差,而采用我国的大气模式进行红外大气透过率的计算,将有利于提高计算精度。

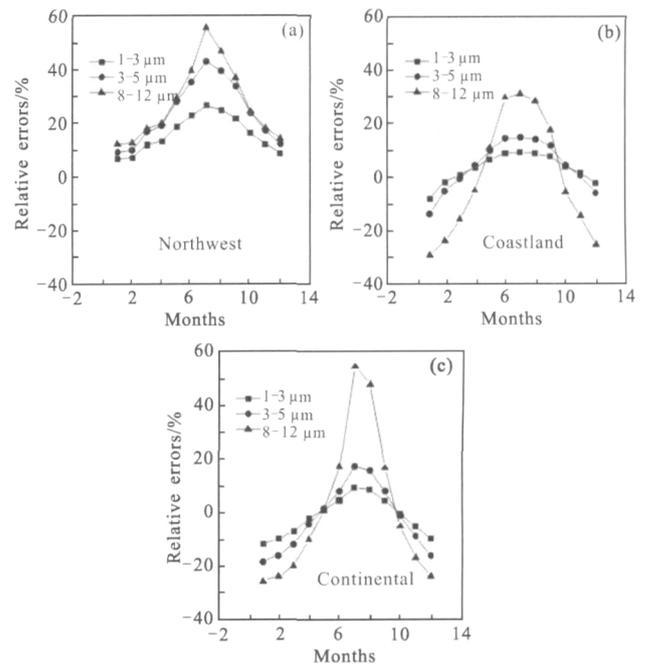


图 7 用国外大气模式近似和用我国大气模式计算结果的相对误差

Fig.7 Relative errors of the results calculated with approximate foreign atmospheric models and with those in regions of China

### 4 结束语

研制了一套具有自主知识产权的红外辐射大气透过率软件,可以计算空间任意两点之间的红外大气光谱透过率。和国际上流行的辐射传输软件MODTRAN相比,其计算精度有所提高,计算速度比LBLRTM提高了约 200 倍;其速度和可靠性也已得到验证。软件的研制有利于提高我国区域内应用场景红外大气透过率计算的精度,对于红外系统的设计和性能评估也具有参考价值。

参考文献:

[1] Kneizys F X, Shettle E P, Gallery W O, et al. Users Guide

- to Lowtran 7[R]. AFGL-TR-88-0177, 1988.
- [2] Berk A, Anderson G P, Acharya P K, et al. MODTRAN4 User's Manual [M]. Hanscom AFB MA: Air Force Research Laboratory Space Vehicle Directorate Air Force Material Command, 1997.
- [3] Chen Yuheng, Zhou Jiankang, Chen Xinhua, et al. Calculation of SNR of a satellite CCD camera based on MODTRAN[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(5): 910-914. (in Chinese)  
陈宇恒, 周建康, 陈新华, 等. 基于 MODTRAN 模型计算星载 CCD 相机信噪比[J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(5): 910-914.
- [4] Ye Qing, Sun Xiaoquan, Shao Li. Analysis of optimum detective wavebands for infrared early-warning satellite [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(3): 389-393. (in Chinese)  
叶庆, 孙晓泉, 邵立. 红外预警卫星最佳探测波段分析[J]. *红外与激光工程*, 2010, 39(3): 389-393.
- [5] AER's Radiative Transfer Working Group. AER's public release radiative transfer models and databases [OL]. 2002-09-30. <http://www.rtweb.aer.com>.
- [6] Wei Heli, Song Zhengfang. The calculation of infrared atmospheric transmittance[J]. *J Infrared Millim Waves*, 1995, 14(2): 159-160. (in Chinese)  
魏合理, 宋正方. 红外辐射大气透射率的计算[J]. *红外与毫米波学报*, 1995, 14(2): 159-160.
- [7] Wei Heli, Wu Chengjiu, Ma Zhijun, et al. A new method for improving the measurement spectral resolution of atmospheric absorption spectra[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(2): 165-169. (in Chinese)  
魏合理, 邬承就, 马志军, 等. 提高大气吸收光谱测量分辨率的新方法[J]. *光学学报*, 2002, 22(2): 165-169.
- [8] Mlawer E J, Taubman S J, Brown P D, et al. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave[J]. *JGR*, 1997, 102: 16663-16682.
- [9] Li Xuebin, Hu Shunxing, Xu Qingshan, et al. Characteristics measurement of extinction and refractive index of aerosol particles[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, 19(2): 207-210. (in Chinese)  
李学彬, 胡顺星, 徐青山, 等. 大气气溶胶消光特性和折射率的测量[J]. *强激光与粒子束*, 2007, 19(2): 207-210.
- [10] Wei Heli, Chen Xiuhong, Rao Ruizhong, et al. A moderate-spectral-resolution transmittance model based on fitting the line-by-line calculation[J]. *Optics Express*, 2007, 15: 8360-8370.
- [11] Chen Xiuhong, Wei Heli. Variation of infrared atmospheric transmittance based on atmospheric models in typical regions of China [J]. *Laser and Infrared*, 2008, 38(11): 1090-1093. (in Chinese)  
陈秀红, 魏合理. 基于中国典型地区大气模式的红外大气透射率变化特征[J]. *激光与红外*, 2008, 38(11): 1090-1093.

## 下期预览

# 应用加热软化和应力效应的激光加工技术

杨立军, 张宏志, 吴雪峰, 王懋露, 王 扬

(哈尔滨工业大学 机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 常规激光加工技术多是利用高温使材料熔化或气化而达到加工目的, 但是在激光加热过程中引起的材料软化和热应力往往是需要克服的, 探讨了利用激光加热引起的软化和热应力效应进行加工的可行性, 主要研究了激光加热辅助切削技术和激光加热弯曲三维成形技术等非常规激光加工技术, 着重探讨了激光加热辅助切削陶瓷材料的温度场变化、切屑形态和加工表面形貌, 以及激光加热弯曲三维成形过程中轨迹规划策略、温度场、应力场和形变场的传播过程, 建立了两种加工技术的理论分析模型和实验系统, 并用该系统进行大量的实验研究, 获得了比较好的加工效果, 为实际加工奠定了理论基础。