

文章编号: 1001-3806(2010)02-0149-05

工艺参量对 NdFeB 永磁体和 SPCC 钢激光点焊质量的影响

白少俊, 常保华*, 张 骅, 都 东

(清华大学 机械工程系 先进成形制造教育部重点实验室, 北京 100084)

摘要: 为了将激光点焊工艺应用于 NdFeB 永磁体与冷轧碳钢薄板的连接, 试验研究了脉冲功率、脉冲宽度和离焦量对焊点形貌和接头强度的影响。激光点焊中存在热导焊和深熔焊两种焊接模式, 改变峰值功率和离焦量都能使焊接模式发生转变, 而改变脉宽时焊接模式不转变。点焊试样剪切试验中存在脱壳式、剪断式和压断式 3 种断裂模式, 所对应的熔核尺寸和剪切载荷依次增加。结果表明, 为获得较高的连接强度, 宜使峰值功率与离焦量适当配合, 实现深熔焊模式进行焊接, 而脉冲宽度不宜太大。

关键词: 激光技术; 激光焊接; NdFeB 永磁体; 异质材料连接; 工艺参量

中图分类号: TG456.7 **文献标识码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1001-3806.2010.02.002

Effect of process parameters on laser spot welding quality of NdFeB permanent magnet and SPCC steel

BAI Shao-jun, CHANG Bao-hua, ZHANG Hua, DU Dong

(Key Laboratory for Advanced Materials Processing Technology of Ministry of Education, Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: To apply the laser spot welding process in the joining of NdFeB permanent magnet and steel plate cold commercial (SPCC) steel, the effects of laser pulse power, pulse duration, and defocusing distance on weld features and strength were studied experimentally. The results show that there are both conduction welding and keyhole welding in the laser spot welding under our experimental conditions. Welding modes can be transformed by changing peak power or defocusing distance, but not altered by changing pulse duration. There are three fracture modes in shearing tests, i.e., exuviation, shear and crush fractures, with nugget dimensions and shearing load increasing in turn. To gain good joint strength, the pulse peak power and defocusing distance should be chosen appropriately to implement welding in keyhole mode, and moreover, pulse duration should not be too long.

Key words: laser technique; laser welding; NdFeB permanent magnet; dissimilar materials welding; process parameter

引 言

钕铁硼 (Nd-Fe-B) 以其优异的磁性能近年来得到了快速发展和广泛应用^[1]。为了实现一定的功能, 实际应用中经常需要将永磁体和其它材料连接起来。目前, 这些连接主要采用胶接或机械连接的方法, 其生产效率低, 如强度和耐热性差, 也很难实现结构的微型化。为了适应工业生产高速化和微型化的要求, 永磁体材料的焊接问题日益受到关注。

采用焊接方法实现永磁体与其它材料的连接, 迄今为止还没有工业应用, 这方面的研究工作也非常有

限。对 NdFeB 永磁体和冷轧碳钢薄板 (steel plate cold commercial, SPCC) 激光焊接的初步研究表明, 采用激光点焊可以实现钢磁异质材料的连接^[2]。但是, 工艺参量如何影响接头性能, 如何获得最佳的焊接质量, 在这些方面还没有开展相应的研究工作。

作者采用脉冲 Nd:YAG 激光器对 NdFeB 永磁体和 SPCC 钢异质材料进行点焊, 考察了脉冲功率、脉冲宽度和离焦量 3 个工艺参量对激光点焊质量的影响规律, 以期 NdFeB 永磁体激光点焊工艺参量的选择提供依据。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验中采用高性能烧结型钕铁硼永磁材料 N48, 试样尺寸为 7.5mm × 3.5mm × 0.7mm; 钢板材料为 SPCC, 试样尺寸为 7.5mm × 3.5mm × 0.3mm。两种材料的化学成分分别列于表 1 和表 2 中。焊接前先用氢

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50628506; 50705049)

作者简介: 白少俊 (1983-), 男, 硕士研究生, 现主要从事激光焊接工艺方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: bhchang@tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2009-03-30; 收到修改稿日期: 2009-04-15

Table 1 Chemical compositions of SPCC(mass fraction)

chemical element	w(C)	w(Mn)	w(Si)	w(P)	w(S)	w(N)	w(Fe)
contents	0.0006	0.0028	0.00003	0.00009	0.00015	0.00005	balance

Table 2 Chemical compositions of the NdFeB(mass fraction)^[3]

chemical element	w(Nd)	w(Fe)	w(B)	w(Dy)	w(Al)	w(Si)	w(C)
contents	0.31	0.64	0.01	0.025	0.0045	0.0017	0.0007

氧化钠溶液清洗试件表面油污,再用硝酸溶液清洗表面氧化层。由于 NdFeB 中的钕元素很活泼,需要在清洗后迅速焊接^[4]。

1.2 试验设备与参量

焊接中采用英国 GSI 公司生产的 JK300HP 型脉冲 Nd:YAG 激光器,其波长为 1064nm,最大平均输出功率为 300W,脉冲宽度范围 0.2ms ~ 20ms,模式为 TEM₀₀。

脉冲激光器能量输出波形如图 1 所示。每个脉冲

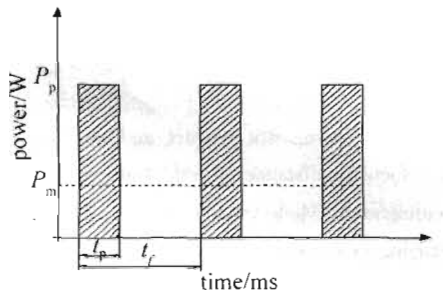


Fig. 1 Schematic diagram of pulsed laser

可由脉冲宽度 T_p (ms) 和峰值功率 P_p (W) 确定,脉冲峰值功率 E_p (J) 为图中单个阴影部分所围的面积, $P_p = E_p/T_p$ 。 t_f 为脉冲频率 f (Hz) 的倒数, P_m 为平均功率, $P_m = E_p/t_f$ 。 P_A 为峰值功率密度, $P_A = P_p/A = E_p/T_p A$, 其中, $A = \pi d^2/4$ 是工件表面上激光光斑的面积, d 是光斑直径,光斑面积 A 与激光束的焦点位置 z (mm) 有关。当焦点在工件上方时,离焦量取正值,在下方时离焦量取负值^[5]。

作者采用单脉冲工艺对磁/钢组合进行激光焊接。由于焊接中仅有一个脉冲输出,因此,决定激光能量输入强度的工艺参量为脉冲峰值功率、脉冲宽度和离焦量。这里主要考察这 3 个参量对焊接质量的影响。

1.3 接头形式与性能检测

激光点焊过程如图 2 所示,使用专用夹具将试样叠放在一起,SPCC 在上,NdFeB 在下,两试件在激光照射下发生升温、混溶、凝固,形成熔核,实现两试件的连接。焊接过程中采用 Ar 气作为保护气体。

焊接质量主要通过焊点形貌和剪切强度的角度进行评价。焊点形貌主要包括焊点表面直径、熔深、接合面直径等^[6-7],各特征尺寸的定义如图 3 所示。采用日

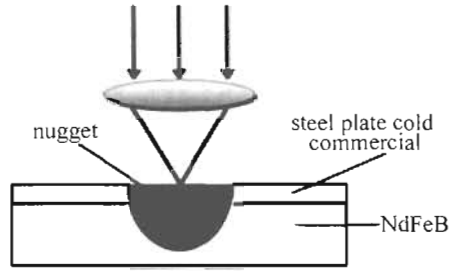


Fig. 2 Schematic diagram of laser spot welding

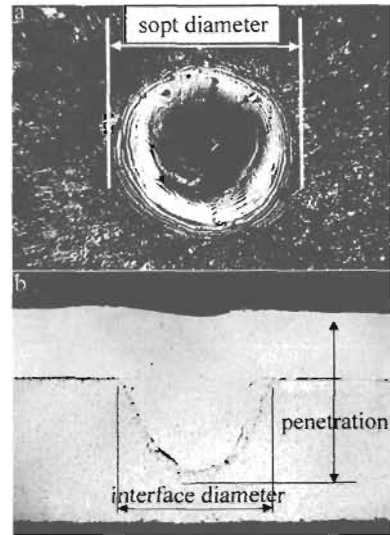


Fig. 3 Characteristic dimensions of a spot weld a—top view b—cross-section view

本新宝 FGN-20B 数字测力仪测试了接头的剪切强度,以评价激光点焊接头的力学性能。

2 试验结果

2.1 脉冲峰值功率对焊接质量的影响

固定脉宽为 16ms,频率为 1Hz,离焦量为 0mm,改

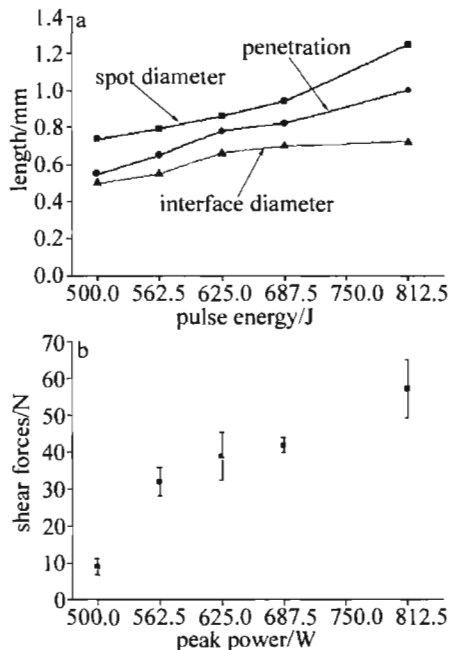


Fig. 4 Effect of pulse peak power on weld quality a—characteristic dimensions b—shear force

变脉冲峰值功率分别为 500W, 562.5W, 625W, 687.5W 和 812.5W。所得焊点特征尺寸及接头剪切强度如图 4 所示。

由图 4a 可以看出,随着脉冲峰值功率的增加,焊点各特征尺寸均呈增大趋势。热输入量随功率的增大而增大,熔化金属量增加,此时熔池在宽度和深度两个方向都增大。图 4b 所示为焊点所能承受的剪切载荷随激光功率的变化,由图可见,剪切载荷随脉冲峰值功率的增加而增大。

2.2 脉冲宽度对焊接质量的影响

固定脉冲频率为 1Hz,离焦量为 0mm,峰值功率为 625W,分别在 12ms, 14ms, 16ms, 18ms 和 20ms 5 个脉冲宽度下,采用单脉冲对试样进行激光焊接。所得焊点特征尺寸及接头剪切载荷随脉冲宽度的变化如图 5 所示。

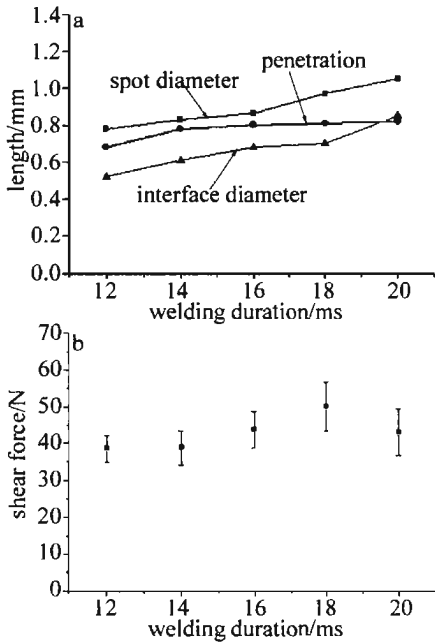


Fig. 5 Effect of pulse duration on weld quality a—characteristic dimensions b—shear force

由图 5a 可以看出,随着脉宽的增大,焊点表面直径和接触面直径都随之增大;对焊点熔深而言,脉宽从 12ms 增加到 14ms,熔深增大,而脉宽从 14ms 增加到 20ms 时,焊点熔深基本不改变。可见在峰值功率一定时(625W),脉宽改变主要影响焊点横向尺寸,而对熔深的影响较小。由图 5b 可知,脉宽从 12ms 增加到 18ms,剪切载荷增大;脉宽继续增大到 20ms 时,剪切载荷减小。脉冲宽度为 18ms 时接头的剪切载荷最大。

2.3 离焦量对焊接质量的影响

固定脉冲峰值功率为 812.5W,脉宽为 16ms,在 0mm 到 +3.5mm 范围内调节离焦量。焊点特征尺寸及接头剪切强度随离焦量的变化如图 6 所示。

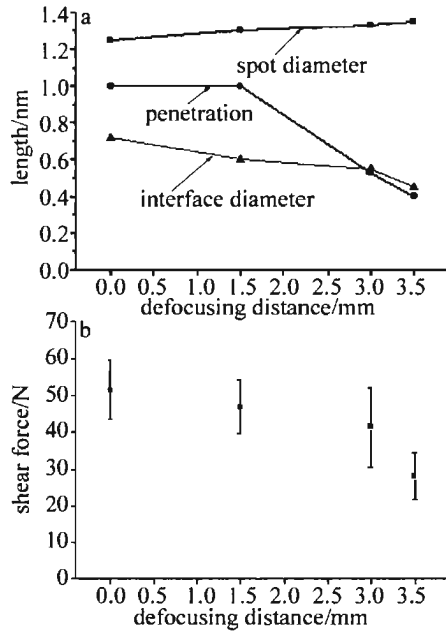


Fig. 6 Effect of defocusing distance on weld quality a—characteristic dimensions b—shear force

由图 6a 可以看出,增大离焦量,焊点表面直径随之略有增加,这是激光热源作用面积增大所致。焊点的熔深及接触面直径都随离焦量的增加而减小,这是离焦量增加时,功率密度因加热面积增大而降低造成的。由图 6b 可以看出,离焦量增大时,剪切强度逐渐减小。这是接触面直径和熔深随离焦量的增大而减小、承载熔核尺寸减小所致。

3 讨论

3.1 焊接模式

在 SPCC 钢与 NdFeB 永磁体的激光点焊中存在热导焊和深熔焊两种焊接模式。热导焊形成的熔核近似半球或椭球形,熔深小于焊点直径;而深熔焊形成的熔

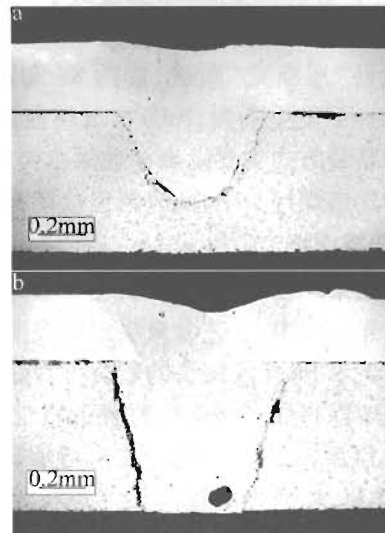


Fig. 7 Nuggets formed under two different welding modes a—conduction type b—keyhole type

核呈锥形或丁字型,试样熔透,熔深为1mm^[8]。两种典型的熔核形貌如图7所示。

由试验结果可知,增加峰值功率,焊接由热导焊转变为深熔焊;增加离焦量,焊接由深熔焊转变为热导焊,增加脉宽时,熔深增加很小,焊接模式始终是热导焊,没有发生转变。从图4可知,峰值功率从687.5W增加到812.5W,模式发生了改变。在不离焦条件下,激光焦斑直径约为0.35mm,因此,由热导焊向深熔焊转变的临界功率密度在 $7.15 \times 10^5 \text{ W/cm}^2 \sim 8.44 \times$

10^5 W/cm^2 之间。

3.2 接头断裂模式

对剪切试验后所得的试样断口形貌进行了观察,发现接头受到剪切载荷作用时存在3种断裂模式。

第1种是“脱壳式”断裂,如图8a和图8b所示。此时接头从熔核与NdFeB基体的结合界面处开裂,断裂后熔核与钢片连在一起,在磁体上形成凹坑。这种模式通常在接触面直径和高度(熔深)都比较小(小于0.5mm)时发生,断裂载荷通常小于30N。

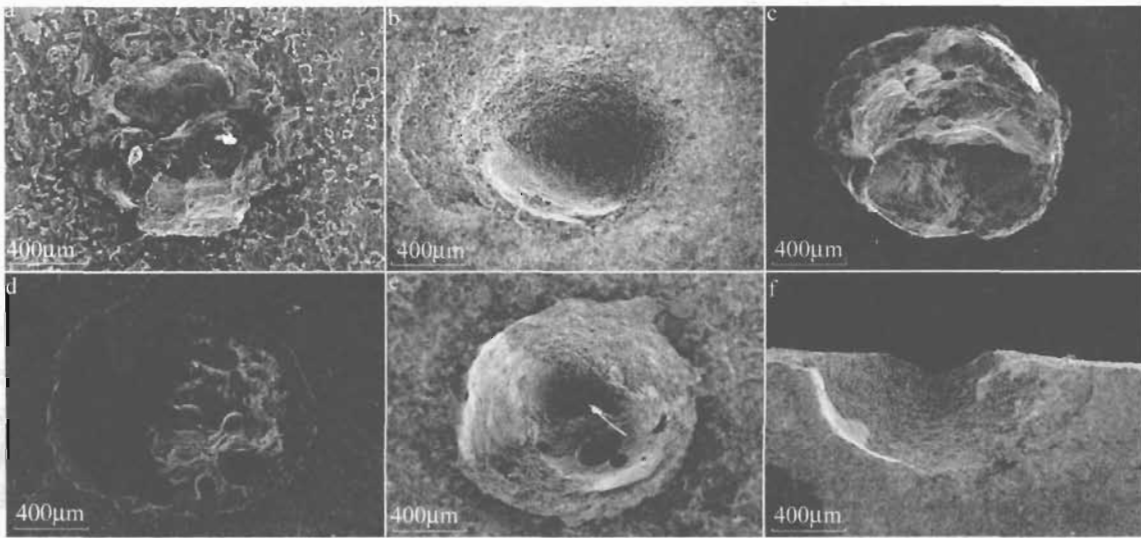


Fig. 8 Three fracture modes in shearing tests

a—first mode;nugget exuviated b—first mode;pit in magnet c—second mode;nugget joint with SPCC d—second mode;nugget joint with NdFeB e—third mode;nugget f—third mode;crushed magnet

第2种是“剪断式”断裂,如图8c和图8d所示。此时接头中的熔核在磁体与钢片的界面处发生断裂,断裂后熔核的上半部与SPCC钢片相连,下半部与NdFeB基体相连。这种断裂方式发生在熔核高度和接触面直径大于0.6mm的热导型接头中,断裂载荷在30N~50N范围内。

第3种是“压断式”断裂,如图8e和图8f所示。此时熔核本身不发生断裂,NdFeB母材在压力作用下断裂。这种断裂方式主要发生在熔深达到或接近试样整体厚度的深熔焊接头中,此时断裂载荷大于50N。

3.3 焊接参量选择

从试验结果和以上讨论可知,在SPCC钢与NdFeB永磁体的激光点焊中,工艺参量决定焊接模式,并因此影响熔核的大小、形状及接头的断裂行为。一般而言,剪切强度随熔深和焊点接触面直径的增加而增大,深熔焊接头的强度大于热导焊接头。增加脉冲峰值功率、减小离焦量,均使得焊接由热导焊转变为深熔焊,熔深增加,强度增大。而仅仅增加脉冲宽度不会改变焊接模式,此时熔深基本不变,接头强度可随接触面直

径增加而增加。值得注意的是,过度增加脉冲宽度(不小于20ms),反而导致接头强度减小。可见,除焊点尺寸外,还有其它因素影响焊接强度。初步分析这种长脉宽下强度降低的现象应与冶金质量变坏有关。NdFeB永磁体属于粉末冶金材料,因母材颗粒之间存在孔隙,所以在熔化焊接过程中很容易形成气孔、裂纹等缺陷^[9-11]。增加脉宽时焊接时间增加,有可能导致更多的气体杂质进入熔池,同时熔化金属凝固收缩增大,裂纹倾向增加,这些都可能对接头强度产生不利影响。关于工艺参量对冶金质量的影响,限于篇幅,本文中不展开讨论,将另文探讨。

综上所述,在NdFeB永磁体与SPCC的激光点焊中,为获得较高的连接强度,宜采用深熔焊模式进行焊接,主要通过峰值功率与离焦量适当配合,使峰值功率密度大于临界功率密度。同时,既要保证熔核具有一定的尺寸以提高接头强度,又要避免冶金质量变差。为此脉冲宽度选择要恰当,不能太大。本研究中最佳的一组工艺参量为:脉宽16ms,脉冲功率812.5W,离焦量0mm。

4 结 论

(1) NdFeB 永磁体与 SPCC 钢激光点焊中存在热导焊和深熔焊两种焊接模式。由热导焊向深熔焊转变的临界功率密度在 $7.15\text{W} \times 10^5\text{W}/\text{cm}^2 \sim 8.44 \times 10^5\text{W}/\text{cm}^2$ 之间。改变峰值功率和离焦量都可使焊接模式发生转变,而改变脉宽时焊接模式不转变。

(2) NdFeB 与 SPCC 激光点焊试样剪切试验中存在 3 种不同的断裂模式,随熔核尺寸的增加,分别为脱壳式、剪断式和压断式,剪切载荷逐渐增加。

(3) 在 NdFeB 永磁体与 SPCC 的激光点焊中,为获得较高的连接强度,宜采用深熔焊模式进行焊接。峰值功率与离焦量要适当配合,使峰值功率密度大于临界功率密度;而脉冲宽度不宜太大。该研究中接头强度最高的点焊工艺参量为:脉宽 16ms,脉冲功率 812.5W,离焦量 0mm。

参 考 文 献

- [1] ZHOU Sh Z, DONG Q F. Super permanent magnet-rare earth iron permanent magnet[M]. 2nd ed. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2004:9-11(in Chinese).
- [2] CHANG B H, BAI Sh J, LI X G, *et al.* Laser spot welding of SPCC steel to NdFeB magnets [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2008, 48(11):1728-1731(in Chinese).
- [3] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB/T 13560-2000 Sintered permanent NdFeB material [S]. Beijing: Standard Press of China, 2000(in Chinese).
- [4] ZHU H H, TANG X H, ZHU G F. The application for laser-welding technology in P/M materials [J]. Powder Metallurgy Technology, 2000, 18(2):117-121(in Chinese).
- [5] LI Zh Y, QIAN Y Y, ZHANG J H, *et al.* Advanced bonding method [M]. Beijing: China Machine Press, 2000:33-34(in Chinese).
- [6] BRANSCH H N, WECKMAN D C, KERR H W. Effects of pulse shaping on Nd:YAG spot welds in austenitic stainless steel [J]. Welding Journal, 1994, 73(6):141-151.
- [7] LIAO Y C, YU M H. Effects of laser beam energy and incident angle on the pulse laser welding of stainless steel thin sheet [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 190(1/3):102-108.
- [8] TANG X H, ZHOU Y, HE Y Y, *et al.* Study on technology of laser welding of powder materials [J]. Laser Technology, 2003, 27(4):276-278(in Chinese).
- [9] MOSCA E, MARCHETTI A, LAMPUGNANI U. Laser welding of PM materials[J]. Power Metallurgy International, 1983, 15(3):115-118.
- [10] ZHOU J X, TANG X H, ZHOU Y, *et al.* Investigation of porosity defect phenomenon during laser welding of powder metal material [J]. Laser Technology, 2003, 27(6):503-505(in Chinese).
- [11] HAMILL J A, Jr. P/M joining processes, materials and techniques [J]. International Journal of Power Metallurgy, 1991, 27(4):363-372.