

文章编号: 0258-7025(2008)01-0137-05

Fe-C 混合粉末激光烧结成形致密度分析

范春华 董丽华 黄开旭

(上海海事大学工程训练中心, 上海 200135)

摘要 分析了金属粉末激光选区烧结成形过程致密化机制。选择不同的参数对 Fe-C 混合粉末进行了激光烧结成形实验,根据烧结件微观结构分析了金属粉末的致密化机制,根据致密度数据分析成形参数与致密度的关系建立了数学模型。结果表明,Fe-C 混合粉末在低功率激光作用下部分粉末熔化形成液相,在液相的参与下粉末通过重排、溶解沉淀导致致密化。成形参数对致密度的影响归结于烧结过程中产生的液相量,激光功率的增加、扫描间隔的减小、扫描速度的降低和切片层厚的减少都会提高烧结件的致密度。

关键词 激光技术;快速成形;激光烧结;金属粉末;烧结机制;致密度

中图分类号 TG 665;TG 14 **文献标识码** A

Analysis of Densification Rate of Fe-C Mixture Powder Forming with Laser Sintering

Fan Chunhua Dong Lihua Huang Kaixu

(Engineering Training Center, Shanghai Maritime University, Shanghai 200135, China)

Abstract Densification mechanism of metal powder sintered with selective laser was studied. Different parameters were used in the laser sintering of Fe-C mixed powder experiments. The densification mechanism of metal powder was analyzed by observing the microstructure of sintered part. Based on experiment, the relationship between the densification rate and forming parameters was studied and its mathematical model was established. The results show that part of powder melts into liquid phase by low power laser and the densification is caused by powders rearrangement, dissolution and deposition participated in the liquid phase. The affect of laser process parameters on densification rate is decided by the amount of liquid phase produced during laser sintering. With the increase of laser power, the decrease of scanning interval, scanning speed and piece thickness, the densification is improved.

Key words laser technique; rapid prototype; laser sintering; metal powder; sintering mechanism; densification rate

1 引言

选区激光烧结成形技术以激光为加热能量源,逐层烧结叠加完成零件的增材制造。近年来,快速成形技术在金属等材料的制备上逐步得到应用,其主要目标为获得满足使用性能的致密的金属零件^[1]。选区激光烧结成形技术主要采用三种金属粉末进行成形烧结:1)单一金属粉末;2)金属与低熔点金属粘结剂的混合粉末;3)金属与有机粘结剂的混合粉末^[2]。

液相烧结机制通常被认为是金属粉末选区烧结的唯一可行机制,如多组分铜基粉末(含铜,预合金 CuSn, CuP)的烧结机制为熔点较低的 CuSn 充当粘

结金属,熔点较高的 Cu 充当结构金属,镍合金激光直接烧结成形的实验研究表明其烧结过程为不完全烧结过程。在激光工艺参数方面,已有的研究一般是采用高功率(1 kW 以上)激光对金属粉末进行多层熔覆构建三维实体^[3,4]。在致密度模型方面,文献^[5]以聚苯乙烯材料为例,给出激光烧结过程的模拟计算模型,采用数值分析的方法对烧结致密化程度进行了研究。本文选择未添加低熔点粘结剂组分的 Fe-C 混合粉末进行了低功率激光成形工艺实验,对烧结工艺参数与烧结件致密度的关系进行分析,结合烧结过程致密化机制和激光与材料的相互作用过程,推导了烧结件相对密度的数学模型。

收稿日期:2007-03-22;收到修改稿日期:2007-08-28

基金项目:上海市教委青年基金(2004117)资助项目。

作者简介:范春华(1975—),男,福建人,硕士,工程师,主要从事快速成形技术的研究。E-mail:chfan@adm.shmtu.edu.cn

2 实 验

实验材料选用 Fe,C 粉末按一定比例混合后进行激光烧结,材料的主要物理参数和组分如表 1 所示。

表 1 实验材料成分及相关性能参数

Table 1 Composition and characteristic of experimental material

Composition	Powder granularity /mesh	Mass fraction /%
Iron powder	200	99.6
Graphite powder	200	0.4

实验在北京隆源自动化成型公司生产的 AFS-320 激光成型机上进行,激光最大功率为 50 W,功率连续可调,焦平面光斑直径 0.4 mm,最小扫描间隔为 0.1 mm。实验烧结样块为底 10 mm×10 mm,具有一定高度的长方体,烧结精度为±0.2 mm。烧结试样如图 1 所示。

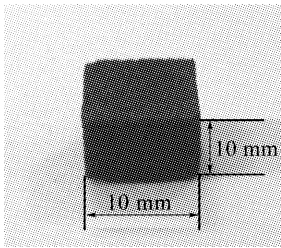


图 1 烧结件试样

Fig. 1 Sintering part specimen

选择不同的工艺参数(激光功率 P 、扫描速度 v 、扫描间隔 Δ 和切片层厚 l) 进行成形烧结,测试不同工艺参数下烧结件的密度。烧结件的密度 $\rho = m/V$ (g/cm^3), m 和 V 分别为试件的质量和体积,质量用单盘分析天平 DTG160 测得,精度为 0.0001 g。

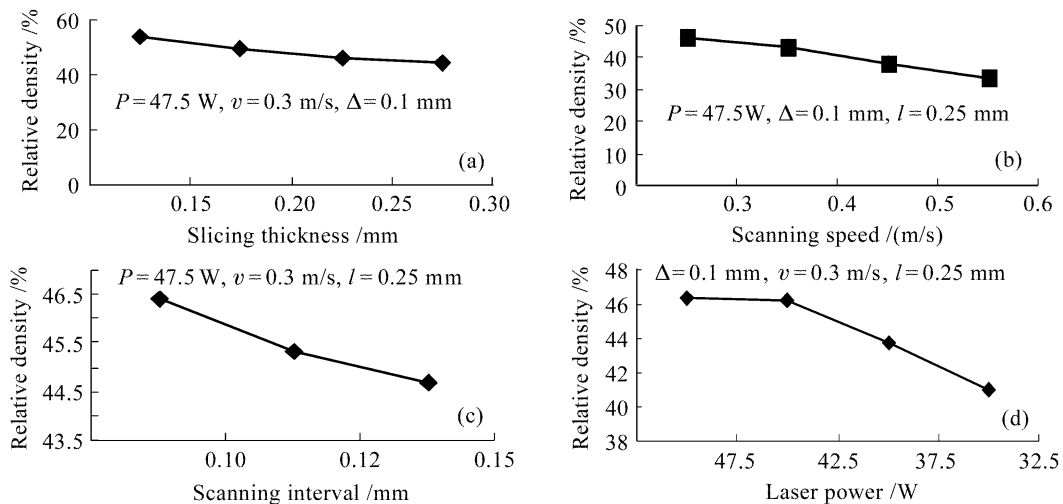


图 2 成形参数与烧结件相对密度的关系

Fig. 2 Relationship between relative density and forming parameters

由于试样的形状规则,试样的体积用千分尺测量尺寸后计算求得。进而可求得烧结件与纯铁(密度为 $7.8 \text{ g}/\text{cm}^3$)的相对密度。烧结件的微观形貌用扫描电镜进行观察。

3 实验结果及分析

3.1 工艺参数与致密度的关系

选区激光烧结成形主要工艺参数包括切片层厚 l ,扫描速度 v ,扫描间隔 Δ ,激光功率 P 。为了分析各单一参数对烧结致密度的影响,在其余参数选定的情况下改变其中一个参数,各参数烧结件的致密度数据如图 2(a)~(d)所示。

图 2 的实验数据表明,随着切片层厚、扫描速度和扫描间隔的增加和激光功率的减少,烧结件致密度下降。金属粉末通过吸收激光能量并转化为热能进行烧结,按一定的机制连接成形,在不产生气化的前提下,单位体积粉末吸收的能量的大小将决定烧结致密化程度的高低。在成形过程中,单位体积吸收的能量将由激光功率密度、切片层厚和激光作用时间决定。在粉末表面光斑半径不变的前提下,激光的功率密度由激光功率决定,扫描速度决定其作用时间。由于在一定的激光烧结工艺参数下,激光的熔深是一定的,层厚的增加将使得层与层之间的连接强度和致密度降低,烧结件的整体致密度降低,扫描间隔对烧结的影响如图 3 所示。

为了保证成形,激光的前后扫描轨迹必须相互搭接,在搭接处激光将多次扫描,激光能量则多次叠加。随着扫描间隔的减小,能量叠加区的范围和次数将增加,从而增加单位体积粉末吸收的能量,提高烧结致密度。

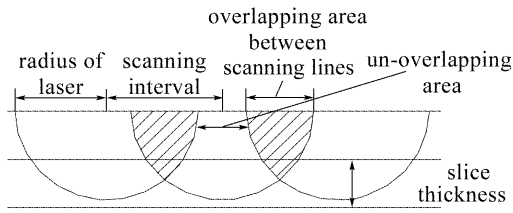


图 3 扫描间隔对成形的影响

Fig. 3 Scan interval affection on forming process

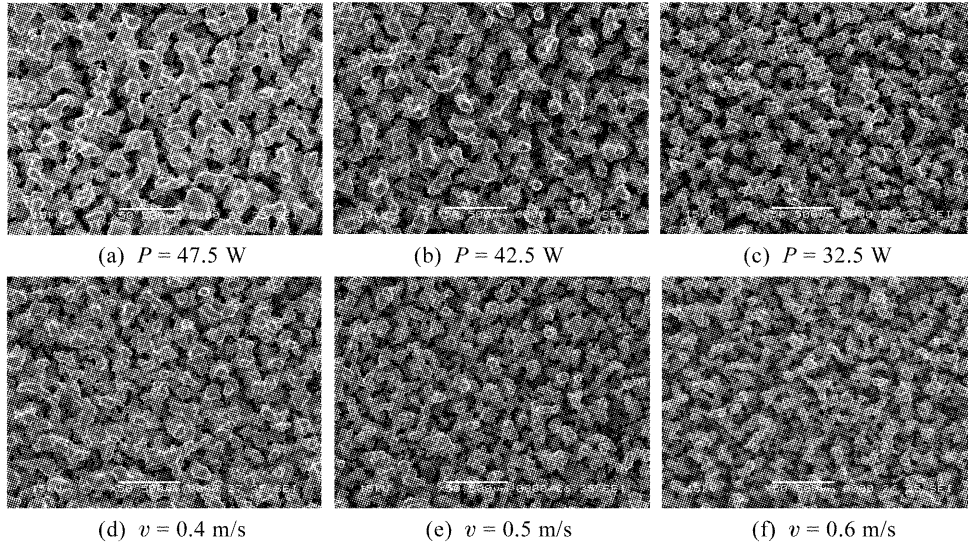


图 4 不同烧结工艺参数下烧结件表面的显微结构

Fig. 4 Surface microstructure of sintering part with different sintering parameters

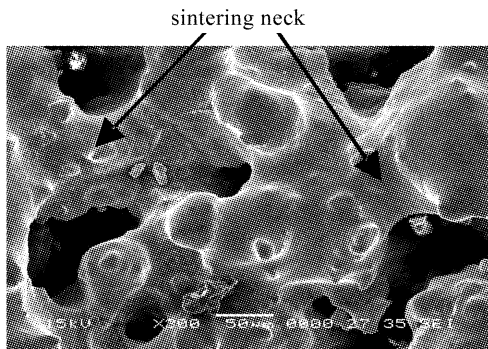


图 5 粉末烧结连接形式

Fig. 5 Connection shape of powder sintering

激光快速成形过程是一个十分复杂的非平衡短时物理冶金过程^[6]。在激光的作用下,部分粉末被瞬间加热而发生固相、液相、固相的转变,随着激光光斑的移动,不断产生新的熔池,相邻金属颗粒之间通过烧结颈连接,如图 5 所示。

根据烧结件的显微结构及粉末烧结的连接形式,在液相的参与下,Fe-C 混合粉末的液相烧结致密化过程可由图 6 所示。

图 7 为液相烧结溶解、沉淀过程的模型。Kingery 提出^[7]已溶解的体积 V_s 约为

$$V_s = \frac{1}{2} \pi x^2 h, \quad (1)$$

3.2 烧结机制分析

图 4 为不同成形参数下烧结件表面的显微结构。其中图 4(a)~(c)的烧结工艺参数为扫描间隔 0.1 mm,扫描速度 0.3 m/s,切片层厚 0.25 mm,激光功率如图中所示。图 4(d)~(f)的烧结工艺参数为激光功率 47.5 W,扫描间隔 0.1 mm,切片层厚 0.25 mm,扫描速度如图中所示。

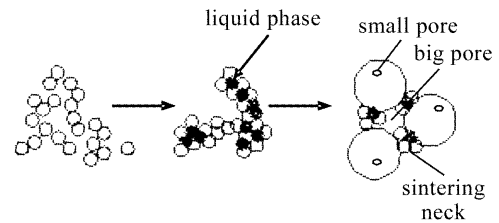


图 6 粉末烧结致密化过程

Fig. 6 Densification process of powder sintering

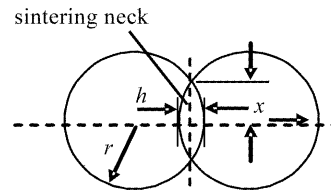


图 7 液相烧结过程模型

Fig. 7 Model of liquid phase sintering

式中 h 为每个球的溶解量,且形成半径为 x 的接触面。(1) 式表明,随着颗粒半径 r 和连接颈宽度的增加,溶解的体积增大。在液相烧结过程中,在液体表面张力和毛细引力的作用下,通过粉末重排、溶解和沉淀提高烧结致密度。图 2 和图 4 中,随着激光功率的减少和扫描速度的提高,激光成形烧结件的颗粒尺寸和连接颈的宽度减小,烧结件的致密度减小。

其原因在于功率的减小和扫描速度的增加将导致激光对粉末加热能量的减少,成形过程中产生的液相量减少,溶解、沉淀体积减小,导致致密度降低。因此,不同的工艺参数对烧结件致密度的影响很大程度上取决于该烧结工艺参数下单位体积产生的液相量,依此可建立烧结致密度模型。

3.3 烧结致密度模型的建立

由于 Fe-C 混合粉末中碳的质量分数仅为 0.4%,且一般的碳素钢和铁的密度没有多大差别,以单一铁粉计算的质量密度引起的误差很小。设铁粉的比热为 c_p (J/(g·K)),熔点为 T ,成形室环境温度为 t_0 , 1 mm^3 的 Fe 粉末完全熔化成液相所需能量为 W (J),铁粉的密度为 ρ (g/cm³),则

$$W = c_p(T - t_0)\rho/1000, \quad (2)$$

假定其功率密度不随时间变化,在光斑直径范围内,其功率密度 p_d 的分布为^[8]

$$p_d = p_0 \exp(-d^2/r_0^2), \quad (3)$$

式中 p_0 为激光光斑中心的功率密度, d 为考察点到光斑中心的距离, r_0 为激光光斑半径。激光光斑外的功率密度为 0,则激光的功率 P 为

$$P = \int_0^{r_0} p_0 \exp(-x^2/r_0^2) 2\pi x dx, \quad (4)$$

则

$$p_0 = \frac{P}{\pi r_0^2} \frac{1}{1 - e^{-1}} = \frac{P\lambda}{\pi r_0^2}, \quad (5)$$

式中 $\lambda = \frac{1}{1 - e^{-1}}$ 。在激光成形过程中,激光在粉床表面按一定扫描速度移动,激光对粉末的加热是光斑移动过程中一系列脉冲能量的叠加。设扫描速度为 v (m/s),在激光扫描平面内以光斑中心为原点建立 x, y 坐标系,取在扫描方向宽度为 s 的微小图元,分析激光一次扫描时对粉末加热单位面积吸收的能量密度 E_0 (J/mm²),如图 8 所示。则有

$$E_0 = \frac{4 \int_0^s \int_0^{\sqrt{r_0^2 - y^2}} p_0 \exp\left[-\frac{(x^2 + y^2)}{r_0^2}\right] dx dy}{2000sr_0} = \frac{P}{2000vr_0}. \quad (6)$$

由于扫描间隔和切片层厚及 Fe-C 粉末材料对激光

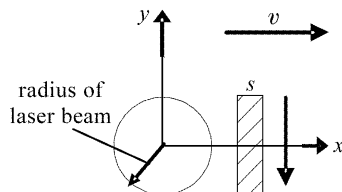


图 8 激光扫描加热过程

Fig. 8 Heating process of laser scanning

的吸收对扫描加热过程的影响,在整个工件的成形过程中,单位体积吸收的能量密度 E (J/mm³) 为

$$E = \alpha E_0 \frac{2r_0}{\Delta} \frac{1}{l} = \frac{\alpha P}{2000vr_0} \frac{2r_0}{\Delta} \frac{1}{l}, \quad (7)$$

式中 α 为粉末对激光的吸收比。若不考虑烧结粉末与周围粉末和环境的热传导及相变潜热,在激光作用下单位体积内 (mm³) 溶解为液相的体积分数 η 为

$$\eta = \frac{E}{W} = \frac{\alpha P}{2r_0v} \frac{2r_0}{\Delta} \frac{1}{l} \frac{1}{c_p(T - t_0)\rho} \times 100\%. \quad (8)$$

由于激光成形过程是逐层叠加的增材制造,粉末材料由铺粉系统逐层提供,在烧结层面内未烧结区域的粉末不能对致密化引起的收缩进行补充,激光烧结后成形工件相比于铺粉后粉末致密度的增加归结于每层粉末烧结后在成形高度方向的收缩率,如图 9 所示。

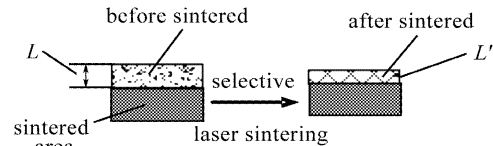


图 9 激光扫描烧结后粉层沿高度方向的收缩

Fig. 9 Shrinkage of powder in heightening direction after laser selective sintering

致密化引起的高度方向的收缩将在下层铺粉时在成形高度方向自动补偿。假定每层粉末烧结后收缩高度为 Δl ,粉末在成形高度方向的收缩主要由于液相参与下颗粒的重排及对孔隙的填充,未烧结前铺粉后粉末密度为 ρ_r ,烧结后粉末的密度为 ρ_s ,粉末熔化为液相后完全致密,其密度为 ρ ,根据质量不变的原则,单位体积熔解的液相量体积分数 η 与粉末烧结后高度方向的收缩近似存在关系

$$\rho l \eta = \rho_r \Delta l, \quad (9)$$

$$\rho_r(l + \Delta l) = \rho_s l, \quad (10)$$

因此烧结后 Fe-C 烧结件的相对理论密度 θ 为

$$\theta = \frac{\rho_s}{\rho} = \frac{(\rho_r + \alpha \eta)}{\rho} \times 100\% = \left[\frac{\rho_r}{\rho} + \frac{\alpha P}{2r_0v} \frac{2r_0}{\Delta} \frac{1}{l} \frac{1}{c_p(T - t_0)\rho} \right] \times 100\%, \quad (11)$$

(11)式表明,随着激光功率的增加、扫描间隔的减少、切片层厚的减少和扫描速度的降低烧结成形件的致密度将增加,此外烧结成形件的致密度还和铺粉后的粉末初始致密度及工作室环境温度有关。

由于采用铺粉的方式进行粉末供给,铺粉后粉末的密度略大于松装密度,铁粉的松装密度为 2.8 g/cm^3 ,取铺粉后密度 ρ_r 为 3.0 g/cm^3 ,粉末对

激光的吸收系数 α 取 0.08, 铁粉比热容 c_p 为 $0.45 \text{ J}/(\text{g} \cdot \text{K})$, 铁的熔点 T 为 $1534 \text{ }^\circ\text{C}$, 取环境温度 t_0 为 $34 \text{ }^\circ\text{C}$ 。由(11)式计算所得的相对致密度与实验结果的对比如表 2 所示。

表 2 理论计算值与实验值相对致密度对比表

Table 2 Comparisons between calculated and experimental relative density of sintering parts

Laser power /W	Scan velocity /(m/s)	Scan interval /mm	Layer thickness /mm	Measured relative density	Calculated relative density	Fractional error /%
47.5	0.3	0.1	0.15	54.0	54.5	0.5
47.5	0.3	0.1	0.2	49.8	50.5	0.7
47.5	0.3	0.1	0.25	46.4	48.1	1.7
47.5	0.3	0.1	0.3	44.0	46.5	2.5
47.5	0.4	0.1	0.25	43.2	45.7	2.5
47.5	0.5	0.1	0.25	37.7	44.3	6.7
47.5	0.6	0.1	0.25	33.8	43.3	9.5
47.5	0.3	0.12	0.25	45.3	46.5	1.2
47.5	0.3	0.15	0.25	44.7	44.9	0.2
42.5	0.3	0.1	0.25	46.2	47.1	0.9
37.5	0.3	0.1	0.25	43.7	46.1	2.4
32.5	0.3	0.1	0.25	41.0	45.1	4.1

表 2 数据表明, (11) 式计算的致密度理论值和实验值在一定范围内误差较小, 随着扫描速度的增加和激光功率的减少, 误差值呈增加的趋势。这是由于激光功率的减小和扫描速度的增加都将使得粉末床的温度降低, 降低液相的粘性流动能力, 使得理论值与实际烧结件的致密度值的误差增大。由于该模型的建立未考虑烧结粉末与周围粉末和环境的热传导及相变潜热, 尚需进一步完善。

4 结 论

1) 激光功率的增加、扫描间隔的减小、扫描速度的降低和切片层厚的减少将增加烧结成形件的致密度;

2) 显微结构和实验数据表明, 在一定的功率范围内, 随着激光功率的减少和扫描速度的提高, 烧结后的颗粒尺寸和烧结颈宽度逐渐减小, 单位层厚烧结过程中产生的液相量决定了烧结件的致密度;

3) 根据烧结过程产生的液相量及致密化引起的成形增长方向的收缩, 推导了 Fe-C 烧结件的相对密度模型, 该模型反映了烧结工艺参数与烧结致密度的关系, 由模型计算的致密度理论值和实验值在一定范围内误差较小, 但仍需进一步完善。

参 考 文 献

1 Zhang Yongzhong, Shi Likai, Zhang Pingzhi *et al.*. The newest advance in laser rapid forming of metallic powders [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2000, **29**(6):361~365

张永忠, 石力开, 章萍芝 等. 基于金属粉末的激光快速成型技术新进展[J]. *稀有金属材料与工程*, 2000, **29**(6):361~365

2 Hua Guoran, Zhao Jianfeng, Zhang Jianhua *et al.*. A new technology for rapid prototyping manufacturing of metal parts [J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2002, **34**(5):428~431

花国然, 赵剑锋, 张建华 等. 金属零件的一种快速成型方法[J]. *南京航空航天大学学报*, 2002, **34**(5):428~431

3 Gu Dongdong, Shen Yifu, Yang Jialin *et al.*. Densification mechanism of multi-component Cu-based metal powder in selective laser sintering process [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2005, **15**(4):596~602

顾冬冬, 沈以赴, 杨家林 等. 多组分铜基金属粉末选区激光烧结致密化机制[J]. *中国有色金属学报*, 2005, **15**(4):596~602

4 Zhao Jianfeng, Zhang Jianhua, Zhang Jianfeng *et al.*. Analysis on microstructure feature of Ni-alloy parts prepared by direct laser metal sintering [J]. *China Mechanical Engineering*, 2005, **16**(3):264~267

赵剑锋, 张建华, 张建峰 等. 镍合金激光直接烧结成型制件显微结构及微观缺陷[J]. *中国机械工程*, 2005, **16**(3):264~267

5 Zhao Baojun, Shi Fazhong, Feng Tao *et al.*. Numerical simulations and experiments of the sintered densification in selective laser sintering [J]. *Laser Technology*, 2003, **27**(1):40~43

赵保军, 施法中, 冯涛 等. 选区激光烧结成型中致密度的数值模拟与实验[J]. *激光技术*, 2003, **27**(1):40~43

6 Chen Jing, Tan Hua, Yang Hai'ou *et al.*. Evolution of molten pool shape in the process of laser rapid forming [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(3):442~446

陈静, 谭华, 杨海欧 等. 激光快速成形过程中熔池形态的演化[J]. *中国激光*, 2007, **34**(3):442~446

7 W. D. Kingery. Densification during sintering in the presence of a liquid phase. I. theory [J]. *J. Appl. Phys.*, 1959, **30**(3):301~306

8 Lu Jian, Ni Xiaowu, He Anzhi. *Laser and Material Interaction Physics*[M]. Beijing: China Machine Press, 1996. 28~29

陆建, 倪晓武, 贺安之. *激光与材料相互作用物理学*[M]. 北京:机械工业出版社, 1996. 28~29