

文章编号: 1004-0609(2005)01-0019-05

超弹性 NiTi 合金丝激光点焊接头的组织和性能^①

阎小军, 杨大智, 刘黎明

(大连理工大学 材料工程系, 大连 116024)

摘 要: 采用脉冲激光焊研究了 Ti-50.6%Ni(摩尔分数)合金细丝点焊, 对比分析了接头与母材显微组织、相变行为、Ni 含量、显微硬度及应力—应变曲线的变化。结果表明: 当 NiTi 合金用做功能材料时, 激光焊接是可取的; 激光点焊接头熔化区由树枝晶组成, 热影响区靠近熔池部分为粗大等轴晶, 靠近母材部分为细小等轴晶; 激光焊会造成 Ni 的蒸发, 使接头中 Ni 含量降低 0.2%(摩尔分数), 从而影响接头的相变行为; 接头抗拉强度可达母材的 70%, 可恢复应变达母材的 92%。

关键词: NiTi 合金; 激光焊; 超弹性; 组织

中图分类号: TG 456.7

文献标识码: A

Microstructures and properties of laser spot welded joint of superelastic NiTi alloy wire

YAN Xiao-jun, YANG Da-zhi, LIU Li-ming

(Department of Materials Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Ti-50.6%Ni(mole fraction) wires were welded using pulsed YAG laser. The laser spot-welded joints were tested for the microstructure, transformation behavior, Ni content, micro-hardness and stress-strain curves in comparison with the base metal. The results show that laser welding NiTi alloy is advisable when NiTi alloy is used as functional materials. The fusion zone features dendrite structure, the microstructures of heat-affected zone can be divided into two parts, i. e. coarse equiaxial crystals near the fusion zone and fine equiaxial crystals near the base metal. The transformation behavior of the joint is affected by the vaporization of Ni during the laser welding process. The ultimate tensile strength of the joint is up to 70% of the base metal, the maximum recoverable strain is up to 92% of the base metal.

Key words: NiTi alloy; laser welding; superelasticity; microstructure

NiTi 形状记忆合金具有良好的形状记忆效应、超弹性、抗腐蚀性和生物相容性, 已经成为应用最广泛的记忆合金。在实际应用中往往需要将 NiTi 合金自身或 NiTi 合金与其它异种金属焊接起来, 以达到减小产品体积、优化产品性能、降低产品价格的目的。随着 NiTi 合金应用领域的不断扩大, 其焊接技术日益重要, 但有关这方面的研究报道却较少, 目前仅在电阻焊、摩擦焊、电子束焊、激光焊等领域进行了初步研究^[1,2]。激光焊由于具有能

量密度高、焊缝窄、热影响区小、焊接变形小、光束方向性好、能进行精密加工等优点^[3], 越来越受到人们的关注。另外, NiTi 形状记忆合金能很好地吸收波长为 1064 nm 的激光^[4], 因此, 利用激光焊接来加工 NiTi 合金是很有前途的。已有的研究^[5-8]多是用激光焊接 NiTi 合金板材, 很少涉及到 NiTi 合金细丝的焊接。NiTi 合金细丝的应用很广泛, 且丝与丝的焊接和板材之间的焊接相比, 在热传导方面有较大不同。本文作者利用脉冲激光器进行了直

① 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50171015)

收稿日期: 2004-05-25; 修订日期: 2004-11-17

作者简介: 阎小军(1973-), 男, 博士研究生。

通讯作者: 阎小军, 博士研究生; 电话: 0411-84708441; E-mail: dreamto2008@sohu.com

径为 0.5 mm 的 Ti-50.6% Ni 合金细丝对接的点焊实验,研究了脉冲激光点焊接头的组织和性能。

1 实验

用真空感应炉生产成分为 Ti-50.6% Ni 的合金锭,然后经过锻造、轧制、旋锻、多次冷拔,形成直径为 0.5 mm 的细丝,最后经 773 K 真空退火。焊接时采用对接焊的方式,所用焊机为国产 500 W 脉冲激光焊机,最小电流 100 A,最大频率 100 Hz,脉冲宽度 0.1~12 ms。焊前待焊接端面用 1000# 砂纸磨平,用酸的混合溶液除去试件表面氧化膜,用丙酮清洗除去表面油污。实验时,通过改变工艺参数来获得最佳焊接质量。采用金相显微镜、差热分析仪(DSC)、电子探针、显微硬度计对接头进行分析,同时测试母材与焊接接头的抗拉强度,并用扫描电镜观察拉伸断口形貌。激光点焊接头的 DSC 试样取整个接头,以接头中心为对称,包括热影响区。

2 结果与讨论

2.1 接头的组织

图1所示为激光点焊接头的宏观扫描电镜像。

为了防止因两个待焊端面装配间隙大而造成焊接缺陷,在激光点焊过程中沿丝的轴向施加一定的顶锻力,所获得的点焊接头直径略大于丝的原始直径。从图中可以看出,接头表面平滑,成形良好。金相组织观察表明,从接头中心熔化区到母材的组织依次为树枝晶→粗大等轴晶→细小等轴晶→带状组织(图2)。由图可以看出,激光点焊接头熔化区由树枝晶组成,热影响区由2部分组成,靠近熔化区的部分为粗大等轴晶,而靠近母材的部分为细小等轴晶,母材为带状组织。

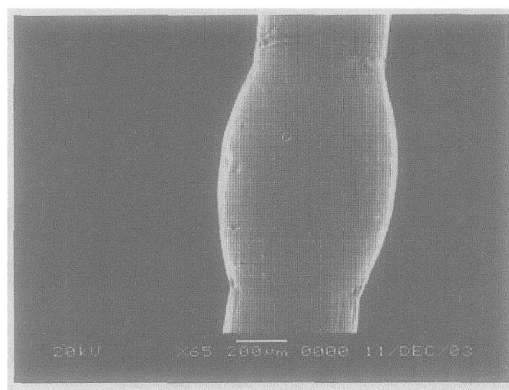


图1 激光点焊接头的扫描电镜像

Fig. 1 SEM image of laser spot-welded joint

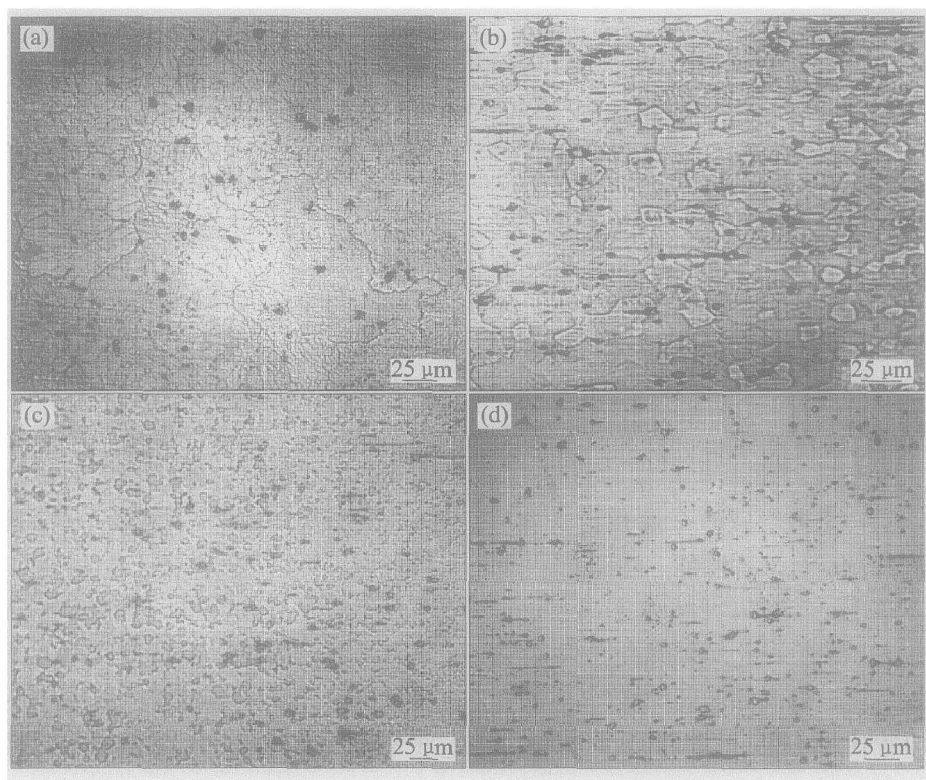


图2 接头及母材的显微组织

Fig. 2 Microstructures of welded joint and base metal

- (a) —Microstructure of fusion zone; (b) —Coarse crystals of heat-affected zone;
(c) —Fine crystals of heat-affected zone; (d) —Microstructure of base metal

焊缝的结晶形态主要决定于合金中溶质的浓度、结晶速度(或晶粒长大速度)和液相温度梯度的综合作用^[9]。激光焊时熔池液态金属的过冷度很大,有利于树枝晶的生长^[10]。熔池附近的母材组织,由于受到焊接热输入的影响,发生了再结晶。靠近熔池部分的母材温度较高,形成的等轴晶晶粒较粗大,而远离熔池部分的母材温度较低,形成的等轴晶晶粒较细小。但 Hsu 等^[7]用 CO₂ 激光焊接完全退火态的 NiTi 合金板材时,热影响区没有出现粗晶。由此可见,母材的状态和焊接工艺对接头组织有重要影响。

合金丝的焊接只沿丝的方向传热,因此对定位及输入能量稳定性要求较高。激光光斑能量偏大,金属丝易出现汽化,焊点区收缩变细,甚至断开,若能量偏小,熔化不充分,无法形成良好的熔融状态。为了保证细丝在激光焊接过程中无大量汽化,工件上功率密度应较低,选择小电流、大脉宽。电流的大小反映了激光脉冲峰值功率密度的大小,电流越大,脉冲峰值功率密度越大,焊接时易出现汽化。脉宽越长,焊接可靠性越高,但可能使热影响区增大,对接头性能不利。

2.2 接头的相变点

NiTi 合金的马氏体相变顺序及相变温度可用 DSC 方法测量。图 3 所示为母材和激光点焊接头的 DSC 测量曲线,母材组织为冷拔退火态,激光点焊接头组织可看作固溶处理态。Miyazaki 等^[11]的研究表明, Ti-50.6% Ni 合金在 1 273 K 固溶处理 3.6 ks 后冰水淬火,所得组织正相变过程为 $B_2 \rightarrow B19'$, 逆相变过程为 $B19' \rightarrow B_2$ 。HUANG 等^[12]的研究表明,冷拔退火态 Ti-50.85% Ni 合金正相变过程为 $B_2 \rightarrow R \rightarrow B19'$, 逆相变过程为 $B19' \rightarrow B_2$ 。退火温度较低时,冷却过程中 $R \rightarrow B19'$ 相变在 173 K 下不能进行到底,相应的加热过程相变为 $B19' \rightarrow B_2$ 和 $R \rightarrow B_2$ 。本实验所用的 DSC 设备最低温度只能到 213 K,将测量结果与 Miyazaki^[11]和 HUANG 等^[12]的研究结果对比可知,母材的正相变过程分 2 步进行,即: $B_2 \rightarrow R$ 及 $R \rightarrow B19'$ 。但由于母材的 Ni 含量较高, M_s 点很低,而所用的 DSC 设备最低温度只能到 213 K,无法检测到马氏体相变峰,所以在母材的 DSC 曲线上只出现了 R 相变峰而没有出现马氏体相变峰。焊接接头的正相变过程只有一个相变峰,即: $B_2 \rightarrow B19'$ 。在后来的实验中发现接头进行热循环后出现了 R 相变,说明此时接头 DSC 曲线上的峰对应的是马氏体相变,而不是 R 相变。图 3

中母材的逆相变过程分 2 步进行,即: $B19' \rightarrow B_2$, $R \rightarrow B_2$, 但 2 个相变峰没有完全分开。焊接接头的逆相变只出现一个相变峰,即: $B19' \rightarrow B_2$ 。从图中可以看到接头和母材的相变温度也相差很大。NiTi 合金的马氏体相变行为强烈依赖于合金的化学成分、热机械处理、时效和热循环。焊缝的相变行为取决于母材的状态和所采用的焊接参数^[6]。从图 2 的显微组织中可以明显地看到接头组织和母材组织的不同。电子探针分析表明,接头的 Ni 含量为 50.4%,比母材低, Ni 含量较低, M_s 点就会较高。组织和成分的差别造成了接头和母材不同的相变行为。

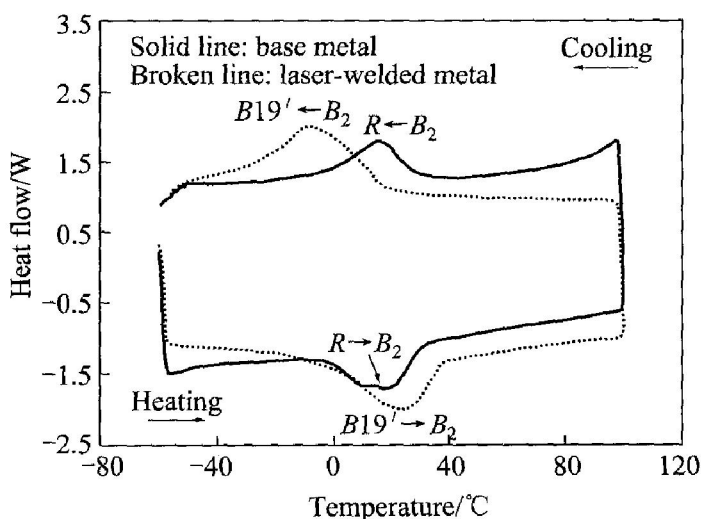


图 3 母材和激光点焊接头的 DSC 曲线

Fig. 3 DSC curves of base metal and laser spot-welded joint

2.3 接头的显微硬度

图 4 所示为接头组织的显微硬度分布曲线。从图中可看出,从接头中心到母材,显微硬度值先降低后升高,热影响区有一部分硬度值最低,约为 210 HV,母材的硬度值最高,约为 345 HV。造成这种硬度分布的主要原因是各部分组织状态不同。由图 2 所示的显微组织可以看到,在热影响区有一粗晶区,这是由于 NiTi 合金的导热率低,室温下为 $10 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ^[13],焊接过程中的热量来不及扩散,从而造成局部温度过高,晶粒长大,硬度较低。母材组织为拉拔态的组织时,其硬度最高。

2.4 接头的拉伸曲线

图 5 所示为母材和激光点焊接头在室温下的拉伸曲线。从图中可以看出,母材的抗拉强度约为 1 250 MPa,激光焊接接头的抗拉强度约为 880 MPa,可达到母材抗拉强度的 70%。应力诱发马氏

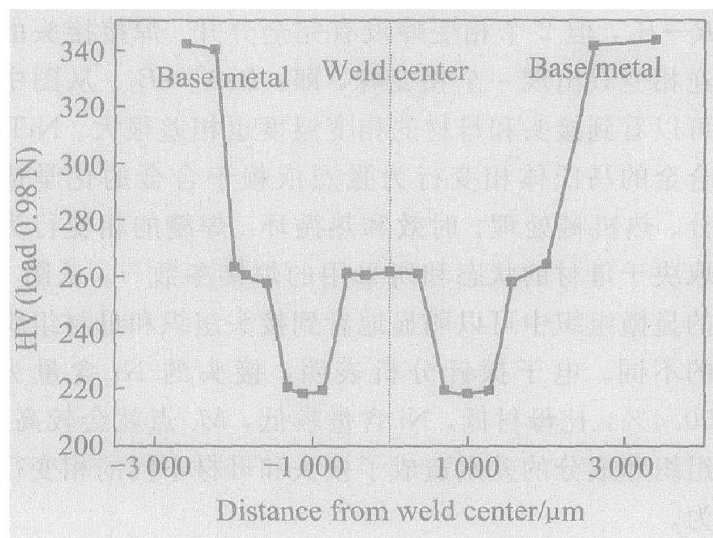


图 4 接头组织的显微硬度分布曲线

Fig. 4 Micro-hardness distribution curve of laser spot-welded joint

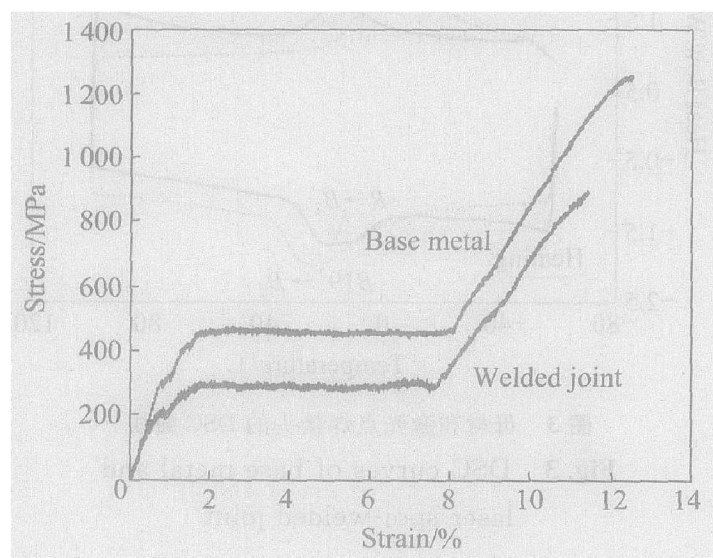


图 5 母材和接头的拉伸曲线

Fig. 5 Stress-strain curves of base metal and welded joint

体所需的应力在母材中约为 455 MPa, 而在焊接接头中约为 288 MPa, 是母材的 63%, 对应的可恢复应变: 母材为 8%, 焊接接头为 7.4%, 可达母材的 92%, 接头的弹性模量比母材的小。图 6(a) 所示为母材拉断后的断口形貌, 从图中可以看到明显的韧窝, 属韧性断裂。图 6(b) 所示为焊接接头拉伸断口照片, 从图中可以看到明显的河流花样, 说明断口属脆性断裂。由此可知, 激光焊后, 焊接接头的力学性能及超弹性比母材都有所下降, 其中力学性能下降的程度较大, 超弹性性能降低的程度较小。

从图 2 所示接头的显微组织可以看到, 接头熔

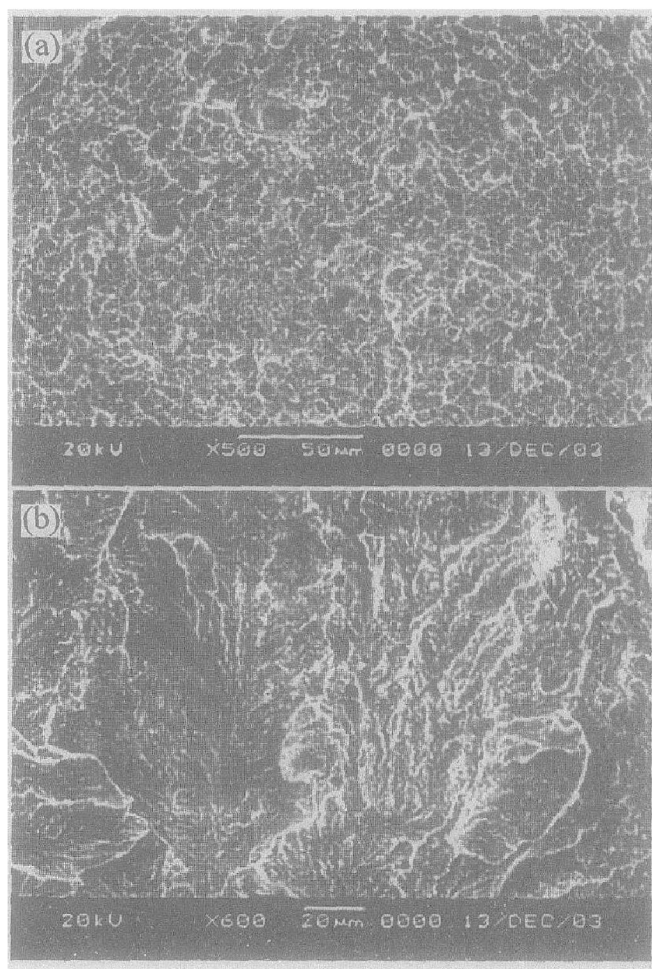


图 6 拉伸断口形貌

Fig. 6 Tensile-fractured appearances of base metal (a) and welded joint (b)

化区由树枝晶组成, 热影响区存在粗晶, 这种组织特征对 NiTi 合金的力学性能和功能性都有不利的影响^[2]。另外, 激光焊接是一种熔化焊接方法, 在焊接过程中接头温度高, 而 Ti 在高温下很容易吸收氮气、氧气、氢气等气体并在接头中形成脆性化合物; 接头在凝固过程中会析出 Ti_2Ni 、 $TiNi_3$ 等金属间化合物, 这些因素都会使接头的抗拉强度和超弹性下降^[1]。其次, 接头在凝固过程中易形成凝固裂纹^[14], 使接头的性能进一步恶化。

3 结论

1) NiTi 合金丝材激光点焊接头熔化区由树枝晶组成, 热影响区靠近熔池部分为粗大等轴晶, 靠近母材的部分为细小等轴晶。

2) 激光点焊接头的相变行为与母材有很大差别, 冷却过程中母材的相变过程为 $B_2 \rightarrow R \rightarrow B19'$, 接头的相变过程为 $B_2 \rightarrow B19'$, 接头的 M_s 、 A_f 点比

母材高。

3) 激光点焊接头抗拉强度达母材的 70%, 可恢复应变达母材的 92%。

4) 当 NiTi 合金用做功能材料时, 激光焊接是可取的。

致谢

感谢大连理工大学材料工程系焊接研究室的老师和同学对本实验的大力支持。

REFERENCES

- [1] 任家烈, 吴爱萍. 先进材料的连接[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
REN Jia-lie, WU Ai-ping. The Joint of Advanced Materials[M]. Beijing: China Machine Press, 2000.
- [2] Potluri N B. Joining of shape memory alloys[J]. Welding Journal, 1999, 78(3): 39-42.
- [3] 李志远, 钱乙余, 张九海. 先进连接方法[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
LI Zhi-yuan, QIAN Yi-yu, ZHANG Jiu-hai. The Advanced Joint Method[M]. Beijing: China Machine Press, 2000.
- [4] Paren S. Post weld disturbance analysis in laser diode assemblies[EB/OL]. <http://www2.sjsu.edu/faculty/selvaduray/page/papers/mate234/parenshah.pdf>.
- [5] Tuissi A, Besseghini S, Ranucci T, et al. Effect of Nd:YAG laser welding on the functional properties of the Ni-49.6at.% Ti[J]. Materials Science and Engineering, 1999, A273-275: 813-817.
- [6] Schloßmacher P, Haas T, Schüßler A. Laser welding of NiTi shape memory alloys[A]. The First International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies[C]. California: Asilomar Conference Center, 1994. 85-90.
- [7] Hsu Y T, Wang Y R, Wu S K, et al. Effect of CO₂ laser welding on the shape memory and corrosion characteristics of TiNi alloys[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2001, 32(3): 569-576.
- [8] QIU Xiao-ming, SUN Da-qian, LI Ming-gao, et al. Microstructures and properties of welded joint of TiNi shape memory alloy and stainless steel[J]. Trans Non-ferrous Met Soc China, 2004, 14(3): 475-479.
- [9] 周振丰, 张文钺. 焊接冶金与金属焊接性[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988.
ZHOU Zhen-feng, ZHANG Wen-yue. Welding Metallurgy and Weldability of Metal[M]. Beijing: China Machine Press, 1988.
- [10] Tjong S C, Zhu S M, Ho N J, et al. Microstructural characteristics and creep rupture behavior of electron beam and laser welded AISI 316L stainless steel[J]. Journal of Nuclear Materials, 1995, 227(1-2): 24-31.
- [11] Miyazaki S, Igo Y, Otsuka K. Effect of thermal cycling on the transformation temperatures of TiNi alloys[J]. Acta Metall, 1986, 34(10): 2045-2051.
- [12] HUANG Xu, LIU Yong. Effect of annealing on the transformation behavior and superelasticity of NiTi shape memory alloy[J]. Scripta Materialia, 2001, 45: 153-160.
- [13] 杨大智, 张连生, 王凤庭. 形状记忆合金[M]. 大连: 大连工学院出版社, 1988.
YANG Da-zhi, ZHANG Lian-sheng, WANG Feng-ting. Shape Memory Alloys[M]. Dalian: Dalian Institute of Technology Press, 1988.
- [14] WANG G. Strength of welded nitinol for medical applications[EB/OL]. <http://www.engineeringreference.com/H-Processes/nitinolmedicalapplications.pdf>.

(编辑 李向群)