

中等质量恒星在赫罗图中由 E-AGB 星 进入 TP-AGB 星的分界点

洪雅芳[†] 蒋苏云

(浙江师范大学数理与信息工程学院 金华 321004)

摘要 通过对 $3 \sim 10 M_{\odot}$ 恒星在赫罗图上演化轨迹的研究, 分析恒星内部氦壳层燃烧峰值处能量、密度、温度、氦壳层表面光度与恒星表面光度比及恒星半径的变化, 给出了中等质量恒星由早期 AGB 星演化至热脉冲 AGB 星阶段在赫罗图上的分界点, 与 119 颗碳星的观测结果吻合得相当好. 同时提出: 在恒星演化至该分界点之后, 其星风物质损失公式可能需要引入一个与表面光度无关的量以主导超星风的形成. 在此基础上, 通过对考虑湍流压效应下 $5 M_{\odot}$ 恒星的结构和演化及星风物质损失率的分析, 发现湍流压在热脉冲 AGB 星阶段对星风物质损失影响较大, 从而使得热脉冲 AGB 星的湍流压不可忽略, 进而提出了影响热脉冲 AGB 星星风物质损失的可能的物理因素.

关键词 恒星: 演化, 恒星: AGB 星, 恒星: 赫罗图, 恒星: 质量损失, 湍流
中图分类号: P 145; **文献标识码**: A

1 引言

中等质量恒星在其中心氦燃烧结束后, 将形成电子简并的 C-O 核, 其壳层源外部的外壳迅速膨胀, 从而使得恒星向红超巨星演化, 其演化轨迹沿一条渐近巨星分支向上运动, 开始了 AGB 星阶段的演化. AGB 星作为中小质量恒星自主序开始伴有核反应演化的最后一个阶段, 在整个恒星演化的过程中有着相对较高的光度, 因此常被作为研究河外星系的一个重要的工具^[1-4]; 同时, 它在演化成为白矮星之前, 通过超星风的形式把超过 70% 的物质抛射出去^[5], 行星状星云就此形成, 进而膨胀扩散成为星际介质, 从而对星际介质中元素的组成与来源有着不可忽略的影响.

为了系统地了解 AGB 星, Iben 等^[6] 将 AGB 星分为两个阶段, 即早期 AGB 星 (E-AGB) 与热脉冲 AGB 星 (TP-AGB), 热脉冲 AGB 星由于其光度、温度等量的周期性脉动、第 3 次挖掘效应及该过程中伴随的超星风而更引人注目.

超星风的概念最早由 Renzini^[7-8] 于 1981 年引入, 他注意到要产生典型的行星状星云, AGB 后期的物质损失率必须达到 $3 \times 10^{-5} M_{\odot} \cdot \text{yr}^{-1}$. 而这样的损失速率明显是当时由 Reimers^[9] 在 1975 年提出并被广泛使用的星风公式所达不到的. Wood 等^[10] 随后通

2010-11-19 收到原稿, 2011-01-12 收到修改稿

[†] hyfwood@sohu.com

通过对行星状星云核模型进行的分析, 论证出了中心核质量为 $1.4 M_{\odot} > M_c \geq 0.86 M_{\odot}$ 的 AGB 星都能通过超星风抛射物质形成行星状星云. 在观测上, 超星风的存在也得到了进一步的证实, Knapp 等^[11] 与 Wood 等^[12] 发现许多 AGB 星都存在着持续的超星风物质损失, 超星风如此频繁地被观察到, 说明行星状星云并非间歇性抛射而形成的^[13-14]. 然而, 超星风的产生机制至今还不是很清楚, 主要有基于辐射压机制的尘埃驱动星风理论^[15-19]. Iben 等^[6] 提出壳层脉动可能加强星风物质损失, 其间出现的碳元素外迁也可能对星风物质损失率产生一定的影响, 对星风物质损失公式的建立起到了一定的指导作用. 如 Marigo 等^[20] 就在考虑超星风物质损失公式的同时引入了脉动周期 P_0 、恒星表面 C/O 丰度比. 之后, Dominik 等^[21] 于 1990 年首次将质量损失与尘埃的形成与生长联系起来, 相关的星风物质损失半经验公式随之建立^[22-25].

随着理论上对脉动恒星大气及与之相关的质量损失的流体动力学唯象研究的发展, 与恒星星风物质损失相关的观测数据逐步得到完善, 对 AGB 星超星风物质损失公式的拟合寻找也在不断进行着. 基于辐射压机制的假设, 观测上^[26-28] 对于 $\lg \dot{M}-P_0$ 的总结归纳 (\dot{M} 为质量损失率), Vassiliadis 等^[29] 于 1993 年认为在 $P_0 = 500$ d 之前恒星星风物质损失率是以脉动周期的指数函数形式增大的, 而之后则近似以数倍于 $10^{-5} M_{\odot}$ 大小的常数形式存在. 因此将脉动周期函数 P_0 引入了 AGB 星风物质损失公式, 提出了以 $P_0 = 500$ d 为分界点, 对 AGB 星的星风物质损失公式做了分阶段处理. 对于 $M \leq 3 M_{\odot}$ 的恒星, 其理论结果与观测结果能够很好地拟合, 而对于较大质量恒星, 其理论结果与观测值的拟合还不够理想. Blocker^[30] 在这之后也对 AGB 星的星风物质损失做了相关的研究, 同样提出了分界点的观点, 考虑到初始质量大于 $2 M_{\odot}$ 的恒星至少在 $P_0 = 100$ d 之前其星风物质损失都比较少, 故取最低值 $P_0 = 100$ d 为分界点, 在 Reimers^[9] 的基础上对星风物质损失公式进行了修正. 与此类似的, Bergeat 等^[25] 于 2005 年在观测的基础上, 选择了以有效温度 $T_{\text{eff}} = 2900$ K 作为分界点. 分界点的提出为热脉冲 AGB 星阶段的超星风质量损失公式的拟合提供了方便, 但是, 这些都是基于观测上的经验总结, 没有理论的依据.

Iwamoto^[31] 2009 年对贫金属中小质量 AGB 星的研究中, 对恒星自主序开始至 AGB 星过程在赫罗图上的演化轨迹进行了描绘, 图中可以清楚地看到后期由于其光度的下降, 轨迹出现了峰值, 而其峰值过后光度的周期性脉动, 也许可以视为 Becker 等^[32] 所提出的 “minipulses”, 本文利用改进后的 Kippenhahn 恒星结构与演化程序, 通过对 $3 \sim 10 M_{\odot}$ 恒星 (金属丰度 $Z = 0.02$) 从主序开始的恒星演化的计算, 得出此峰值过后在赫罗图上的部分演化轨迹, 从而得以对此峰值做进一步的分析, 从理论上提出在赫罗图上早期 AGB 星演化进入热脉冲 AGB 星的分界点.

在文中的第 2 部分介绍了此次计算用到的恒星模型的参量、星风公式及湍流压的处理, 第 3 部分讲述了理论计算的结果, 在 3.1 节通过理论分析给出了恒星在赫罗图上演化进入热脉冲 AGB 星阶段的分界点, 3.2 节阐明了湍流压对热脉冲 AGB 星的星风有着不可忽略的影响, 3.3 节定性分析了热脉冲 AGB 星的星风物质损失公式可能的修正方式. 第 4 部分给出了本文关于此分界点的确定和应用的一些结论.

2 模型

本文采用改进后的 Kippenhahn 恒星结构与演化程序, 计算了金属丰度为 0.02, 初始质量为 $3 M_{\odot}$ 、 $4 M_{\odot}$ 、 $5 M_{\odot}$ 、 $8 M_{\odot}$ 、 $10 M_{\odot}$ 的恒星从主序星开始到 AGB 星的演化, 对流区的计算采用局地混合程理论^[33-35], 取混合参数 $\alpha = 1.8$, 不考虑对流超射.

2.1 星风

采用 3 阶段的星风损失公式处理方式. 以 T_{eff} 为恒星有效温度, L 为恒星表面光度, M 为恒星质量, R 为恒星半径. 则:

(1) 第 1 阶段

对于中心氢燃烧开始直至中心氢燃烧结束阶段, 此处采用 de Jager 等^[36] 给出的半经验公式:

$$\lg \dot{M} = 1.64 \lg L - 1.61 \lg T_{\text{eff}} + 0.16 \lg M - 7.93. \quad (1)$$

(2) 第 2 阶段

中心氢燃烧结束后至 AGB 星早期阶段采用 Reimers^[9] 给出的经验公式. 以 \dot{M}_r 表示采用 Reimers^[9] 提出的经验公式而得到的恒星质量损失率, 则:

$$\dot{M}_r = 4 \times 10^{-13} \frac{LR}{M} \eta \quad 0.3 < \eta < 3. \quad (2)$$

对于星风损失计算, 不同质量恒星 η 取值略有不同. 本文对于 $3 \sim 8 M_{\odot}$ 恒星采用 $\eta = 1.0$, 对于 $10 M_{\odot}$ 恒星采用 $\eta = 1.5$.

(3) 第 3 阶段

进入 AGB 星后, 若再采用 (2) 式, 则将由于 AGB 星在演化后期会产生巨大的星风, 从观测上^[11] 已不能很好地拟合, 故需加以修正. 此处我们采用 Blocker^[30] 的理论对热脉冲开始后的星风公式进行必要的修正, 令:

$$\dot{M} = 4.83 \times 10^{-9} M^{2.7} L^{2.7} \dot{M}_r. \quad (3)$$

至于从何时开始将星风公式的处理转入第 3 阶段, Blocker^[30] 通过观测拟合, 对此提出了建议. 他以 Ostlie 等^[37] 在 1986 年所定义的基础模型为基础, 即定义一个与热脉动相关的周期函数 P_0 , 令:

$$\lg(P_0/\text{d}) = -1.92 - 0.73 \lg M + 1.86 \lg R, \quad (4)$$

提出对于初始质量大于 $2 M_{\odot}$ 的恒星, 至少在 $P_0 = 100 \text{ d}$ 之前其星风物质损失率比较小, 故在 $P_0 > 100 \text{ d}$ 之后采用第 3 阶段的星风损失公式的处理.

以上各式中, L 、 R 、 M 分别是以 L_{\odot} 、 R_{\odot} 、 M_{\odot} 为单位的, 质量损失率 \dot{M} 以 $M_{\odot} \cdot \text{yr}^{-1}$ 为单位.

2.2 湍流压

湍流压 P_t 为密度 ρ 及平均对流元速度 \bar{v} 的函数, 取其表达式^[38-41] 为:

$$P_t = \rho \bar{v}^2, \quad (5)$$

本文将适当考虑湍流压对恒星演化,特别是对热脉冲 AGB 星阶段可能带来的影响.在此,我们结合蒋苏云等^[38-39]与 Demarque 等^[42]所提出的对湍流压的处理,在忽略磁压和自转效应的前提下,对静力学平衡公式做出适当的修正.当其处理对流区时,令:

$$\nabla(P + P_t) = -\rho g, \quad (6)$$

$$P = P_g + P_R, \quad (7)$$

其中 P_R 为辐射压强, P_g 为气体压强, g 为重力加速度.从而得以考虑湍流压对恒星演化各阶段所产生的影响.

3 结果和分析

3.1 热脉冲 AGB 星在赫罗图上的起点

3.1.1 对 $5 M_{\odot}$ 恒星的详细分析

图 1 示意了 $5 M_{\odot}$ 恒星在赫罗图中的演化轨迹.由图 1,我们可以看到令人惊讶的结果:赫罗图(HR 图)上曲线在达红超巨星阶段后向右下方偏折.为了研究其所处状态,我们给出了内部温度密度关系图(图 2)及 He 壳层燃烧的各量的变化情况(图 3).

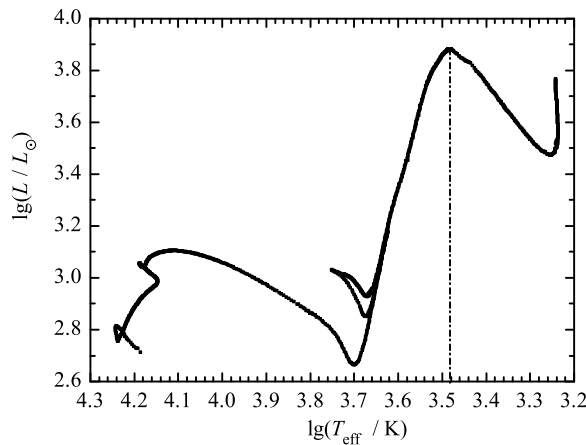


图 1 $5 M_{\odot}$ 恒星在赫罗图中的演化轨迹

Fig. 1 Evolutionary track in HR diagram for $5 M_{\odot}$ star

由图 2 可以看出此时恒星已处于 C-O 核电子简并态,进入了 AGB 星演化阶段.进一步分析其壳层燃烧的各状态量,以期了解其处于 AGB 星阶段的哪一层次.

表 1 给出了赫罗图峰值处 ($\lg T_{\text{eff}} \approx 3.482$ K) 附近各点处所对应的部分物理量,如:年龄 Age、氦壳层的燃烧峰值处的温度 $\lg T_r$ 、密度 ρ_r 、能量 ε_r 、壳层外沿光度值 $\lg(L_r/L_{\odot})$ 、恒星有效温度 $\lg T_{\text{eff}}$ 、表面光度 $\lg(L/L_{\odot})$ 及恒星半径 R .图 4 则让我们对 $5 M_{\odot}$ 恒星半径随时间变化的情况有了直观的了解.

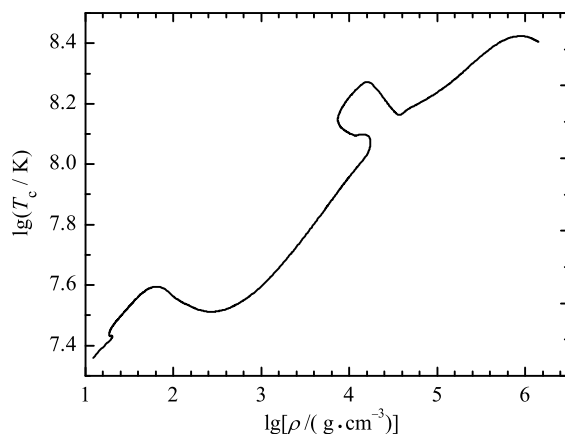


图 2 $5 M_{\odot}$ 恒星演化过程中中心温度随密度的变化曲线图

Fig. 2 Temperature versus density in the center of $5 M_{\odot}$ star

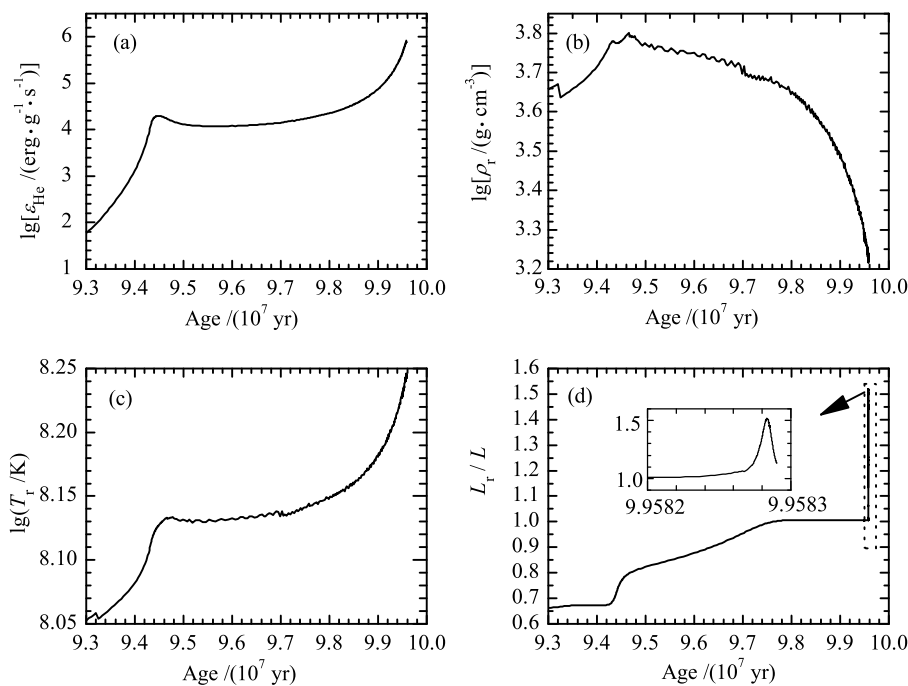


图 3 $5 M_{\odot}$ 恒星氦壳层氦燃烧峰值处能量 (a)、密度 (b)、温度 (c) 及氦壳层表面光度与恒星表面光度的比值 (d) 随时间的变化图

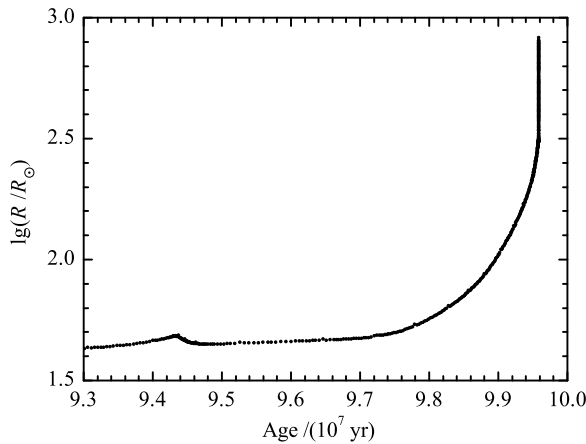
Fig. 3 Four parameters of the helium-shell source as functions of time for $5 M_{\odot}$ star. Energy productive rate (a), density (b) and temperature (c) are calculated at the maximum of helium burning. (d) indicates the ratio of luminosity at the upper border of helium-shell to that of the stellar surface

表 1 $5 M_{\odot}$ 恒星在赫罗图上演化轨迹的峰值处附近各点处所对应的部分物理量Table 1 Part parameters corresponding to some points around the peak of evolutionary track in HR diagram for $5 M_{\odot}$ star

| Age(yr) | $\lg T_r(\text{K})$ | $\rho_r(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ | $\varepsilon_r(\text{erg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{s}^{-1})$ | $\lg(L_r/L_{\odot})$ | $\lg(L/L_{\odot})$ | $\lg T_{\text{eff}}(\text{K})$ | $R(R_{\odot})$ |
|----------|---------------------|---------------------------------------|---|----------------------|--------------------|--------------------------------|----------------|
| 99565752 | 8.242 | 1745.82 | 722769.8 | 3.869 | 3.864 | 3.498 | 284 |
| 99576520 | 8.243 | 1678.80 | 783429.6 | 3.885 | 3.879 | 3.487 | 303 |
| 99579884 | 8.245 | 1706.08 | 801678.1 | 3.890 | 3.881 | 3.485 | 307 |
| 99580579 | 8.244 | 1690.44 | 809095.9 | 3.891 | 3.882 | 3.484 | 308 |
| 99581697 | 8.245 | 1702.15 | 814704.3 | 3.892 | 3.883 | 3.482 | 311 |
| 99582498 | 8.245 | 1694.34 | 822242.6 | 3.893 | 3.863 | 3.466 | 329 |
| 99582606 | 8.245 | 1702.16 | 822242.6 | 3.893 | 3.841 | 3.450 | 345 |

从图 3、图 4 和表 1 可以发现从 $\lg T_{\text{eff}} = 3.482 \text{ K}$ 附近开始, 恒星的表面光度达到峰值, 开始往下降. 同时可以看到, 此刻氦壳层源的单位时间释放的能量快速增大, 温度攀升的速率正在急剧增大, 对应的密度同时快速下降, 壳层源的光度超过了恒星的总光度, 且随时间推移超过的量越来越多. 最为特别的是, 此时恒星的半径在经过 HR 图峰值点附近后急速地加速膨胀.

故可假定 $5 M_{\odot}$ 恒星演化至赫罗图峰值 $\lg T_{\text{eff}} = 3.482 \text{ K}$ 处时, 恒星演化由早期 AGB 星转入热脉冲 AGB 星阶段.

图 4 $5 M_{\odot}$ 恒星半径随时间变化图Fig. 4 Stellar radius as a function of time for $5 M_{\odot}$ star

3.1.2 对中等质量恒星的简要分析

恒星的初始质量对其在热脉冲 AGB 星阶段的演化有着不可忽略的作用, Herwig^[43] 于 2005 年对 AGB 星进行了分类, 分为超级 AGB 星、大质量 AGB 星、低质量 AGB 星 3 种情况. 超级 AGB 星对应的恒星初始质量 $M \geq 8 M_{\odot}$, 初始质量大于 $10 M_{\odot}$ 的恒星是否进入热脉冲 AGB 星阶段与其星风物质损失大小有一定的关系. 小于 $4 M_{\odot}$ 的恒星则称之为低质量 AGB 星. 为了分析在赫罗图上早期 AGB 星进入热脉冲 AGB 星的演化轨

迹分界点的普适性, 本文对 $3 M_{\odot}$ 、 $4 M_{\odot}$ 、 $5 M_{\odot}$ 、 $8 M_{\odot}$ 、 $10 M_{\odot}$ 恒星在赫罗图上的演化轨迹 (图 5) 及其中心温度密度关系图 (图 6) 进行了分析.

由图 5 可以看出, 中等质量恒星均于赫罗图中的演化轨迹中出现了明显的峰值, 也即早期 AGB 星转入热脉冲 AGB 星的分界点, 且各质量恒星的峰值对应的有效温度几近相等, 且其光度随初始质量的增加而增大. 结合表 2, 在误差允许的条件下, 我们可以总结如下:

(1) 峰值所对应的有效温度为 $\lg T_{\text{eff}} = 3.48 \pm 0.005$ K, 也即 $T_{\text{eff}} = 3020 \pm 35$ K, 随初始质量增大呈递减关系.

(2) 峰值的光度范围为 $2950 \sim 23550 L_{\odot}$, 且随初始质量的增大呈递增关系.

(3) 峰值所对应的周期函数 P_0 随初始质量的增大呈递增关系.

根据 Cristallo 等^[44] 与 Iwamoto^[31] 所计算的模型, 我们可以做出相应的必要补充: 金属丰度的不同将影响峰值处 T_{eff} 的大小, 且其将随金属丰度的增大呈递减关系.

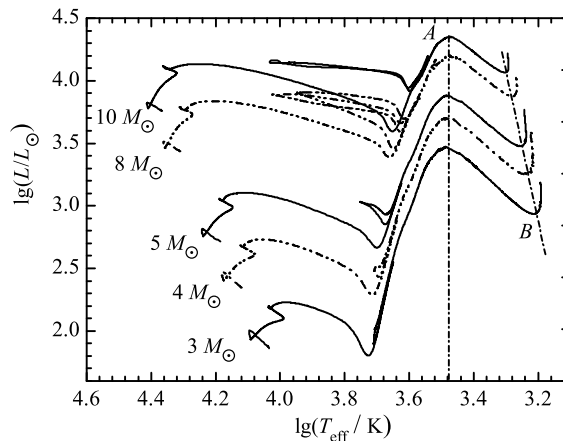


图 5 各质量恒星在赫罗图上的演化轨迹

Fig. 5 Evolutionary tracks in HR diagram for stars with different masses

Iben 等^[6] 曾认为恒星在进入 AGB 星时中心 C-O 核已处电子简并态, 从而认为 AGB 星初始质量上限大概为 $8 \sim 9 M_{\odot}$. 然而如图 5 所示, 初始质量为 $10 M_{\odot}$ 的恒星也演化进入 AGB 星, 并在 $T_{\text{eff}} = 3020 \pm 35$ K 附近进入热脉冲 AGB 星阶段, 从图 6 中可以看到, 此时其 C-O 核并未简并, 这正符合超级 AGB 星的特点^[43].

Vassiliadis 等^[29] 及 Blocker^[30] 对于热脉冲 AGB 星星风公式的修正, 其中一个关键点就在于通过周期函数 P_0 估计转入超星风阶段的时间, 再加以修正. 如表 2, 我们可以看出随着恒星初始质量的增加, 早期 AGB 星转入热脉冲 AGB 星时, 其 P_0 的大小以较大的幅度也跟着增大. 故以 P_0 作为分界点进行星风的修正存在着一定的适用局限.

Bergeat 等^[25] 于 2005 年对超星风公式的修正则是通过对比 119 颗富碳巨星^[45-47] 的质量损失率来总结确定出的经验公式. 他们提出以 $T_{\text{eff}} = 2900$ K 做为分界点, 与我们所提出的赫罗图上演化轨迹分界点 $T_{\text{eff}} = 3020 \pm 35$ K 相差无几. 为了慎重起见, 我们对其所列出的 119 颗研究对象进行分析, 发现只有 V623Cas ($T_{\text{eff}} = 3360$ K)、V614Mon ($T_{\text{eff}} =$

3320 K)、TX Psc ($T_{\text{eff}} = 3125$ K) 超出我们所提出的分界点较多, 另有 6 颗偏离范围小于 20 K, 其他均符合我们从理论上所提出的分界点要求. 虑及金属丰度对该分界点可能产生的影响, 我们姑且可以认为, 我们理论分析提出的分界点与 Bergeat 等 [25] 通过对观测总结提出的修正并无冲突.

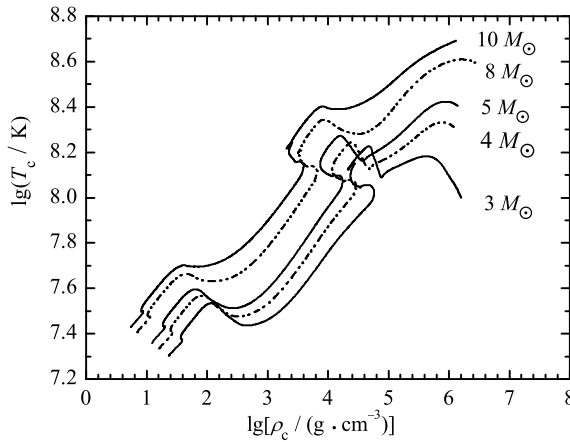


图 6 各质量恒星中心温度随密度变化曲线

Fig. 6 Temperature versus density in the centers of stars with different masses

如此, 我们可以确定: 当恒星演化初次达 $T_{\text{eff}} = 3020 \pm 35$ K 时进入热脉冲 AGB 星阶段, 对于 $3 \sim 8 M_{\odot}$ 恒星 ($Z = 0.02$), 该分界点所处光度范围为 $2950 \sim 23550 L_{\odot}$. 该判据具有简单明了、便于观测的特点.

表 2 各质量恒星在赫罗图峰值 (A) 及右侧低谷 (B) 的各物理量

Table 2 Some parameters corresponding to the peak (A) and bottom (B) of evolutionary tracks in HR diagram for stars with different masses

| M_i (M_{\odot}) | T_{eff}^A (K) | $\lg(L^A/L_{\odot})$ | P_0^A (d) | M^A (M_{\odot}) | \dot{M}^A ($M_{\odot} \cdot \text{yr}^{-1}$) | T_{eff}^B (K) | $\lg(L^B/L_{\odot})$ | P_0^B (d) | M^B (M_{\odot}) | \dot{M}^B ($M_{\odot} \cdot \text{yr}^{-1}$) |
|--------------------------|---------------------------|----------------------|----------------|--------------------------|---|---------------------------|----------------------|----------------|--------------------------|---|
| 3 | $10^{3.485}$ | 3.471 | 100 | 2.92 | $10^{-7.10}$ | $10^{3.2147}$ | 2.935 | 321 | 2.92 | $10^{-8.73}$ |
| 4 | $10^{3.484}$ | 3.700 | 131 | 3.90 | $10^{-6.48}$ | $10^{3.2382}$ | 3.251 | 417 | 3.90 | $10^{-7.85}$ |
| 5 | $10^{3.482}$ | 3.883 | 171 | 4.82 | $10^{-5.97}$ | $10^{3.2563}$ | 3.475 | 495 | 4.82 | $10^{-7.21}$ |
| 8 | $10^{3.476}$ | 4.204 | 259 | 7.58 | $10^{-5.26}$ | $10^{3.2817}$ | 3.876 | 675 | 7.58 | $10^{-6.20}$ |
| 10 | $10^{3.476}$ | 4.372 | 345 | 8.38 | $10^{-4.47}$ | $10^{3.3038}$ | 4.089 | 823 | 8.32 | $10^{-5.30}$ |

3.2 湍流压对恒星演化的影响

超星风的产生机制目前尚不十分清楚, 因此对于星风物质损失的研究均为经验公式或半经验公式, 半经验公式多数立足于辐射压的尘埃驱动星风理论. 在湍动对流的影响被成功地引入脉动变星的理论后 [48], 基于脉动将影响星风物质损失的考虑 [6], 湍流压被认为可能是星风产生的物理原因 [49]. 文献 [38-39,49-51] 在对湍流压做了深入的研究后, 提出在红巨星和 AGB 星阶段, 靠近恒星表面区域内的湍流压相对总压强达 0.3, 故而湍流压不可忽略. 在这之后, Demarque 等 [42] 也将湍流压引入太阳的研究, 并对太阳的零

龄主序阶段、现阶段、亚巨星阶段等 3 个阶段分别做了模型构建及分析, 通过日震学加以验证, 发现引入湍流压可以使得理论与观测结果更加接近, 并进而提出在恒星演化至亚巨星阶段后, 湍流压的效应将变得更为重要. 出于对星风物质损失机制的考虑, 我们对湍流压进行了适当的分析讨论.

图 7 示意了湍流压对 $5 M_{\odot}$ 恒星在赫罗图上演化轨迹的影响. 由图 7 可以看出两者几乎重叠, 只于中心氦燃烧阶段及 AGB 星阶段两者略有差别. 这两阶段正是恒星外部处于对流状态的阶段, 说明当恒星外部为对流区时, 湍流压的作用效果将比较明显.

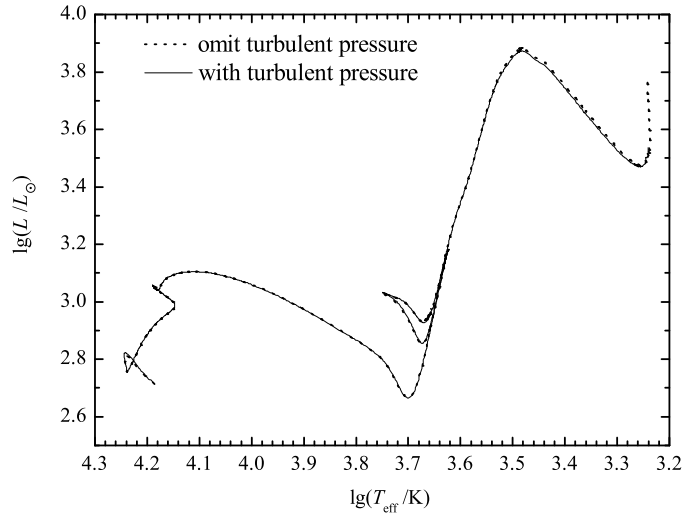


图 7 $5 M_{\odot}$ 恒星在赫罗图上的演化轨迹

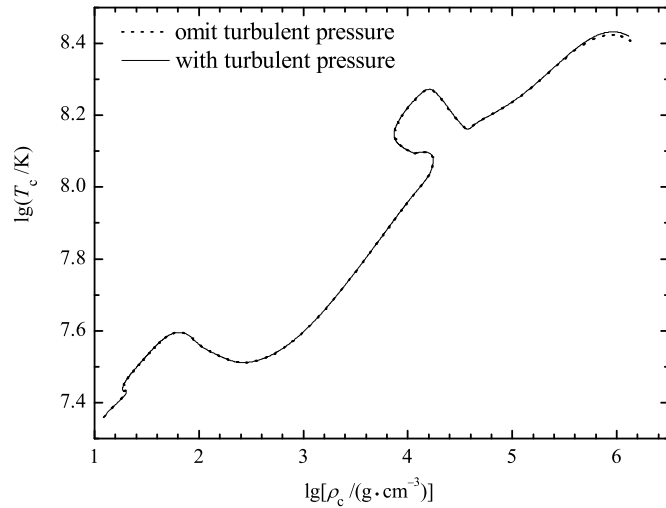
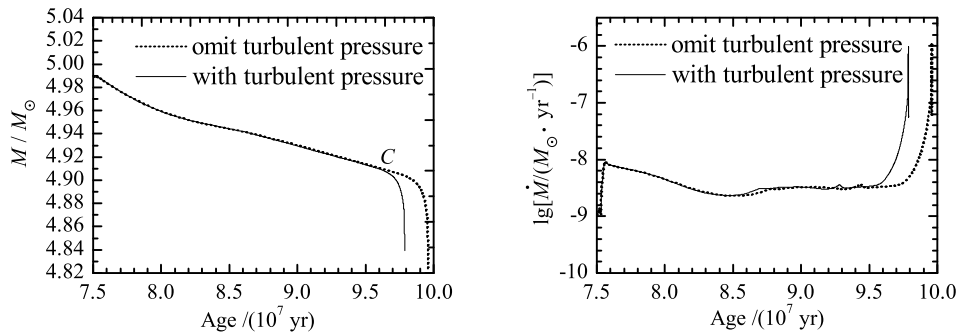
Fig. 7 Evolutionary tracks in HR diagram for $5 M_{\odot}$ star

图 8 为忽略湍流压和考虑湍流压两种情况下 $5 M_{\odot}$ 恒星中心温度和中心密度的演化图. 从图 8 可以看出, 简并前 (AGB 星阶段前), 两线实现很好的重叠, 说明湍流对恒星中心的影响在 AGB 星前几乎为零. 其原因可以理解为: 越接近恒星中心部分, 对流温度梯度与绝热温度梯度的值越接近相等, 同时湍流压造成的影响也越小.

但是, 在 AGB 星阶段恒星中心部分 (中心氦核已处电子简并态), 从密度温度曲线看出两者有明显的差别, 湍流压应该不是直接的原因. 虑及图 5 中赫罗图峰值 ($T_{\text{eff}} \approx 3030 \text{ K}$) 附近及之后其曲线也有明显的错开, 故可能是由于进入 AGB 星阶段湍流压对恒星的演化效果加强, 至于其方式, 可从图 9 看出原因.

图 9 示意了恒星演化过程中质量及质量损失率随时间变化情况. 从图 9 可以明显看出 C 点 ($9.6 \times 10^7 \text{ yr}$ 左右) 以后, 由于此时恒星外部对流层的湍流压不可忽略, 在考虑湍流压效应下, 恒星星风物质损失明显大于不考虑湍流压的情况. 而结合表 1, 可以发现 C 点已接近赫罗图峰值处 ($T_{\text{eff}} \approx 3030 \text{ K}$), 也就是接近我们前面所假设的恒星在赫罗图上由早期 AGB 星阶段进入热脉冲 AGB 星阶段的转折点.

从而, 我们可以假想, 由于进入热脉冲 AGB 星阶段后, 湍流压对超星风的产生有较大的影响, 从而影响恒星的演化, 故当恒星演化至热脉冲 AGB 星时, 湍流压不可忽略.

图 8 $5 M_{\odot}$ 恒星中心温度密度关系图Fig. 8 Temperature versus density in the center of $5 M_{\odot}$ star图 9 $5 M_{\odot}$ 恒星总质量 (左) 和质量损失率 (右) 随时间变化图Fig. 9 Variations of mass (left) and mass-loss rate (right) with time for $5 M_{\odot}$ star

3.3 热脉冲 AGB 星物质损失的定性讨论

以不考虑湍流的 $5 M_{\odot}$ 恒星演化为例.

图 10 为 $5 M_{\odot}$ 恒星演化过程中脉动周期函数 P_0 与质量损失率随时间变化曲线图. 如图 10 所示, 恒星演化进入热脉冲 AGB 星阶段后, P_0 已远大于 100 d, 但质量损失却不能达到观测的 $10^{-5} \sim 10^{-4} M_{\odot}$, 也即不能符合当时 Blocker^[30] 提出新的星风物质损失校正公式的初衷. 究其原因, 应是当时表面光度大幅下降了.

现今的关于星风物质损失公式大多与表面光度有关, 其比例关系都各自给定. 如 Reimers^[9]、Lamers^[52]、Nieuwenhuijzen 等^[53] 所提出的经验公式是基于 L 、 R 、 M 函数的关系式, de Jager 等^[36] 所提出的经验公式则仅仅是 L 、 T_{eff} 函数的关系式,

Schroder 等^[54] 则是以 L 、 R 、 T_{eff} 、 M 为变量. 基于可以用 L 、 T 为自变量来表示 R 的原因, 我们可以姑且认为: 这些经验或半经验公式若应用于 AGB 星阶段, 其在热脉冲 AGB 星阶段因表面光度振荡带来的问题难以避免. 如 Blocker^[30] 利用校正式 (3) 式对 $3 M_{\odot}$ 、 $4 M_{\odot}$ 、 $5 M_{\odot}$ 、 $7 M_{\odot}$ 恒星进行分析, 可知脉动期间确可以在短时间内达到较大的质量损失率, 但由于其损失持续时间相对较短 (应该与其表面光度出现振荡有关), 似乎不足以在进入白矮星阶段前及时抛出所需质量, 且由于持续的超星风被频繁地观测到^[11-12], 说明热脉冲 AGB 星的星风物质损失并非由于间歇性抛射而形成的^[13-14]. 故对于热脉冲 AGB 星的星风物质损失公式的拟合应该尽量避免由于表面光度的脉动引起的星风大小的间歇性大幅度变化.

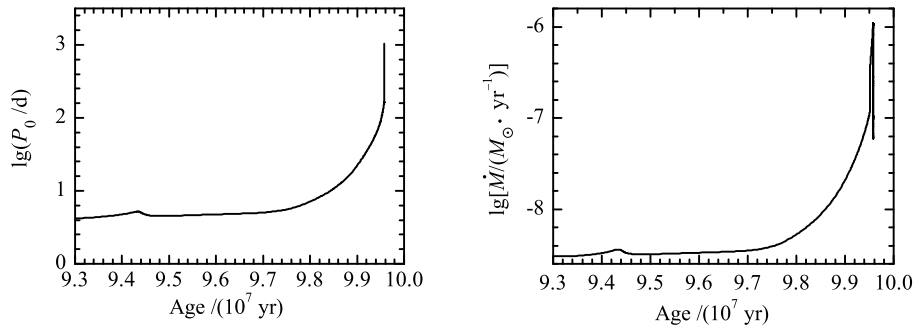


图 10 $5 M_{\odot}$ 脉动周期 (左) 与质量损失率 (右) 随时间变化曲线

Fig. 10 The pulsation period (left) and mass-loss rate (right) as functions of time for $5 M_{\odot}$ star

由图 1, 并虑及热脉冲 AGB 星的特点, 在恒星演化至热脉冲 AGB 星后, 由于表面光度将可能出现大幅度的振荡, 其星风物质损失公式应做的校正最好有某些量是不受表面光度影响直接叠加上去的, 又或其在受表面光度影响的同时引入另外一个量. 类似的想法也曾被多次实践过, 如 Wood 等^[12]、Whitelock 等^[55]、Vassiliadis 等^[29] 在对辐射压引起的超星风中对周期函数 P_0 直接引入使用, 当恒星演化至热脉冲 AGB 星后, 该量对星风物质损失有着较大的影响, 甚至主导了后期超星风的形成. 对于 $M \leq 3 M_{\odot}$ 的 AGB 星, 其理论跟观测值能够较为有效地吻合, 对于较大质量的恒星其观测估值小于理论值.

蒋苏云等^[49] 曾通过对 AGB 星外部对流区进行研究, 发现由于湍流压的作用, 恒星外壳紧靠表面的区域将出现密度梯度反转的动力学非稳定性, 并可能因此导致超星风的形成. 虑及图 9 中湍流压对星风物质损失的影响, 及本次对 $10 M_{\odot} \geq M \geq 3 M_{\odot}$ 恒星在赫罗图上演化轨迹的分析, 也许可以在恒星演化达早期 AGB 星与热脉冲 AGB 星的分界点 ($T_{\text{eff}} = 3020 \pm 35 \text{ K}$) 后, 对星风物质损失公式修正时同时考虑湍流压的影响.

4 结论

(1) 本文通过对金属丰度 $Z = 0.02$ 的 $10 M_{\odot} \geq M \geq 3 M_{\odot}$ 中等质量恒星在赫罗图上的演化轨迹的研究, 分析其内部结构及氢燃烧壳层各量的变化, 确定了恒星演化进入热脉冲 AGB 星阶段在赫罗图上的分界点, 即当演化轨迹达到峰值 ($T_{\text{eff}} = 3020 \pm 35 \text{ K}$) 附

近时, 恒星演化已进入热脉冲 AGB 星阶段. 对于 $10 M_{\odot} \geq M \geq 3 M_{\odot}$ 的恒星, 分界点的光度范围为 $2950 \sim 23550 L_{\odot}$, 从而明确了赫罗图上热脉冲 AGB 星的所在.

(2) 定性地提出: 对于初始质量 $M \geq 3 M_{\odot}$ 的 AGB 星, 初次达 $T_{\text{eff}} = 3020 \pm 35 \text{ K}$ 之后, 由于恒星演化已进入热脉冲 AGB 星阶段, 其星风物质损失公式应做修正. 可以考虑直接引入一个与表面光度无关的量, 使之在热脉冲 AGB 星演化阶段主导超星风的形成, 并通过引入湍流压效应的分析, 发现湍流压对热脉冲 AGB 星阶段的星风物质损失有较大的影响, 提出也许可以在校正公式中考虑湍流压的影响.

参 考 文 献

- [1] Searle L, Wilkinson A, Bagnuolo W G. ApJ, 1980, 239: 803
- [2] Charlot S, Bruzual A G. ApJ, 1991, 367: 126
- [3] Battinelli P, Demers S. A&A, 2004, 418: 33
- [4] Girardi L, Marigo P. A&A, 2007, 462: 237
- [5] Sedlmayr E. LNP, 1994, 428: 163
- [6] Iben I Jr, Renzini A. ARA&A, 1983, 21: 271
- [7] Renzini A. Physical Processes in Red Giants. Dordrecht: Reidel, 1981: 431
- [8] Renzini A. Effects of Mass Loss on Stellar Evolution. Dordrecht: Reidel, 1981: 319
- [9] Reimers D. MSRSL, 1975, 8: 369
- [10] Wood P R, Faulkner D J. ApJ, 1986, 307: 659
- [11] Knapp G R, Morris M. ApJ, 1985, 292: 640
- [12] Wood P R, Whiteoak J B, Hughes S M G, et al. ApJ, 1992, 397: 552
- [13] Roxburgh I W. Natur, 1967, 215: 838
- [14] Paczynski B, Ziolkowski J. AcA, 1968, 18: 255
- [15] Wood P R. ApJ, 1979, 227: 220
- [16] Castor J I. Physical Processes in Red Giants. Dordrecht: Reidel, 1981: 285
- [17] Holzer T E, MacGregor K B. Mass Loss from Red Giants. Dordrecht: Reidel, 1985: 229
- [18] Bowen G. ApJ, 1988, 329: 299
- [19] Hearn A G. From Miras to Planetary Nebulae: Which Path for Stellar Evolution?. Yvette Cedex: Editions Frontieres, 1990: 121
- [20] Marigo P, Girardi L. A&A, 2007, 469: 239
- [21] Dominik C, Gail H P, Sedlmayr E, et al. A&A, 1990, 240: 365
- [22] Arndt T U, Fleischer A J, Sedlmayr E. A&A, 1997, 327: 614
- [23] 熊关柱, 陈培生. 天文学报, 2000, 41: 181
- [24] Xiong G Z, Cheng P S. ChA&A, 2000, 24: 501
- [25] Bergeat J, Chevallier L. A&A, 2005, 429: 235
- [26] Wood P R. Stellar Pulsation. Berlin: Springer, 1987: 250
- [27] Wood P R. From Miras to Planetary Nebulae: Which Path for Stellar Evolution?. Yvette Cedex: Editions Frontieres, 1990: 67
- [28] Schild H. MNRAS, 1989, 240: 63
- [29] Vassiliadis E, Wood P R. ApJ, 1993, 413: 641
- [30] Blocker T. A&A, 1995, 297: 727
- [31] Iwamoto N. PASA, 2009, 26: 145
- [32] Becker S A, Iben I Jr. ApJ, 1979, 232: 831
- [33] Böhm-Vitense E. ZA, 1958, 46: 108
- [34] Hofmeister E, Kippenhahn R, Weigert A. ZA, 1964, 59: 215
- [35] 黄润乾. 恒星物理. 北京: 科学出版社, 2006: 48-54

- [36] de Jager C, Nieuwenhuijzen H, van der Hucht K A. *A&AS*, 1988, 72: 259
- [37] Ostlie D A, Cox A N. *ApJ*, 1986, 311: 864
- [38] 蒋苏云, 黄润乾. *天体物理学报*, 1997, 17: 271
- [39] Jiang S Y, Huang R Q. *ChA&A*, 1997, 21: 461
- [40] Henyey L, Vardya M S, Bodenheimer P. *ApJ*, 1965, 142: 841
- [41] de Jager C. *The Brightest Stars*. Dordrecht: Reidel, 1980: 470
- [42] Demarque P, Li L H, Robinson F J, et al. *ESASP*, 2001, 464: 423
- [43] Herwig F. *ARA&A*, 2005, 43: 435
- [44] Cristallo S, Straniero O, Gallino R, et al. *MmSAI*, 2009, 80: 157
- [45] Lambert D L, Gustafsson B, Eriksson K, et al. *ApJS*, 1986, 62: 373
- [46] Olofsson H, Eriksson K, Gustafsson B, et al. *ApJS*, 1993, 87: 267
- [47] Abia C, Isern J. *ApJ*, 1996, 460: 443
- [48] 熊大闰. *天文学报*, 1977, 18: 86
- [49] 蒋苏云, 黄润乾. *天体物理学报*, 1998, 18: 148
- [50] 蒋苏云, 黄润乾. *天体物理学报*, 1998, 18: 59
- [51] Jiang S Y, Huang R Q. *ChA&A*, 1998, 22: 244
- [52] Lamers H J G L M. *ApJ*, 1981, 245: 593
- [53] Nieuwenhuijzen H, de Jager C. *A&A*, 1990, 231: 134
- [54] Schroder K P, Cuntz M. *ApJ*, 2005, 630: L73
- [55] Whitelock P, Feast M, Catchpole R. *MNRAS*, 1991, 248: 276

The Demarcation Point from E-AGB to TP-AGB in HR Diagram for Intermediate-mass Stars

HONG Ya-fang JIANG Su-yun

(*College of Mathematics Physics and Information Technology, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004*)

ABSTRACT Stars with the initial masses in the range of $3 \leq M/M_{\odot} \leq 10$ have evolved from the main-sequence phase to the end of the asymptotic giant branch (AGB). The evolutionary tracks in the Hertzsprung-Russell diagram (HR diagram) are investigated. The temporal variations of the energy productive rate, density and temperature at the maximum of helium burning in the helium-shell, stellar radius, and the ratio of the luminosity at the upper border of helium-shell to that of the stellar surface are analyzed. The demarcation point from E-AGB to TP-AGB in HR diagram for the intermediate-mass stars are proposed. They are in excellent agreement with the millimetric observations of 119 carbonrich giants. In order to form continuous superwind, a mass-loss function, which is unaffected by the luminosity of stellar surface after the demarcation point, is possibly necessary.

Based on the above ideas, turbulent pressure has been taken into account for the mass-loss, structure and evolution of stars with masses of $5 M_{\odot}$. The effect of turbulent pressure cannot be overlooked in the TP-AGB phase, particularly for stellar mass-loss. Also, the possible physical factors influencing on the superwind during the TP-AGB phase are discussed.

Key words stars: evolution, stars: AGB, stars: Hertzsprung-Russell diagram, stars: mass-loss, turbulence