

文章编号: 1001-3806(2013)06-0712-06

## 填镁改善 5052 铝合金激光焊接接头机械性能研究

邹宇峰<sup>1</sup>, 金湘中<sup>1\*</sup>, 何依宁<sup>2</sup>, 张宏圭<sup>1</sup>, 杨洪亮<sup>1</sup>

(1. 湖南大学 汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 长沙 410082; 2. 山东大学 材料科学与工程学院, 济南 250061)

**摘要:** 在铝合金激光搭接焊中, 镁元素烧损将大大降低焊缝的抗拉强度。为了消除铝合金激光搭接焊中镁元素的烧损对焊接接头的负面影响, 采用在铝合金激光焊接接头中填加镁粉的方法, 研究焊接速率对镁元素烧损的影响。实验中, 测量了焊缝中镁元素在垂直和水平方向的分布, 并对焊接接头抗拉强度进行了测试; 分析了焊接接头中镁含量和抗拉强度之间的关系, 比较了填镁量不同时各焊接接头的抗拉强度。结果表明, 镁元素的烧损极大地影响了焊缝的抗拉强度, 在激光焊接中填镁能有效地提高焊缝的抗拉强度; 相比没填镁, 填镁的焊接接头抗拉强度最大改善可以达到 36.06%; 当焊缝中镁元素的质量分数大约是 0.026 时, 抗拉强度达到最大值。这为改善铝合金激光焊接接头强度提供了新的理论依据和方法。

**关键词:** 激光技术; 抗拉强度; 填镁; 铝合金

中图分类号: TG456.7 文献标识码: A doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2013.06.002

### Study on improving mechanical properties of the welds by filling magnesium powder during laser welding 5052 aluminum alloy

ZOU Yu-feng<sup>1</sup>, JIN Xiang-zhong<sup>1</sup>, HE Yi-ning<sup>2</sup>, ZHANG Hong-gui<sup>1</sup>, YANG Hong-liang<sup>1</sup>

(1. The State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. School of Material Science &amp; Engineering, Shandong University, Ji'nan 250061, China)

**Abstract:** Magnesium is an important strengthening alloying element in aluminum alloy, the burning loss of which will greatly reduce such mechanical property of the welds as the tensile strength during laser lap welding of aluminum alloy. In order to eliminate the negative effect of the burning loss of magnesium on mechanical property of the welds, filling magnesium powder is adopted filled in laser welding aluminum alloy. The contents of magnesium in the welds were measured both in the vertical and horizontal directions, and the effect of welding velocity on the burning loss of magnesium was experimentally studied. Then, the tensile strength of the welds was tested. Compared after comparing the tensile strength of the welds under different magnesium contents, the relationship between the content of magnesium element of the welds and tensile strength was studied. The results show that the reduction of magnesium content due to the burning loss of magnesium can greatly affect the tensile strength of the welds, filling magnesium during laser welding can effectively improve the tensile strength of the welds, the maximum of the improvement can reach to 36.06% compared to those without filling magnesium. When the mass fraction of the magnesium element in the welds is about 0.026, the tensile strength of the welds reaches the maximum. This study provides new theoretical basis and methods to improve the strength of aluminum alloy laser welded joints.

**Key words:** laser technique; tensile strength; filling magnesium; aluminum alloy

### 引 言

铝合金, 因为其优良的物理和机械性能, 被广泛的应用于航空、航天、汽车、机械制造、船舶、铸造业和化工行业<sup>[1]</sup>。近年来, 随着科学技术和工业经济的迅速发展, 实际生产中对铝合金焊接结构件的需求不断增加, 铝合金激光焊接由于其诸多优点: 高能量密度、焊接强度高、速率快、变形小、焊缝美观等被

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50875079); 湖南省自然科学基金资助项目(09JJ3088)

作者简介: 邹宇峰(1987-), 男, 硕士研究生, 主要从事激光加工焊接方面的工作。

\* 通讯联系人。E-mail: jin9000xz@hotmail.com

收稿日期: 2013-02-27; 收到修改稿日期: 2013-03-06

广泛应用于工业生产中。但是,不可避免的,铝合金激光焊接存在许多问题,如合金元素的烧损、气孔、氧化和凝固裂纹等,这些均可导致焊缝和热影响区强度降低<sup>[2-4]</sup>。

针对铝合金强度降低等问题,相关学者对填料焊接的方法进行了相关研究,得出适当的添加料能较好地改善接头的组织性能和强度<sup>[5-8]</sup>。焊缝中合金元素的烧损问题<sup>[9-12]</sup>,特别是镁元素的烧损问题,相关学者作了比较深入的研究,指出合金元素的烧损导致焊缝中物质减少,却没有新的物质添加进来,进而导致焊缝出现下塌,最终使激光焊接强度降低。LIANG<sup>[13]</sup>等人对铝合金钎焊过程中添加镁元素的方法进行了研究,实验结果表明,在铝合金中,当单位体积镁质量达到一个特定值的时候,铝合金强度最高。ZHANG<sup>[14]</sup>等人对钎焊过程中优质接头形成过程进行了研究,钎焊焊缝附近镁的浓度适量是获得优质焊缝的关键。但是,针对铝合金激光焊接过程中对焊缝中直接添加镁的方法的研究,国内外鲜有报道。ZHANG 等人<sup>[15]</sup>对铝合金激光焊接过程中的镁元素的蒸发烧损,利用特殊设计的实验装置采集了孔内等离子体的光谱信号,并利用电子探针显微分析仪检测了焊缝中的镁元素含量,结果表明,小孔中不同位置处镁元素烧损主要由各位置吸收的激光能量决定,材料吸收的能量越高,镁元素的烧损越大。但是并没有研究激光焊接过程中添加镁元素对铝合金焊接接头性能的影响。

作者针对激光焊接过程中,由于激光的高能量密度导致高温焊缝区的合金元素蒸发而使接头强度大大降低这一问题,采用了在激光焊接过程中添加镁元素的方法来补充焊缝过程中镁元素的烧损。然后对焊件进行拉伸强度的测试,进而比较添加镁元素相对于不添加镁元素焊件的强度变化,研究了焊缝中镁元素的分布情况,并且通过成分测试找出焊缝拉伸强度最高时焊缝接头中的镁元素的含量。

## 1 实验材料及方法

实验材料采用的是车用铝合金 5052,厚度为 1mm,焊接形式为搭接焊,其化学成分见表 1,板料尺寸为 40mm × 80mm。添加的镁粉为纯度大于 99.0% 的化学单质。实验用激光器为 IPG 公司生产的 YLR-4000-C-WA 型光纤激光器,配合光纤激光器使用的是 ABB 公司生产的 IRB2400 6 轴联动机器人。由于铝

Table 1 The mass fraction of aluminum alloy 5052

w(Si)	w(Fe)	w(Cu)	w(Mn)	w(Mg)	w(Cr)	w(Zn)	w(Ti)	w(Al)
0.0045	0.008	0.001	0.001	0.022 ~ 0.028	0.002	0.001	0.001	surplus

合金表面比较光滑,对激光的反射比较强烈,因防止激光器因保护镜片和激光器受损而不出光,需要将激光器的激光头偏转 15°,焊接过程中采用同轴保护 + 侧面保护 + 背面保护,以 Ar 气体作为焊接保护气体。为提高焊接质量,焊接前对焊接工件进行如下的焊前处理,步骤如下:(1)在质量分数为 0.3 的 NaOH 溶液中浸泡 6min,然后清水冲洗干净,以去除表面的氧化层;(2)在室温下用体积分数为 0.1 的硝酸溶液浸泡 5min,然后清水冲洗干净,以去除残留在金属表面的 NaOH;(3)利用砂纸对焊接处进行机械打磨,让焊件表面形成细微的沟槽,以利于焊接过程中对激光的吸收;(4)丙酮去油污,烘干,然后进行焊接试验,如图 1 所示。焊后将试验焊件切割成图 2 所示。在 WDW-E200 型微机控制万能机上进行拉伸,最后用 JXA-8230 电子探针显微分析仪对焊缝中镁元素含量进行测试。

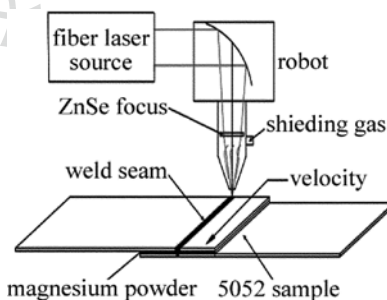


Fig. 1 Method of filling magnesium powder and welding schematic diagram

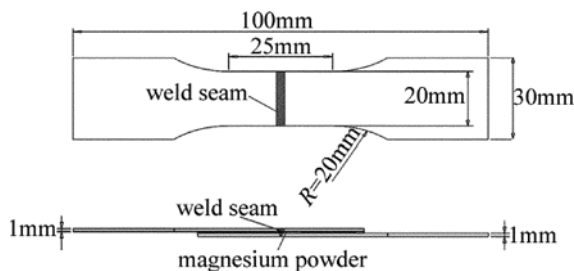


Fig. 2 Dimension of tensile specimen

## 2 实验结果及分析

### 2.1 拉伸实验结果分析

作者进行了大量的铝合金搭接激光焊接实验,对激光功率、焊接速率、离焦量、保护器类型、以及保护器流量进行了不断的优化。在条件允许的范围内确定工艺参量为:功率  $P = 3.0\text{kW}$ ,焊接速率  $v$  分别为 60mm/s, 70mm/s, 80mm/s, 90mm/s, 100mm/s, 离

焦量  $f=0$ , Ar 保护气总量为 25L/min, 分流为侧吹和背面保护气。每个参量焊接 3 个试样, 制作试样拉伸得到拉伸强度取平均值如图 3 所示。拉伸时设置拉伸速率为 1.0mm/min, 搭接焊缝厚度设为 1.0mm, 对于搭接接头来说, 由于拉力不同轴, 而必然出现剪切的作用, 很显然, 搭接焊缝区端部的应力集中比较明显。

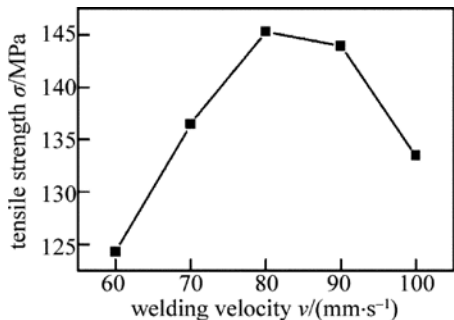


Fig. 3 Tensile strength variation with the welding velocity

由图 3 可以看出: 在速率为 80mm/s 的时候, 焊接接头的拉伸效果最好, 为 145.26MPa; 在焊接速率为 60mm/s, 由于焊接速率比较慢, 吸收的激光能量比较多, 镁元素烧损也比较厉害, 所以焊接接头的拉伸强度仅 124.28MPa; 当焊接速率为 100mm/s 时, 工件没有焊透, 焊件的拉伸强度不高, 只有 133.44MPa。因此取焊接速率为 60mm/s, 70mm/s 和 80mm/s 进行填镁焊接实验, 然后进行拉伸实验, 根据填镁量由无到有, 由少到多将焊件编号, 取其中 6 个编号分别为 0, 1, 2, 3, 4, 5, 其中 0 号试样是没有填镁焊接的焊件。将填镁的和不填镁的进行对比得出见表 2, 并得出拉伸强度增加率  $\Delta\sigma$ 。其中:

$$\Delta\sigma = \frac{\sigma_{Mg} - \sigma_0}{\sigma_0} \quad (1)$$

式中,  $\sigma_0$  为不填镁焊件的拉伸强度;  $\sigma_{Mg}$  为填镁焊件的拉伸强度;  $\Delta\sigma$  为拉伸强度增加率。

显然, 由表 2 可以看出, 在同一速率下, 随着填镁量的增加, 焊接接头的拉伸强度变化趋势为先增

Table 2 Tensile strength of weld specimen with filled magnesium and the tensile strength increase rate/MPa

	0	1	2	3	4	5
60mm/s	124.28	135.30	156.62	169.10	144.57	99.63
$\Delta\sigma$		8.87%	26.02%	36.06%	16.32%	-19.83%
70mm/s	136.50	147.35	164.53	161.31	150.47	138.17
$\Delta\sigma$		7.95%	20.53%	18.18%	10.23%	1.12%
80mm/s	145.26	150.80	153.59	164.27	149.92	83.48
$\Delta\sigma$		3.81%	5.73%	13.09%	3.21%	-42.53%

大后减小。在速率不同时, 随着焊接速率的提高, 镁元素的烧损也减小, 填加镁元素相对于不填镁元素对焊接接头的改善效果也变小。在镁元素烧损较多的焊件中, 即焊接速率为 60mm/s 时, 填加适量的镁元素, 相对于没填镁, 最高能将焊接接头的拉伸强度提高 36.06% (约为母材的 82.5%), 而焊接速率为 80mm/s, 相对于不填镁, 接头的拉伸强度最高仅仅提高 13.09%。因此, 适量的填镁对焊接接头的拉伸性能有比较明显的改善作用, 但是填加量过多会使焊接接头的拉伸强度明显降低, 主要原因是镁元素过多, 在焊接过程中的高温环境中形成了一些 Al-Mg 的脆性化合物, 降低了接头的拉伸强度。因此在焊接过程中, 对镁元素的填加量的控制是试验成功的关键。

## 2.2 镁元素的含量检测及分析

将焊件切割成 20mm × 10mm 块状, 将要检测的平面进行抛光, 以保证检测结果的准确性。扫描线如图 4 所示。

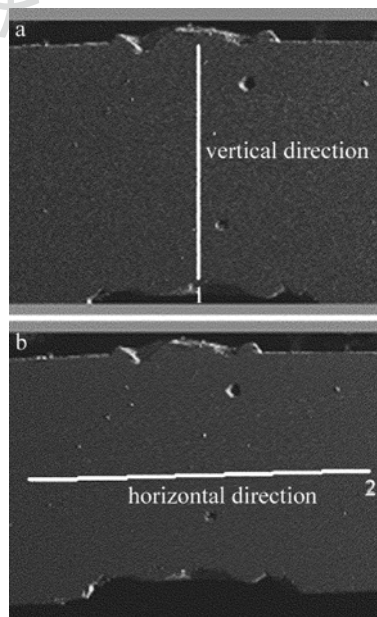


Fig. 4 Test line diagram

扫描之前, 要确定垂直方向和水平方向上的扫描线为焊缝的正中间, 而后将扫描线平均分为 499 段, 产生 500 个点, 而后测定这 500 个点所在位置出镁元素的含量, 得到的平均值如表 3 所示。将焊件进行编号,  $h_{ij}$  为焊缝中镁元素的含量, 其中  $i$  为如上所定义的填镁量由少到多的编号, 可取 0, 1, 2, 3,  $j$  是表示镁元素的扫描检测线, 其中 1 表示扫描方向为垂直方向, 2 表示扫描方向为水平方向。



Table 3 The average content of magnesium in weld seam in the vertical direction and horizontal direction(mass fraction)

	$h_{01}$	$h_{02}$	$h_{11}$	$h_{12}$	$h_{21}$	$h_{22}$
60mm/s	0.0194	0.0209	0.0208	0.0223	0.0235	0.0249
70mm/s	0.0210	0.0215	0.0222	0.0234	0.0260	0.0274
80mm/s	0.0223	0.0228	0.0242	0.0259	0.0257	0.0264
	$h_{31}$	$h_{32}$	$h_{41}$	$h_{42}$	$h_{51}$	$h_{52}$
60mm/s	0.0262	0.0276	0.0316	0.0331	0.0346	0.0355
70mm/s	0.0270	0.0281	0.0298	0.0310	0.0321	0.0332
80mm/s	0.0261	0.0275	0.0301	0.0313	0.0360	0.0366

显然,垂直方向上的镁元素含量比横向上镁元素的含量都相对偏高,主要原因是在搭接的两块焊件中间填加了镁粉的缘故。取其中没有填镁焊接和填镁焊接效果最好的焊件的镁元素分布图进行比较,不填镁时焊缝中的镁元素的含量分布如图 5 所示,填镁焊接后拉伸效果较好的焊件焊缝中镁元素含量分布如图 6 所示。

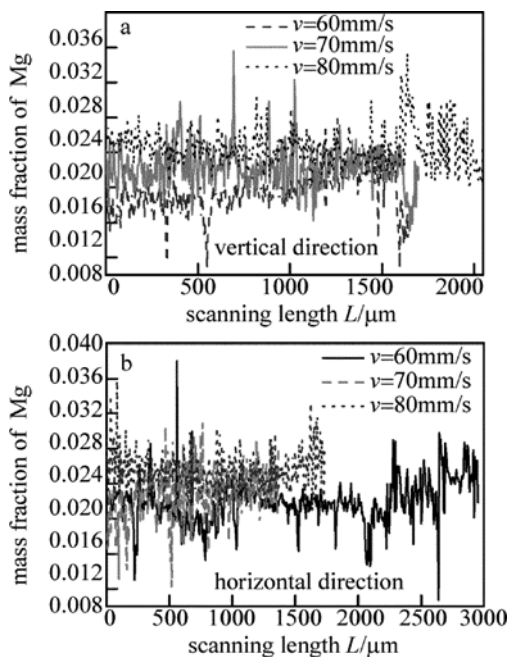


Fig. 5 Scanned drawing of magnesium content distribution in the welds at the welding velocity of 60mm/s,70mm/s and 80mm/s

由图 5 可知,焊接速率分别为 60mm/s,70mm/s 和 80mm/s 时,焊缝中镁元素的主要分布区间明显不同,而分布区间即代表镁元素的含量,因此由图 5 可以看出,焊接速度不同时,焊缝中镁元素的烧损有着明显的区别。由图 5 和图 6 可以看出,相邻两个点的镁元素的含量差别比较大,有些点的镁元素的含量远远大于母材中镁元素的质量分数 0.0252,而有些点的镁元素的含量又远远低于母材的含量值,产生这种现象的原因是激光焊接过程中材料的熔化

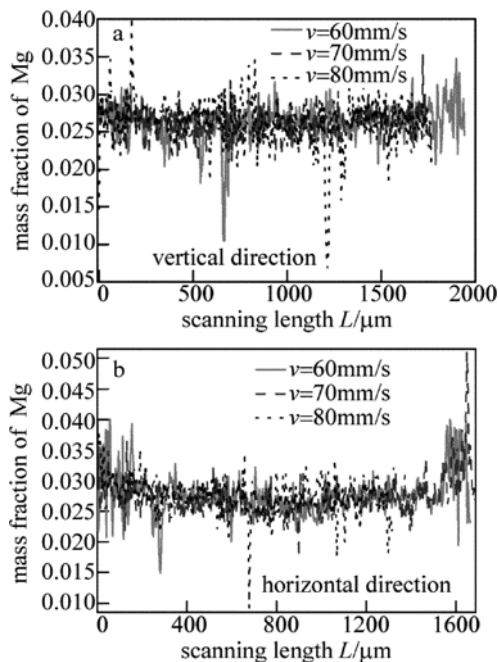


Fig. 6 Scanned drawing of magnesium content distribution in the welding seam welded with filling magnesium powder and the effect are best at the velocity of 60mm/s,70mm/s and 80mm/s

和冷却速率都较快,使镁元素在焊缝中不能很快均匀分布,从而最终使镁元素在焊缝中的某些位置出现聚集现象,导致在一些点上镁元素的含量远远高于母材,而另外某些点的镁元素含量就远远低于母材,因此研究单个点的镁元素的含量意义不大。将数据作如下处理:将每 25 个数据取一个平均值,以最后一个点的横坐标作为横坐标,以平均值作为纵坐标可以得到图 7 和图 8。

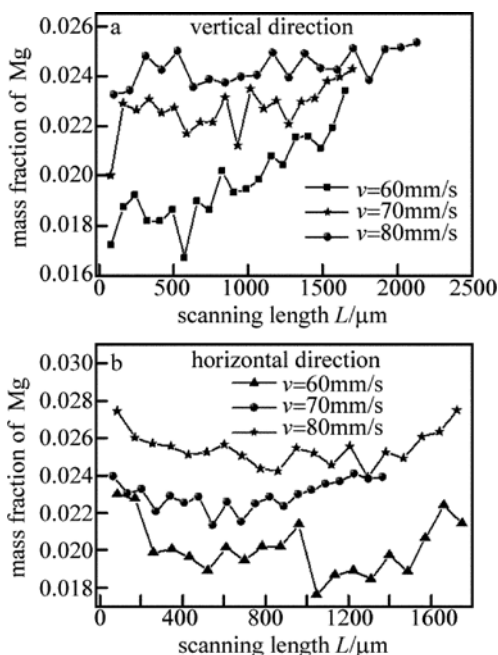


Fig. 7 Trend graph of magnesium content distribution in the weld at the welding velocity of 60mm/s,70mm/s and 80mm/s

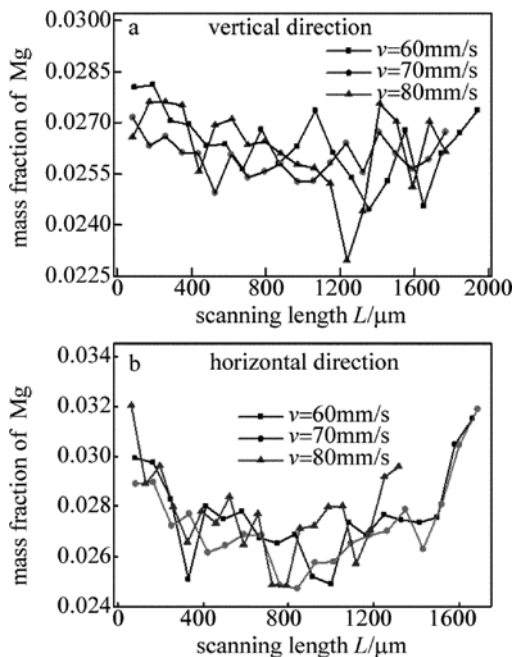


Fig. 8 Trend graph of magnesium content distribution in the welding seam welded with filling magnesium powder and the effect are best at the velocity of 60mm/s, 70mm/s and 80mm/s

由此图 7 和图 8 可以看出,在没有填镁焊接时,焊缝中镁元素在垂直方向上的分布趋势为先增加而后降低,最后再增加,而添加镁元素焊接后,镁元素在垂直方向上的分布趋势为先减小而后增大。可见填镁后,焊缝靠近上表面的镁元素含量显著升高,主要原因是在添加镁元素后,在焊接的过程中由于焊接过程中形成的小孔作用将小孔外的镁元素排开,使其向上流动,使得焊缝上部的镁元素含量增加。而镁元素在水平方向上的变化都是先减小再增大,基本上都是呈现出一种左右对称的形式。根据镁元素在垂直方向和水平方向上含量的变化,可以得出填镁焊接后镁元素在整个焊缝平面的分布如下:镁元素含量最低点为焊缝的正中心处的,以中心为圆心,随着离中心的距离增大,镁元素的含量也会慢慢增加。其主要原因是在焊接过程中形成了小孔,小孔的形成使小孔中心的镁元素向孔外流动,并且激光在小孔内壁经过不断的反射,最后被小孔吸收,吸收的位置大部分处在焊缝的中心处,由于激光能量的高斯分布,所以导致激光中心处的温度最高,镁烧损也最厉害,镁元素的含量相对较小。通过研究某种特殊元素的含量变化可以推测在焊接过程中熔池的流动方式。

### 2.3 焊缝中镁元素的含量与拉伸强度的关系

由以上的分析可知,在搭接板中间添加镁元素,能较好地改善镁元素在焊缝中垂直方向上的分布,

而对焊缝水平方向上的分布改变趋势改变不大。工件在焊透情况下的所有焊件焊缝中的镁元素在垂直方向上的含量平均值与焊接接头的抗拉强度如表 4 和图 9 所示。

Table 4 Magnesium content in the weld joints and the tensile strength of the joint

$w(\text{Mg})$	0.0194	0.0208	0.021	0.0222	0.0223	0.0235
tensile strength $\sigma$	124.28	135.3	136.5	147.35	145.26	156.62
$w(\text{Mg})$	0.0242	0.0257	0.0260	0.0261	0.0262	0.0270
tensile strength $\sigma$	150.80	152.56	164.53	164.27	169.10	161.31
$w(\text{Mg})$	0.0298	0.0301	0.0316	0.0321	0.0346	0.0360
tensile strength $\sigma$	150.47	149.92	144.57	138.17	99.63	83.48

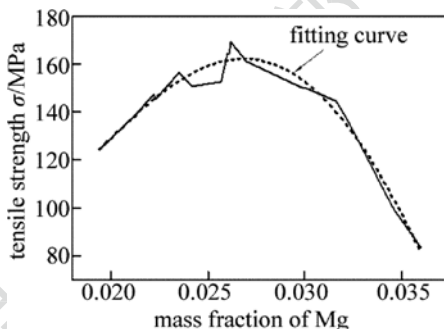


Fig. 9 The relationship between the magnesium content and the tensile strength

由表 4 和图 9 可以看出,在工件焊透的情况下,随着镁元素烧损由小变大,焊件的抗拉强度由大变小。在焊接过程中添加镁元素能有效地提高焊接接头的抗拉强度,镁元素烧损越厉害,填镁对接头的抗拉强度的改善越明显,当焊缝中的镁元素质量分数为 0.026 左右的时候,焊接接头达到最大值即改善效果最显著。随着镁元素添加量的继续增加,焊缝中镁元素质量百分数增多,在激光焊接过程中的高温下,很容易直接燃烧,或者跟 Al 结合形成脆性化合物,直接导致焊接接头的力学性能的下降,所以对填镁量的控制是实验成功与否的关键。

### 3 结 论

(1) 激光功率为 3kW 的情况下,焊接速率为 60mm/s 的工件比焊接速率为 80mm/s 的工件焊缝中镁元素的烧损更厉害。通过在焊接过程添加镁粉的方法能起到改善焊接接头拉伸性能的作用,并且,镁元素烧损越厉害,改善效果越明显,通过填镁,分别使上面两种工件的拉伸强度增加 36.06% 和 13.09%。

(2) 填镁和不填镁,焊缝镁元素在垂直方向上的分布有很大的不同,不填镁时,镁元素含量的分布

趋势为先增大后减小然后再增大,而填镁后为先减小而后增大,即填镁后,使得焊缝熔池上面的镁元素含量增大。

(3)在工件焊透的情况下,焊缝中镁元素的含量与焊接接头的抗拉强度呈现抛物线的变化趋势,并且当焊缝中镁元素质量分数在 0.026 左右时,焊接接头的拉伸强度最大。

#### 参 考 文 献

- [1] EL-BATAHGY A, KUTSUNA M. Laser beam welding of AA5052, AA5083 and AA6061 aluminum alloys[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2009, 2009: 974182.
- [2] KUO T Y, LIN H C. Effects of pulse level of Nd-YAG laser on tensile properties and formability of laser weldments in automotive aluminum alloys[J]. *Materials Science and Engineering*, 2006, A416(1/2): 281-289.
- [3] ZHAO H, DEBROY T. Weld metal composition change during conduction mode laser welding of aluminum alloy 5182[J]. *Metallurgical and Materials Transactions*, 2001, B32(1): 163-172.
- [4] MUNDRA K, DEBROY T. Calculation of weld metal composition change in high-power conduction mode carbon dioxide laser-welded stainless steels [J]. *Metallurgical and Materials Transactions*, 1993, B24(1): 145-155.
- [5] QI X D, LIU L M. Fusion welding of Fe-added lap joints between AZ31B magnesium alloy and 6061 aluminum alloy by hybrid laser-tungsten inert gas welding technique[J]. *Materials and Design*, 2012, 33(4): 436-443.
- [6] YU Y Ch, WANG Ch M, YU Sh F, *et al.* Microstructures and property of butt laser joint of aluminium alloy 5A06 sheets with filler[J]. *Laser Technology*, 2010, 34(1): 34-36 (in Chinese).
- [7] BRAUN R. Nd:YAG laser butt welding of AA6013 using silicon and magnesium containing filler powders[J]. *Materials Science and Engineering*, 2006, A426(1/2): 250-262.
- [8] XU F, CHEN L, GONG Sh L, *et al.* Microstructure and mechanical properties of laser welding 5A06 aluminum with filling wire [J]. *Applied Laser*, 2009, 29(2): 83-86 (in Chinese).
- [9] JANDAGHI M, PARVIN P, TORKAMANY M J, *et al.* Alloying element losses in pulsed Nd:YAG laser welding of stainless steel 316[J]. *Journal of Physics*, 2008, D41(23): 235503.
- [10] HE X, DEBROY T. Alloying element vaporization during laser spot welding of stainless steel[J]. *Journal of Physics*, 2003, D36(23): 3079-3088.
- [11] DILTHEY U, GOUMENIOUK A, LOPOTA V, *et al.* Development of a theory for alloying element losses during laser beam welding[J]. *Journal of Physics*, 2001, D34(1): 81-86.
- [12] JANDAGHI M, PARVIN P, TORKAMANY M J, *et al.* Measurement of the composition change in Al5754 alloy during long pulsed Nd:YAG laser welding based on LIBS[J]. *Applied Physics*, 2009, 42(20): 205301.
- [13] LIANG N, SHENG Y F. Effect of active element-magnesium on the properties of vacuum brazed joints of aluminum alloy [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2007, 28(7): 61-64 (in Chinese).
- [14] ZHANG Y H, SHI Ch Ch. Research on the role of magnesium in the process of aluminum alloy vacuum brazing[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 1983, 4(2): 55-69 (in Chinese).
- [15] ZHANG H G, JIN X Zh, CHEN G Y, *et al.* A study on the burning loss of magnesium element in fiber laser welding of aluminum alloy 5052[J]. *Laser Technology*, 2012, 36(6): 713-718 (in Chinese).