第 44 卷 第 2 期 天 文 学 报 Vol.44 No.2
2003 年 5 月 ACTA ASTRONOMICA SINICA May, 2003

蓝回绕特性的研究

曾艺蓉

(中国科学院国家天文台云南天文台 昆明 650011)

摘要 研究了可以影响蓝回绕(blue loops)的各种主要因素, 发现蓝回绕的形状和中心氦燃烧阶段的总产能率的变化相关联, 而总产能率的变化主要来源于壳层氢燃烧和中心氦燃烧产能率的变化, 所以蓝回绕主要与壳层氢燃烧和中心氦燃烧产能率的变化相联系. 壳层氢产能率的变化主要与氢丰度变化区(μ- 梯度区)的氢丰度分布轮廓(X-profile), μ- 梯度区的温度, 以及外对流区的深入程度密切相关. 氦核的大小和温度会影响中心氦燃烧产能率的变化, 中心氦燃烧产能率的变化不仅对总产能率的变化有贡献, 而且也会影响壳层氢燃烧产能率的变化.

关键词 恒星: 演化, 恒星: 赫罗图和颜色 – 星等图

中图分类号: P 144

1 引言

许多人研究发现, 中等质量星在中心氦燃烧阶段的赫罗图中的演化轨迹发生来回摆动 (又称为蓝回绕), 有很多因素可能影响演化轨迹的来回摆动. 例如: 物质不透明度 [1−5] 、恒星的初始化学组成 [3,6,7] 、中心氢燃烧结束后遗留的氢丰度分布轮廓(X-profile) 以及氢壳层燃烧 [3,7−15] 、对流超射 [13−19] 、恒星的自转 [20,21] 等都可以影响演化轨迹的来回摆动. 此外, Renzini 等 [22] 认为中等质量星在赫罗图中的演化轨迹发生来回摆动是由于恒星外壳内产生热非稳定性所造成的, 而这种热非稳定性主要是由于物质不透明度与温度及密度的特殊关系所激发的. 但 Iben[23] 则构造了一系列模型, 比如不透明度恒定的模型, 计算它们的蓝回绕的情况, 并且认为: 演化轨迹发生来回摆动以及摆动的幅度是恒星的中心核、外壳和壳层燃烧的相互作用的综合效果, 而不是某一种效应所决定的.

在以上研究中绝大多数只研究了单个因素对蓝回绕的影响, 但不知道这些因素之间的内在联系, 也无法判断在这些因素中哪些因素是主要的. 还有一些研究工作构造了一个产生蓝回绕的半经验, 半理论的判据, 并研究这个判据中的各个参量对蓝回绕的影响. 但它们的物理图像不是很清楚. 总之, 目前对于蓝回绕的物理机制还没有定论.

2002-07-28 收到

2 关于数值计算

我们计算了一颗 5 个太阳质量恒星从零龄主序到中心氦燃烧结束的演化，共计算了两个演化序列. 序列 1 是考虑超射效应的 (只在主序阶段考虑了超射效应); 序列 2 是不考虑超射效应的.

计算所用的是 Kippenhahn 等 (1967) 编写的恒星结构和演化程序，并加入了新的不透明度表 (Rogers & Iglisias 1992) 和产能率 (Maeder 1983; Maeder &Meynet 1987,1989). 两个序列的初始化学丰度都是 X=0.70, Z=0.02, 在计算中，都忽略了星风物质损失，因为对于 $5\,M_\odot$ 的恒星，星风物质损失非常小.

3 计算结果和结论

图 1 是以上两个演化序列在赫罗图中的演化轨迹. 用虚线表示的演化轨迹为序列 1, 即考虑超射效应的演化轨迹; 用实线表示的演化轨迹为序列 2, 即不考虑超射效应的演化轨迹. 演化轨迹上的特征点 a 、 b 、 c 、 d 、 e 、 f 、 g 、 h 和 i 分别对应零龄主序、中心氢燃烧结束、中心氦燃烧开始、第一次物质搬运的开始、巨星分支的光度最高点、蓝回绕阶段的第一个转折点、最蓝点、第二个转折点和中心氦燃烧结束. 从图 1 中可以看出: 在中心氢燃烧阶段，超射效应使恒星的光度增加，而在中心氦燃烧阶段，超射效应使蓝回绕缩短.

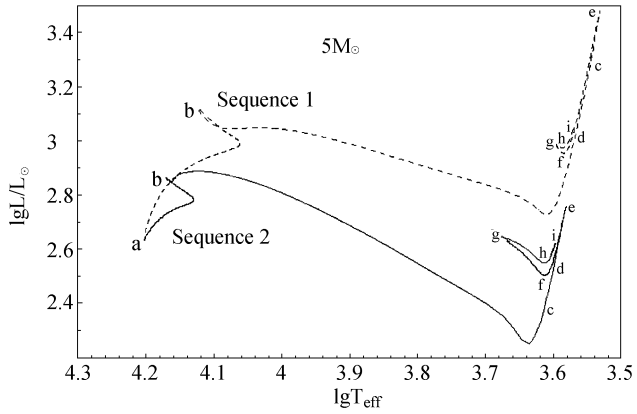

图 1 $5\,M_\odot$ 恒星演化的赫罗图，图中的标记在文中说明

Fig. 1 HR-diagram of a $5\,M_\odot$ star, the denoted signs in the figure are explained in the article

图 2 和图 3 分别是 b 点 (中心氢燃烧结束点) 和 e 点 (巨星分支的光度最高点) 的氢丰度分布轮廓 (X-profile). 图 2 和图 3 分别反映了中心氢燃烧和壳层氢燃烧阶段恒星内部的一些特点. 在主序阶段，超射效应使对流核变大，从而使更多的氢物质参与核

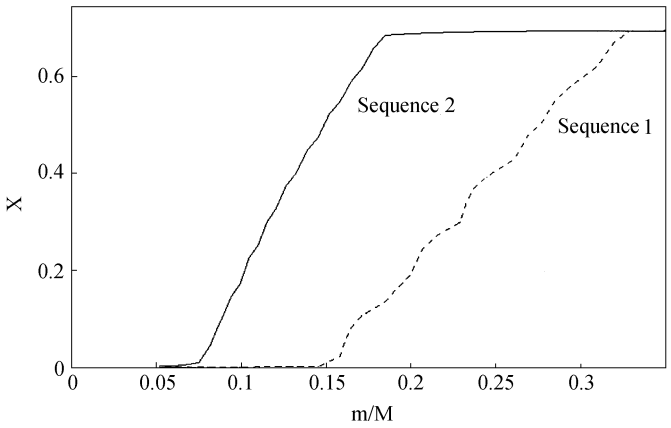

图 2　b 点中心氢燃烧结束点）的氢丰度分布轮廓（ X-profile ）

Fig. 2　The X-profile of evolution point b(the end of central H-burning)

反应，留下一个更大的氦核，μ- 梯度区靠外平缓一些. 图 2 正反映了这个事实. 比较图 3 与图 2, 可以看出，两个演化序列的氢丰度变化区（ μ- 梯度区）的内边界都向外移动，而外边界向内移动. 同时，μ- 梯度区内的 X-profile 变得更陡，外边界出现十分明显的突变. X-profile 变陡是由于壳层氢燃烧造成的；而外边界向内移动和出现十分明显的突变是由于外部对流区向内延伸到 μ- 梯度区，并将 μ- 梯度区的物质搬运到外壳（第一次物质搬运）所致，即 μ- 梯度区的外边界的位置和形状是由外部对流区向内延伸达到最深点所决定.

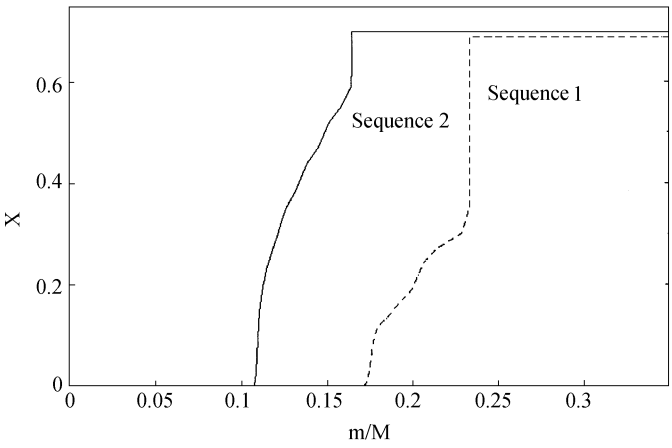

图 3　e 点（巨星分支的光度最高点）的氢丰度分布轮廓（ X-profile ）

Fig. 3　The X-profile of evolution point e(the highest point of the giant branch)

表 1 演化模型的性质

Table 1 Properties of the evolution models

Age	$\log L/L_\odot$	$\log T_{\rm eff}$	Boundary of μ–gradient m/M		Properties of H-burning shell m/M			X	Y
10^7yrs			Inner	outer	Inner bound (T10^7K)	Location of Max. energy rate(T10^7K)	Outer bound		
Seq.1									
0.0	2.633	4.203						0.7000	0.2800
12.430	3.086	4.109	0.0989	0.3278	0.0989(3.750)	0.1627(3.221)	0.2924(1.675)	0.7000	0.2800
12.470	3.269	3.547	0.1530	0.2443	0.1530(3.917)	0.1643(3.664)	0.1903(1.854)	0.6979	0.2821
12.460	3.006	3.569	0.1350	0.3278	0.1350(3.899)	0.1615(3.412)	0.1978(1.828)	0.6999	0.2801
12.490	3.481	3.531	0.1695	0.2337	0.1695(4.027)	0.1748(3.882)	0.1903(1.977)	0.6880	0.2920
12.950	2.956	3.586	0.2207	0.2337	0.2207(3.737)	0.2262(3.112)	0.2306(1.637)	0.6880	0.2920
13.140	2.986	3.596	0.2257	0.2337	0.2257(3.373)	0.2308(3.112)	0.2337(1.633)	0.6880	0.2920
13.230	2.975	3.586	0.2280	0.2337	0.2280(3.365)	0.2337(3.006)	0.2515(1.611)	0.6880	0.2920
13.310	3.043	3.571	0.2291	0.2337	0.2291(3.516)	0.2337(3.141)	0.2466(1.656)	0.6880	0.2920
Seq.2									
0.0	2.633	4.203						0.7000	0.2800
8.152	2.865	4.171	0.0211	0.1846	0.0211(3.097)	0.0910(2.972)	0.3457(1.535)	0.7000	0.2800
8.517	2.370	3.615	0.1009	0.1846	0.1009(3.491)	0.1059(3.266)	0.1166(1.738)	0.7000	0.2800
8.522	2.533	3.600	0.1009	0.1846	0.1009(3.532)	0.1062(3.289)	0.1160(1.742)	0.6999	0.2801
8.547	2.757	3.582	0.1052	0.1647	0.1052(3.597)	0.1085(3.428)	0.1157(1.766)	0.6984	0.2816
9.990	2.502	3.614	0.1358	0.1647	0.1358(3.141)	0.1387(2.992)	0.1502(1.574)	0.6983	0.2817
10.960	2.647	3.676	0.1478	0.1647	0.1478(3.184)	0.1503(3.055)	0.1647(1.600)	0.6983	0.2817
11.260	2.550	3.612	0.1505	0.1647	0.1509(3.214)	0.1536(2.999)	0.1635(1.585)	0.6983	0.2817
11.350	2.614	3.599	0.1516	0.1647	0.1516(3.327)	0.1544(3.048)	0.1627(1.567)	0.6983	0.2817

表 1 给出了两个演化序列中各个关键点的年龄、光度、有效温度、μ- 梯度区的内、外边界、壳层氢燃烧区域的内边界、最大产能率所在位置和外边界的位置和温度，以及表面氢丰度 X 和表面氦丰度 Y 的值.

从表 1 中可以看出：壳层氢燃烧的内边界始终与 μ- 梯度区的内边界重合，也就是说，氢燃烧壳层的内边界与 μ- 梯度区的内边界同步向外移动，而氢燃烧壳层的外边界最初（从 b 点到 g 点）比 μ- 梯度区的外边界小，然后比 μ- 梯度区的外边界大. 也就是说，氢燃烧壳层首先很窄并且位于 μ- 梯度区内，然后变宽并且超出 μ- 梯度区. 从表 1 中还可以看出：序列 1 的氢燃烧壳层的温度比序列 2 高得多，同样，序列 1 的氦核的温度也比序列 2 的高得多.

图 4 和图 5 分别是序列 1（考虑超射的演化序列）和序列 2（不考虑超射的演化序列）的产能率随时间变化的曲线. 每个图中的实线都表示总产能率曲线，虚线表示氦核的产能率曲线，虚点线表示氢燃烧产能率曲线. 图中的特征点 a 、 b 、 c 、 d 、 e 、 f 、 g 、 h 和 i 的含义与图 1 相同. 从 a 到 b 只有中心氢燃烧. 在 b 点附近中心氢燃烧减小，壳层氢燃烧开始. c 点以后，中心氦燃烧开始，恒星内有两个能量源.

比较图 1 和图 4 、 5 可以看到：图 1 中蓝回绕的长度与图 4 、 5 中总产能率变化时标直接相关. 图 1 中序列 2 的蓝回绕比较长，它对应于图 5（序列 2 ）中恒星的总产

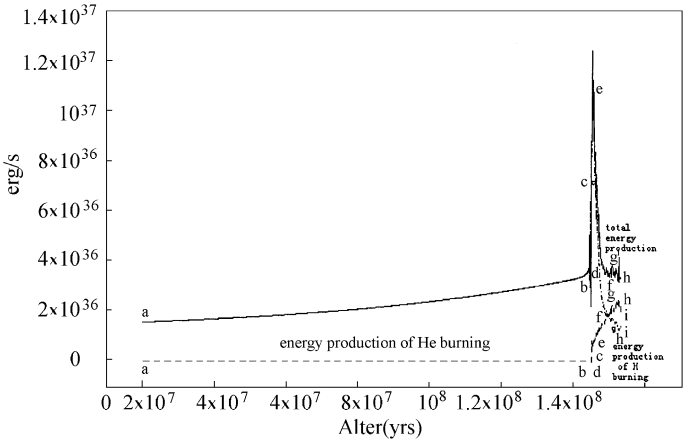

图 4　序列 1（考虑超射效应的演化序列）产能率随时间变化曲线

Fig.4　Variation of the energy production with time for sequence 1 in which the overshooting effect is include

能率从 f 点到 h 点的时间也比较长，序列 2 从 f 点到 h 点的时间为 $t_{fh2} = (11.260 - 9.990) \times 10^7 = 1.27 \times 10^7$ 年；在图 1 中序列 1 的蓝回绕比较短，它对应于图 4（序列 1 ）的恒星的总产能率从 f 点到 h 点的时间也比较短，序列 1 从 f 点到 h 点的时间为 $t_{fh1} = (13.230 - 12.950) \times 10^7 = 0.28 \times 10^7$ 年. 因此，我们发现，恒星在赫罗图中的演化轨迹的蓝回绕与恒星的总产能率从 f 点到 h 点的时间直接相关.

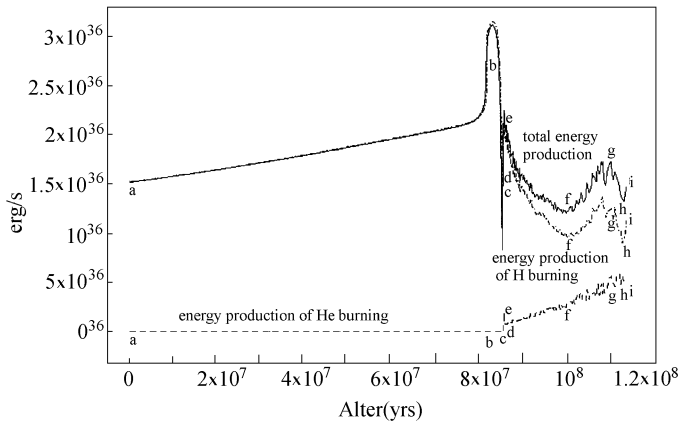

图 5　序列 2（不考虑对流超射效应的演化序列）的产能率随时间变化曲线

Fig.5　Variation of the energy production with time for sequence 2 in which the overshooting effect is not include

当恒星的总产能率（即光度）增加时，恒星的有效温度既可上升，也可下降，还可不变. 从 f 点到 h 点的阶段，恒星的光度和有效温度正相关变化，即随恒星光度上升，有效温度上升，反之下降. 因此，总产能率增加的时间越长，幅度越大，有效温度增长的幅

度也越大，即蓝回绕越长． Carson 等 [3], Stothers 等 [4,5], 以及 Renzini 等 [22] 曾讨论过引起恒星光度和有效温度相关变化的机制，应该说该问题的深入研究是很必要的．

恒星在赫罗图中的演化轨迹的蓝回绕与恒星的总产能率的变化直接相关，而总产能率的变化主要来源于壳层氢燃烧和中心氦燃烧产能率的变化，所以蓝回绕的特性与壳层氢燃烧和中心氦燃烧产能率的变化相联系．恒星从 f 点演化到 g 点，壳层氢燃烧在 μ- 梯度区内，所以壳层氢产能率的大小以及变化时标必然与 μ- 梯度区的 X-profile 、 μ- 梯度区的温度、以及外对流区的深入程度密切相关．由图 1 可知， g 点对应于蓝回绕的最蓝点，而由表 1 中可以看出：壳层氢燃烧在 g 点附近达到氢丰度变化区（ μ- 梯度区）的外边界．所以，外对流区的深入程度也会影响蓝回绕长度．外对流区越深入，蓝回绕越短．这个结果与 Huang 等 [17] 的结果相同． Huang 等 [17] 研究外部对流层超射对蓝回绕的影响时发现，当外部对流层超射越小 (α=0.5) 时，即外部对流层向内延伸越浅时，蓝回绕达到的最蓝点越远，即蓝回绕越大．氦核的大小和温度将影响中心氦燃烧产能率的变化，中心氦燃烧产能率的变化不仅对总产能率的变化有贡献，而且也会影响壳层氢燃烧产能率的变化．

需要指出的是：我们仅仅研究了有对流超射效应情况和 $5M_{\odot}$ 恒星的内部变化，而没有更深入地研究恒星的很多其他因素：比如在不透明度、初始质量和化学丰度等变化的情况下恒星内部的结构变化．我们所得到的结论可能有相当的局限性．但是，我们已发现的中心氦燃烧、壳层氢燃烧、对流区大小以及中心氢燃烧结束后遗留的氢丰度分布轮廓（ X-profile ）等因素之间的关系，可能对了解产生蓝回绕的机制有一定的帮助．

致谢 作者感谢黄润乾院士的指导和富于启发性的讨论．

参 考 文 献

1 Robertson J W. ApJ. 1972, 173: 631
2 Johson H R, Whitaker R W. MNRAS, 1975, 173: 523
3 Carson T R, Stothers R B. ApJ, 1976, 204: 461
4 Stothers R B, Chin C-W. ApJ, 1994a, 431: 797
5 Stothers R B, Chin C-W. ApJ, 1994b, 421: L91
6 Becker S A, Iben I, Tuggle R S. ApJ, 1977, 218: 633
7 Schlesinger B M. ApJ, 1977, 212: 107
8 Lauterborn D, Refsdal S, Weigert A. A&A. 1971, 10: 97
9 Robertson J W. ApJ. 1971, 170: 335
10 Fricke K J, Strittmatter P A. MNRAS, 1972, 156: 129
11 Langer N, EI Eid M F, Fricke K J. A&A, 1985, 145: 179
12 Kippenhahn R, Weigert A. Stellar Structrue and Evlution, 1990
13 Alongi M, Bertelli G, Bressan A, et al. A&A, 1991, 244: 95
14 Chin C-W, Stothers R B. ApJS, 1991, 77: 299
15 EI Eid M F. MNRAS, 1995, 275: 983
16 Matraka B, Wassermann C, Weigert A. A&A, 1982, 107: 283
17 Huang R Q, Weigert A. A&A, 1983, 127: 309
18 Bertelli G, Bressan A, Chiosi C. A&A, 1985, 150, 33
19 Becker S A, Cox A N. ApJ, 1982, 260: 707
20 Meyer-Hofmeister E. A&A, 1972, 16: 282

21 Endal A S, Sofia S. ApJ, 1976, 210: 184
22 Renzini A, Greggio L, Ritossa C, et al. ApJ, 1992, 400: 280
23 Iben I Jr. ApJ, 1993, 415: 767

Study on the Properties of the Blue Loops

ZENG Yi-Rong
(*Yunnan Observatory, National Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming* 650011)

Abstract The main factors which affecting the formation and extension of the blue loops of the middle mass stars are studied and the correlation between the feature of blue loops and the variation of the total energy production rate of the star during the core He-burning is found. The variation of the total energy production rate is mainly contributed by the H-burning shell and the core He–burning, the H-burning shell is dependent, however, on the temperature and the hydrogen profile in the μ-gradient region and the inward penetration of the outer convective zone. Both of the size of the He core and the temperature in the region of the He core determine the core He–burning which not only contributes to the total energy production rate, but also has influence on the H-burning shell.

Key words stars: evolution , stars: HR and C-M diagrams