

doi: 10.12068/j.issn.1005-3026.2018.11.014

在线控冷对热轧 L360 管线管组织和性能的影响

李振垒, 陈冬, 康健, 袁国

(东北大学 轧制技术及连轧自动化国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 针对热轧无缝钢管组织性能调控手段单一, 依赖添加合金元素和离线热处理的问题, 以轧板模拟轧管的方式, 通过实现在线控制冷却将离线热处理工艺在线化, 研究分析了热轧 L360 高温轧制后在线控冷条件下显微组织演变及力学性能变化规律. 结果表明: 高温轧制后空冷时实验钢中含有粗大的魏氏组织, 而轧后控制冷却工艺下实验钢组织显著细化, 有利于微合金碳氮化物析出. 实验钢轧后控冷至 650 ℃ 时, 能够避开魏氏组织形成的区间, 同时屈服强度为 478 MPa, 抗拉强度为 641 MPa, 伸长率达到 25.3%, 屈强比 0.74, 0 ℃ 冲击功高达 164 J, 实现了强度、韧性和塑性的平衡, 各项力学性能指标均能满足 API SPEC 5L—2012 标准要求.

关 键 词: 热轧 L360 管线管; 魏氏组织; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TG 142.2 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2018)11-1588-05

Effect of Online-Cooling on Microstructure and Mechanical Properties of Hot-Rolled L360 Steel Pipe

LI Zhen-lei, CHEN Dong, KANG Jian, YUAN Guo

(The State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.
Corresponding author: LI Zhen-lei, E-mail: tsenlylee@163.com)

Abstract: In the view of the hot-rolled seamless steel pipe problems which lacks the way to control microstructure and mechanical properties, depends on the addition of alloying element excessively and uses an off-line heat treatment, an online cooling after rolling treatment is used to replace off-line treatment by means of the plate rolling instead of tube rolling. The effects of different cooling strategy on the microstructure and mechanical properties of a typical hot-rolled L360 steel pipe is studied. The results show that compared with air cooling treatment which easily causes a coarse Widmanstatten structure in L360 steel, the cooling after rolling treatment can promote the precipitation of microalloying elements, refine Widmanstatten structure and improve mechanical properties of the steel. When cooling temperature is controlled at 650 ℃, the formation of Widmansatten structure is reduced effectively and the balance of strength, toughness and plasticity of L360 steel can be achieved with the yield strength of 478 MPa, the tensile strength of 641 MPa, the elongation of 25.3%, the yield ratio of 0.74 and the impact energy at 0 ℃ of 164 J, respectively, which meet the requirements of the standard of API SPEC 5L—2012.

Key words: hot-rolled L360 steel pipe; Widmanstatten structure; microstructure; mechanical property

目前,热轧无缝钢管的主要生产工序是环形炉加热、穿孔、斜轧/连轧、张力减径/定径后在冷床上空冷至室温,其组织性能调控依赖合金元素的添加和后续离线热处理,调控手段较为单一. 控制冷却技术作为热轧钢材组织性能调控有效手段,已经在热轧带钢、型钢、棒线材等领域得到广泛的工业应用,是实现低成本高品质、以及更高综合性能钢材产品开发的关键工艺技术^[1-3].

然而在热轧无缝钢管领域,由于热轧无缝钢管高强度均匀化控制冷却技术还未得到突破,因

而造成控制冷却技术在热轧无缝钢管领域发展滞后. 在热轧无缝钢管轧制过程中通常采用较高的加热温度和变形温度, 以降低穿管及轧管阶段的变形抗力, 同时保证管材的尺寸精度, 由于温度较高, 无法像热轧板带钢一样, 通过控制轧制获得“细化、硬化”状态的奥氏体^[4]. 且各国钢铁工作者在热轧无缝钢管轧后控制冷却原理与技术方面研究相对较少, 控制冷却条件下热轧无缝钢管组织性能调控和强化的规律认识不足, 因此十分有必要开展热轧无缝钢管控冷条件下组织调控规律方面的研究.

本文以 L360 管线管为研究对象, 采用以轧板代轧钢的方式, 通过实验室热轧实验研究了热轧工艺, 尤其是轧后控制冷却路径对 L360 管线管组织演变和力学性能的影响, 并建立了工艺参数、微观组织、力学性能之间的关系, 得出较为适宜的轧后控制冷却工艺参数, 为轧后控制冷却技术在热轧管线管中的应用与推广奠定了实验研究基础.

1 实验材料及方法

实验用钢采用与某厂热轧无缝 L360 管线管相同化学成分 (质量分数, %) : C 0. 14, Si 0. 27, Mn 1. 2, Al 0. 05, Nb 0. 027, V 0. 063, Ti 0. 015, Fe 余量. 采用 150 kg 真空感应炉熔炼并浇注, 切去缩孔, 锻成断面为 60 mm × 80 mm 的坯料. 热轧实验在 $\phi 450$ mm 二辊可逆轧机上进行. 考虑到热轧无缝钢管主要热变形过程均在较高的温度进行, 因此热轧实验奥氏体化温度为 1 260 $^{\circ}\text{C}$, 保温 2 h. 按照相同截面压缩比 (延伸系数) 的方法, 采用轧板代轧管的方式进行实验. 以直径 350 mm 管坯轧制 $\phi 355. 6$ mm × 15 mm 规格钢管为例. 各阶段轧件尺寸及延伸系数见表 1.

表 1 热轧无缝钢管各阶段变形量				
Table 1 Deformation process of a hot-rolled seamless steel pipe				
工序	温度/ $^{\circ}\text{C}$	直径/mm	厚度/mm	延伸率
加热	1 260	350	—	—
穿孔	1 100 ~ 1 150	415	61. 7	1. 4
连轧	1 050 ~ 1 080	369	15	4. 6
定径	1 000 ~ 1 050	355. 6	15	1. 04

热轧阶段总延伸系数 (截面压缩比) 为 6. 7, 考虑到定径阶段延伸系数较小, 其热变形主要集中在穿孔和连轧两个阶段. 因此将热轧实验分成模拟穿孔和连轧两个阶段, 模拟穿孔轧制温度

1 150 $^{\circ}\text{C}$, 终轧厚度为 48 mm; 模拟连轧温度定为 1 000 ~ 1 050 $^{\circ}\text{C}$ 之间, 最终厚度为 15 mm, 压下制度定为: 68 → 48 → 33 → 25 → 20 → 17 → 12 mm. 具体轧制工艺及参数见图 1 和表 2.

对不同工艺下实验钢显微组织表征及力学性能检测, 金相试样经过机械抛光后, 经 4% 的硝酸酒精溶液腐蚀后用 LEICA - DMIRM 光学显微镜及 FEI Quanta 600 扫描电子显微镜对实验钢的显微组织形貌进行观察. 采用 FEI Quanta 600 扫描电子显微镜观察冲击试样的裂纹扩展情况. 利用 FEI TECNAI G² F20 型透射电子显微镜 (TEM) 对实验钢析出粒子的尺寸、形貌及分布规律进行观察, 试样经过机械减薄至 50 μm 后, 冲孔制成 $\phi 3$ mm 的圆形薄片试样, 后经电解双喷制成透射观察试样. 采用截线法统计显微组织晶粒尺寸, 并利用图像分析软件测定实验钢中各相质量分数. 依据 API SPEC 5L—2012 标准进行室温拉伸实验和 0 $^{\circ}\text{C}$ Charpy 冲击试验制样和检测. 拉伸试样为直径 8 mm 圆棒试样, 平行段长 40 mm, 冲击试样采用 Charpy V 型缺口纵向冲击试样, 尺寸为 10 mm × 10 mm × 55 mm. 拉伸实验在 CMT - 5105 微机控制电子万能试验机上进行, 0 $^{\circ}\text{C}$ 冲击实验在 Instron 冲击试验机上进行.

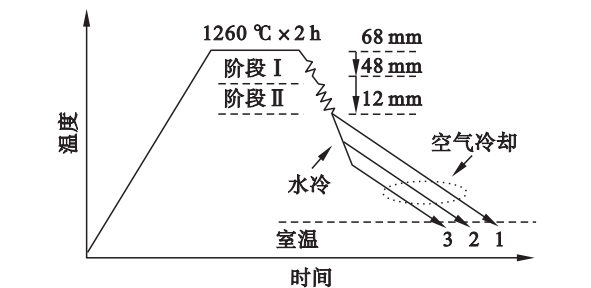


图 1 热轧实验工艺示意图
Fig. 1 Schematic diagram of a hot-rolled process in practice

表 2 实验工艺参数			
Table 2 Parameters of hot-rolled experiment			
序号	轧制温度/ $^{\circ}\text{C}$	冷后温度/ $^{\circ}\text{C}$	冷却方式
1	1 010	—	AC
2	1 005	715	WC + AC
3	1 012	650	WC + AC

注: AC 表示空气冷却; WC 表示水冷.

2 结果与讨论

2. 1 显微组织

3 种工艺下实验钢的显微组织如图 2 所示. 由图 2a 可知, 相同终轧温度下, 轧制后采用空冷

条件下实验钢的室温组织由多边形铁素体 PF、珠光体 P 和魏氏体 W 组成. 其中 PF 晶粒尺寸较大, 平均晶粒尺寸约为 23.4 μm , 其体积分数约为 62%. 如图 2b 所示, 控冷至 715 $^{\circ}\text{C}$ 时实验钢显微组织同样由 PF, P 及 W 组成, 其中 PF 平均晶粒尺寸约为 17.2 μm , 体积分数约为 73%. 与轧后空冷下显微组织相比, 控冷至 715 $^{\circ}\text{C}$ 工艺条件下, 显

微组织晶粒尺寸一定程度上得到细化, 同时魏氏组织细化及所占百分比例由空冷时的 18% 减少至 10%, 因此可以说明, 在线控制冷却可抑制魏氏组织的形成, 有利于改善缺陷组织. 图 2c 为控冷至 650 $^{\circ}\text{C}$ 时实验钢的显微组织, 由于终冷温度较低, 多边形铁核受到抑制, 显微组织由针状铁素体 AF 和贝氏体铁素体 BF 的构成.

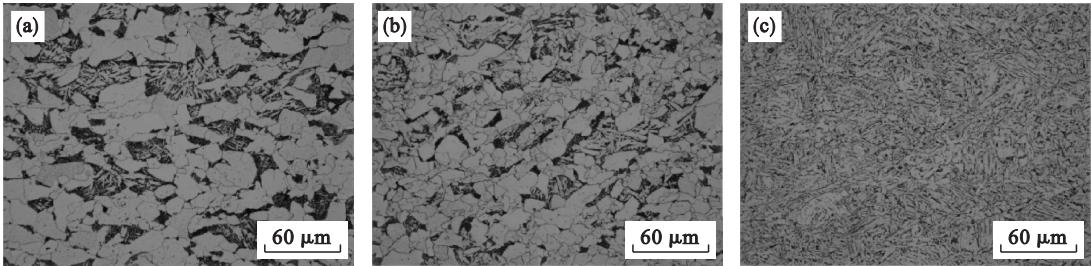


图 2 实验钢金相照片
Fig. 2 Optical micrograph of the experimental steel
(a)—轧后空冷; (b)—控冷至 715 $^{\circ}\text{C}$; (c)—控冷至 650 $^{\circ}\text{C}$.

2.2 力学性能

表 3 为实验钢轧后不同冷却条件下实验钢的力学性能. 由表可知轧后控冷至 650 $^{\circ}\text{C}$ 时, 实验钢各项力学性能指标均达到 API SPEC5 L X52 标准, 其中屈服强度为 478 MPa、抗拉强度为 630 MPa, 断后延伸率为 25.4%, 0 $^{\circ}\text{C}$ 冲击吸收功平均值 162 J. 实验钢的强度与 0 $^{\circ}\text{C}$ 冲击吸收功变化规律见图 3 所示. 轧后控制冷却条件下实验钢力学性能有不同程度的提高, 但轧后空冷与轧后控冷至 715 $^{\circ}\text{C}$ 下, 由于显微组织中魏氏体的存在导致实验钢冲击韧性较差, 远低于目标值.

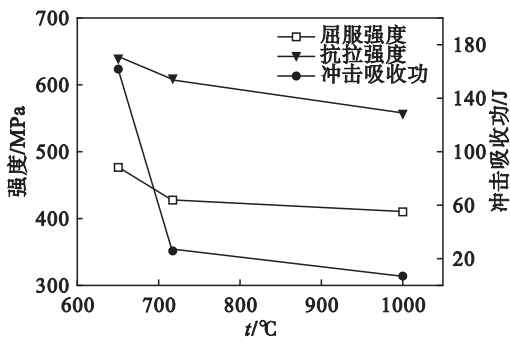


图 3 不同冷却工艺下实验钢强度及 0 $^{\circ}\text{C}$ 冲击吸收功
Fig. 3 Strength and impact absorption energy of the tested steel in different cooling processes

表 3 不同冷却工艺下实验钢力学性能
Table 3 Mechanical properties of the tested steel in different cooling processes

冷却方式	$R_{0.5}/\text{MPa}$	R_m/MPa	延伸率/%	屈服比	冲击功(0 $^{\circ}\text{C}$)/J		
					1#	2#	3#
空气冷却	412	559	30.4	0.73	8	7	10
水冷 715 $^{\circ}\text{C}$	430	610	26.8	0.70	28	37	19
水冷 650 $^{\circ}\text{C}$	478	641	25.4	0.75	168	160	157

2.3 讨论

如图 4 所示, 本实验中轧后空冷和控冷至 715 $^{\circ}\text{C}$ 时, 实验钢显微组织均包含有魏氏组织, 但较轧后空冷, 轧后控制冷却条件下魏氏体组织明显细化, 魏氏体铁素体展弦比增加, 且魏氏组织所占的比例降低. 魏氏体铁素体形核兼具扩散机制和切边机制的特征, 轧后控冷条件下, 冷却速度的提高, 增大了形成魏氏体铁素体半共格形式切变形核的驱动力, 而且冷速增加能降低形成魏氏组织的温度区间, 导致魏氏体铁素体晶核长大过程中 C 元素扩散较慢, 因而轧后控冷至 715 $^{\circ}\text{C}$ 时, 显

微组织仍有魏氏组织产生且得到的魏氏组织有一定程度的细化^[5-7]. 此外, 通过轧后控制冷却使实验钢冷却至 650 $^{\circ}\text{C}$ 时, 实验钢中无魏氏组织. 基于以上分析, 说明通过控制合适的冷却路径能有效避开魏氏组织的形成区间, 从而改善实验钢的综合力学性能.

不同工艺下实验钢析出物形貌如图 5 所示. 轧后控冷至 715 $^{\circ}\text{C}$ 时, 析出密度最大、数目最多, 且碳化物尺寸较空冷下尺寸明显减小, 轧后控冷抑制碳化物在较高温度下析出. 同时通过提高过冷度增大了碳化物形核驱动力, 且在控冷至

715 ℃时,有部分相间析出形成. 而控冷至 650 ℃析出物尺寸最小,且析出数目较少,快冷通过 $\gamma \rightarrow \alpha$ 相变区,微合金碳化物的相间析出被抑制,后续进行空冷,碳化物将主要以均匀形核的方式在铁素体及贝氏体基体中沉淀析出,但析出物数目小

于控冷至 715 ℃时的析出数目. 因为铁素体的排碳化学驱动力比贝氏体大,因此控冷至 650 ℃时实验钢中析出物数目减少.

由于魏氏体铁素体亚结构几乎平行或取向差较小,见图6,实验钢中裂纹形成后,裂纹容易贯

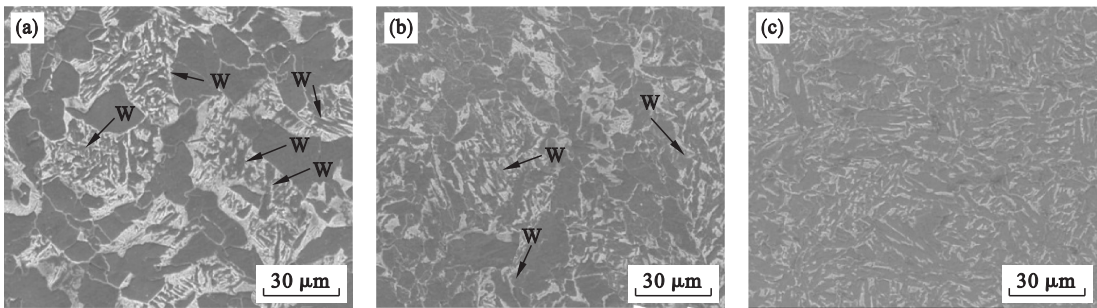


图 4 不同工艺下实验钢显微组织形貌
Fig. 4 Morphology of Widmanstatten structure in different processes
(a)—轧后空冷; (b)—控冷至 715 ℃; (c)—控冷至 650 ℃.

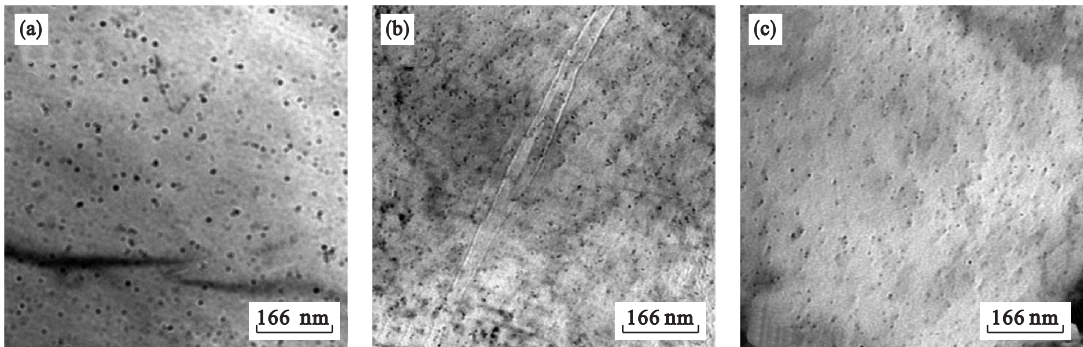


图 5 不同工艺下析出相 TEM 观察
Fig. 5 TEM micrographs of precipitated particles in different processes
(a)—空冷; (b)—控冷至 715 ℃; (c)—控冷至 650 ℃.

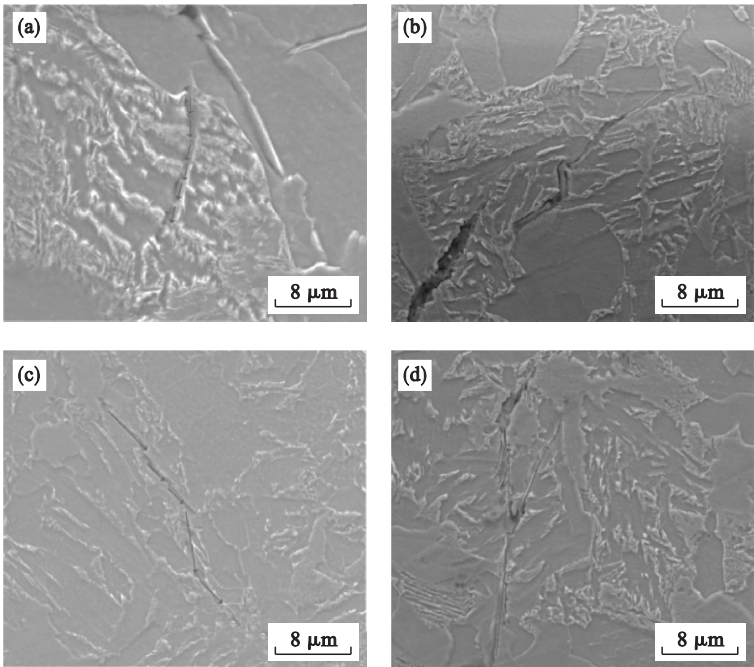


图 6 解理裂纹扩展
Fig. 6 Cleavage crack propagation
(a), (b)—空冷; (c), (d)—控冷至 715 ℃.

穿魏氏组织结构,单个板条很难阻止其扩展,因而导致实验钢空冷和控冷至 715 ℃工艺条件下,实验钢韧性较差.但控冷时晶粒细化作用,实验钢的冲击韧性较空冷下仍有一定提升.控制冷却终冷温度650 ℃条件下,实验钢中有大量的针状铁素体,因而具有良好的抗裂纹扩展能力^[8-10],使实验钢具有更好的冲击韧性,因此 0 ℃冲击功 164 J.

3 结 论

- 1) 轧后空冷工艺条件下,组织粗大并且组织中含有较多粗大的魏氏体,实验钢强度和冲击韧性较低,0 ℃冲击功低于 10 J.
- 2) 采用轧后控制冷却工艺,能够有效改善实验钢中不良组织,控制终冷温度在 650 ℃时能避免实验钢中魏氏体铁素体的形成.
- 3) 轧后控制实验钢终冷温度在 650 ℃时,实验钢屈服强度 478 MPa,抗拉强度 641.8 MPa,伸长率 25.3%,屈强比 0.74,0 ℃冲击功 164 J,能够很好地满足标准.

参考文献:

[1] 王国栋,王昭东,刘振宇,等.基于超快冷的控轧控冷装备技术的发展[J].中国冶金,2016,26(10):9-17.
(Wang Guo-dong, Wang Zhao-dong, Liu Zhen-yu, et al. Development of TMCP technology based on ultra-fast cooling [J]. *China Metallurgy*, 2016, 26(10): 9-17.)

[2] Wu D, Li Z, Lu H S. Effect of controlled cooling after hot roiling on mechanical properties of hot rolled TRIP steel[J]. *ISIJ International*, 2008, 15(2): 65-70.

[3] 王国栋.控轧控冷技术的发展及在钢管轧制中应用的设想[J].钢管,2011,40(2):1-8.
(Wang Guo-dong. Development of TMCP and envisaged application to steel tube rolling[J]. *Steel Pipe*, 2011, 40(2): 1-8.)

[4] Hua W U. Microstructure and properties of 22Mn2SiVBS seamless steel pipe treated by controlling cooling after hot rolling[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2007, 31(7):1-3.

[5] Wang J Q, Atrens A, Cousens D R, et al. Microstructure of X52 and X65 pipeline steels [J]. *Journal of Materials Science*, 1999, 34(8):1721-1728.

[6] Hillert M. Diffusion-controlled lengthening of Widmanstätten plates[J]. *Acta Materials*, 2003, 51(7):2089-2095.

[7] Huang B M, Yen H W, Ho D, et al. The influence of Widmanstätten ferrite on yielding behavior of Nb-containing reinforcing steel bars[J]. *Scripta Materialia*, 2012, 67(5):431-434.

[8] Hu J, Du L X, Wang J J. Effect of cooling procedure on microstructures and mechanical properties of hot rolled Nb - Ti bainitic high strength steel [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2012, 554:79-85.

[9] Anelli E, Armengol M, Novelli P, et al. High strength steel pipes with excellent toughness at low temperature and sulfide stress corrosion cracking resistance:9598746 [P]. 2017-07-11.

[10] Liu L, Xiao H, Li Q, et al. Evaluation of the fracture toughness of X70 pipeline steel with ferrite-bainite microstructure [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2017, 688:388-395.



(上接第 1581 页)

[8] Shelhamer E, Long J, Darrell T. Fully convolutional networks for semantic segmentation[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2017, 39(4):640-651.

[9] Shin H C, Roth H R, Gao M, et al. Deep convolutional neural networks for computer-aided detection; CNN architectures, dataset characteristics and transfer learning [J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 2016, 35(5):1285-1298.

[10] Kingma D P, Ba J. Adam: a method for stochastic optimization [C]// International Conference on Learning Representations. Amherst:UMASS, 2015:1-13.

[11] Srivastava N, Hinton G E, Krizhevsky A, et al. Dropout: a simple way to prevent neural networks from overfitting[J]. *Journal of Machine Learning Research*, 2014, 15(1):1929-1958.

[12] Dice L R. Measures of the amount of ecologic association between species[J]. *Ecology*, 1945, 26(3):297-302.

[13] Connelly K A, Detsky J S, Graham J J, et al. Multicontrast late gadolinium enhancement imaging enables viability and wall motion assessment in a single acquisition with reduced scan times [J]. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, 2009, 30(4):771-777.

[14] Hu H, Liu H, Gao Z, et al. Hybrid segmentation of left ventricle in cardiac MRI using Gaussian-mixture model and region restricted dynamic programming [J]. *Magnetic Resonance Imaging*, 2013, 31(4):575-584.

[15] Liu H, Hu H, Xu X, et al. Automatic left ventricle segmentation in cardiac MRI using topological stable-state thresholding and region restricted dynamic programming[J]. *Academic Radiology*, 2012, 19(6):723-731.