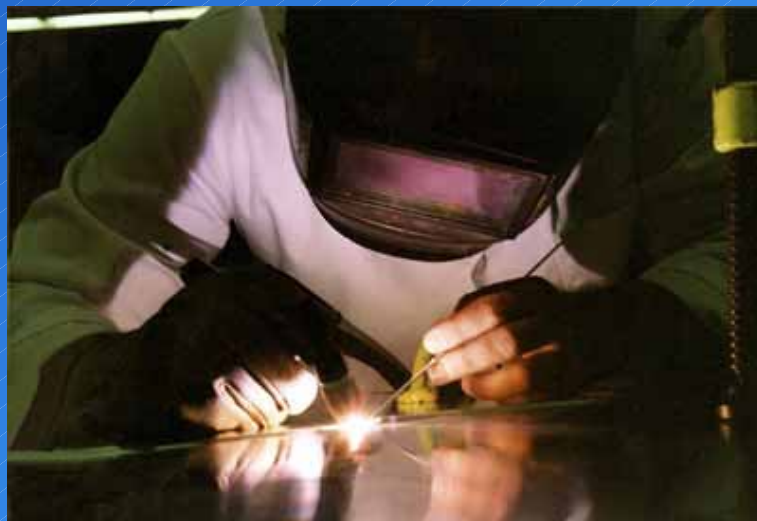


# 《焊接过程建模基础》

---

## 焊接电弧物理 Welding Arc Physics

林三宝 博士  
2006年2月20日



# 概述

---

## 授课内容

- 焊接热源强度
- 电弧等离子体
- 电弧的导电机制
- 电弧的温度
- 电弧力
- 母材的熔化和焊缝成形

Stresses theoretical knowledge of the underlying physics that govern welding arc processes

# 关于本课程

---

- 共8/36学时
- 教学：
  - 课堂授课
  - 讨论，围绕heat flow/arc temperature, arc force, weld pool convection三个方向，阅读参考文献(给定/自查)，做出阅读报告，部分讲解
  - 专题讲座
- 提交 Reading report
- 后续焊接变形模拟(方洪渊教授)、MIG建模(耿正教授)，焊接数值模拟(魏艳红教授)
- 参考文献从<http://www.weld.labs.gov.cn/~linsb/arcphysics.htm>下载。

# 参考书籍

---

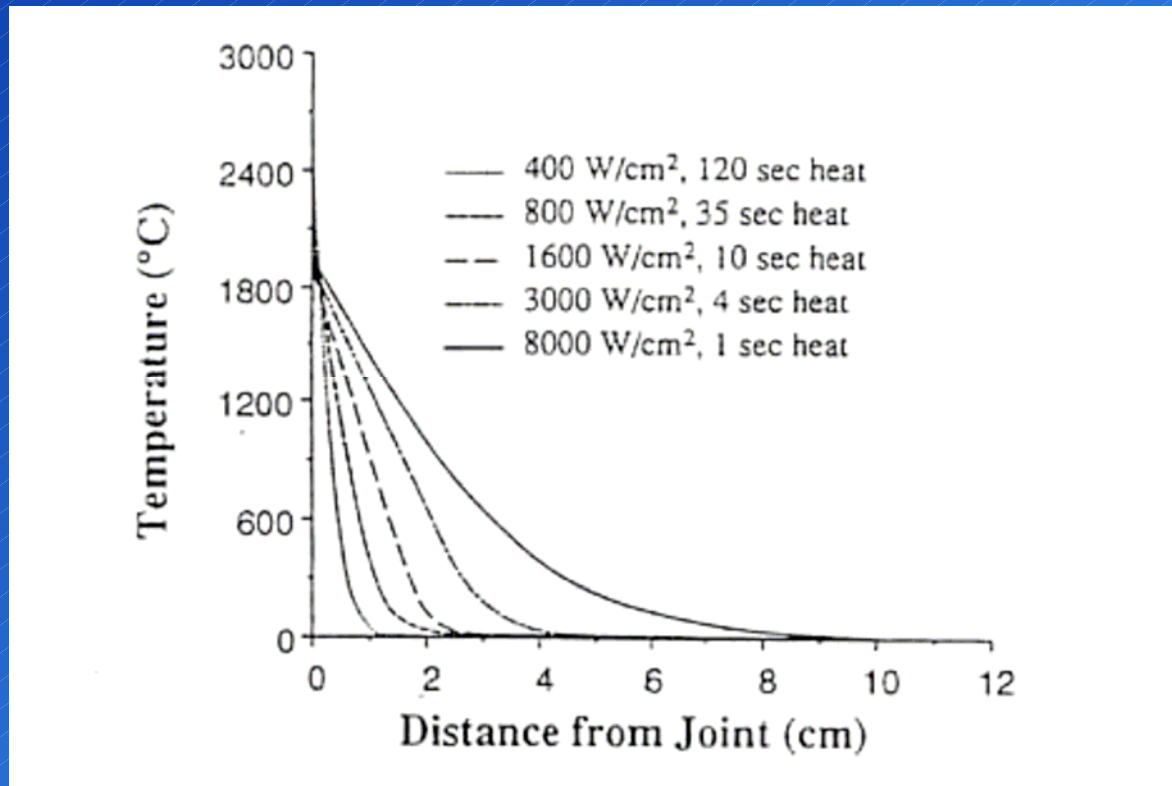
- 日本《焊接电弧现象》
- 杨春利、林三宝编著，《电弧焊基础》
- 美国《焊接手册》第一卷
- Prof. Thomas Eagar, MIT <Welding and Joining Process>  
<http://ocw.mit.edu/OcwWeb/Materials-Science-and-Engineering/3-37Welding-and-Joining-ProcessesFall2002/coursehome/index.htm>

# 焊接热源/*heat intensity*

---

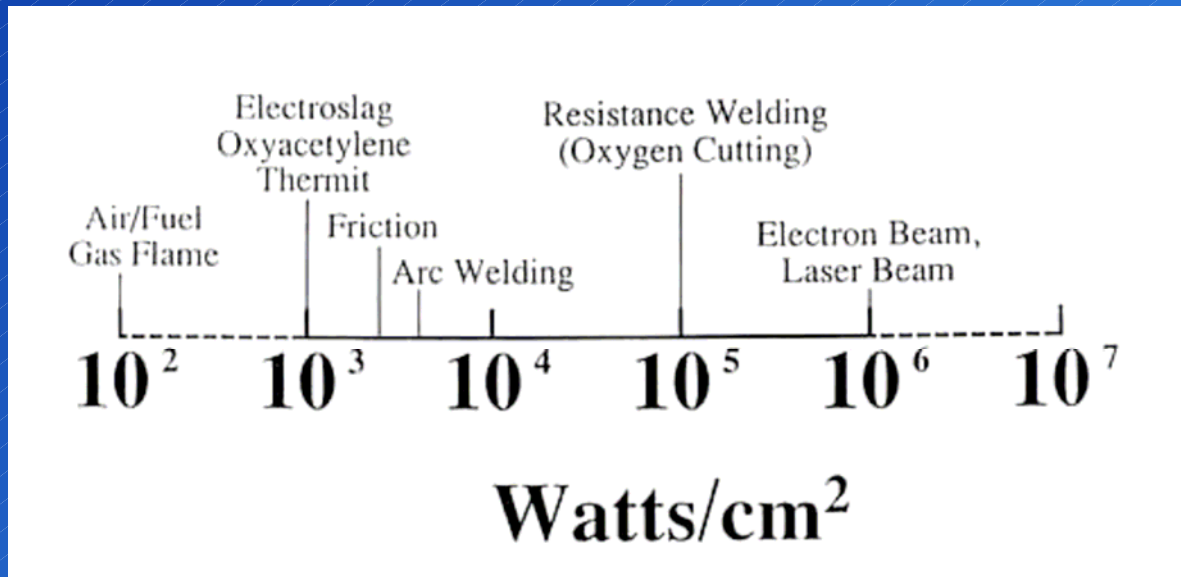
- 在熔化焊(fusion welding)中焊接热源用于熔化被焊金属
- 热源强度与熔化焊过程中的温度分布、熔深、HAZ等有关，是最关键的因素
- 在低于  $100 \text{ W/cm}^2$  的功率密度(power density)下，金属不可能被熔化，只是加热和传导
- 至少需要  $500 - 1000 \text{ w/cm}^2$ 的功率密度才能熔化金属
- 如果功率密度过高，大约  $10^7 \text{ w/cm}^2$ ，工件在导热之前直接汽化，形成钻孔和切割，例如激光束(Laser Beam)和电子束(Electron Beam)

# 焊接热源/heat intensity



厚板经过一定加热时间后的温度分布(室温20度)

# 焊接热源/heat intensity



熔化焊接中各种方法常用的功率密度

- 任何热源都在此坐标上

# 焊接热源/*heat intensity*

---

## 功率密度的增加将会：

- 提高热效率
- 降低HAZ的宽度
- 降低作用时间(Interaction time):  $10\text{s} - 10^{-5}\text{s}$
- 提高焊接速度： $0.1\text{cm/s} - 100\text{cm/s}$
- 增加了对焊接自动化的需要
- 增加设备成本
- 增加熔透深度
- 增加生产过程中额外的要求



# 焊接热源/*heat intensity*

---

## 提高热效率

- 功率密度低: 2-10% 热效率
- 电弧焊的热效率为 30-70% (图中所示)
- 功率密度高 ( $10^6$  watts/cm<sup>2</sup>): 99% 热效率

# 焊接热源/heat intensity

热效率(电弧焊)：

- **线能量**：单位长度从移动热源输入的能量，J/mm

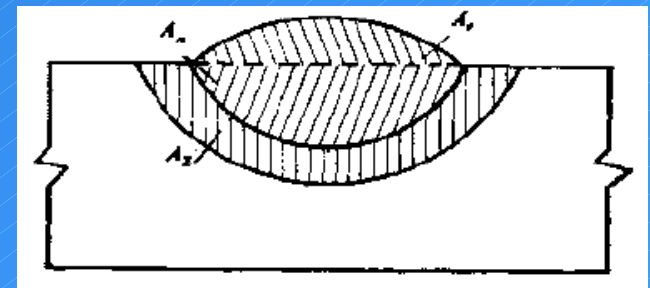
$$H = UI/v, H_n = f_1 H$$

- **比热量**：熔化单位体积的金属所需要的热量

$$q = \frac{(T_m + 273)^2}{300000} (J / mm^3)$$

- **熔化效率**：有效线能量中用于熔化金属能量的百分率

$$f_2 = \frac{qA_w}{H_n} = \frac{qA_w v}{f_1 P} = \frac{qA_w v}{f_1 UI}$$



# 焊接热源/heat intensity

- 熔化效率同焊接方法、被焊材料、接头形状、板厚等都有关系；

- 氧乙炔焊接铝合金.....
- Laser: 99%
- Arc: 40%

Table 1 Thermal diffusivities of common elements from 20 to 100 °C (68 to 212 °F)

Element	Density		Heat capacity		Thermal conductivity			Thermal diffusivity cm <sup>2</sup> /s
	g/cm <sup>3</sup>	lb/in. <sup>3</sup>	J/kg · K	cal <sub>IT</sub> /g · °C	W/m · K	cal <sub>IT</sub> /cm · s · °C	mm <sup>2</sup> /s	
Aluminum	2.699	0.098	900	0.215	221	0.53	91	0.91
Antimony	6.62	0.239	205	0.049	19	0.045	14	0.14
Beryllium	1.848	0.067	1880	0.45	147	0.35	42	0.42
Bismuth	9.80	0.354	123	0.0294	8	0.020	7	0.069
Cadmium	8.65	0.313	230	0.055	92	0.22	46	0.46
Carbon	2.25	0.081	691	0.165	24	0.057	15	0.15
Cobalt	8.85	0.320	414	0.099	69	0.165	19	0.188
Copper	8.96	0.324	385	0.092	394	0.941	114	1.14
Gallium	5.907	0.213	331	0.079	29-38	0.07-0.09	17	0.17
Germanium	5.323	0.192	306	0.073	59	0.14	36	0.36
Gold	19.32	0.698	131	0.0312	297	0.71	118	1.178
Hafnium	13.09	0.472	147	0.0351	22	0.053	12	0.12
Indium	7.31	0.264	239	0.057	24	0.057	14	0.137
Iridium	22.5	0.813	129	0.0307	59	0.14	20	0.20
Iron	7.87	0.284	460	0.11	75	0.18	21	0.208
Lead	11.36	0.410	129	0.0309	35	0.083	24	0.236
Magnesium	1.74	0.063	1025	0.245	154	0.367	86	0.86
Molybdenum	10.22	0.369	276	0.066	142	0.34	50	0.50
Nickel	8.902	0.322	440	0.105	92	0.22	23.5	0.235
Niobium	8.57	0.310	268	0.064	54	0.129	23.6	0.236
Palladium	12.02	0.434	244	0.0584	70	0.168	24	0.24
Platinum	21.45	0.775	131	0.0314	69	0.165	24.5	0.245
Plutonium	19.84	0.717	138	0.033	8	0.020	3.0	0.030
Rhodium	12.44	0.449	247	0.059	88	0.21	29	0.286
Silicon	2.33	0.084	678	0.162	84	0.20	53	0.53
Silver	10.49	0.379	234	0.0559	418	1.0	170	1.705
Sodium	0.9712	0.035	1235	0.295	134	0.32	112	1.12
Tantalum	16.6	0.600	142	0.034	54	0.130	23	0.23
Tin	7.2984	0.264	226	0.054	63	0.150	38	0.38
Titanium	4.507	0.163	519	0.124	22	0.052	9	0.092
Tungsten	19.3	0.697	138	0.033	166	0.397	62	0.62
Uranium	19.07	0.689	117	0.0279	30	0.071	13	0.13
Vanadium	6.1	0.22	498	0.119	31	0.074	10	0.10
Zinc	7.133	0.258	383	0.0915	113	0.27	41	0.41
Zirconium	6.489	0.234	280	0.067	21	0.050	12	0.12

常用金属的热扩散(导热)系数

# 焊接热源/heat intensity

---

- 焊缝金属同线能量之间的关系：

$$A_w = f_2 \frac{H_n}{q} = \frac{f_1 f_2 H}{q}$$

- 假设在钢板上堆焊一个焊道， $U=20V$ ， $I=200A$ ， $v=5mm/s$ ， $f_1=0.9$ ， $f_2=0.3$ ， $q=10j/mm_3$

$$A_w = \frac{0.9 \times 0.3 \times 20 \times 200}{5 \times 10} = 21.6mm^2$$

# 焊接热源/heat intensity

Table 2 Thermal diffusivities of common alloys from 20 to 100 °C (68 to 212 °F)

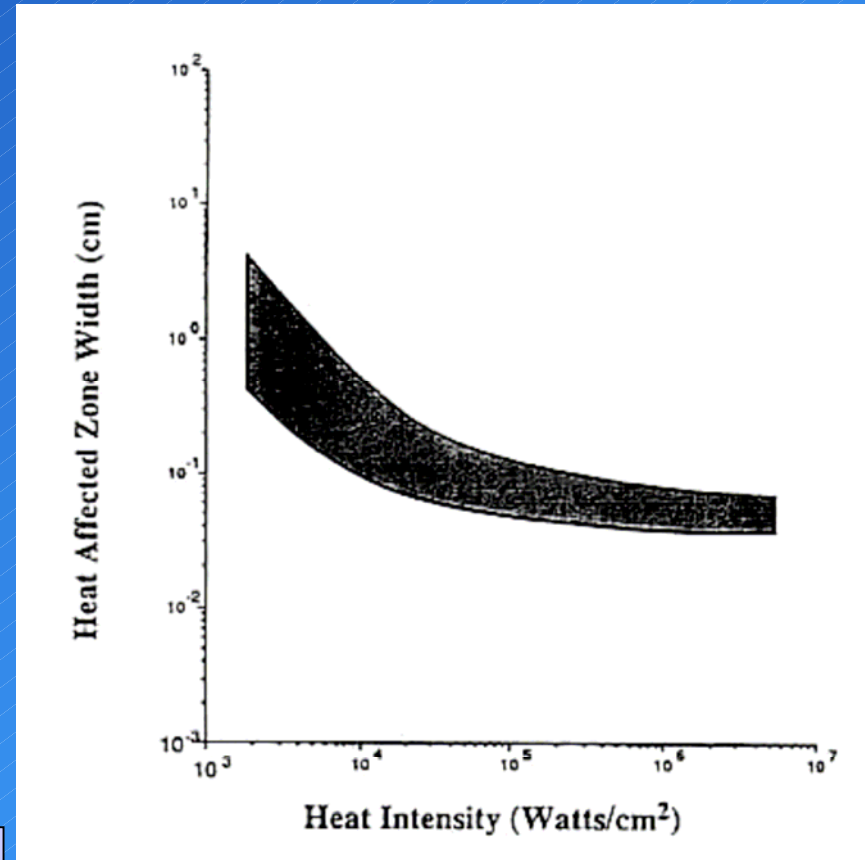
Alloys	Density		Heat capacity		Thermal conductivity		Thermal diffusivity	
	g/cm <sup>3</sup>	lb/in. <sup>3</sup>	J/kg · K	cal <sub>T</sub> /g · °C	W/m · K	cal <sub>T</sub> /cm · s · °C	mm <sup>2</sup> /s	cm <sup>2</sup> /s
<b>Aluminum alloys</b>								
1100	2.71	0.098	963	0.23	222	0.53	85	0.85
2014	2.80	0.101	963	0.23	193	0.46	71	0.71
5052	2.68	0.097	965	0.23	138	0.33	54	0.54
6061	2.70	0.098	963	0.23	172	0.41	66	0.66
7075	2.80	0.101	963	0.23	121	0.29	45	0.45
<b>Copper alloys</b>								
Commercial bronze	8.80	0.318	377	0.09	188	0.45	57	0.57
Cartridge brass	8.53	0.308	377	0.09	121	0.29	38	0.38
Naval brass	8.41	0.303	377	0.09	117	0.28	37	0.37
Beryllium copper	8.23	0.297	419	0.1	84	0.20	24	0.24
9% aluminum bronze	7.58	0.273	435	0.104	60	0.144	18	0.18
<b>Magnesium alloys</b>								
AZ 31	1.78	0.064	1050	0.25	84	0.20	45	0.45
AZ 91	1.83	0.066	1005	0.24	84	0.20	46	0.46
ZW 1	1.8	0.065	1005	0.24	134	0.32	74	0.74
RZ 5	1.84	0.066	963	0.23	113	0.27	64	0.64
<b>Stainless steels</b>								
Type 301	7.9	0.285	502	0.12	16	0.039	4.1	0.041
Type 304	7.9	0.285	502	0.12	15.1	0.036	3.8	0.038
Type 316	8.0	0.289	502	0.12	15.5	0.037	3.9	0.039
Type 410	7.7	0.278	460	0.11	24	0.057	6.7	0.067
Type 430	7.7	0.278	460	0.11	26	0.062	7.3	0.073
Type 501	7.7	0.278	460	0.11	37	0.088	10	0.10
<b>Nickel-base alloys</b>								
Nimonic 80A	8.19	0.296	460	0.11	11	0.027	3.0	0.030
Inconel 600	8.42	0.304	460	0.11	15	0.035	3.8	0.038
Monel 400	8.83	0.319	419	0.10	22	0.052	5.8	0.058
<b>Titanium alloys</b>								
	4.3	0.160	611	0.146	5.9	0.014	2.1	0.021
	4.6	0.161	460	0.11	6.3	0.015	3.1	0.031

合金的热扩散(导热)系数

# 焊接热源/heat intensity

降低热影响区HAZ(Heat Affected Zone)宽度

- 功率密度低，热传导作用大，热影响区宽
- 反之.....
- $< 10^4 \text{w/cm}^2$ ，与熔化所需时间有关，  
 $> 10^4 \text{w/cm}^2$ 时，HAZ宽度与时间无关，在冷却阶段增加，正比于熔化区宽度



热影响区宽度同功率密度的关系

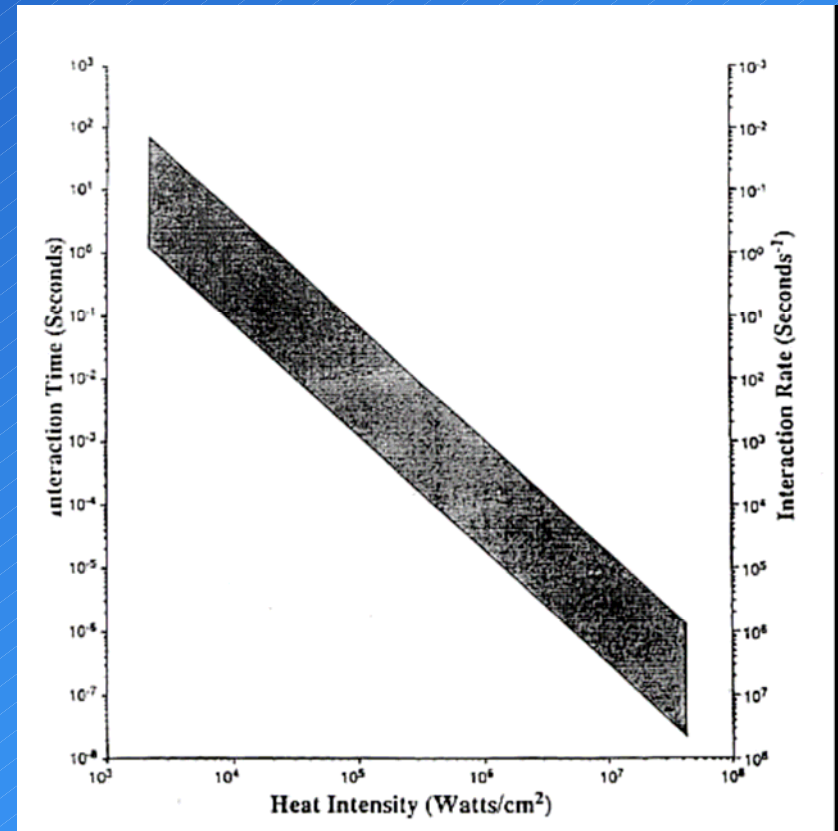
# 焊接热源/heat intensity

## 降低熔化金属所需时间(Interaction time)

- 使钢表面熔化所需时间

$$t_m = \left[ \frac{5000}{H.I.} \right]^2$$

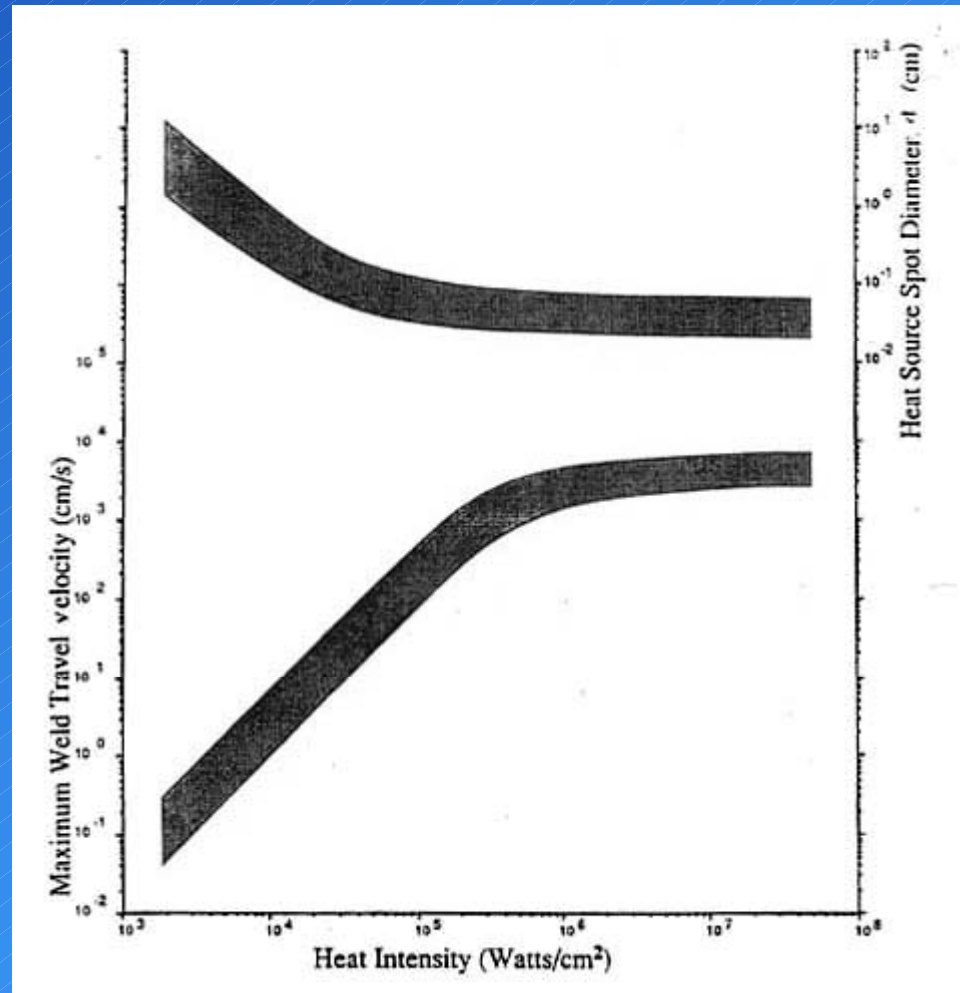
Heat intensity



# 焊接热源/heat intensity

## 提高焊接速度

- 从0.1cm/s – 100cm/s
- 人的反应时间约0.1s
- 氧乙炔焊接开始练起
- 弧焊需要较多的培训和实践
- 激光、电子束必须自动化焊接，成本高





# 焊接热源/heat intensity

## 增加焊接成本

- 汽车：电阻焊
- 航天航空：电子束

## 提高深宽比

- 0.1-10

