

文章编号: 0258-7025(2010)10-2662-05

# 激光单次冲击 LY2 铝合金微观强化机制研究

鲁金忠 罗开玉\* 冯爱新 钟俊伟 孙桂芳 张磊 钱晓明

(江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

**摘要** 采用激光冲击强化技术对 LY2 铝合金表面进行处理, 利用扫描电镜和透射电镜对塑性变形层深度方向的不同区域进行结构表征, 测量了元素成分的变化, 并对激光冲击强化铝合金的微观机理进行深入的研究。结果表明, 激光冲击能够在 LY2 铝合金表面产生亚微米级的亚晶结构, 深度方向的位错结构从随机分布位错到位错线, 再到位错缠结, 最后到亚晶进行逐步演变, 最终形成细化的晶粒。激光冲击的超高应变率对于粗晶的细化和最小平均晶粒尺寸的大小具有至关重要的作用。

**关键词** 激光技术; 激光冲击强化; 塑性变形; 晶粒细化; 超高应变率

中图分类号 TN249; TG156.99 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103710.2662

## Micro-Structural Enhancement Mechanism of LY2 Aluminum Alloy by Means of a Single Laser Shock Processing

Lu Jinzhong Luo Kaiyu Feng Aixin Zhong Junwei Sun Guifang  
Zhang Lei Qian Xiaoming

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

**Abstract** The effects of laser shock processing (LSP) on grain size, element content and microstructure are investigated by scanning electron microscope (SEM) and transmission electron microscope (TEM) observations in the top surface, the sever plastic deformation layer, the minor plastic deformation layer and the substrate after a single laser shock processing. The influences of LSP on micro-structure and grain size of LY2 aluminum alloy are discussed, and the enhancement mechanism of a single LSP on LY2 aluminum alloy is also addressed. After a single LSP impact, the change of dislocation structure can be also clearly seen at different layers, i. e., it varies from dislocation lines (DLs) to dislocation tangles (DTs) and dense dislocation walls (DDWs), to subgrains or refined grains as functions of the distance from the top surface. It is found that the microstructure is obviously refined due to the ultra-high plastic strain induced by multiple LSP impacts.

**Key words** laser technique; laser shock processing; plastic deformation; grain refinement; ultra-high strain rate

### 1 引 言

LY2 铝合金为耐热硬铝, 有较高的强度, 热变形时塑性高, 可热处理强化, 耐热锻铝和切削加工性能良好, 用于制造在较高温度下工作的承力结构件, 目前广泛用于某型涡喷发动机工作的叶片材料。通过对叶片失效件进行断口观察、分析发现, 叶片故障主要是由于叶片表面产生裂纹导致疲劳强度降低, 使得叶片在振动应力下发生疲劳失效<sup>[1,2]</sup>。为防止叶片发生早期失效, 目前国内主要利用喷丸强化和强化组织来提高叶片表面的完整性, 提高其抗疲劳

强度, 国际上采用高强度喷丸 (HISP) 和低塑抛光 (LPB) 等技术对叶片边缘进行表面处理, 大幅度提高了铝合金叶片抗疲劳强度, 延长了铝合金叶片的使用寿命<sup>[3]</sup>。

强激光 (脉冲能量 15~50 J, 脉冲宽度 15~30 ns) 与物质相互作用产生的强冲击波, 具有高压 (吉帕-太帕)、超快 (几十纳秒)、高应变率 ( $10^7 \sim 10^8 \text{ s}^{-1}$ , 比爆炸成形高出 100 倍) 的显著特点, 与常规加工方法相比, 具有无可比拟的优点<sup>[4,5]</sup>, 在装备重要零部件的强化制造方面发挥重要的作用, 在某些场合

收稿日期: 2010-01-28; 收到修改稿日期: 2010-04-20

基金项目: 国家自然科学基金 (50705038, 50735001)、江苏省自然科学基金 (BK2007512, BK2010352) 和江苏省博士创新基金 (CX10B-330Z) 资助课题。

作者简介: 鲁金忠 (1975—), 男, 博士, 副教授, 主要从事激光冲击强化和激光复合再制造技术等方面的研究。

E-mail: jxscience@ujs.edu.cn, bluesky2005@163.com

\* 通信联系人。E-mail: luoteacher@126.com

具有不可替代性。当高功率密度、短脉冲激光束通过透明的约束层照射涂有涂层的金属表面时,表面涂层吸收激光能量后迅速气化并发生电离,形成等离子体,产生向金属内部传播的冲击波。当冲击波的峰值压力超过金属材料的动态屈服强度时,将使金属表面产生一定的塑性变形,同时使金属材料的组织结构和应力状态发生改变,从而实现材料表面强化。表面残余压应力能够阻止表面裂纹的产生,而深度方向的残余压应力阻止微裂纹的扩展<sup>[6~8]</sup>。

随着工程结构向集成、高速和多参数趋势发展,传统的均一性能材料已无法满足工程构件在各种极端服役环境下的性能要求。激光冲击强化(LSP)铝合金提高结构件的疲劳性能得到了大量的研究和广泛的应用<sup>[8,9]</sup>,但是很少有文献对激光冲击铝合金深度方向的微观结构和强化机制进行深入的研究。

本文采用脉冲激光对 LY2 铝合金试样进行单次冲击,用扫描电子显微镜(SEM)观察了试样横截面的微观形貌,并用 X 射线衍射仪(XRD)测试了深度方向不同区域的成分变化,采用透射电镜(TEM)分析了激光单次冲击铝合金深度方向的微观组织,深入研究了激光冲击对塑性变形层的强化机制。

## 2 实验方法

### 2.1 试样材料

试样材料为 LY2 铝合金,它的化学成分如表 1 所示。试样尺寸为 5 mm×5 mm×2 mm。激光冲击时采用 0.1 mm 的美国 3M 公司专用铝箔(其中一面为粘贴剂,与试样表面粘贴)作为激光能量吸收层,便于涂敷和清洗,采用流水作为激光冲击时的约束层,流水厚度为 1~2 mm。冲击实验前,将试样进行抛光,然后放置到盛有乙醇的槽内,利用超声波进行清洗。

表 1 LY2 铝合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of LY2 duralumin alloy

Composition	Mass fraction /%
Cu	2.6~3.2
Mg	2.0~2.4
Mn	0.45~0.7
Be	0.05
Si	0.30
Fe	0.30
Cr	0.05
Zn	0.05
Ti	0.15
Al	other

### 2.2 实验装置及参数选择

激光冲击强化 LY2 铝合金实验在江苏大学强激光实验室钨玻璃型激光冲击强化装置上进行,激光冲击光斑直径为 4 mm,脉冲能量为 20 J,激光波长为 1054 nm,重复频率为 0.5 Hz,对每个试样沿上表面几何中心进行单次冲击。

### 2.3 测试方法

将激光冲击处理后的试样沿光斑中心剖开,对截面进行抛光,将其浸泡在铝合金专用腐蚀液(H<sub>2</sub>O 为 190 mL,HNO<sub>3</sub> 为 5 mL,HF 为 2 mL,HCl 为 3 mL) 10 min,利用场发射扫描电子显微镜(FE-SEM,JEOL JSM 6700F)观察试样深度方向的腐蚀性能。

采用透射电镜(TEM,JEM-2100)观察激光冲击处理后的试样不同深度的微观组织。激光处理层截面的样品,先由线切割沿深度方向切下薄层若干个,其中的两个用 Gatan 胶将处理面对粘,加热到 70 ℃保温,冷却后放入同样充满 Gatan 胶的 φ3 mm 铜管中,冷却后备用。使用金刚石切片机将铜管切成厚度为 10 μm 左右的薄片,在 2000# 砂纸上轻轻地减磨,然后进行双喷,双喷液由体积分数为 94% 的乙醇和 6% 的 HClO<sub>4</sub> 组成,温度和电压分别为 -30 ℃和 30 V,最后在离子减薄仪(GL-6960)上进行单面减薄,直至样品薄区达到观察要求。

## 3 实验结果与分析

### 3.1 深度方向的腐蚀性能和成分变化

图 1 为激光单次冲击铝合金,浸泡在铝合金专

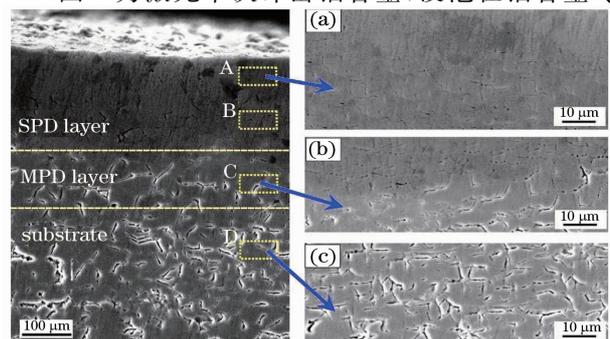


图 1 激光单次冲击铝合金腐蚀后深度方向不同区域的 SEM 形貌。(a)激光冲击上表面,(b)轻微塑性变形区域,(c)基体

Fig. 1 Comparison among the grain structures of the SPD layer, the MPD layer and substrate subjected to a single LSP immersed in the Keller's reagent for 10 minutes at room temperature. (a) at the top surface of the SPD layer, (b) in the MPD layer, (c) in the substrate

用腐蚀液 10 min 腐蚀后深度方向不同区域的 SEM 形貌。左边图为沿光斑中心剖开截面图,右边(a), (b), (c)分别为左图方框 A, C 和 D 的放大图。按照塑性变形的程度,将深度方向的截面图分为严重塑性变形区域 (SPD layer)、轻微塑性变形区域 (MPD layer) 和未冲击区域 (基体: substrate)。从图 1 左图可以看出,严重塑性变形区域和轻微塑性变形区域的深度大约为  $230 \mu\text{m}$  和  $120 \mu\text{m}$ 。且未冲击区域的析出物较粗较多,晶界明显 [如图 1(c) 所示],晶粒的大小为  $5 \sim 10 \mu\text{m}$ ;与未冲击区域相比,激光冲击区域晶界析出物较少,晶粒明显变小,晶粒的大小为

$0.5 \sim 1.5 \mu\text{m}$  [如图 1(a) 所示]。因此,可以得出激光冲击能够有效细化 LY2 铝合金晶粒的认识。

图 2 为激光单次冲击铝合金深度方向不同区域的成分含量, (a), (b), (c) 分别为未冲击区域、轻微塑性变形区域和严重塑性变形上表面的成分含量。从图 2 可以看出,激光冲击未能改变深度方向铝合金的元素成分,在上表面的 Al 元素比未冲击区域和轻微塑性变形区域稍高,是因为吸收层 (铝箔) 吸收激光的能量气化、形成等离子体,在强大冲击波的压力下,少量植入到铝合金的上表面。

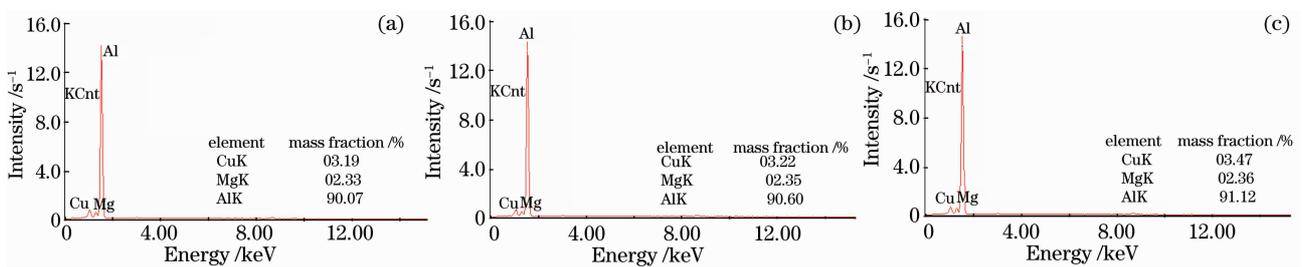


图 2 激光单次冲击铝合金深度方向不同区域的成分含量。(a) 基体, (b) 轻微塑性变形区域, (c) 激光冲击上表面  
Fig. 2 Element content of different layers subjected to a single LSP. (a) in the substrate, (b) in the MPD layer, (c) at the top surface of the SPD layer

### 3.2 深度方向的微观组织结构

图 3 为激光单次冲击铝合金深度方向不同区域的典型 TEM 图像,其中(a), (b), (c), (d)分别为未冲击区域、轻微塑性变形区域、严重塑性变形区域和冲击上表面的 TEM 图像。在这些图像中,可以看到典型的位错结构:位错线和位错缠结。从图 3(a)可以看

出,未冲击区域的铝合金粗晶为  $8 \sim 10 \mu\text{m}$ ;在轻微塑性变形区域可以发现很多位错线 [如图 3(b) 所示];在严重塑性变形区域,可以看到高密度的位错缠结 [如图 3(c) 所示];在激光冲击铝合金上表面,可以明显看出有很多亚晶结构,亚晶的长度为  $500 \sim 700 \text{ nm}$ ,宽度为  $200 \text{ nm}$  左右 [如图 3(d) 所示]。

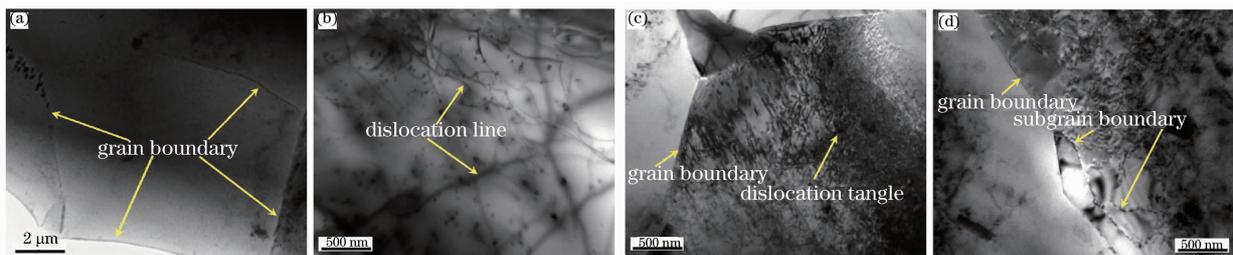


图 3 激光单次冲击铝合金深度方向不同区域的典型 TEM 图像。(a) 基体, (b) 轻微塑性变形区域, (c) 严重塑性变形区域中部, (d) 激光冲击上表面

Fig. 3 Typical TEM images of different layers subjected to a single LSP. (a) in the substrate, (b) in the MPD layer, (c) at the middle of the SPD layer, (d) at the top surface of the SPD layer

### 3.3 激光单次冲击铝合金的强化机制

铝合金塑性变形时通过不同的位错运动协调塑性变形。在激光冲击铝合金表层,不同的位错运动导致了表面层原始晶粒内位错墙和位错缠绕结构的形成。这些位错墙和位错缠绕结构把原始粗晶细分成更小的不同尺寸的位错胞块。当变形应变量达到

一定程度时,即位错墙和位错缠绕结构内的位错密度达到一定值时,这些位错开始湮灭、重排,形成位错墙,把原始粗晶细分成各个不同的亚晶,形成细化的晶粒。

从实验所得微观组织可以看出,激光冲击区域的上表面的晶粒尺寸为  $0.5 \sim 1.5 \mu\text{m}$ ,明显比未冲

击区域(基体)的晶粒尺寸( $8\sim 10\ \mu\text{m}$ )小很多,根据 Hall-Petch 公式<sup>[10]</sup>

$$H_v = H_{v_0} + K_{Hv}d^{-1/2}, \quad (1)$$

式中  $H_v$  为材料的微观硬度,  $H_{v_0}$  为基体的微观硬度值,  $K_{Hv}$  为 Hall-Petch 常数,  $d$  为晶粒的尺寸。大量的研究表明<sup>[11]</sup>, 结构金属件的疲劳寿命与晶粒大小有强关联, 在一定范围内, 晶粒尺寸越小, 抗疲劳能力越强。

激光冲击处理后的材料位错密度显著提高, 并出现缠结结构。若材料屈服强度为  $\sigma$ , 位错密度为  $\rho$ , 因  $\sigma \propto \rho^{1/2}$ ,  $\rho$  的提高使材料屈服强度得到提高<sup>[3]</sup>。从实验分析可以看出, 激光冲击 LY2 铝合金能够细化塑性变形层的晶粒, 在晶粒内部产生高密度的位错结构, 明显提高塑性变形层材料的屈服强度, 增强抗疲劳能力。

图 4 为激光单次冲击铝合金塑性变形层应变率沿深度方向的变化示意图。结果显示, 从基体到激光冲击的上表面, 应变率急剧增加, 位错结构从随机分布位错到位错线, 再到位错缠结, 再到亚晶, 最后到细化晶粒, 即塑性变形时应变率对于粗晶的细化和最小平均晶粒尺寸的大小具有至关重要的作用。

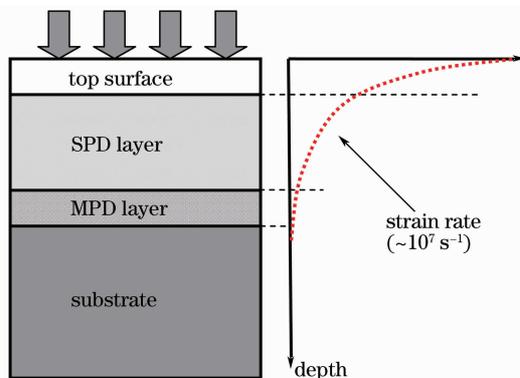


图 4 激光单次冲击铝合金塑性变形层应变率沿深度方向的变化示意图

Fig. 4 Schematic illustration of the microstructure characteristics and distribution of strain rate along depth direction in the plastic-deformation layer subjected to a single LSP

大量的研究结果<sup>[12~15]</sup>证实了变形应变量对晶粒细化的影响, 在一定的应变率条件下, 随应变量增加, 位错密度增加而形成尺寸更细小的晶粒, 在一定的变形量下, 位错密度随应变率的增加而增加, 高应变率比低应变率更能提高相邻亚结构间的晶体学取向差。激光冲击铝合金时, 冲击的上表面的应变率高达  $10^7\ \text{s}^{-1}$ , 在超高应变率的外载荷作用下, 激光冲击能够有效细化塑性变形层的晶体, 提高塑性变

形层的机械性能。

## 4 结 论

对强激光单次冲击的 LY2 铝合金形成的塑性变形层在深度方向上进行了结构表征和元素成分的测量, 实验结果表明, 激光单次冲击在 LY2 铝合金试样形成厚度约为  $350\ \mu\text{m}$  的塑性变形层, 在冲击的上表面层生成亚微米(亚晶长度为  $500\sim 700\ \text{nm}$ , 宽度为  $200\ \text{nm}$  左右)的细化晶体, 在塑性变形层铝合金的晶粒明显细化, 深度方向的位错结构从随机分布位错到位错线, 再到位错缠结, 最后到亚晶进行逐步演变, 最终形成细化的晶粒, 明显提高塑性变形层的屈服强度, 增强抗疲劳能力。激光冲击的超高应变率对于粗晶的细化和最小平均晶粒尺寸的大小具有至关重要的作用。

## 参 考 文 献

- 1 M. P. Pawar, G. Ranjan. On the effect of matrix cracks in composite helicopter rotor blade [J]. *Composites Science and Technol.*, 2005, **65**(3-4): 581~594
- 2 N. Aretakis, K. Mathioudakis, V. Dedoussis. Derivation of signatures for faults in gas turbine compressor blading [J]. *Control Engineering Practice*, 1998, **6**(8): 969~974
- 3 A. King, A. Steuwer, C. Woodward *et al.*. Effects of fatigue and fretting on residual stresses introduced by laser shock peening [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2006, **435-436**: 12~18
- 4 Gu Yongyu, Zhang Lingfeng, Lu Jinzhong *et al.*. Micro-plastic deformation of  $\text{ZrO}_2$  in high strain rate by laser shocking [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(12): 3318~3322
- 5 顾永玉, 张凌峰, 鲁金忠等.  $\text{ZrO}_2$  陶瓷激光冲击强化预处理研究 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(12): 3318~3322
- 6 C. S. Montross, L. Ye. Laser shock processing and its effects on microstructure and properties of metal alloys: a review [J]. *International J. Fatigue*, 2002, **24**: 1021~1036
- 7 Luo Xinmin, Zhang Jingwen, Zhao Guangzhi *et al.*. Effect of laser shock strengthening on fatigue behaviors of 2A02 aluminum alloy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(12): 3323~3328
- 8 罗新民, 张静文, 赵广志等. 激光冲击强化对 2A02 铝合金疲劳行为的影响 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(12): 3323~3328
- 9 C. Rubio-González, J. L. Ocaña, G. Gomez-Rosas *et al.*. Effect of laser shock processing on fatigue crack growth and fracture toughness of 6061-T6 aluminum alloy [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2004, **386**: 291~295
- 10 Zhang Yongkang, Chen Jufang, Xu Renjun. Experimental research of laser shock strengthening AM50 magnesium alloy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(7): 1668~1072
- 11 张永康, 陈菊芳, 许仁军. AM50 镁合金激光冲击强化实验研究 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(7): 1068~1072
- 12 J. M. Yang, Y. C. Her, N. Han *et al.*. Laser shock peening on fatigue behavior of 2024-T3 Al alloy with fastener holes and stopholes [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2001, **298**: 296~299
- 13 L. Harold, R. H. Michael. The effects of laser peening on high-cycle fatigue in 7085-T7651 aluminum alloy [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2008, **477**(1-2): 208~216
- 14 M. Hakamada, Y. Nakamoto, H. Matsumoto *et al.*

- Relationship between hardness and grain size in electrodeposited copper films [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2007, **457**: 120~126
- 12 A. D. Schino, J. M. Kenny. Grain size dependence of the fatigue behaviour of a ultrafine-grained AISI 304 stainless steel [J]. *Mater. Lett.*, 2003, **57**: 3182~3185
- 13 L. Zhen, H. Hu, X. Y. Wang *et al.*. Distribution characterization of boundary misorientation angle of 7050 aluminum alloy after high-temperature compression [J]. *J. Materials Processing Technol.*, 2009, **209**(2): 754~761
- 14 Q. Li, Y. B. Xu, Z. H. Lai *et al.*. Dynamic recrystallization induced by plastic deformation at high strain rate in a Monel alloy [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2000, **276**(1-2): 250~256
- 15 I. Mazurina, T. Sakai, H. Miura *et al.*. Grain refinement in aluminum alloy 2219 during ECAP at 250 °C [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2008, **473**: 297~305

\*\*\*\*\*

## 2011 年《中国激光》“激光制造”专题 征 稿 启 事

激光制造技术是国家重点支持和推动的一项高新技术,近年来在涉及国家安全、国防建设、高新技术产业化和科技前沿等领域已取得多项重大研究成果。《中国激光》在成功组织 2008 年、2009 年“激光制造”专题的基础上,计划在 2011 年 6 月正刊(EI 核心收录)上推出第三期“激光制造”专题栏目,现特向国内外广大专家学者征集“激光制造”方面原创性的研究论文,旨在集中反映该领域最新的研究成果及研究进展。

### 征稿范围包括:

- 激光制备新材料技术
- 激光表面工程技术
- 激光连接技术
- 激光去除技术
- 激光直接制造技术
- 激光复合制造技术
- 激光微加工技术
- 激光纳米制造技术
- 激光器、光学元器件与加工系统
- 激光宏微观制造过程模拟、检测与控制技术
- 其他

### 特邀组稿专家:

钟敏霖 教授(《中国激光》常务编委) 清华大学机械工程系激光加工研究中心

E-mail: zhml@tsinghua.edu.cn 010-62772993

截稿日期:2011 年 2 月 28 日

### 投稿方式以及格式:

通过网上投稿系统(<http://www.opticsjournal.net/zgjc.htm>)直接上传稿件(留言中说明“激光制造”专题投稿),详情请参见中国光学期刊网:[www.opticsjournal.net](http://www.opticsjournal.net)。本专题投稿文体为中文,其电子版请使用 MS-word 格式,有任何问题请咨询马沂编辑,E-mail: mayi@siom.ac.cn;电话:021-69918427-802。

《中国激光》杂志社

2010-09-22