

文章编号: 0258-7025(2007)Supplement-0086-05

激光熔覆过程中熔池图像的实时检测

于 栋, 钟敏霖, 刘文今, 张红军, 朱晓峰, 何金江

(清华大学机械工程系先进成形与制造教育部重点实验室, 北京 100084)

摘要 建立了基于 CCD 摄像机的激光熔覆过程检测系统, 得到熔池的动态变化过程。从动态视频中读取每帧数字图像, 获得稳定的熔池区图像。对熔池图像处理的算法进行研究, 得到清晰准确的熔池形貌边缘; 提取熔池中心, 得到单道熔覆层熔池的相对高度变化, 能够近似表征沉积表面的起伏。在图像采集卡与计算机图像处理单元互相通信和采集软件模块的基础上进行连续视频图像实时处理程序的开发, 在 0.2 s 内完成对图像的采集处理工作, 为获得精确的熔池位置偏差和激光熔覆过程控制提供了检测基础。

关键词 材料加工工程; 激光熔覆检测系统; 熔池; 图像处理

中图分类号 TN249; TG665 **文献标识码** A

Realtime Monitoring Research of Melt Pool Images in Laser Cladding Process

YU Dong, ZHONG Min-lin, LIU Wen-jin, ZHANG Hong-jun, ZHU Xiao-feng, HE Jin-jiang
(Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Key Laboratory for Advanced Materials Processing Technology, Ministry of Education, Beijing 100084, China)

Abstract A laser cladding process monitoring system was set up based on CCD camera, dynamic behavior of melt pool can be acquired as a video form through the system. The melt pool's digital image is read from the video frame by frame and the steady melt pool area can be obtained. A kind of algorithm was studied and implemented. This algorithm can get the clear melt pool's contour and centroid. Jointed each pool's centroid of the single pass, a relative height curve is formed, and it can approximately describe the deposition's surface. On the basic of the communication between the image collection card and the computer image process cell, a realtime consecutive image process software was developed. The software can accomplish the image collection and process within 0.2 s. These are monitoring elements for finding the actual melt pool position and further laser cladding process close-loop control.

Key words materials processing engineering; laser cladding monitoring system; melt pool; image processing

1 引 言

激光熔覆是激光沉积技术的一种, 是指用高能激光束局部熔化金属表面形成熔池, 同时用送粉器将金属粉末送入熔池而形成与基体金属冶金结合的新金属层的方法。通过逐线、逐层地熔覆, 可以堆积出任意形状的功能性金属实体零件。激光熔覆制造过程包含数百次数千次的层叠循环, 单道熔覆过程中激光功率、扫描速度、送粉速度、熔池温度等任一因素的不稳定性和层叠循环过程中可能产生的扰动

均会直接影响制造结果, 一旦扰动因素循环增强, 则制造过程将出现不可控结果, 使得后续层叠过程无法进行^[1]。因此, 激光熔覆制造过程的检测与闭环反馈控制是极为重要的, 是激光熔覆快速制造的技术关键之一。

目前, 国际上一些研究机构在掌握工艺参数对成形效果影响规律的基础上, 先后对激光熔覆成形过程的检测与控制展开了探索。激光熔覆制造过程中影响因素对成形过程的作用最终将通过一些过程

作者简介: 于 栋(1982—), 男, 山东桓台人, 硕士研究生, 主要从事激光熔覆过程的检测与控制方面的研究。

E-mail: yud04@mails.tsinghua.edu.cn

导师简介: 钟敏霖(1961—), 男, 浙江玉环人, 教授, 博士生导师, 主要从事激光材料加工和激光快速直接制造方面的研究。E-mail: zhml@tsinghua.edu.cn

输出参量,如熔池的形状和尺寸、熔池温度、熔池及其附近温度场、熔池冷却速率等体现出来,而这些参量将最终决定激光熔覆过程的稳定和成形质量^[2]。因此,在熔覆过程中对输出参量进行实时检测是实现激光熔覆过程检测的主要思路,而且将监测信息用于反馈调节工艺参数的控制手段是非常有效的。美国密西根大学 J. Mazumder 教授的研究组、美国 Sandia 国家实验室、美国南卫理工会大学、英国利物浦大学等研究机构在这方面进行了大量的研究工作^[3,4]。国内清华大学、华中科技大学、西北工业大学、湖南大学等高校也开展了在该领域的研究^[5,6]。本文研究了激光熔覆过程中提取熔池几何特征的图像处理过程,并尝试了对熔池图像的实时采集处理,为进一步的闭环控制奠定了检测基础。

2 实验条件

实验中采用 3 kW 快轴流 CO₂ 激光器, Ni25 合金粉末, 基体为低碳钢, 激光功率 $P=1000$ W, 扫描速度 $V_1=4$ mm/s, 送粉速度 $V_f=3$ g/min, ZnSe 透镜聚焦, 光斑直径 $D=3$ mm, 送粉气流量 $Q=300$ L/h, 保护气氩气流量为 20 L/h。

选用台湾敏通 MTV-1881EX 工业 CCD 摄像机作为图像传感器, 全场采样频率为 25 f/s, 总像数为 795 pixel × 596 pixel, 实验中输出窗口大小为 400 pixel × 300 pixel, 可以拍摄动态、清晰的图像。熔覆过程中光斑直径约为 1~3 mm, 调节镜头光圈、亮度及焦距, 将物距和像距之比控制在一定的范围之内, 获得较大和清晰的熔池侧向形貌。在本系统中, 利用设计的卡具将 CCD 摄像机与机床 Z 轴固定, 使 CCD 相对熔池静止, 为避免熔池辐射和粉末飞溅对成像设备的损害, 在镜头前加装保护镜片^[7]; 为了防止噪声及热影响区辐射的干扰, 根据熔池发光光谱选用合适的滤光片^[8]。图 1 为 CCD 检测系

统示意图。

为了研究熔池的连续动态变化规律, 激光头单道往复扫描, 同时保持同轴喷嘴每层向上抬高 0.2 mm, 往复过程中开激光、送粉。

熔池光谱测量实验选用 Ocean Optics 生产的 USB2000 便携式光谱仪测量熔池发光光谱。主要参数如下: 波长范围为 360~2000 nm, 光学分辨率为 1.5 nm, 传输速率为每 13 ms 刷新内存一次, 信噪比为 250:1, 积分时间为 3 ms~65 s。

3 实验结果与分析

3.1 熔池光谱测量与分析

为得到质量较高的熔池图像, 避免可见光、基体及粉末反射光、热影响区辐射等对熔池辐射产生的影响和干扰, 有必要对熔池的发光光谱进行测量和分析。

根据 Ocean Optics USB2000 说明书发现此时得到的熔池光谱并非实际光谱, 需要对其进行修正。修正后光强的计算公式及参数由说明书给出:

$$I_{\lambda} = R_{\lambda} \left(\frac{S_{\lambda} - D_{\lambda}}{R_{\lambda} - D_{\lambda}} \right), \quad (1)$$

其中 I 为修正后的实际发光强度; S 为目标光源光强; R 为参考光源光强, 此处参考光源温度已假定为 2960 K; D 为背景光强; λ 为相应波长。

光强由普朗克黑体辐射公式求得:

$$M_{\lambda}(T) = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5} \frac{1}{\exp[hc/(\lambda k T)] - 1}, \quad (2)$$

其中 $T=2960$ K。

通过测得的熔池光谱及背景光谱得出经过修正后的熔池光谱图如图 2 所示。由图可知熔池光谱大约在 860 nm 处光强最强。从图中可看出, 熔池发出的光集中在 700~1100 nm 之间, 因此选用 800 nm 带通滤光片, 半带宽为 10 nm。

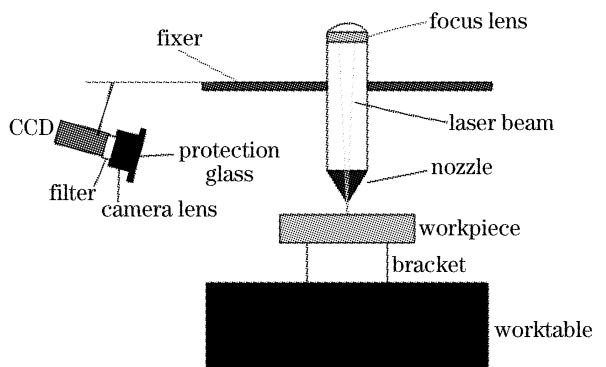


图 1 CCD 检测系统

Fig. 1 CCD monitoring system sketch

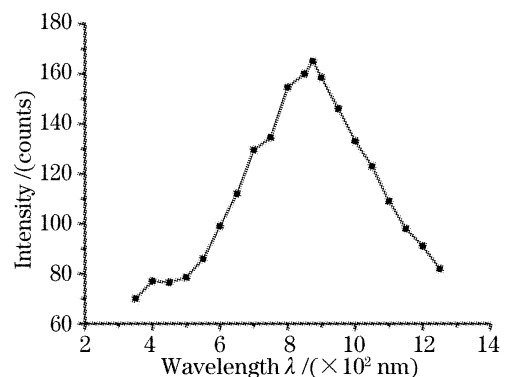


图 2 修正后的熔池光谱

Fig. 2 Revised melt pool spectrum

3.2 激光熔覆过程中熔池的观测与分析

3.2.1 熔池图像提取

采用 Matlab7.0 中的 `aviread` 命令对拍摄到的 `avi` 文件进行分帧读取,由于图像的数据量很大,每幅图像都保存处理会占用很多系统资源和硬盘空间,所以编程有选择地保存图像。图 3 所示为熔池稳定后提取的某帧熔池图像。图中看到熔池清晰,在窗口中所占大小适中,适合观察。中间白色区域为液态熔池,熔池周围灰色区域为热影响区,上方灰色区域为落入的粉末流^[9],可见光已经全部滤掉。

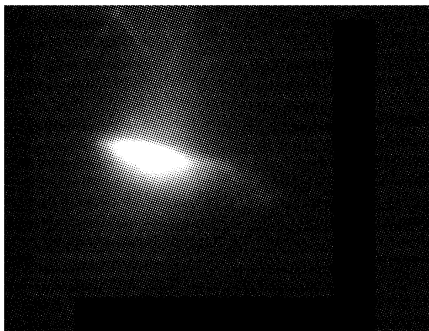


图 3 熔池原始图像

Fig. 3 Original image of melt pool

3.2.2 熔池图像预处理

通过熔池的原始图像可以观测到熔池的侧向形貌,图像中包含了大量的数据和信息。为得到熔池的特征信号需要对读取的熔池图像进行一系列的预处理工作。

图像直方图是图像的重要统计特征,可以认为是图像灰度分布密度函数的近似。灰度直方图表示数字图像每一灰度级与该灰度级出现频率的对应关系。典型熔池图像的直方图如图 4 示。

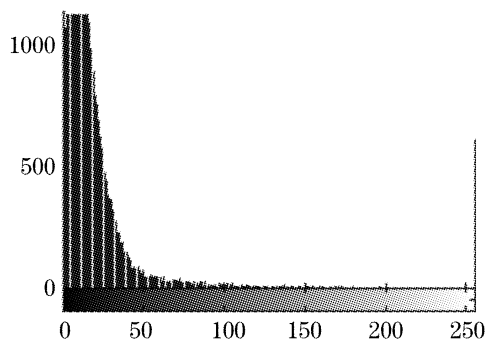


图 4 熔池原始图像直方图

Fig. 4 Histogram of original melt pool image

通过对直方图统计可以看出,熔池图像中大部分像素灰度级在 50 以下,大约 600 多个像素为最高的灰度级 255,灰度分布在 (51, 254) 之间的像素极少。而熔池区域最亮,灰度值为 255。根据直方图门限阈值分割法的原理^[10],将 255 作为区分熔池与

背景像素的门限,很好地将熔池从背景中分离出来得到二值图像。阈值分割后得到的熔池二值图像如图 5(c)所示。

数字图像的边缘检测是提取图像特征的一个重要属性,为了分析熔池图像特征信息,必须对其进行边缘检测。对于连续图像 $f(x,y)$,其方向导数在边缘(法线)方向上有局部最大值。边缘检测就是求 $f(x,y)$ 梯度的局部最大值和方向。常用的边缘检测算子有 Roberts 算子, Prewitt 算子, Sobel 算子, LoG 算子以及 Canny 算子等^[11],对于并不复杂的熔池图像来说,采用算子对边缘检测的影响不大,文中边缘检测均采用 Sobel 算子。

图 5(a)为拍摄到的稳定的熔池图像,图 5(b)为对应的直接进行边缘检测得到的图像,图中最里面的闭合线为熔池边缘,往外由几层温度依次下降的热影响区边缘包围,它们的周围分布了大量的噪声。在图像采集过程中,由于图像传输和数字量化处理过程中产生的寄生效应会导致采集的图像中会叠加很多噪声,加上在获取熔池图像时会受到熔池和基体反射、粉末飞溅的干扰,得到的熔池图像本身就往往含有很强噪声,大多数噪声都是以点状形式呈现的。图 5(d)所示为经过阈值分割后的熔池边缘,可以看到,已经没有了周围的噪声和热影响区影响。但可以观察到熔池图像下方有一个段并不连接的“小尾”,可能是由于基体镜面反射很强的熔池辐射光引起的错判,与熔池形状并无关系,为得到准确的

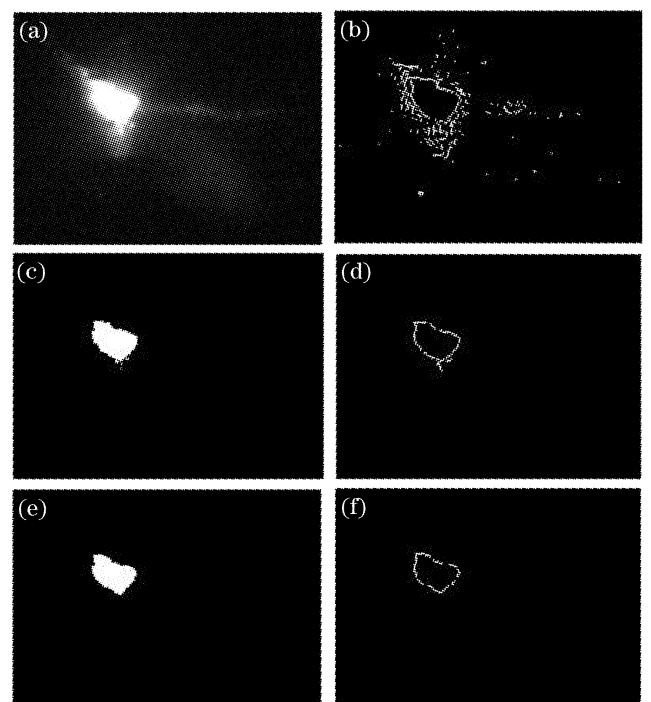


图 5 熔池图像的处理过程

Fig. 5 Melt pool image process

熔池形状和特征参数,必须对阈值分割后的图像进行数学形态学处理。

3.2.3 形态学处理

形态学运算是针对二值图像,并依据数学形态学集合论方法发展起来的图像处理方法。基本思想是用具有一定形态的结构元素去量度和提取图像中的对应形状,以达到对图像分析和识别的目的。

二值图像基本的形态学运算是腐蚀和膨胀。给定二值图像 $I(x, y)$ 和作为结构元素的二值模板 $T(i, j)$,典型的腐蚀与膨胀运算表示为:

1) 腐蚀:

$$E(x, y) = (I \otimes T)(x, y) = \bigwedge_{i, j=0}^m [I(x+i, y+j) \& T(i, j)], \quad (3)$$

简单的腐蚀运算是消除物体的所有边界点的一种过程,其结果是使剩下的物体沿其周边比原物体小一个像素的面积;

2) 膨胀:

$$D(x, y) = (I \oplus T)(x, y) = \bigvee_{i, j=0}^m [I(x+i, y+j) \& T(i, j)], \quad (4)$$

简单的膨胀运算是将与某物体接触的所有背景点合并到该物体中的过程。过程的结果是使物体的面积增大了相应数量的点^[12]。

因此先通过腐蚀消除图像中不连接的那段小的噪声区域,然后用膨胀运算可以填补图像中的空洞。

经过开运算后的熔池二值图像如图 5(e) 所示,可以看到已经消除了背景噪声,只剩下熔池区域。图 5(f) 为图 5(e) 图的边缘。

3.2.4 熔池特征参数的提取

为了控制熔覆层的精度,有必要对检测到的信息进行量化,以反映信息量与熔覆层形貌的关系。经过以上的处理过程,能得到侧向熔池的质心。定义当前熔池的相对高度为熔池质心的纵坐标,对某

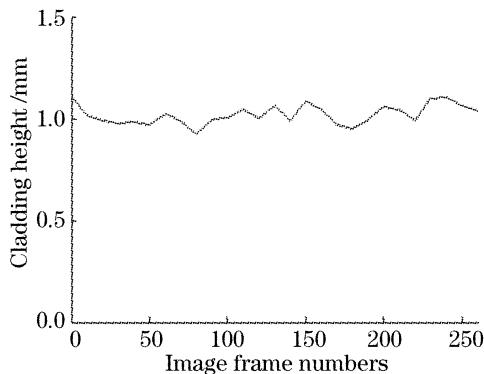


图 6 熔池高度相对时间的变化曲线

Fig. 6 Height fluctuation of melt pool for time

次实验后的最后一层熔池图像进行熔池高度的提取后连接^[13],如图 6 所示。纵轴为熔池高度,横轴为图像帧数,由于图像帧数由时间决定,所以可以看作熔池高度相对时间的变化曲线。图 7 为实验结束后的单道熔覆实物。

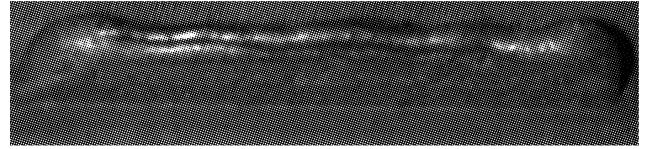


图 7 实验结果实物图

Fig. 7 Example result sample's picture

图 6 与图 7 对比可发现最后一层熔池高度的变化与最终熔覆层的表面起伏近似,所以可利用熔池相对高度的变化来判断熔覆层的起伏。

3.3 基于对话框的熔池图像实时处理

当前图像处理在算法实现中主要应用 Matlab 仿真,但 Matlab 运行效率较低,且可移植性和实用性不好。为了能对采集的图像进行实时处理,应用 VC++ 对大恒 QP300 图像采集卡进行二次开发,在 Windows 平台上移植以上图像处理算法,保证了激光熔覆过程中检测的实时性。

调用图像采集卡应用接口库中的头文件(.h),并将静态链接库(.lib)文件加到新建的对话框工程文件中,供编译程序链接时使用。在程序中设置图像采集卡的参数使其正常工作,在 CGStoreAvi 类中的回调函数中添加图像处理算法^[14],得到的实时检测熔池图像的界面如图 8 示。

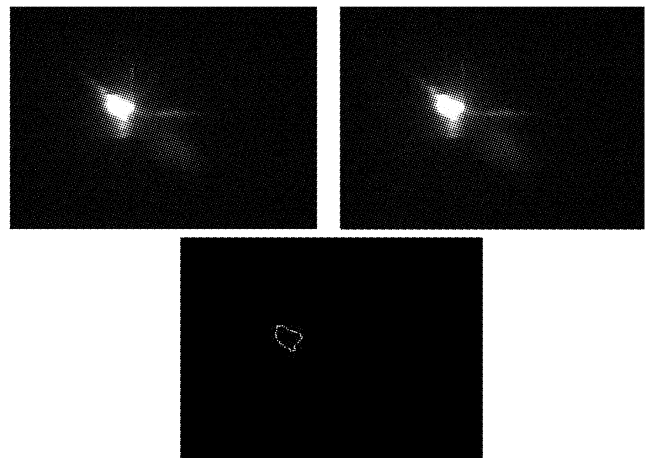


图 8 实时熔池图像检测软件界面

Fig. 8 Realtime melt pool image monitoring software interface

此软件将熔池的 avi 文件和读取的位图文件、处理后的熔池图像在一个对话框中实时显示,随着 CCD 摄像机随机床运动,对话框中的图像随之反映

为当前点的熔池图像。由于熔池图像的数据量巨大,且 CCD 的采样频率为 25 f/s,在不影响检测的前提下,每 5 帧图像取一帧处理,即能保证检测精度又不影响实时性。

4 结 论

1) 建立了用于激光熔覆过程的 CCD 观测系统,能够实现对熔池侧向形态进行观测分析;

2) 通过对熔池光谱的分析确定了透过一定波长的滤光片,保证能拍摄到质量较高的图像;

3) 对熔池进行实时观察,提取熔池图像进行预处理及边缘检测,得到了清晰的熔池边缘,确定了熔池图像处理的算法,离线得到熔池的相对高度变化,为预测熔覆层表面起伏奠定了基础;

4) 对图像采集卡进行二次开发,增加了图像处理功能,能够实时提取熔池边缘,实现了熔池图像在线检测,为以后加工过程的反馈控制提供了基础。

参 考 文 献

- Zhong Minlin, Ning Guoqing, Liu Wenjin. Research and development on laser direct manufacturing metallic components [J]. *Laser Technology*, 2002, **26**(5): 388~391
钟敏霖, 宁国庆, 刘文今. 激光熔覆快速制造金属零件研究与发展 [J]. *激光技术*, 2002, **26**(5): 388~391
- Griffith Michelle L. Hofmeister, William H. Knorovsky *et al.*. Direct laser additive fabrication system with image feedback control [P]. USA patent 6459951, 2002
- K. G. Watkins, Eamonn Fearon. A method of layer height control in direct laser fabrication of 304L stainless steel [C]. *ICALEO 2003 Proceedings*, 2003. 903~904
- J. Mazumder, D. Dutta, N. Kikuchi *et al.*. Closed loop direct metal deposition: art to part [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2000, **34**(10): 397~414
- Tan Hua, Chen Jing, Yang Haiou *et al.*. Real-time sensing and closed-loop control of laser rapid forming process [J]. *Applied*

Laser, 2005, **25**(2): 74~76

谭 华, 陈 静, 杨海鸥等. 激光快速成形过程的实时监测与闭环控制 [J]. *应用激光*, 2005, **25**(2): 74~76

- Ning Guoqing, Zhong Minlin, Yang Lin *et al.*. Research about close-loop control system during laser direct manufacturing metallic components [J]. *Applied Laser*, 2002, **22**(2): 172~175
宁国庆, 钟敏霖, 杨 林等. 激光直接制造金属零件过程的闭环控制研究 [J]. *应用激光*, 2002, **22**(2): 172~175
- Yang Lin. Investigation on the stable powder feeding and melt pool monitoring system and techniques for laser direct manufacturing [D]. Beijing: Tsinghua University, 2004. 39~43
杨 林. 激光直接制造稳定送粉和熔池检测系统与基本工艺研究 [D]. 北京: 清华大学, 2004. 39~43
- Hu Xiaodong, Zhao Wanhua, Xu Chao *et al.*. The CCD based weld pool control system for directly metal forming [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(3): 375~377
胡晓冬, 赵万华, 许 超等. 基于 CCD 的金属直接成型过程监控系统 [J]. *光子学报*, 2003, **32**(3): 375~377
- He Jinjiang, Zhong Minlin, Liu Wenjin *et al.*. Observation and analysis on behaviors of powder stream concentration and molten pool in laser deposition process in controlled environment chamber [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(2): 283~288
何金江, 钟敏霖, 刘文今等. 保护箱中激光沉积的粉末流、熔池观测与分析 [J]. *中国激光*, 2006, **33**(2): 283~288
- Rafael C. Gonzalez. Digital Image Processing [M]. 2nd Edition, New Jersey, USA: Prentice Hall, 2002. 479~494
- He Bin, Ma Tianyu, Wang Yunjian *et al.*. Visual C++ Digital Image Processing [M]. 2nd Edition, Beijing: Posts & Telecommunication Press, 2004. 394~433
何 斌, 马天宇, 王运坚等. Visual C++ 数字图像处理 [M] 第二版, 北京: 人民邮电出版社, 2004. 394~433
- Shao Qike, Chen Guoding, Fang Yong. A study on morphological operators for weld pool image processing [J]. *Mechanical Science and Technology*, 2003, **22**(1): 42~43, 47
邵奇可, 陈国定, 方 勇. 形态学在熔池图像处理中的应用研究 [J]. *机械科学与技术*, 2003, **22**(1): 42~43, 47
- Zhang Zhiyong *et al.*. Jing Tong MATLAB 6. 5 [M]. 1st Edition, Beijing: Beihang University Press, 2003. 283~247
张志涌等. 精通 MATLAB 6. 5 版 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003. 238~247
- David J. Kruglinski. Inside Visual C++ [M]. 4th Edition, Beijing: Tsinghua University Press, 1999. 64~209
David J. Kruglinski. Visual C++ 技术内幕 [M] 第四版, 潘爱民译. 北京: 清华大学出版社, 1999. 64~209