

文章编号: 1000-5889(2004)05-0005-04

电子束焊接电子枪电子光学系统设计

何成旦^{1,2}, 李鹤岐¹, 李春旭¹, 许启晋²

(1. 兰州理工大学材料科学与工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 兰州物理研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 电子光学系统的设计是电子束焊接电子枪设计的核心技术. 介绍了电子束焊接电子枪电子光学系统的组成, 分析了电子束束斑构成的4种主要物理因素. 根据局部真空电子束焊接技术的要求, 依据已给定的参数, 通过计算得到了电子束会聚半角、光路尺寸、磁透镜的参数和结构. 在此基础上设计完成的电子枪, 达到了1) 加速电压60 kV, 电子束束流134 mA, 即电子枪功率为8 kW; 2) 电子枪在工件上的束斑尺寸, 理论上设计计算直径为1.3 mm, 用AB试验法实测束斑直径为1.6 mm; 3) 设计完成的电子光学系统满足了局部真空电子束焊接技术应用电子枪的需求; 4) 设计完成的电子枪集成应用于局部真空电子束焊机. 经试验验证, 设计完成后的8 kW电子枪满足局部真空电子束焊接的要求.

关键词: 电子枪; 电子光学系统; 焊接; 束斑; 透镜

中图分类号: TG439.3 **文献标识码:** A

Design of electron optical system for electron gun for electron beam welding

HE Cheng-dan^{1,2}, LI He-qi¹, LI Chun-xu¹, XU Qi-jin²

(1. College of Materials Science and Engineering, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China; 2. Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The design of electron optical system is the key technique for design of electron gun used in electron beam welding. The composition of this system is introduced, the four kinds of main physical factors of the structure of electron beam spot are analyzed. On the basis of the technical requirement of local vacuum electron beam welding as well as according to the parameters given, the convergent half-angle, dimensions of light route, and parameters and structure of magnetic lens are obtained by means of calculation. So designed electron gun has following parameters and feature: 1) accelerate voltage is 60 kV, electron beam current is 134 mA, i. e. the power of the electron gun is 8 kW; 2) electron beam spot diameter on the work piece is 1.6 mm; 3) electron optical system of electron gun meets the requirements of local vacuum electron beam welding; 4) electron gun can be used on the local vacuum electron beam welding equipment.

Key words: electron gun; electron optics system; weld; electron beam spot; lens

对电子束焊接而言, 焊接电子枪电子光学系统的设计要求能在工件上获得尽可能小的束斑, 电子束斑尺寸要受到电子光学系统的几何参量电参量的影响. 通过分析构成束斑尺寸的物理因素和电子光学系统几何参量及电参量对束斑尺寸的影响, 设计了局部真空电子束焊接应用的8 kW电子枪电子光学系统. 局部真空电子束焊机所用电子枪与通常使用的电子束焊机电子枪在原理上是相同的, 但是

在设计时也有一些特殊要求, 如电子枪的像距比较大, 这是由焊机本身的结构决定的^[1]. 电子枪在焊接过程中始终处于运动状态, 这对电子枪的稳定性要求更高.

1 系统设计依据^[1]

1.1 设计指标

1) 三级电子枪(具有可控制束流的栅极或聚束极). 2) 加速电压60 kV, 电子束电流134 mA, 即电子枪功率8 kW. 3) 导流系数 $p = \frac{1}{\sqrt{3}} = 0.0091 \times 10^{-6}$ (朴). 4) 选用直热式钨阴极.

收稿日期: 2004-02-17

基金项目: 国家“九五”先进制造技术基金(18-7-3-2)

作者简介: 何成旦(1966-), 男, 山西平陆人, 高级工程师, 博士生

1.2 电子光学基本参数的选择

1) 物距和像距: 根据局部真空电子束焊接技术的特点和要求, 结合局部真空电子束焊机的总体设计, 选择电子光学系统中磁透镜的物距 $u=266\text{ mm}$, 选择像距 $z=356\text{ mm}$.

2) 磁透镜参数: 磁透镜内径 D 为 80 mm , 间隙 S 为 32 mm , S/D 为 0.4 .

2 物理因素和计算方法

2.1 物理因素

构成焊接用电子枪电子光学最基本的部分是静电透镜和磁透镜, 如图 1 所示.

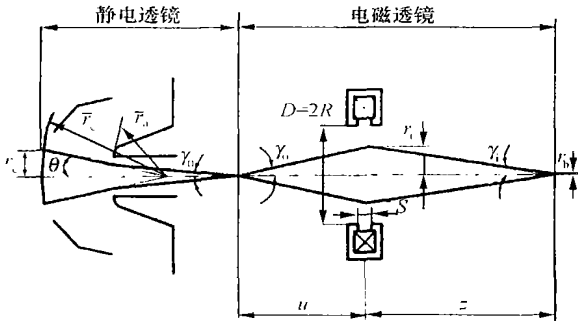


图 1 电子束焊接用电子枪电子光学系统

Fig. 1 Scheme of electron optical system of electron gun for electron beam welding

焊接用电子枪的电子束束斑尺寸主要因素有^{2,3}:

- 1) 热初速. 在静电透镜区由于热发射电子的初速构成的束斑半径为 r_T ;
- 2) 漂移区空间电荷. 电子束在通过磁透镜中心面后, 在漂移区因空间电荷力引起的束半径为 r_s ;
- 3) 磁透镜球差. 球差弥散圆半径为 r_{sa} ;
- 4) 色差. 加速电压和磁透镜聚焦电流波动引起的色差弥散圆半径为 r_{ch} .

2.2 近似计算方法

1) 热初速效应下工件上的电子束束斑半径 r_T
只考虑热初速效应下工件上的电子束束斑半径为 r_T :

$$r_T = M \frac{r_c}{\gamma_0} \sqrt{\frac{T}{11\ 600 V_a}} \quad (1)$$

式中: M 为电子光学系统放大倍数, $M = \frac{z}{u} = \frac{356}{266} = 1.338$; r_c 为阴极等效半径, $\text{mm}^{1/4}$, $r_c = \sqrt{S_A/\pi}$, 其中 $S_A = 1.5\text{ mm} \times 1.5\text{ mm}$; γ_0 为阳极出口处会聚半角, rad ; T 为阴极温度, K ; 根据电子束束流 $I_a = 134\text{ mA}$

的要求, $j = \frac{I_a}{S_A} = 5.96\text{ A/cm}^2$, 由里查逊公式

$$j = AT^2 \exp\left(\frac{-e\varphi_s}{RT}\right), A \text{ 是钨阴极材料的发射常数, } \varphi_s \text{ 是钨阴极材料的功函数, 文[5]中: } A=60, \varphi_s=4.54, \text{ 经计算得到阴极温度 } T=2\ 885\text{ K}; V_a \text{ 为加速电压, } V_a=60\text{ kV}.$$

将以上数值带入公式得到:

$$r_T = 2.305 \times 10^{-3} / \gamma_0$$

2) 磁透镜中心面以后在空间电荷作用下在工件上构成的电子束束斑半径 r_s

电子越过磁透镜后进入无场空间, 直到工件表面. 在无场空间中, 电子既不受电场作用, 也不受磁场作用, 仅保持初始斜率作惯性运动. 然而电子束内部存在库仑斥力, 这个力使电子束造成发散. 如果在磁透镜中心面上入射处电子束束包络半径为 r_i , 电子初始速度径向向内的速度分量 v_i , 导流系数为 p , 电子束通过距离为 z , 在工件上得到最小束斑时需满足条件⁶:

$$\frac{dr_s}{dr_i} = 0$$

利用此条件得到 $p^{\frac{1}{2}} \frac{z}{r_i} - \frac{r_s}{r_i}$ 曲线, 见图 2.

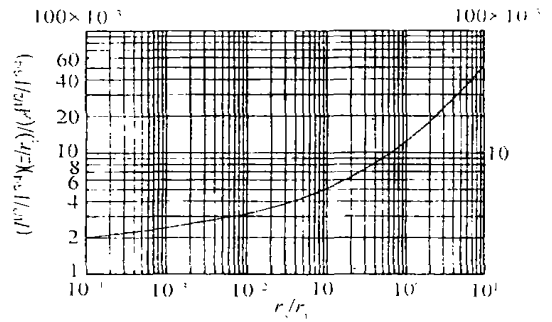


图 2 $p^{\frac{1}{2}} \frac{z}{r_i} - \frac{r_s}{r_i}$ 曲线

Fig. 2 Relationship curve of $p^{\frac{1}{2}} \frac{z}{r_i}$ vs $\frac{r_s}{r_i}$

由于 $\gamma_0 = \frac{r_i}{u}$, $r_i = u\gamma_0$, 由不同 γ_0 值得到不同的 $p^{\frac{1}{2}} \frac{z}{r_i}$ 值, 利用图 2 求得不同 γ_0 值对应的 r_s 值.

3) 工件上球差弥散圆半径 r_{sa}

一般资料上给出的球差公式为^{7,8}

$$r_{sao} = C_s \alpha_0^3$$

式中: r_{sao} 为折算到物方的球差弥散圆半径, $r_{sao} = \frac{r_{sa}}{M}$, 这里 $M' = \frac{z}{f}$, 这是 r_{sao} 的定义, 见图 3. 即认为磁透镜中心面有一直径 $D=2R$ 的光阑, 由像方无穷远处有一束半径为 R 的平行射线束在物方焦点处形成球差弥散圆, 其半径为 r_{sao} , α_0 是电子束在物

方焦点处所张的孔径半角, C_s 是折算到物方焦点的球差系数。

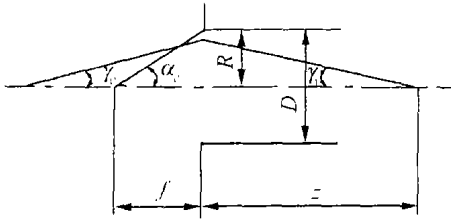


图3 折算到物方焦点处的球差(或色差)半径

Fig. 3 Sketch of radius of spherical aberration (or chromatic aberration) transformed at object focus

文[6]详细列出了磁透镜在不同 S/D 值时, $\frac{C_s}{R}$

K^2 的数据表。

由 $r_{sao} = \frac{r_{sa}}{M}$, 得到:

$$r_{sa} = M' r_{sao} = \frac{(1+M)^4}{M^3} C_s \gamma_0^3 \quad (2)$$

由于 $\frac{1}{f} = \frac{1}{z} + \frac{1}{u}$, 其中 $z = 266 \text{ mm}$; $u = 356 \text{ mm}$, 代入

公式得到 $f = 152.2 \text{ mm}$ 。从而 $\frac{S}{D} = \frac{32}{80} = 0.4$, $\frac{f}{R} =$

$$\frac{152.2}{40} = 3.81。$$

利用 $\frac{S}{D}$ 和 $\frac{f}{R}$ 的值, 文[9]得到磁透镜激磁参数

$k^2 = 0.255$, 再由文[6]得:

$$\frac{C_s}{R} = 36.5, C_s = 1460 \text{ mm}$$

将 $M = 1.338$, 及 C_s 值带入上式得到 $r_{sa} =$

$$1.821 \times 10^4 \times \gamma_0^3。$$

4) 工件上色差弥散圆半径 r_{ch}

文献[6]给出物方焦点的色差公式:

$$r_{cho} = C_c \left[\left| \frac{\Delta V_a}{V_a} \right| + 2 \left| \frac{\Delta I}{I} \right| \right] \gamma_0 \quad (3)$$

式中: r_{cho} 为折算到物方焦点的色差弥散圆半径, C_c

为折算到物方焦点的色差系数, $\left| \frac{\Delta V_a}{V_a} \right|$, $\left| \frac{\Delta I}{I} \right|$ 分别

为高压电源及聚焦电源的稳定度, 见图3。同样按照

r_{cho} 的定义, 在工件上色差弥散圆半径 $r_{ch} = M' r_{cho}$ 。

式中, $M' = \frac{z}{f}$, 因而 $M' = 1 + M$, 得到:

$$r_{ch} = \frac{(1+M)^2}{M} \left[\left| \frac{\Delta V_a}{V_a} \right| + 2 \left| \frac{\Delta I}{I} \right| \right] C_c \gamma_0 \quad (4)$$

式中: $M = 1.338$, $\left| \frac{\Delta V_a}{V_a} \right| = 10^{-2}$, $\left| \frac{\Delta I}{I} \right| = 10^{-3}$, 查文

[6] 在不同 $\frac{S}{D}$ 值下 $\frac{C_c}{R}$ 关于激励参数 K^2 的数据表, 得

到 $\frac{C_c}{R} = 3.56$, 计算出 $C_c = 142.4 \text{ mm}$, 将这些数值带

入式(4)得到色差弥散圆半径公式 $r_{ch} = 6.981 \gamma_0$ 。

5) 工件上电子束束斑半径

由于 r_T 、 r_s 、 r_{sa} 、 r_{ch} 都是 γ_0 的函数, 即 $r_b =$

$R(\gamma_0)$ 。将上述1)~4)引用的公式中赋予的一系列

值, 得到对应的 r_T 、 r_s 、 r_{sa} 、 r_{ch} 的值计算结果见表1。

这4种物理因素构成的工件上综合电子束束斑为

$$r_b = \sqrt{r_T^2 + r_s^2 + r_{sa}^2 + r_{ch}^2}$$

在图4中分别绘出 $r_T - \gamma_0$ 、 $r_s - \gamma_0$ 、 $r_{sa} - \gamma_0$ 、 $r_{ch} - \gamma_0$ 、 $r_b - \gamma_0$ 的曲线。由 $r_b \sim \gamma_0$ 曲线可以得到在工件上获

得的最小束斑是, 当 $\gamma_0 = 0.02868 \text{ rad}$ 时, $r_b =$

$$0.650 \text{ mm}。$$

表1 在不同的 γ_0 时, r_T 、 r_s 、 r_{sa} 、 r_{ch} 、 r_b 的值

Tab. 1 Value of r_T 、 r_s 、 r_{sa} 、 r_{ch} 、 r_b corresponding to different γ_0

γ_0/rad	r_T/mm	r_s/mm	r_{sa}/mm	r_{ch}/mm	$r_b = \sqrt{r_T^2 + r_s^2 + r_{sa}^2 + r_{ch}^2}(\text{mm})$
0.010 00	0.230 50	2.766 4	0.018 2	0.069 81	2.776 9
0.015 00	0.153 67	1.719 7	0.061 5	0.104 72	1.730 8
0.022 15	0.104 60	0.883 7	0.197 9	0.154 63	0.924 6
0.025 01	0.092 16	0.665 2	0.284 9	0.174 59	0.750 1
0.027 02	0.085 31	0.539 0	0.359 2	0.188 63	0.680 0
0.028 02	0.082 26	0.484 5	0.400 6	0.195 61	0.663 5
0.028 28	0.081 51	0.470 2	0.411 9	0.197 42	0.660 6
0.028 48	0.080 93	0.454 5	0.420 7	0.198 82	0.655 5
0.028 68	0.080 37	0.438 7	0.429 6	0.200 22	0.650 8
0.028 88	0.079 81	0.434 0	0.438 6	0.201 61	0.654 0
0.029 02	0.079 43	0.428 4	0.445 0	0.202 59	0.654 9
0.029 24	0.078 83	0.427 8	0.455 2	0.204 12	0.661 9
0.029 93	0.077 01	0.398 1	0.488 2	0.208 94	0.668 1
0.031 48	0.073 22	0.334 9	0.568 1	0.219 76	0.699 0
0.033 45	0.068 91	0.267 0	0.681 6	0.233 51	0.771 4
0.036 10	0.063 85	0.192 1	0.856 7	0.252 01	0.915 7
0.040 00	0.057 63	0.106 4	1.165 4	0.279 24	1.204 5
0.050 00	0.046 10	0.023 3	2.276 3	0.349 05	2.303 4
0.060 00	0.038 42	0.005 2	3.933 4	0.418 86	3.955 8

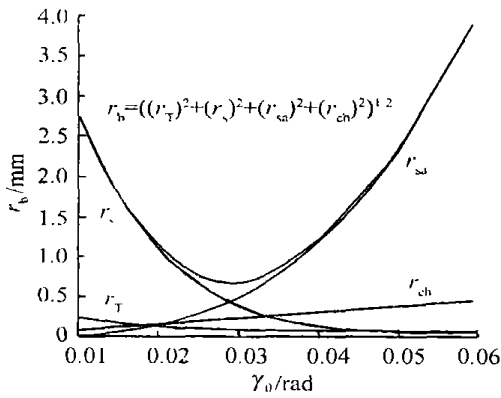


图 4 $r_T, r_s, r_{sa}, r_{ch}, r_b$ 与 γ_0 的关系曲线

Fig 4 Relationship curve of $r_T, r_s, r_{sa}, r_{ch}, r_b$ VS γ_0

3 磁透镜的计算与设计

3.1 计算安匝数

磁透镜安匝数 NI_F 计算有以下关系式:

$$(NI_F)^2 = \frac{K^2 V_r}{\beta} \quad (5)$$

式中: V_r 是 V_a 的相对论修正值, $V_r = V_a(1 + 0.978 \times 10^{-6} V_a) = 6.352 \times 10^4 V$; K^2 及 β 值由 S/D 与 f/R 确定, 查文[9] 得到 $K^2 = 0.255, \beta = 0.127$.

将以上数值代入式(5)得到:

$$NI_F = \sqrt{\frac{K^2 V_r}{\beta}} = 1129 \text{ (安匝)}$$

考虑损耗: $NI_F \times 1.3 = 1468 \text{ (安匝)}$.

取 $NI_F = 1500 \text{ (安匝)}$.

3.2 聚焦线圈结构的计算

取聚焦电流 $I_f = 1 \text{ A}$, 则聚焦线圈匝数 $N = 1500 \text{ (匝)}$.

取铜导线电流密度 $j = 2 \text{ A/mm}^2$, 则导线截面积 $S = I_f/j = 0.5 \text{ mm}^2$, 导线直径 $d = \sqrt{\frac{4S}{\pi}} = 0.798 \text{ mm}$, 选导线直径为 0.8 mm , 漆包线外径为 0.89 mm .

取线圈内径 $D_{内} = 90 \text{ mm}$, 线圈外径 $D_{外} = 112 \text{ mm}$, 取线圈层数 n 为 12 层, 每层匝数 $M = 125 \text{ 匝}$, 取线圈高 h 为 115 mm .

4 实验结果

1) 将设计完成的电子枪, 结合大直径旋转动密封装置^[1], 集成应用于局部真空电子束焊机上, 在加速电压 60 kV 时, 电子束最大束流达到 134 mA . 实验结果表明, 设计完成的 8 kW 电子枪达到了局部真空电子束焊接技术的要求.

2) 在局部真空电子束焊接的工作距离上, 采用 AB 试验法对设计完成的电子枪的电子束流焦点尺寸进行了测量^[10, 11]. 实测结果电子束流焦点束斑最小直径为 1.6 mm , 而理论设计最佳束斑直径为 1.3 mm . 造成电子束流焦点束斑直径增大的主要原因是电极形位和装配偏差的影响结果.

5 结论

1) 局部真空电子束焊接用电子枪的特点是像距较大, 焊接时对电子枪稳定度要求较高. 对于 60 kV , 导流系数 10^{-8} 左右的电子枪设计, 构成工件上束斑尺寸 r_b 的物理因素主要有 r_T, r_s, r_{sa}, r_{ch} .

2) 设计完成的电子枪电子光学系统的指标是加速电压为 60 kV , 电子束电流为 134 mA , 即电子枪功率为 8 kW . 经实测, 加速电压为 60 kV , 电子束电流为 134 mA , 能稳定工作, 达到了设计指标的要求.

3) 针对局部真空电子束焊接使用的电子枪, 理论上设计的电子束流束斑直径为 1.3 mm , 实测电子束束斑直径为 1.6 mm .

4) 设计完成的电子枪, 结合大直径旋转动密封装置, 集成应用于局部真空电子束焊机上, 满足直径在 $100 \sim 300 \text{ mm}$ 范围内, 法兰环缝局部真空电子束焊接的要求.

参考文献:

[1] 何成旦, 李鹤岐, 许启晋. 局部真空电子束旋转动密封装置设计[J]. 甘肃工业大学学报, 2003, 29(4): 7-10.
 [2] 周广德, 林 达. 电子束焊接装置用电子光学系统的设计与分析[J]. 焊接学报, 1981, 2(4): 160-169.
 [3] 一机系统电子枪攻关组. 60 千伏 100 毫安电子枪电子光学系统计算和电子计算机复算[J]. 电焊机, 1977(20): 1-30.
 [4] 何成旦, 李鹤岐, 许启晋, 等. 电子枪新型阴极的设计[J]. 甘肃工业大学学报, 2003, 29(3): 1-5.
 [5] 达道安. 真空设计手册[K]. 修订版. 北京: 国防工业出版社, 1995.
 [6] El-Kareh A B El-Kareh J C J. Electron beams, lenses and optics Vol. 2[M]. New York: Academic Press, 1970.
 [7] 赵国骏. 电子光学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1985.
 [8] 应根裕. 电子光学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1984.
 [9] El-Kareh A B El-Kareh J C J. Electron beams, lenses and optics Vol. 1[M]. New York: Academic Press, 1970. 343-346.
 [10] 王之康, 高永华, 徐 宾. 真空电子束焊接设备及工艺[M]. 北京: 原子能出版社, 1990.
 [11] 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.