

激光热加工

曹明翠 郑启光 编著
陈祖涛 程祖海

华中理工大学出版社

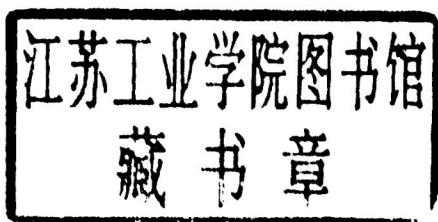
TG156.99

C 09

448044

激光热加工

曹明翠 郑启光
陈祖涛 程祖海



华中理工大学出版社
湖北 武汉

(鄂)新登字第 10 号

D222/34
05

图书在版编目(CIP)数据

激光热加工/曹明翠编著

武汉:华中理工大学出版社. 1995年6月

ISBN 7-5609-1136-6

I. 激…

I. ①曹… ②郑… ③陈… ④程…

II. 激光热处理

IV. TG156.99

激光热加工

曹明翠 郑启光

陈祖涛 程祖海

责任编辑:周筠

*

华中理工大学出版社出版发行

(武昌喻家山 邮编:430074)

新华书店湖北发行所经销

华中理工大学出版社沔阳印刷厂印刷

*

开本:850×1168 1/32 印张:11.375 字数:284 000

1995年6月第1版 1995年6月第1次印刷

印数:1-2000

ISBN 7-5609-1136-6/TG·42

定价:9.80元

内 容 简 介

激光热加工是利用激光束作为热源的热加工工艺。它已广泛地应用于国防、电子、机械、仪表等工业。为了推广这一新工艺,本书系统地介绍了固体激光和高功率 CO_2 激光加工系统,激光热加工基础,激光打孔,脉冲激光焊接,连续激光焊接,激光切割和激光热处理工艺。本书选材是从便于推广激光热加工工艺出发,使读者既能了解激光器的特性,又能掌握激光热加工的工艺。在总结国内外研究和应用成果的基础上,注意了理论联系实际,对各种激光热加工工艺的特点、工艺参数、加工质量、金相组织进行了详细的分析。本书系统完整,工艺参数实例分析较多,简明易懂。可供从事激光热加工的工程技术人员参考,也可供激光专业,机械加工专业的学生参考。

前 言

随着激光器的发展和完善,激光热加工作为一种新工艺已显示出了强大的竞争力,并在国外得到了广泛的应用,取得了显著的经济效益。

然而,激光热加工工艺在我国还未得到广泛的应用,原因很多,但其中原因之一是人们对其还不十分了解,从事激光热加工的工程技术人员和工人对激光器各种参数的控制和调整不清楚,而研制用于激光热加工激光器的工程技术人员,还不够注意应用推广工作。这就需要有一本比较系统地介绍激光热加工的书,以弥补这方面的不足,从而使激光热加工工艺在我国得到广泛的应用。

本书从推广激光热加工工艺的目的出发,总结了国内外研究和应用的成果,选材注意了理论联系实际,既考虑了整个激光热加工工艺知识的系统性,又注意了实用性,以便使读者对固体激光加工系统、气体激光加工系统以及激光热加工中,激光和物质相互作用过程中产生的一些基本物理现象有一个系统的了解。在此基础上对激光打孔,脉冲激光焊接,连续激光焊接,激光切割,激光热处理等各种工艺作了详细的介绍,各章内容都注意力求实用性。

在固体激光加工系统和高功率 CO_2 激光加工系统两章中,作者从使用激光器作热加工热源的立足点出发,避开了繁杂的数学公式,仅简明介绍了激光器和加工系统中各部分功能和如何设计、调整、控制各种激光参数,为更好地研究和提高加工质量打基础。

全书共分八章。第一、第四章由郑启光编写,第五、第七章由曹明翠和郑启光编写,第二章由程祖海和曹明翠编写,第三章由曹明翠编写,第六章和第八章由蒲万林和陈祖涛编写。全书由曹明翠统稿。

由于我们的水平有限,书中难免会有错误和不当之处,欢迎读者批评指正。

编者

1995 年 3 月

目 录

第一章 固体激光加工系统	(1)
§ 1.1 固体激光器	(1)
§ 1.2 固体激光加工机的光学系统	(15)
§ 1.3 固体激光加工机的电源系统	(31)
§ 1.4 激光加工机的工作台和实例	(37)
第二章 高功率 CO₂ 激光加工系统	(44)
§ 2.1 高功率 CO ₂ 激光器的分类	(44)
§ 2.2 CO ₂ 激光器的工作原理	(45)
§ 2.3 CO ₂ 激光器的工作特性	(52)
§ 2.4 快速纵向流动 CO ₂ 激光器	(59)
§ 2.5 横向流动 CO ₂ 激光器	(68)
§ 2.6 高功率连续 CO ₂ 激光加工机系统	(84)
第三章 激光热加工基础	(94)
§ 3.1 激光热加工概述	(94)
§ 3.2 激光束对金属表面的直接穿透深度	(98)
§ 3.3 金属表面对激光的反射率	(99)
§ 3.4 激光束对金属材料加热的数学分析	(108)
§ 3.5 热压缩激波和等离子云	(118)
第四章 激光打孔及其他应用	(123)
§ 4.1 激光打孔的特点及物理过程	(123)
§ 4.2 激光打孔的参数	(141)
§ 4.3 提高激光打孔的精度和重复性的措施	(147)
§ 4.4 激光打孔的实例分析	(154)
§ 4.5 激光划线与微调	(161)

第五章 脉冲激光焊接	(166)
§ 5.1 脉冲激光焊接工艺的特点	(166)
§ 5.2 脉冲激光焊接中的激光参数	(170)
§ 5.3 激光焊点熔池中的温度场和熔深	(184)
§ 5.4 脉冲激光焊接工艺	(194)
§ 5.5 激光焊点中的金属结构特性	(215)
§ 5.6 脉冲激光焊接裂纹	(220)
§ 5.7 脉冲激光焊接在电子工业中的应用	(231)
第六章 连续激光焊接	(235)
§ 6.1 连续激光焊接的基本原理	(236)
§ 6.2 焊接工艺和焊接工艺参数	(242)
§ 6.3 HY—130 钢焊接性能分析	(248)
§ 6.4 连续激光焊接实例	(252)
第七章 激光切割	(263)
§ 7.1 激光切割的特点	(263)
§ 7.2 材料特性对激光切割参数的影响	(267)
§ 7.3 激光切割工艺	(274)
§ 7.4 激光切割质量分析	(294)
§ 7.5 脉冲激光切割	(317)
第八章 激光热处理	(321)
§ 8.1 激光表面相变硬化基本知识	(323)
§ 8.2 激光表面相变硬化工艺	(327)
§ 8.3 激光表面相变硬化的组织性能	(335)
§ 8.4 激光表面相变硬化的实例	(344)
§ 8.5 其他激光热处理简介	(349)

第一章 固体激光加工系统

激光热加工的热源是激光束。产生激光束的设备是激光器。用

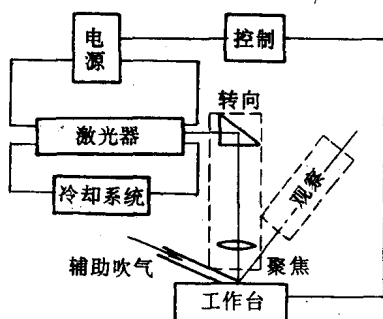


图 1-1

于激光加工的固体激光器通常是掺钕钇铝石榴石激光器(简称为 YAG 激光器)、钕玻璃激光器和红宝石激光器;气体激光器通常是高功率 CO_2 激光器。

固体激光加工系统包括激光器、光学聚焦和观察系统、工作台系统以及供电系统,如图 1-1 所示。本章将分别讨论各组成部分的基本原理。

§ 1.1 固体激光器

一 激光产生的基本原理

激光器是受激发射的光放大器。在原子的发光过程中,同时存在着光的自发辐射、受激吸收和受激发射。光的受激发射是指处于高能级 E_2 的原子,在能量为 ϵ_{12} 的光子引诱下,发射出一个与入射光子一模一样的光子,而跃迁到能级 E_1 上。受激发射光的频率、相位、偏振方向和传播方向都与入射光相同,光的受激发射参见图 1-2。

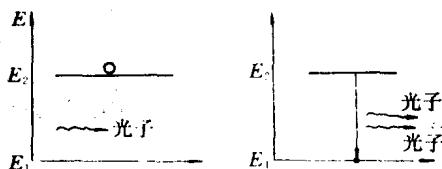


图 1-2

在热平衡条件下,大量同类粒子分布在低能级 E_1 上,高能级 E_2 和低能级 E_1 上的粒子数密度应有下列关系

$$\frac{N_2}{g_2} < \frac{N_1}{g_1} \quad (1-1)$$

式中, N_2 和 N_1 分别为 E_2 、 E_1 能级上的粒子数密度; g_2 和 g_1 分别为能级 E_2 、 E_1 的统计权重。(1-1)式称为粒子数的正常分布。在固体激光工作物质能级中,存在一个亚稳态能级 E_2 ,该能级的寿命较长,因此,在外界光泵浦的激励下,高能级 E_2 和低能级 E_1 的粒子数密度有可能满足下列关系

$$\frac{N_2}{g_2} > \frac{N_1}{g_1} \quad (1-2)$$

(1-2)式称为粒子数的反转分布。对于激光器来说,在激光工作物质中,能否实现粒子数反转分布,是能否产生激光的关键。

在外界光泵浦工作期间,激光工作物质中的一对能级 E_1 和 E_2 ,若实现了粒子数反转分布,则在粒子发光过程中,受激发射有可能占主导地位。聚集在 E_2 上的大量原子,在某些能量为 ϵ_{12} 的自发辐射的光子引诱下产生受激发射。能量为 ϵ_{12} 的光子在激光棒内的传播过程中,光强会越来越强。若在激光棒起始端上,假设光强度为 I_0 ,则沿光轴方向上,光的强度变化为

$$I = I_0 e^{Gz} \quad (1-3)$$

式中, G 为该工作物质的增益系数。一般表达式为

$$G(\nu) = \left(N_2 - N_1 \frac{g_2}{g_1} \right) \frac{c^2}{4\pi^2 \nu_0^2 n^2 \Delta \nu_F \tau} \quad (1-4)$$

式中, n 为工作物质的折射率; c 为光速; ν_0 为光的中心频率; $\Delta\nu_F$ 为工作物质的荧光宽度; τ 为能级 E_2 的寿命。

要想在有外界光泵浦作用的激光棒中产生激光束辐射, 则要在激光棒两端加一对由平面或球面镜组成的谐振腔。光在沿着激光棒的轴线方向上来回振荡, 从而得到放大, 在反射率较小的镜片一端, 辐射出一束高强度的激光束, 如图 1-3 所示。

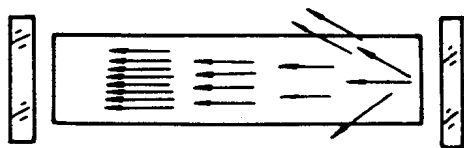


图 1-3

在外界光泵浦作用期间, 激光在沿着谐振腔轴线来回振荡的过程中, 存在着各种损耗。如由激光棒的有限口径所引起的衍射损耗, 激光棒的各种光学不均匀性引起的吸收和散射损耗, 构成谐振腔的介质膜片的透射、散射、吸收和衍射损耗等。若将它们都折算成单位距离内的平均损耗, 并用 α 来表示, 则(1-3)式应改为下列形式

$$I = I_0 e^{(g-\alpha)z} \quad (1-5)$$

由(1-5)式可知, 若要使光在谐振腔内得到增益放大, 其阈值条件为

$$G \geq \alpha \quad (1-5')$$

可见, 谐振腔的损耗愈小, 则激光器的阈值愈低。由于谐振腔内实际上存在着损耗, 要想得到光的放大, 则激光上、下一对能级的反转粒子数密度的差值应大于某一阈值 $\Delta N_{\text{阈}}$, 即

$$\Delta N_{\text{阈}} = N_2 - N_1 = \frac{4\pi^2 \nu^2 n^2 \Delta\nu_F \tau \alpha}{c^2} \quad (1-6)$$

每一种固体激光器的 $\Delta N_{\text{阈}}$ 与激光棒的材料性质有关。若假设激光棒内的损耗为零, 仅考虑谐振腔膜片的透射损耗, 而且反射镜的

表 1-1 3 种固体激光器的 $\Delta N_{\text{阈}}$ 值和性能

$\Delta N_{\text{阈}}$ 值和性能	红宝石	钕玻璃	$\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$
波 长/ μm	0.6943	1.06	1.06
频 率/ s^{-1}	4.32×10^{14}	2.83×10^{14}	2.83×10^{14}
吸收带宽	很宽	较宽	窄
荧光线宽/ s^{-1}	3.3×10^{11}	7.0×10^{12}	1.95×10^{11}
亚稳态能级寿命/s	3×10^{-3}	7×10^{-4}	2.3×10^{-4}
$\Delta N_{\text{阈}}/\text{cm}^{-3}$	8.7×10^{17}	1.4×10^{18}	1.8×10^{16}
$N_{2\text{阈}}/\text{cm}^{-3}$	8.4×10^{18}	1.4×10^{18}	1.8×10^{16}
荧光量子效率	0.5~0.7	0.4~0.6	1
折射率	1.76	1.52	1.82
热膨胀系数/ $^{\circ}\text{C}^{-1}$	6×10^{-6}	7.0×10^{-6}	6.9×10^{-6}
热传导率/ $\text{W} \cdot (\text{cm} \cdot ^{\circ}\text{C})^{-1}$	0.384	0.01	0.14
硬 度	9	4.5~6.5	8.5

反射率分别为 1.0 和 0.5, 腔长为 10cm, 则 3 种固体激光器的 $\Delta N_{\text{阈}}$ 值如表 1-1 所示。红宝石晶体内的 Cr^{3+} 粒子数密度 N_0 通常为 $1.58 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$, 从理论上可计算出满足阈值条件时, 激光上能级 E_2 上的粒子数密度 $N_{2\text{阈}}$ 为 $8.4 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ (相当于要将基态粒子数的 50% 以上抽运到激光上能级去)。对于四能级激光系统的 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 和钕玻璃激光工作物质来说, 由于激光下能级 E_1 近似于空能级, 故有

$$N_{2\text{阈}} = \Delta N_{\text{阈}}$$

可见, 三能级系统的阈值比四能级的要高得多。

二 固体激光器的基本结构

固体激光器的基本结构包括: 激光工作物质、谐振腔、光泵浦灯和聚光腔, 见图 1-4。

1. 激光棒

固体激光工作物质由发光中心的激活离子和为激活离子提供配位场的基质组成。一般分为玻璃和晶体两大类。属于玻璃类的激光工作物质有钕玻璃, 属于晶体的有掺钕钇铝石榴石和红宝石晶体。

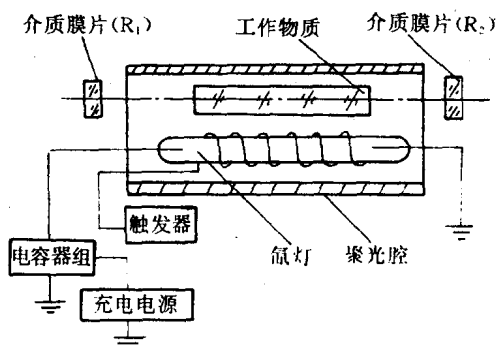


图 1-4

固体激光工作物质应是具有高的荧光量子效率,较长的亚稳态寿命,宽的吸收带和大的吸收系数,高的掺杂浓度,内损耗小的基质。也就是说要具有增益系数 $G(\nu)$ 高、阈值 ΔN_{th} 低的特性。为了减少光振荡过程中的损耗 α ,激光工作物质应具有很好的光学特性和物理特性:即光学均匀性好,无杂质颗粒、气泡、条纹、应力等缺陷,尽量减少激光棒的吸收和散射损耗。为了加工方便和激光输出参数的稳定性,激光工作物质还应具有机械强度高、熔点高、热导率高、热膨胀系数小及光学和化学稳定性高等特点。

固体激光工作物质通常被加工成棒状,见图 1-5。棒两端面的平行度应小于 $10''$ 。平整度在 $1/4$ 光圈内。从表 1-1 中可知,

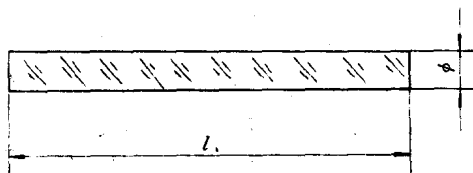


图 1-5

$\text{Nd}^{3+} : \text{YAG}$ 具有荧光量子效率高、阈值低、热传导率高等优点。它可以在脉冲和连续状态下运行,它在中小能量的脉冲激光器和连

续的激光加工中得到了广泛的应用。红宝石属于三能级系统,其阈值高,激光效率低,而且荧光量子效率随温度变化十分明显,通常只能在低重复率下运行。钕玻璃具有宽的吸收带,它属于四能级激光系统,阈值较低,而且容易加工,成本较低,可以做成较大尺寸的棒,其单次输出能量大。但是,由于它的热传导率很差,故也只适合于在单次脉冲状态下运行。此外,目前在激光加工中,掺钕铝酸钇晶体 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAP}$ 也被广泛应用。它的激光波长为 $1.0795\mu\text{m}$,其阈值和效率与 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 相近,而且还具有价格比较便宜、容易加工的优点。

2. 谐振腔

激光谐振腔是由两块平面或球面反射镜按一定方式组合而成的。其中一面是全反射膜片,另一面是具有一定透过率的膜片。谐振腔是决定于激光输出功率、振荡模式、发散角等输出参数的重要光学部件。固体激光器的谐振腔膜片,一般都是在玻璃基片上镀多层介质膜,每层介质膜的厚度为特定激光波长的 $1/4$ 。介质膜层数愈多,反射率愈高。全反射镜片的膜层大约为 19 层。另一面输出反射镜的透过率应由欲获得最佳输出的参数而定,决定于激光器的运行状态,一般由实验来确定。为了提高激光器的效率,介质膜片反射镜应具有较好的光学均匀性。在激光振荡放大过程中,其散射、吸收和衍射损耗应尽量地小。

3. 泵浦灯

在固体激光器中,激光工作物质内的粒子数反转是通过光泵抽运实现的。目前常用的光泵浦源是脉冲氙灯和连续氙灯(见图 1-6,图中,(a)表示直管单脉冲闪光灯;(b)表示带冷却水套的高功率水冷电极闪光灯;(c)表示直管玻璃封接闪光灯。)脉冲氙灯是在石英灯管内充以压力为 $2.66 \times 10^4 \sim 6.66 \times 10^4 \text{Pa}$ 的氙气。当强大的放电电流瞬间通过氙灯时,管内氙气受到强烈的电激发而发出耀眼的弧光。它是一种将电能变成光能的光电转换器件。泵浦灯发光的光谱特性应与被泵浦的工作物质的吸收光谱相匹配。图

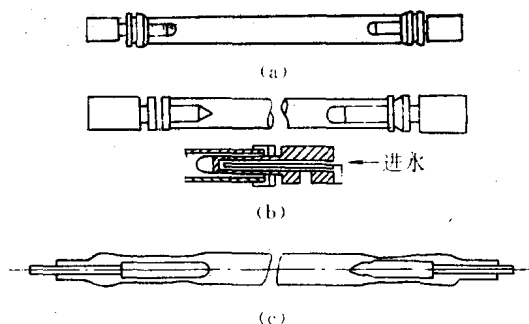


图 1-6

1-7 和图 1-8 分别为氙灯和氮灯的典型发光光谱特性。从图中可知, YAG 和钹玻璃的吸收光谱在 $7.5 \times 10^{-1} \mu\text{m}$, $8.1 \times 10^{-1} \mu\text{m}$ 和 $8.7 \times 10^{-1} \mu\text{m}$, 它们都在红外光谱范围内。由图 1-7 可知, 氙灯的工作电流密度为 $1700 \text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时, 发光光谱中的红外光谱占优势。此时, 氙灯光谱较好地与 YAG 和钹玻璃吸收光谱相匹配。红宝石的吸收光谱在紫色光 $4.1 \times 10^{-1} \mu\text{m}$ 和绿色光 $5.6 \times 10^{-1} \mu\text{m}$

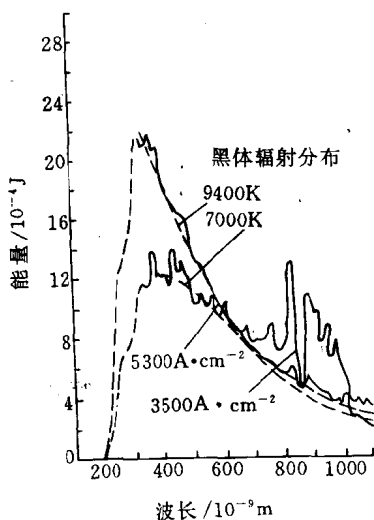


图 1-7

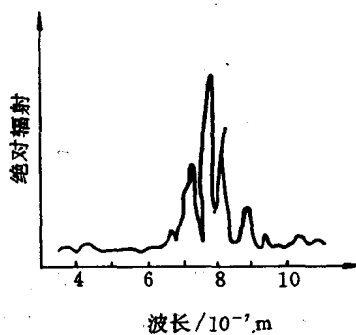


图 1-8

附近,当氙灯的工作电流密度为 $5300\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时,其发光光谱中的紫色光谱占优势,能较好地与红宝石吸收光谱相匹配。

连续氙灯一般使用低电流密度,其发光光谱中,在 $7 \times 10^{-1} \sim 9 \times 10^{-1} \mu\text{m}$ 之间有较长的线状光谱,见图 1-8。因而能与连续 YAG 的吸收光谱相匹配。

泵浦灯的电学特性是设计激光电源系统的重要参数。在激光加工中,脉冲氙灯与储能网络的电容储存的总能为 $E = \frac{1}{2}CU^2$,式中 C 是储能电容, U 是电容上充的电压,在储能网络向脉冲氙灯放电的过程中,氙灯的瞬时电阻 R (单位为 Ω) 可近似用一个非线性电阻来表示,它与瞬时电流 I (单位为 A) 的关系为

$$R = K_0 I^{1/2} \quad (1-7)$$

式中, K_0 对每一个灯均为常数,近似表示为

$$K_0 = K \frac{l}{d} \quad (1-8)$$

式中, d 和 l 分别是灯的内径和极间距,单位为 cm; K 是与管内气体种类和气压有关的常数。对于氙灯, K 值为 1.3。通常氙灯的瞬时电阻在 $0.05 \sim 1\Omega$ 之间。

泵浦灯在运行一段时间后,管壁会出现发黑、发白及龟裂的现象,这使得灯的发光效率大大降低,工作不稳定,从而丧失其使用价值。造成灯损坏的因素很多,其中主要是由于高温和冲击波的作用。鉴于上述原因,通过对泵浦灯进行破坏性试验,根据不同结构、尺寸、气压以及石英管的质量,得出灯的极限负载,它表示为

$$W_{\text{ex}} = \frac{I_p^2 R_{\text{eq}}}{\pi d l} \quad (1-9)$$

式中, I_p 为爆炸时的峰值电流; R_{eq} 为对应于峰值电流的等效电阻。对于脉冲氙灯,有

$$R_{\text{eq}} = 1.3 \frac{l}{d} I_p^{-1/2} \quad (1-10)$$

$$W_{\text{ex}} = 0.414 I_p^{3/2} d^{-2} \quad (1-11)$$

(1-10)式与(1-11)式中, R_{eq} 的单位为 Ω , W_{ex} 的单位为 $W \cdot cm^{-2}$; I_p 的单位为 A; l 与 d 的单位为 cm。

几种脉冲氙灯的极限负载的实验数据列于表 1-2 中。

表 1-2 脉冲氙灯的极限负载

内径 d /mm	管长 l /mm	爆炸时的峰值 电流 I_p /A	极限负载 $W_{ex} / W \cdot cm^{-2}$
4	7.5	780	56.1×10^3
7	15.2	1850	67.1×10^2
13	16.2	5000	85.6×10^3

在放电回路串有电感的情况下, 脉冲氙灯的极限输入能量的经验公式是

$$E_{ex} = K_1 l d T^{1/2} \quad (1-12)$$

对于纯电容放电回路

$$E_{ex} = K_2 l^3 d^3 / U_c^2 \quad (1-13)$$

式中, l 为灯极间距, 单位为 cm; d 为灯管内径, 单位为 cm; T 为放电持续时间, 单位为 μs ; U_c 为储能电容上的充电电压, 单位为 V, K_1, K_2 是与灯的结构、工艺和材料有关的常数 ($K_1 = 12, K_2 = 2$); E_{ex} 的单位为 J。

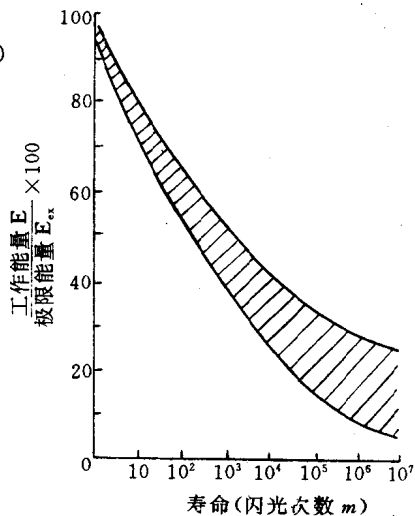


图 1-9

脉冲氙灯正常工作的“闪光次数”称为灯的寿命。图 1-9 给出了管状脉冲氙灯的寿命(闪光次数 m) 和工作能量 E 的关系。可用近似公式表示为

$$m = (E_{ex} / E)^{3.57} \quad (1-14)$$

由此式可以看出: 当工作能量 $E < E_{ex}$ 时, 灯的寿命会增长。为了使灯的有效寿命较长, 一般, 工作能量应选在极限输入能量的 40% 以下。