

文章编号: 1001-3806(2006)05-0507-04

镍 钴合金杆料激光冲击强化的实验和数值模拟

高 立¹, 张永康^{2*}

(1. 潍坊学院 机电系, 潍坊 261061; 2. 江苏大学 机械工程学院, 镇江 212013)

摘要: 为了开发能有效提高火花塞使用寿命的新工艺, 借助于激光冲击强化装置, 实验研究了对材料为 Ni-Co 合金的火花塞中心电极表面的激光冲击强化处理; 探讨了不同的冲击次数、不同的入射激光能量对冲击强化区残余应力、塑性变形、硬度的影响; 并用 ABAQUS 软件进行了有限元模拟。实验测量与仿真结果均表明, 利用激光冲击强化技术, 冲击区域材料的位错密度得到了进一步提高; 并在强化区表面产生了渴望的残余压应力; 火花塞中心电极的表面硬度也得到了显著提高。经过随车使用实验, 证明经过激光冲击强化后的火花塞其平均使用寿命比未受强化的火花塞提高了近 1 倍, 表明激光冲击强化技术不失为提高火花塞使用寿命的一种好的工艺方法。

关键词: 激光技术; 弹塑性变形; 有限元法; Ni-Co 合金; 数值模拟

中图分类号: TG156.99; TN249 **文献标识码:** A

Experimental and numerical simulation of laser shock strengthening of Ni-Co alloy pole

GAO Li¹, ZHANG Yong-kong^{2*}

(1. Department of Mechanical Engineering Weifang School Weifang 261061, China 2. School of Mechanical Engineering Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract The influence of laser shock of Ni-Co sample on plasticity deformation, hardness, stress and life is studied experimentally and simulated by ABAQUS. The results indicate that laser shock can make shock area produce residual pressure, stress and hardness of shock area be enhanced. By test on an automobile, the average life of the impacted spark plug is testified to be enhanced by almost one times than the crude spark plug. The results prove that the laser impact strengthening technology is a prospective measure for enhancing the lifespan of the spark plug.

Key words laser technique; elastic plastic deformation; finite element method; Ni-Co alloy; numerical simulation

引 言

激光冲击强化^[1]自上世纪 70 年代以来就一直被研究。激光在约束介质中产生的冲击波已被用来改善各种金属例如铝、钢、铜的机械性能。特别是激光冲击能在靶材表面产生残余压应力从而改善金属的疲劳寿命^[2], 由于所使用的激光光斑尺寸在毫米量级, 残余压应力能进入金属表面数十微米^[3]。随着汽车工业的兴起, 火花塞作为汽车点火系统的一个重要元件, 其寿命直接影响汽车的使用与维护。火花塞通常是在高温、高压、高腐蚀的环境下工作, 对火花塞的要求是既要导电性好, 又要使用寿命长。火花塞由中心电极和侧电极组成, 火花塞的中心电极容易烧蚀, 这样就使中

心电极与侧电极的间隙越来越大, 从而使放电越来越难。要想提高火花塞的寿命, 就必须改善中心电极的抗腐蚀、抗烧蚀性能。由于激光辐照^[4]可以使材料的辐照表面发生塑性变形并产生残余压应力, 从而使表面硬度得以显著提高。这就启发笔者可以利用激光束来照射中心电极, 使中心电极的表面产生残余的压应力。由于中心电极的硬度得到提高, 从而可显著提高火花塞的抗腐蚀和耐疲劳性能。

1 实验条件

激光冲击强化的实验装夹方案如图 1 所示, 试样被夹持在两个开有正六方形孔的压板之间。图 2 所示为本次的实验对象——火花塞。本实验采用的火花塞为赛欧原厂火花塞, 规格为 BPR-6EY, 点火间隙为 0.8mm~0.9mm, 螺纹直径为 14mm, 热值为 6, 螺纹长度 19mm。中心电极直径 2.5mm, 其中心电极材料表面事先经抛光处理, 实验中在中心电极材料表面涂敷一层 50μm 厚的黑漆作为能量吸收层, 以产生等离子体爆炸形成激光冲击波, 同时保护板料表面不受激光

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50475127, 50275068); 国家“八六三”高技术资助项目 (2002AA336030)

作者简介: 高立 (1964), 男, 博士研究生, 现主要从事高能激光无模成形的研究。

* 通讯联系人。Email: yongkangzhang@ujss.edu.cn

收稿日期: 2005-08-15; 收到修改稿日期: 2006-03-15

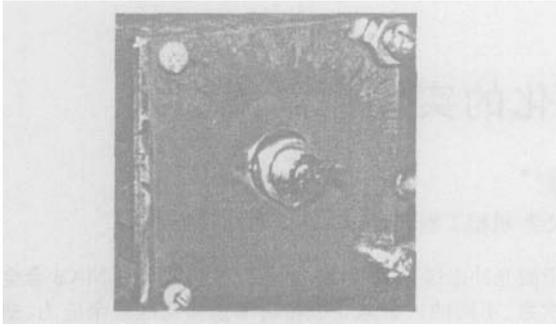


Fig 1 Experimental fitting figure

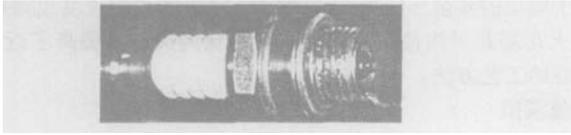


Fig 2 Experimental specimen figure

热损伤^[5,6]。黑漆层表面使用厚度大约为 3mm 的流动水层作为约束层,以提高冲击波的压力。实验装置和过程如图 3 所示。

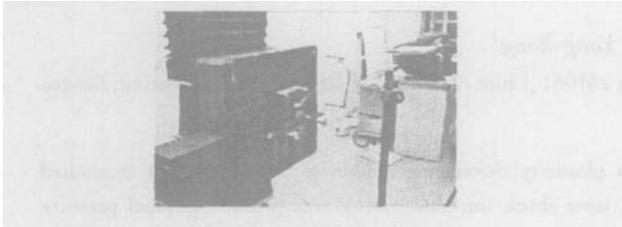


Fig 3 Experimental sketch map

实验后表面的黑漆用丙酮洗去并用酒精擦洗干净。实验使用的入射激光功率密度为 $I = 3.03 \text{ GW/cm}^2$, 能量约为 8.76J。

中心电极材料为 Si-Ni-Cr-Mn 合金,其成分如表 1 所示。几何尺寸为半径 10mm、长 30mm。材料性能参数为:屈服强度 400MPa,抗拉强度大于 500MPa,泊松比 0.33,弹性模量 71GPa,伸长率大于 10%,密度 8900kg/m³,电阻率为 $0.29 \mu\Omega \cdot \text{m} \sim 0.35 \mu\Omega \cdot \text{m}$ 。

Table 1 Sample's chemical ingredient

primary chemistry component/%	impurity content/%	microelement content/%
Si 0.5~1.0	Fe 0.4	Re 0.03
Ni+Co ≥94	Cu 0.15	Ti 0.5
Cr 1.5~2.0	S 0.05	Mg 0.1
Mn 1.5~2.0	C 0.1	Zr 0.1

实验中所用激光波长为 1.064μm,脉宽约 23ns,能量 8.76J 左右,有效光斑直径为 4mm,激光脉冲为准高斯分布。

选择两种冲击方案:(1)保持激光能量 8.76J 左右,对应于入射激光功率密度 $I = 3.03 \text{ GW/cm}^2$ 不变,取 3 只火花塞,分别对其进行了 1, 2, 3 次冲击实验;(2)分别用能量为 6.76J, 7.75J, 8.76J(对应的激光入射功率密度分别为 2.34 GW/cm^2 , 2.68 GW/cm^2 ,

3.03 GW/cm^2) 的激光强度对 3 只火花塞进行了冲击强化实验。

2 在仿真分析中要确定的几个问题

2.1 材料本构行为

关于材料行为,在激光冲击过程中材料被压缩并产生动态变形,应变率超过 10^6 s^{-1} ,在这种情况下静态的应力-应变关系已不能反映材料的真实响应。必须用动态的弹性极限取代之。JOHNSON-COOK 在 1983 年综合硬化和应变率对屈服强度的影响,提出了一个材料模型用来描述材料的这种动态行为。给出了如下形式的本构关系: $\bar{\sigma} = (\sigma_0 + B\bar{\epsilon})(1 + c \ln \bar{\epsilon}^n)$, 式中, B, n, c 为材料常数, σ_0 是材料的静态屈服强度, $\bar{\epsilon}$ 为等效塑性应变率, $\bar{\epsilon}$ 为等效塑性应变。

2.2 冲击波压力计算

激光冲击波的产生主要是由于激光与能量转换体间相互作用诱发等离子体喷射,施与靶面一反冲压力,并在激光能量的支持下维持和传播,是一种物理性质的爆轰波。根据激光冲击处理中为提高激光冲击波峰压而广泛采用约束模式的情况, FABBRO^[7] 等人建立了激光冲击波传播的一维模型,并对冲击波峰值压力进行了估算。冲击波的峰值压力由下式给出:

$$p = 0.01 \sqrt{\frac{\alpha Z I_0}{\alpha + 3}} \quad (1)$$

式中, α 是内能转化为热能的系数, $\alpha = 0.25$; I_0 是入射的激光功率密度; $I_0 = 3.03 \text{ GW/cm}^2$; Z 是靶材与约束层之间的冲击波声阻抗,定义为:

$$\frac{2}{Z} = \frac{1}{Z_t} + \frac{1}{Z_w} \quad (2)$$

式中, Z_t, Z_w 分别是靶材和约束层声阻抗,取值为: $Z_t = \rho D = \sqrt{\rho E} = \sqrt{8900 \times 71 \times 10^9} = 2.51 \times 10^6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; $Z_w = 0.165 \times 10^6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。将 Z_t, Z_w 之值代入 (2) 式,得: $Z = 0.31 \times 10^6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。将 α, I_0, Z 代入 (1) 式,得: $p = 2.73 \text{ GPa}$, 其中, D 是冲击波的波速, $D = \sqrt{E/\rho}$, E 是杨氏模量, ρ 是材料密度。

2.3 冲击波作用时间

冲击波载荷作用时间直接关系到金属靶料所受冲击动量的大小进而影响金属靶料的变形量,激光冲击成形中所用的激光脉宽很短,只有几十纳秒,而且在整个激光脉冲的作用过程中,上升沿时间和下降沿时间又不同,激光脉冲诱导产生的冲击波究竟在板料表面上作用多少时间? 根据 FABBRO 等人的研究结果,激光诱导的冲击波的作用时间大约为激光脉宽的 2 倍~3 倍。因此,在进行成形过程的有限元模拟时,对于激光脉冲的作用时间可先按照激光脉宽的 3 倍来确定,

实验采用的激光脉宽 $\tau = 23\text{ns}$ 这样每一次冲击加载的作用时间就为 70ns 左右, 模拟时取为 70ns

3 仿真分析

借助于有限元分析软件 ABAQUS 对激光冲击火花塞中心电极强化过程进行模拟。利用 ABAQUS 的前处理程序, 建立几何模型, 给定材料及其它物理参数并对结构进行有限元离散, 离散采用的是 8 节点体元, 其中在靠近光斑的地方, 单元画得较为密集。如图 4 所示。

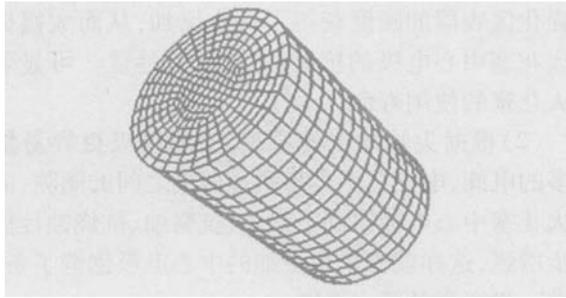


Fig 4 Separated grid figure

激光冲击强化后试样表面上的微观变形是一圆形的光斑区, 即塑性变形区。图 5 和图 6 分别展示了用激光能量 8.76J 对应功率密度 $I = 3.03\text{GW}/\text{cm}^2$ 的入射激光束冲击靶材表面产生的典型的塑性变形和残余应力分布情况。由图 5 可知: 最大塑性变形发生在冲击光斑中心处, 约为 0.048mm 。

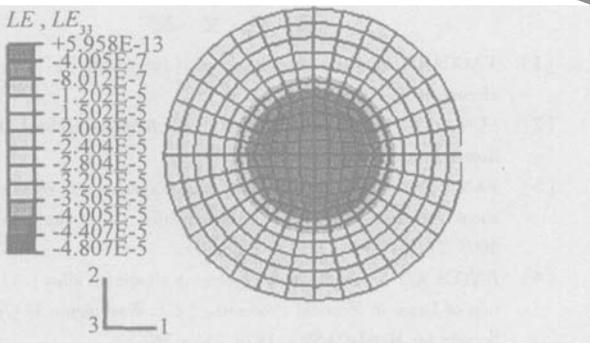


Fig 5 Plastic strain of impact surface

冲击区域表面的残余应力轴向分量 S_{33} 分布如图 6 所示。在冲击区域产生残余压应力, 最大压应力发生在光斑中心处, 约为 136MPa 。

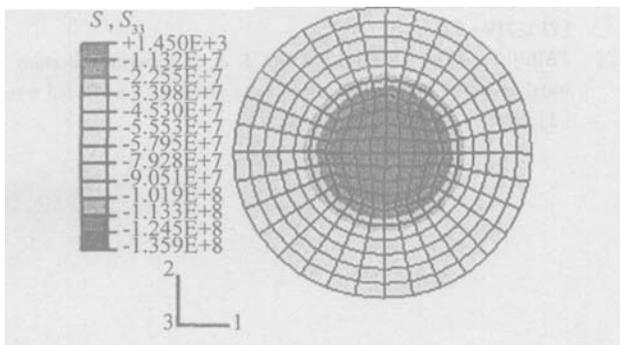


Fig 6 Residual stress S_{33} distribution of impact surface

4 实验结果与分析

4.1 表面塑性变形深度

冲击前后的火花塞中心电极形貌分别如图 7a 图

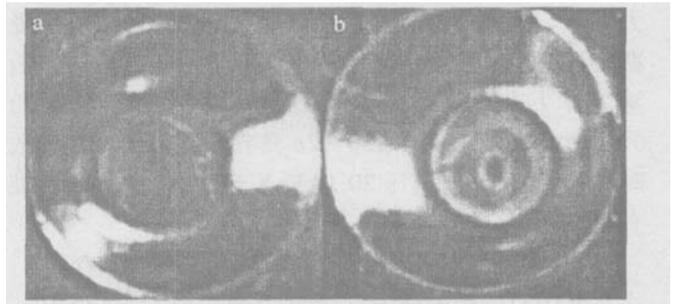


Fig 7 Visage of central electrode, $E = 8.76\text{J}$ $I = 3.03\text{GW}/\text{cm}^2$
a— before impact b— after impact

7b 所示。采用 DGB-5 型电感测微仪和千分表对激光冲击强化区进行测量, 测量基准为试件表面。在两种冲击方案下, 中心电极的变形结果分别如图 8 和图 9 所示。可知, 试件经激光冲击处理后, 表面的塑性变形是不均匀的, 光斑中心处的变形量最大约为 $75\mu\text{m}$ 。这与激光束呈高斯分布相一致, 由图可知, 仿真的结果与实际测得的表面塑性变形大致吻合。中心电极的塑性变形量随冲击次数和入射激光能量的改变呈现出非线性增加的趋势。

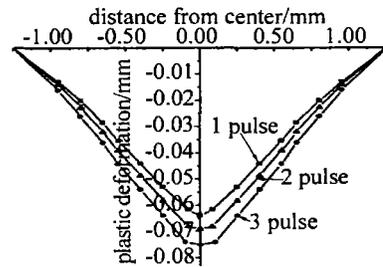


Fig 8 Plastic deformation figure

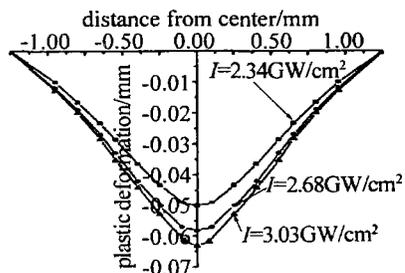


Fig 9 Plastic deformation figure

4.2 显微硬度和硬化层

采用 HVS-1000 型数字显微硬度计, 测量了用 $E = 8.76\text{J}$ 激光能量, 冲击强化区域表面后的硬度情况, 负荷为 100g 保压时间为 15s 基体平均硬度为 343HV , 冲击后的硬度为 423HV , 提高 30% 左右。从试件表面到心部, 硬度呈逐渐下降趋势。

硬度分布不均匀, 冲击区中心部位的硬度高于冲击区边缘, 硬度的提高意味着位错密度的增加。表面

和深度方向的硬度分布与表面和深度方向的残余应力、塑性应变分布是对应的。

4.3 残余应力测试

采用 X 射线衍射法来测定冲击区表面的残余应力大小。试样冲击表面残余应力的测试,采用邯郸爱斯特研究所研制的新型 X-350A X 射线应力测定仪,测量方法采用侧倾固定 Ψ 法,交相关法定峰; Ψ 角 $0^\circ \sim 45^\circ$, 2θ 角 $162^\circ \sim 150^\circ$, 2θ 角扫描步距 0.1° ,计数时间 $0.5s$, X 光管高压 $20.0kV$, X 光管电流 $5.0mA$; 准直管直径为 $\varnothing 1mm$ 。

典型冲击条件下 ($E = 8.76J, I = 3.03GW/cm^2$), 火花塞中心电极表面的残余应力最大值为 $-145MPa$, 在两种冲击方案下的残余应力分量 S_{33} 沿轴向的分布情况分别如图 10 和图 11 所示。由图 11 可知, 经 3 次连续冲击后, 冲击强化区表面的最大残余应力达到 $-210MPa$ 左右。

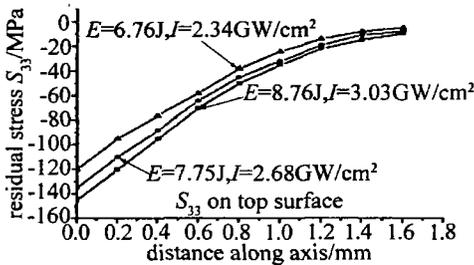


Fig 10 Residual stress S_{33} along axis

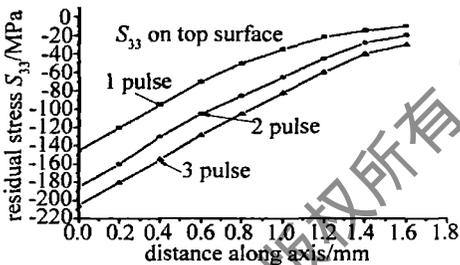


Fig 11 Residual stress S_{33} along axis

4.4 使用寿命测试

赛欧汽车所用的普通火花塞寿命为 $2 \times 10^4 km$ 。

Table 2 Spark plug life improvement

		using life/km
impact time	1	45000
	2	47000
	3	51000
laser energy $I/(GW \cdot cm^{-2})$	2.34	38000
	2.68	41000
	3.03	45000

经随车测试, 在本实验中经过激光冲击强化过的火花塞平均使用寿命提高 1 倍 ~ 2 倍, 由 $2 \times 10^4 km$ 提高到 $5 \times 10^4 km$ 左右。表 2 中列出了经过不同次数和不同激光能量冲击的火花塞使用寿命提高情况。

5 结 论

(1) 激光冲击强化处理可进一步提高被处理区材料的位错密度, 且位错密度沿层深方向呈梯度分布; 其次, 可使其晶粒组织更加细化; 再次, 在被冲击强化区表层形成了很好的残余压应力, 因此, 它的外在表现就是强化区表层的硬度获得了一定增加, 从而大幅提高了火花塞中心电极的抗腐蚀、抗烧蚀性能。可显著提高火花塞的使用寿命。

(2) 根据尖端放电的原理, 尖的电极更容易集积较多的电能, 电火花更容易跳过两极之间的间隙; 而由于火花塞中心电极得到了强化, 抗腐蚀、抗烧蚀性能进一步增强, 这样就为采用更细的中心电极创造了条件。可进一步提高其跳火性能。

(3) 如果采用更细的中心电极, 这样, 加热中心电极所耗热量少, 电极本身消焰作用变小、火焰核更易于扩散。因此, 在同样的低点火电流强度的条件下, 气缸内的可燃混合气能够得到更多一些的点火能量, 混合气燃烧得更加充分。从而进一步提高了火花塞的发光性能。

参 考 文 献

- [1] VACCARI JA. Laser shocking extends fatigue life [J]. American Machinist 1992, 41(7): 62~64
- [2] SUN Ch W. Laser radiation effect [M]. Beijing National Defense Industry Press 2002, 1 (in Chinese).
- [3] FAN Y, WANG Sh B, WU H X *et al*. Experimental research of laser shock processing on aerial aluminum alloy [J]. Laser Technology 2003, 27(4): 273~275 (in Chinese).
- [4] BATESW F Jr. Laser shock processing aluminum alloy [A]. Application of Laser in Material Processing [C]. Washington D C: American Society for Metals (ASM), 1979, 254~267.
- [5] ZOU H Ch, DAISH J, XU M Y *et al*. Study on improvement of properties of aluminum alloy by laser shock processing [J]. Laser Technology 1995, 19(6): 321~325 (in Chinese).
- [6] BRISTED W, BROCKMAN R. Finite element simulation of laser shock peening [J]. International Journal of Fatigue, 1999, A288(21): 719~724
- [7] FABBRO R, FOURNIER J, FABRE E *et al*. Experimental study of metal evolutions in metallic alloys induced by laser generated waves [J]. SPIE, 1986, 1668: 320~324