

[文章编号] 1004- 0609(2002)S1- 0173- 05

电脉冲对金属铝箔的作用^①

何树先, 王 俊, 孙宝德, 周尧和
(上海交通大学 材料科学与工程学院, 上海 200030)

[摘 要] 通过对金属铝箔施加高密度脉冲电流的方法, 从实验和理论上研究了电脉冲对金属铝箔的作用机制。实验结果表明, 电脉冲对铝箔能够产生收缩作用, 铝箔的收缩率与电脉冲充电电压和充电电容以及放电次数有关, 充电电压越高, 充电电容越高, 放电次数越多, 铝箔的收缩率就越大。分析认为, 脉冲电流在铝箔中产生的电磁力是导致铝箔收缩的主要原因, 而脉冲电流产生的焦耳热则不会导致铝箔熔化收缩。

[关键词] 电脉冲; 电磁力; 焦耳热; 金属铝箔

[中图分类号] TG 113.1

[文献标识码] A

在金属的凝固过程中施加脉冲电流能够有效细化组织, 提高金属的力学性能^[1~9]。目前, 理论分析认为脉冲电流在金属凝固过程中产生的电磁力是导致凝固组织细化的最主要原因, 但没有通过相关实验加以证实。作者通过实验研究脉冲电流对金属的电磁力作用, 以便进一步明确电脉冲在金属凝固过程中的作用机制。

1 实验

实验材料采用导电性和塑性良好的纯铝箔(160 cm × 30 cm × 7.5 μm)。实验设备采用自制的 JD-1 型高密度脉冲电流发生器, 最高充电电压额定为 5 kV, 最高充电电容额定为 1 F, 放电次数可自动调节。利用 TDS-210 实时数字示波器定量测试脉冲电流在负载铝箔两端的放电电压和放电有效时间等参数。

电磁力将对铝箔产生磁力收缩作用, 电磁力越大, 铝箔的收缩率越大。由于铝箔为塑性变形, 因此只要能测出每次铝箔的收缩率, 就能表征每次脉冲电流作用于铝箔的电磁收缩力大小。

实验装置如图 1 所示, 首先在两铜电极之间硬性固定好铝箔, 然后改变脉冲充电电压、充电电容及放电次数, 测量每次铝箔的最大横向收缩率(由于铝箔厚度很小, 因此厚度方向的收缩可以忽略不计), 由于铝箔的强度有限, 因此实验中以导致铝箔断裂之前的放电次数为准。同时, 实验过程中采

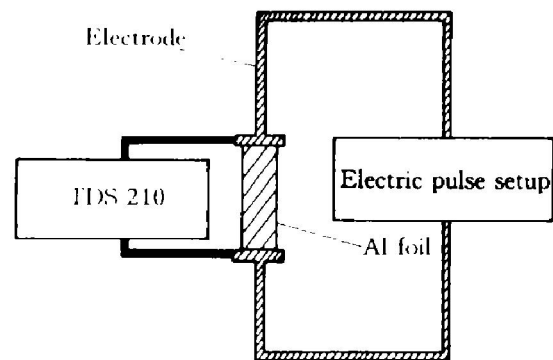


图 1 电脉冲冷态实验装置示意图

Fig. 1 Experimental setup of electric pulse discharging at room temperature

用摄像的方法记录下每次铝箔的收缩情况。

2 实验结果

2.1 电脉冲放电参数测试结果

图 2 所示为充电电压为 1.2 kV, 充电电容为 200 μF 时的测试结果, 可以看出, 脉冲最大峰值电压约为 220 V, 放电有效时间约为 400 ns。

2.2 充电电压对铝箔收缩率的影响

改变电脉冲充电电压(1.2, 1.4, 1.6, 1.8 和 2.0 kV), 固定充电电容为 200 μF, 得到铝箔收缩率与充电电压及放电次数的关系如图 3 所示。图 4 所示为放电过程中铝箔收缩的摄像结果。

① [基金项目] 国家重点基础研究发展规划资助项目(G19999064900- 4); GM(中国)公司基金资助项目

[收稿日期] 2001- 12- 03; [修订日期] 2002- 01- 25

[作者简介] 何树先(1972-), 男, 博士研究生。

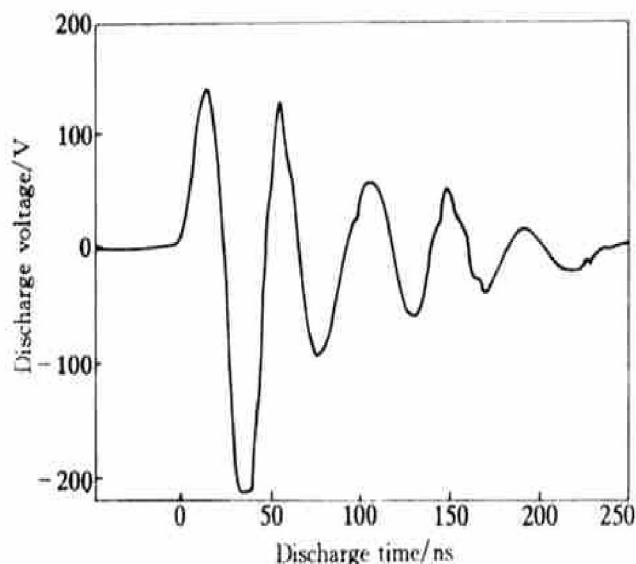


图 2 充电电压为 1 200 V, 充电电容为 200 μF 时的脉冲放电测试结果

Fig. 2 Results of HDPEC discharging with 1 200 V charge voltage and 200 μF charge capacitance

从图 3 中可以看出, 随充电电压升高, 铝箔一次放电收缩率增大, 但有效放电次数减少, 说明脉冲电流感应产生的电磁力随充电电压升高而增大。

2.3 充电电容对铝箔收缩率的影响

固定电脉冲充电电压为 1.2 kV, 改变电容 (200, 400, 600, 800 μF), 测量铝箔收缩率, 实验结果如图 5 所示, 图 6 为铝箔收缩的摄像结果。实

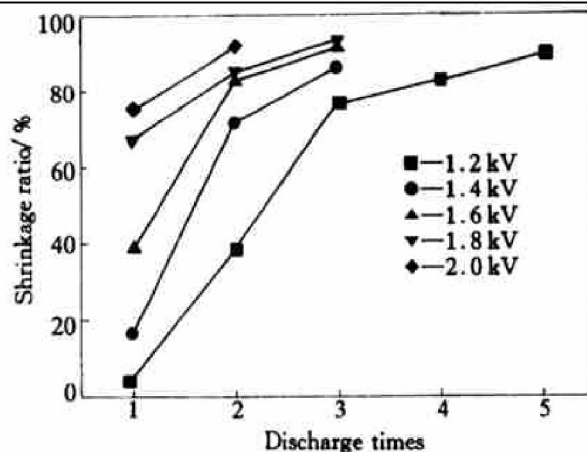


图 3 充电电容为 200 μF 时, 铝箔收缩率与充电电压及放电次数的关系曲线

Fig. 3 Relationship between shrinkage ratio of aluminum foil and charge voltage and discharge times with charge capacitance of 200 μF

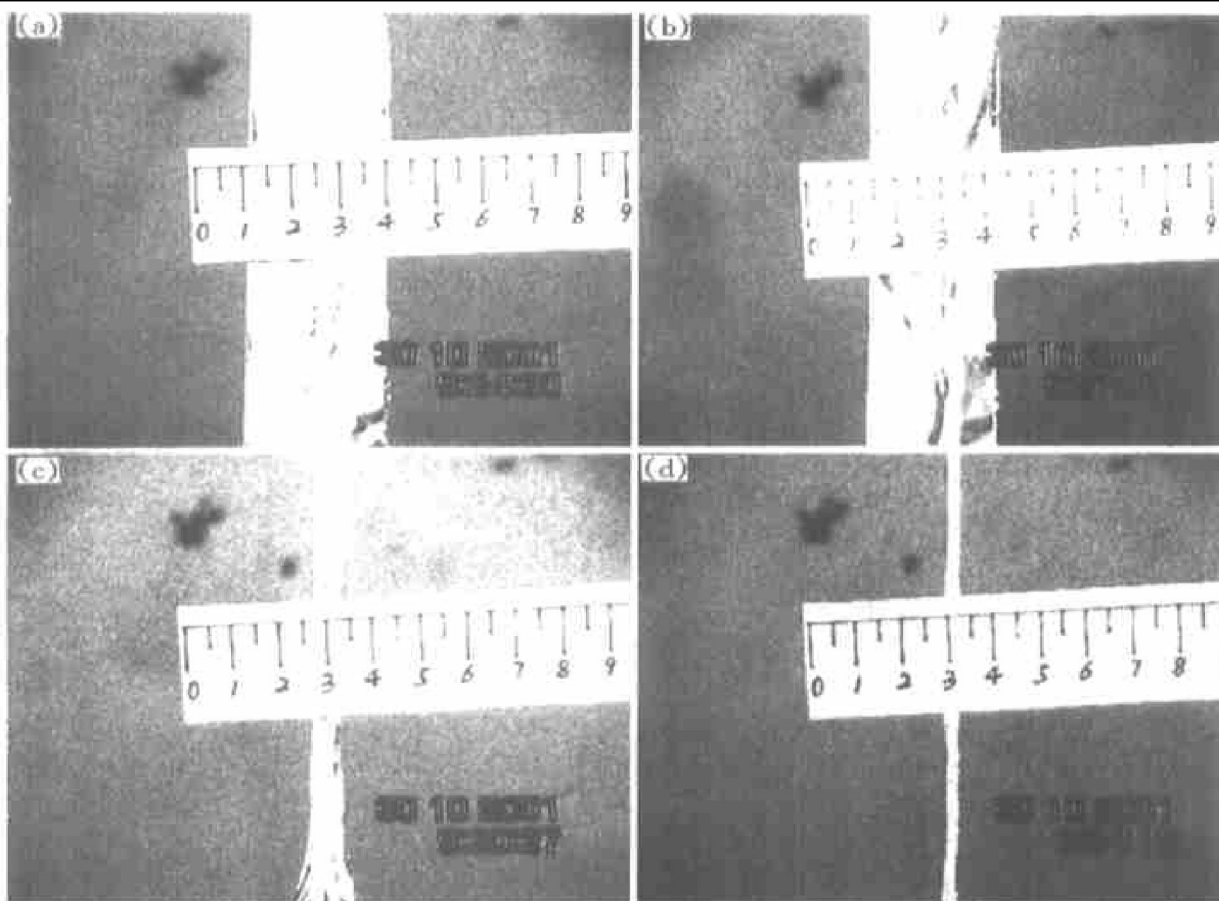


图 4 当充电电压为 1 200 V, 电容为 200 μF 时, 不同放电次数的铝箔收缩情况

Fig. 4 Video photographs of aluminum shrinkage with different discharging times

(Charge voltage= 1 200 V, charge capacitance= 200 μF)

(a) —Without treatment; (b) —Once discharge; (c) —Three times discharge; (d) —Five times discharge

验结果显示: 随充电电容的升高, 铝箔一次放电的收缩率明显增大, 有效放电次数明显减少, 当充电电容为 800 μF 时, 铝箔的有效放电次数仅为一次。说明脉冲电流在铝箔中产生的电磁力随充电电容的增大而增大。

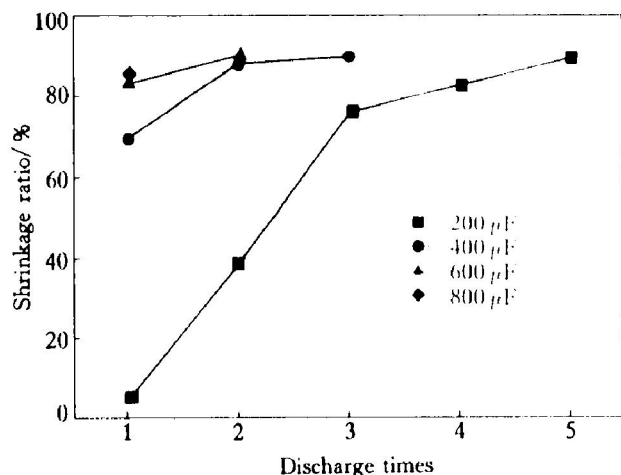


图 5 充电电压为 1 200 V, 铝箔收缩率与充电电容及放电次数的关系

Fig. 5 Relationship between shrinkage ratio of aluminum foil and charge capacitance and discharge times with 1 200 V charge voltage

3 讨论

上述实验结果可能由两方面原因造成: 1) 焦耳热效应, 瞬时的热效应使得铝箔熔化收缩; 2) 磁力收缩作用。

3.1 焦耳热效应

脉冲电流在铝箔中产生的焦耳热可计算如下:

$$J = I^2 \cdot R \cdot t \quad (1)$$

假设脉冲电流在铝箔中产生的焦耳热没有消耗, 则:

$$J(t) = c \cdot m(\text{Al}) \cdot \Delta T \quad (2)$$

式中 I —平均电流, A; R —负载铝箔的电阻, 为 $2.82 \times 10^{-3} \Omega$; t —有效放电时间, s; c —铝的比热容, 为 $1.084 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$; $m(\text{Al})$ —铝箔的质量, 为 $1.5 \times 10^{-3} \text{ kg}$; ΔT —铝箔的温升, K。

合并式(1)和(2)得:

$$\Delta T = \frac{I^2 \cdot R \cdot t}{c \cdot m(\text{Al})} \quad (3)$$

为计算方便, 按照最大平均电流和最大放电有效时间进行计算, 通过放电测试结果可得放电过程最大平均电流约为 $7.9 \times 10^4 \text{ A}$, 最大有效放电时间约为 400 ns, 代入式(3), 计算得 $\Delta T \approx 4.3 \text{ K}$ 。同理, 当充电电压为 2 kV 时, 铝箔的最高温升约为 13.2 K,

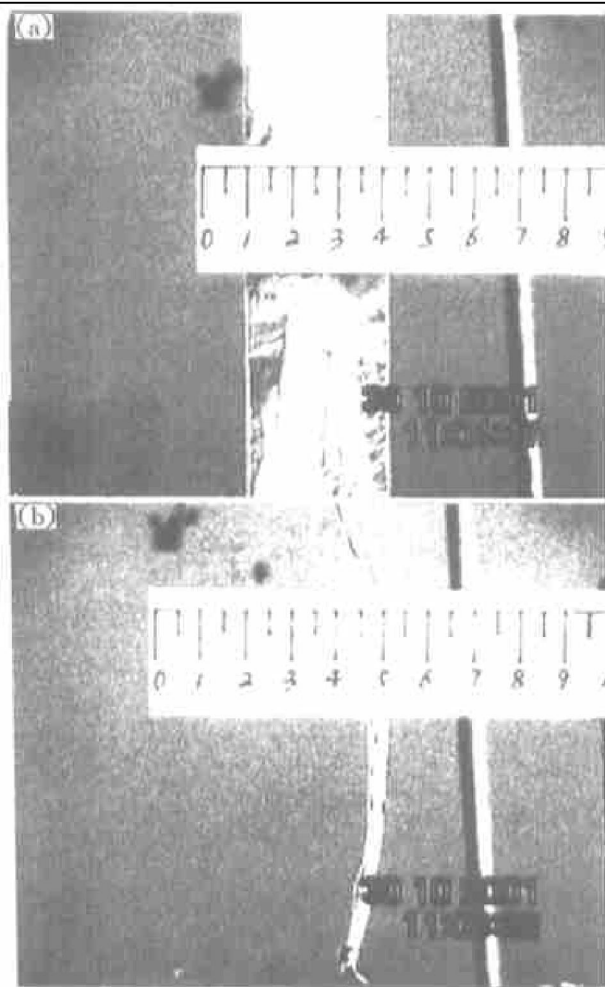


图 6 充电电压为 1 200 V, 电容为 800 μF 时, 放电次数对铝箔收缩率的影响

Fig. 6 Video photographs of aluminum shrinkage with different discharging times

(Charge voltage= 1 200 V, charge capacitance= 800 μF)

(a) —Without treatment; (b) —Once discharge

以上计算结果仅为理论最大值, 实际上铝箔的温升可以忽略不计, 这表明脉冲电流在铝箔中产生的焦耳热不会导致铝箔收缩。

3.2 电磁力作用

实验中所使用的脉冲设备由充电和放电两部分电路组成, 在放电电路中, 除了负载具有电阻 R 外, 电容器组本身和连接负载的引线都有一些电感 L 存在, 因此, 实验所使用的脉冲放电电路相当于一个 R - L - C 电路; 又根据具体实验情况, 负载电阻 R 非常小, 因此脉冲放电电路又是一个弱阻尼衰减振荡电路, 据此, 脉冲电源通过实验材料的放电电流可以按下式计算^[10]:

$$I(t) = \frac{U_0}{\omega L} \exp(-\delta t) \sin(\omega t) \quad (4)$$

式中 $\omega = [\frac{1}{LC} - (\frac{R}{2L})^2]^{1/2}$; $\delta = \frac{R}{2L}$; U_0 —充电电

压, V; L —放电电路电感, 为 10^{-6} H; C —充电电容, F; R —放电电路总电阻, 为 $3.67 \times 10^{-3} \Omega$ 。

本实验中, 考虑到铝箔厚度非常小 ($7 \mu\text{m}$), 远小于铝箔的宽度, 因此, 假设磁收缩只发生在宽度方向上, 并且电流在铝箔上的分布是均匀的。

根据 Ampere 定律^[11], 作用在铝箔上的磁收缩力 $F(t)$ 的大小为

$$F(t) = \frac{\mu_0 I(t) 2b}{2\pi a} \quad (5)$$

式中 μ_0 —真空磁导率, $4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$; a , b —分别为铝箔的宽度和长度, $a = 0.03 \text{ m}$, $b = 0.16 \text{ m}$ 。

将式(4)代入式(5), 得

$$F(t) = \frac{\mu_0 b U_0^2}{2\pi a \omega^2 L^2} \exp(-2\delta t) \sin^2(\omega t) \quad (6)$$

把相关数据代入式(6)并整理得

$$F(t) = 0.107 U_0^2 C \exp(-5.64 \times 10^3 t) \sin^2(10^3 t \sqrt{\frac{1}{C} - 1.99}) \quad (7)$$

根据式(7), 预定充电电容为 $200 \mu\text{F}$, 考察充电电压的变化对电磁收缩力的影响, 如图 7 所示。然后, 预定充电电压为 1.2 kV , 考察充电电容的变化对电磁收缩力的影响, 如图 8 所示。通过计算曲线可以得出, 当充电电压为 1.0 kV , 充电电容为 $200 \mu\text{F}$ 时, 瞬间产生的最大电磁力约为 18 N , 单位面积作用力为 $1.6 \times 10^7 \text{ Pa}$; 而当充电电压为 2.0 kV , 充电电容为 $200 \mu\text{F}$ 时, 瞬间产生的最大电磁力约为 77 N , 单位面积作用力为 $6.9 \times 10^7 \text{ Pa}$; 而当充电电压

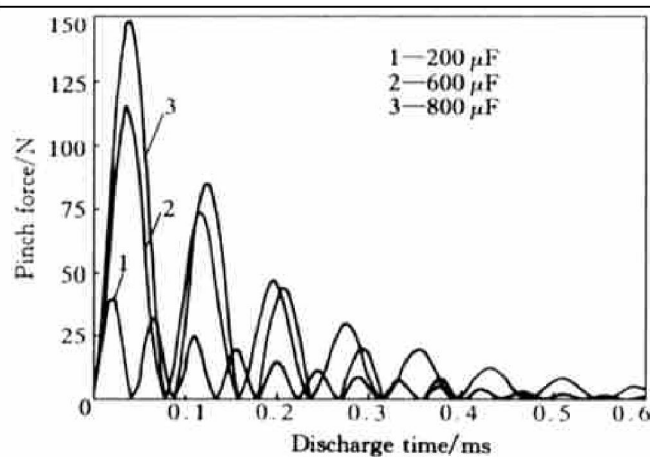


图 8 当充电电容为 1.2 kV 时, 不同的充电电容对应所产生电磁力的理论计算结果

Fig. 8 Theoretical results of electric magnetic forces with different charge capacitance (charge voltage 1.2 kV)

为 1.2 kV , 充电电容为 $800 \mu\text{F}$ 时, 瞬间产生的最大电磁力约为 150 N , 单位面积作用力高达 $1.33 \times 10^9 \text{ Pa}$ 。由此可知, 充电电压越高, 在试样中产生的瞬间电磁力就越大; 同样, 瞬间电磁力也随着充电电容的增大而增大。同时, 根据曲线可知, 电磁力有效作用时间随充电电容增大而增大, 而与充电电压大小无关。

4 结论

1) 高密度脉冲电流能够在金属铝箔中通过自感应产生电磁收缩力, 电磁力是导致铝箔收缩断裂的主要原因; 而脉冲电流在铝箔中产生的焦耳热作用不会导致铝箔熔化收缩。

2) 电磁收缩力的大小随充电电压和充电电容的增大而增大, 电磁力有效作用时间与充电电压大小无关, 而随充电电容增大而增大。

[REFERENCES]

- [1] Ahmed S, McKannan E. Control of γ' morphology in nickel base superalloys through alloy design and densification processing under electric field [J]. Mater Sci Technol, 1994, 10: 941–943.
- [2] Nakada M, Shiohara Y, Flemings M. Modification of solidification structure by pulse electric discharging [J]. ISIJ International, 1990, 30(1): 27–31.
- [3] Li J M, Li S L, Li J, et al. Modification of solidification structure by pulse electric discharging [J]. Scripta Metall, 1994, 31(12): 1691–1694.

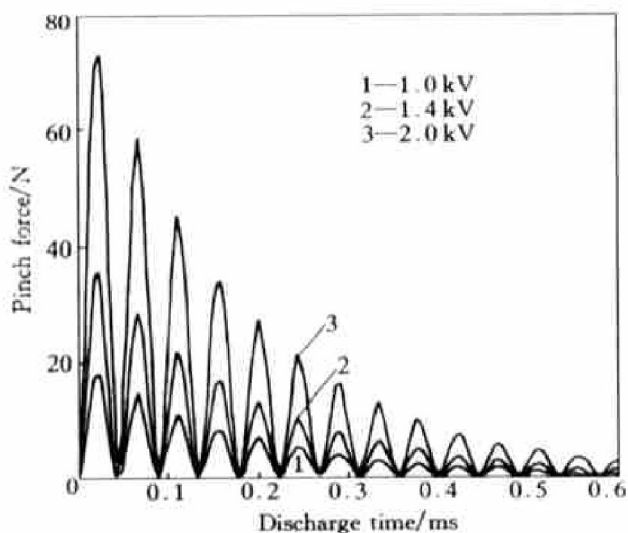


图 7 当充电电容为 $200 \mu\text{F}$ 时, 不同的充电电压对应所产生电磁力的理论计算结果

Fig. 7 Theoretical results of electric magnetic forces with different charge voltage (charge capacitance $200 \mu\text{F}$)

- [4] Barnak J, Sprecher A F S, Conrad H. Colony(grain) size reduction in eutectic Pb-Sn casting by electropulsing [J]. Scripta Metall Mater, 1995, 32(6): 879.
- [5] 唐 勇, 王建中, 苍大强. 电脉冲对高碳钢凝固组织的影响 [J]. 钢铁研究学报, 1999, 11(4): 44- 47.
TANG Yong, WANG Jian-zhong, CANG Da-qiang. Effect of pulse electric discharging on solidification structure of high carbon steel [J]. Journal of Iron and Steel Research, 1999, 11(4): 44- 47.
- [6] 鄢红春, 何冠虎, 周本濂. 脉冲电流对 Sn-Pb 合金凝固组织的影响 [J]. 金属学报, 1997, 33(4): 352- 356.
YAN Hong-chun, HE Guan-hu, ZHOU Ben-lian. Effect of pulse current on the solidification structure of Sn-Pb alloy [J]. Acta Metallurgica Sinica, 1997, 33(4): 352- 356.
- [7] 秦荣山. 电脉冲作用下的非平衡转变研究 [D]. 沈阳: 中国科学院金属研究所, 1996.
QIN Rong-shan. Investigations on the nonequilibrium transformation by pulse electric current [D]. Shenyang: Institute of Metal Research, The Chinese Academy of Sciences, 1996.
- [8] 何树先, 王 俊, 孙宝德. 高密度脉冲电流对过共晶 Al-Si 合金凝固组织的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2002, 12(2): 1- 4.
HE Shu-xian, WANG Jun, SUN Bao-de. Effect of high density pulse current on the solidification structure of hypereutectic Al-19Si alloy [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2002, 12(2): 1- 4.
- [9] HE Shu-xian, WANG Jun, SUN Bao-de, et al. Effect of high density pulse electric current on the solidification structure of low temperature melt of A356 alloy [J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2002, 12(3): 1- 5.
- [10] 邱关源. 电路(电工原理 I) [M]. 北京: 人民教育出版社, 1980.
QIU Guan-yuan. Electric Circuit (I) [M]. Beijing: People Education Press, 1980.
- [11] Wangsness R K. Electromagnetic Fields(2nd edition) [M]. Printed in the USA, 1986.

Effect of pulse electric current on metal aluminum foil

HE Shu-xian, WANG Jun, SUN Bao-de, ZHOU Yao-he

(School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

[Abstract] The high density pulse electric current (HDPEC) was applied to the metal aluminum foil to study the effect of HDPEC on metal aluminum foil. The experimental results show that the aluminum foil will shrink when the HDPEC is applied. The ratio of the shrinkage is determined by the charge voltage, the capacitance and the discharging times. The larger the charge voltage or the charge capacitance or the discharging times, the more the shrinkage ratio is. It is analyzed that the electrical magnetic force induced by HDPEC is the main reason for the shrinkage of the aluminum foil. However, the effect of Joule heat produced by HDPEC on the shrinkage of aluminum foil can be ignored completely.

[Key words] high density pulse electric current; electric magnetic force; Joule heat; metal aluminum foil

(编辑 杨 兵)