

# 送丝速度对镀锌钢激光钎焊接头性能影响研究

马凯<sup>1,2</sup> 于治水<sup>1,2</sup> 张培磊<sup>1,2\*</sup> 卢云龙<sup>1,2</sup> 褚振涛<sup>1,2</sup> 史海川<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 上海工程技术大学材料工程学院, 上海 201620  
<sup>2</sup> 高强激光智能加工装备关键技术产学研开发中心, 上海 201620)

**摘要** 激光钎焊过程中有很多影响焊接接头质量的因素,如激光功率,焊接速度,离焦量等,主要研究了送丝速度对焊接接头力学性能的影响。实验结果显示:焊接接头中有 Fe-Si(Cu)弥散相的析出,这些析出相呈现颗粒状,小岛状或者花瓣状分布。当送丝速度达到 2.0 m/min 时,弥散相的分布最为密集,焊接接头的力学性能最好,并高于母材,在母材处发生断裂;当送丝速度为 1.7 m/min 和 2.3 m/min 时,Fe-Si(Cu)相只是零星分布在焊接接头内,接头力学性能比母材差,拉伸实验断裂在焊缝处,断裂方式属于韧性-塑性型。

**关键词** 激光技术; 镀锌钢板; 送丝速度; 弥散相; 断裂

**中图分类号** TG454 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.1003003

## Study of Influence of Wire Feeding Speed on Properties of Laser Brazing Joint of Zinc-Coated Steel

Ma Kai<sup>1,2</sup> Yu Zhishui<sup>1,2</sup> Zhang Peilei<sup>1,2</sup> Lu Yunlong<sup>1,2</sup> Chu Zhentao<sup>1,2</sup> Shi Haichuan<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> College of Materials Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China  
<sup>2</sup> Research & Development Center for Key Technologies of Intelligent Equipments of Ultra-Intense Laser Processing, Shanghai 201620, China)

**Abstract** Many factors affect the quality of the overlap joint in the laser brazing process, such as laser power, welding speed, defocusing distance and so on. The influences of wire feeding speed on the overlap joints' mechanical properties are studied. The results indicate that a large number of dispersed phases are found in the overlap joint, which is identified as Fe-Si(Cu). These phases appear as granular, island or petal shape. A joint with best mechanical property is got when the wire feeding speed is 2.0 m/min. Phases of Fe-Si(Cu) distribute densely in the joint. The mechanical properties of the overlap joint is best, and is higher than that of the base metal. The fracture occurs in the base metal. When the wire feeding speed is 1.7 m/min and 2.3 m/min, phases of Fe-Si(Cu) only sporadics distribute in the joint. The mechanical properties of the overlap joint is worse than that of the base metal. The fracture occurs at the brazing seam. The fracture mode is the ductile and brittle mixed fracture.

**Key words** laser technique; zinc-coated steel; wire feeding speed; dispersed phases; fracture

**OCIS codes** 140.3390; 140.3460; 160.3900

## 1 引言

镀锌钢板由于锌而在焊接时存在很大的困难,这是由于锌的熔化温度(460 °C)和蒸发温度

(906 °C)比钢板本身要低很多<sup>[1-3]</sup>。然而随着钎焊技术的成熟,利用钎焊焊接镀锌钢板能够得到性能优良的接头,平整美观的焊缝以及优良的抗腐蚀性

**收稿日期**: 2014-03-21; **收到修改稿日期**: 2014-05-01

**基金项目**: 国家自然科学基金(51375294)、上海市自然科学基金(12ZR1444500)、上海市科委地方高校能力建设项目(13160501200)、上海市教委创新项目(14YZ139,12ZZ186)、上海工程技术大学高水平培育项目(2012gp21)、上海工程技术大学研究生创新项目(13KY0510,13KY0509)

**作者简介**: 马凯(1989—),男,硕士研究生,主要从事激光钎焊方面的研究。E-mail: sumouszll@126.com

**导师简介**: 于治水(1960—),男,博士,教授,主要从事新材料连接技术、微连接、激光焊接等方面的研究。

E-mail: yu\_zhishui@163.com

\* **通信联系人**。E-mail: oxidpl@gmail.com

能<sup>[4-5]</sup>。研究人员在利用电弧钎焊镀锌钢板时在钎焊接头界面处发现了 Si 元素的富集以及 Fe<sub>2</sub>Si 和 Fe<sub>3</sub>Si<sub>3</sub> 界面层<sup>[6-8]</sup>。于治水等<sup>[9]</sup>采用脉冲钨极氩弧焊以 CuSi<sub>3</sub> 作为钎料钎焊镀锌钢板,焊接后在钎料区域内发现了呈现球状或者花瓣状的颗粒相,经过测试认为这种颗粒相是 Fe<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>(Cu),并且发现这种颗粒相的存在在一定程度上起到强化接头的作用。Lu 等<sup>[10]</sup>研究发现激光填丝钎焊能够应用于镀锌钢板的焊接,送丝机构的稳定性,激光功率以及镀层都对钎焊质量有很大的影响,利用激光钎焊得到焊接工件仍然具有很好的耐腐蚀性。Xie 等<sup>[11]</sup>通过双光束焊接镀锌钢板得到了比较好的焊接接头,但是采取双光束焊接需要控制好两束激光之间的参数匹配。

表 1 母材基体 Q235 的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Compositions of Q235 base metal (mass fraction, %)

Chemical composition	C	Si	Mn	Cr	S	P	Fe
Percentage	0.08	0.22	0.48	0.18	<0.015	<0.02	base

表 2 钎料 CuSi<sub>3</sub> 的化学成分(质量分数,%)

Table 2 Compositions of CuSi<sub>3</sub> filler metal (mass fraction, %)

Chemical composition	Cu	Si	Mn	Fe	Zn	Al	P	Pb	Sn
Percentage	Base	2.41	1.04	0.07	0.0013	0.004	0.001	0.001	0.056

## 2.2 实验过程

实验采用光纤激光器(IPG YLS-5000)作为热



本文采用光纤激光器作为热源,CuSi<sub>3</sub> 为钎料,研究不同送丝速度下镀锌钢板激光钎焊焊接接头的成形和质量规律,为进一步研究镀锌钢板的激光钎焊提供理论支持。

## 2 实验过程

### 2.1 实验材料

实验采用的母材为镀锌钢板,尺寸为100 mm×40 mm×2 mm,镀锌层厚度为 30 μm,基体为普通的 Q235 钢,成分如表 1 所示。填充钎料为直径为 1.2 mm 的 CuSi<sub>3</sub> 钎料,其成分如表 2 所示。实验前所有的材料均用丙酮清洗干净,晾干。

源,如图 1(a)。钎料自动送给,焊接参数如表 3 所示。图 1(b)为激光填丝钎焊装置示意图。

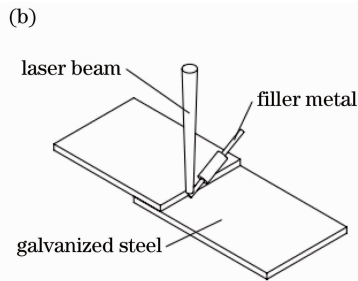


图 1 (a) 激光器实物图; (b) 激光钎焊示意图

Fig. 1 (a) Picture of laser; (b) sketch of laser brazing with filler wire

表 3 焊接实验参数

Table 3 Parameters of laser brazing

Sample	Wire feeding speed /(m/min)	Laser power /W	Brazing speed /(m/min)	Defocus distance /mm
1 #	1.7	3500	0.4	0
2 #	2.0			
3 #	2.3			

## 2.3 实验结果测试方法

将焊接完成的试样切开,一部分试样沿着焊缝截面剖开,镶嵌制样,在 S-3400N 扫描电镜(SEM)和 Rigaku X 射线衍射(XRD)仪上进行分析。另一部分加工成拉伸试样,在电子万能材料试验机

(AG-25T)上进行拉伸实验。

## 3 结果与分析

图 2 是经过激光钎焊后的焊接接头的形貌图。

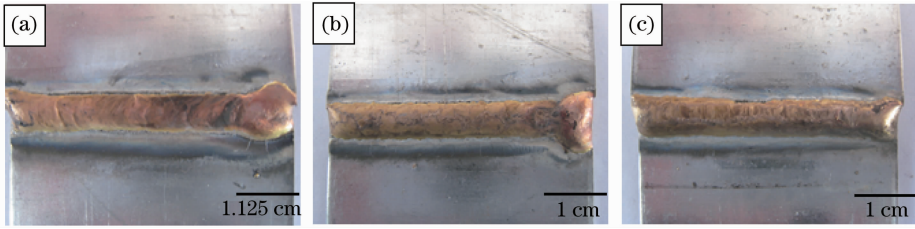


图 2 焊接接头形貌图。(a) 1号试样；(b) 2号试样；(c) 3号试样

Fig. 2 Topography of welding joint. (a) Sample 1#; (b) sample 2#; (c) sample 3#

从图 2 中可以看出：经激光钎焊后的焊缝表面较为平整，光滑。同时，随着送丝速度的增加焊缝也更加的饱满。

### 3.1 接头组织分析

分别对 3 个试样接头进行了组织分析，图 3 是 3 个试样焊接接头截面的 SEM 照片。

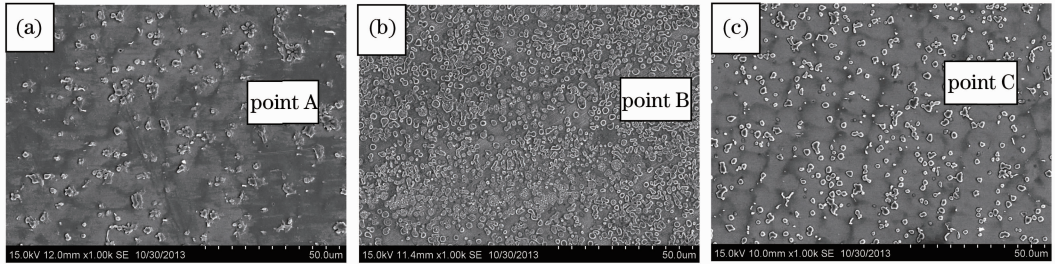


图 3 焊接接头截面 SEM 形貌图。(a) 1号试样；(b) 2号试样；(c) 3号试样

Fig. 3 SEM topography of welding joint cross. (a) Sample 1#; (b) sample 2#; (c) sample 3#

从图 3 中可以看出在经过激光作用后在钎缝中析出了许多灰黑色物质，它们呈现颗粒状，小岛状或者花瓣状分布。表 4 是图 3 中 A, B, C 点的色散谱 (EDS) 分析结果。

表 4 EDS 分析结果(质量分数, %)

Table 4 Results of EDS analysis (mass fraction, %)

Analysis position	Si	Fe	Cu	Mn
Point A	13.5	55.33	27.42	3.81
Point B	7.66	57.90	33.19	1.26
Point C	16.57	68.97	8.9	5.56

从表 4 可以发现：弥散分布的则是富含 Fe 元素和 Si 元素以及 Cu 元素的相，为了进一步确认这些相的组成，对 2 号试样进行了 XRD 分析，分析结果如图 4 所示。

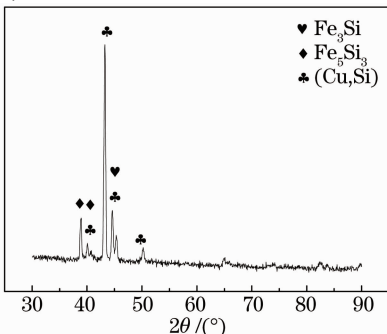


图 4 2号试样 XRD 分析结果

Fig. 4 XRD results of sample 2#

### 3.2 拉伸实验结果与分析

拉伸实验的结果如表 5 所示。

表 5 拉伸实验结果

Table 5 Results of tensile test

Sample number	Tensile strength /MPa	Fraction location
Sample 1#	292.7	Brazing seam
Sample 2#	331	Base metal
Sample 3#	273.2	Brazing seam

从表 5 中可以看出：2 号试样的抗拉强度最大且高于母材的抗拉强度。结合图 3、图 4 以及拉伸实验结果可以推断出，钎焊接头中弥散分布的 Fe-Si (Cu) 对接头的力学性能有较大的影响。这些 Fe-Si (Cu) 相作为弥散的第二相粒子分布于焊接接头中，根据 Orowan<sup>[12]</sup> 公式可知：

$$\Delta\tau = 3\alpha_{Gb}f/2d(1-f), \quad (1)$$

式中  $\Delta\tau$  为弥散质点使材料切应力强度的提高值， $f$  为第二相粒子的体积分数， $d$  为第二相粒子的直径， $\alpha_{Gb}$  表示位错线的张力值。从(1)式可以看出，第二相粒子体积分数越大，尺寸越小，强化效果越好。利用 Image-pro 软件对图 3 中 3 个试样中的析出相进行统计，统计结果如图 5 所示。

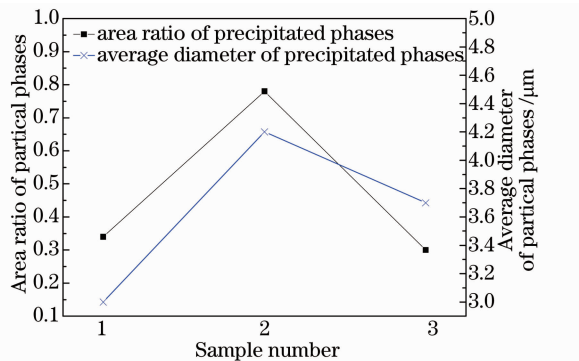


图 5 析出相统计结果

Fig. 5 Statistical results of precipitated phase

结合图 5 计算出的析出相的面积分数以及平均直径, 带入(1)式计算可得到 3 个接头的  $\Delta\tau$  值, 分别为  $0.26\alpha_{Gb}$ ,  $1.27\alpha_{Gb}$ ,  $0.174\alpha_{Gb}$ 。从计算结果可以看出: 2 号试样的  $\Delta\tau$  增加的最多, 1 号样与 3 号样的增加值则是相当, 即 2 号试样的切应力强度提高最大, 1 号与 3 号试样的切应力强度提高值相当, 这与拉伸实验的结果是一致的。因此, 2 号样焊接接头性能得到更好的强化, 接头的力学性能因而也高于母材的力学性能。

同时, 对影响 Fe-Si(Cu) 相形成的因素进行了分析。实验时钎料处于高温状态, 当钎料和母材接

触后, 接触面的母材处于半熔化状态, 热输入增加, 进入到钎料中的 Fe 元素的几率也随之增加, 当 Fe 进入钎料后就会与钎料中的 Cu, Si 等元素在快速加热和快速冷却这样非平衡条件下形成多种金属间化合物 Fe-Si(Cu)。液态钎料在激光作用下处于搅动状态, 增强了熔池的对流作用, 使液态钎料流动性增强, 从而降低了温度梯度, 固液界面前沿的成分过冷区域变宽, 母材中的 Fe 原子和钎料中的 Si 原子充分接触, 增加了形核, 重熔后的钎料内部的 Fe-Si(Cu) 相不断增加。分析认为: 由于 1 号试样的送丝速度最小, 使得单位横截面积的焊缝热输入最大, 因而对流作用强烈, 但较小的送丝速度使得与母材发生反应的钎料减少, 导致了 Fe 原子与 Si 原子充分接触的几率降低, 因而形成的 Fe-Si(Cu) 相较少。而 3 号样虽然送丝量是最大的, 但导致了单位面积的热输入减小, 熔池内液态钎料流动性小, 温度梯度大, 使得界面前沿的成分过冷区域小, 降低了形核的几率, 从而使 Fe-Si(Cu) 相数目比 2 号样少, 故而 2 号试样的强化效果最好, 其接头力学性能也最好。

### 3.3 接头断裂方式分析

为了探究焊接接头的断裂方式, 分别对 1, 2, 3 号试样的断口进行了研究, 图 6(a)~(c) 分别是 3 个试样拉伸断口的宏观形貌。

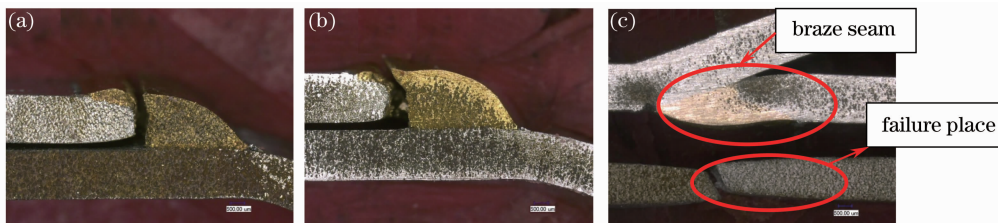


图 6 拉伸试样断口宏观形貌。(a) 1 号试样; (b) 3 号试样; (c) 2 号试样

Fig. 6 Macro morphology of fracture of tensile sample. (a) Sample 1#; (b) sample 3#; (c) sample 2#

由于搭接试样在进行拉伸实验时还受到剪切力的作用, 根据拉伸剪切实验做出如图 7 所示的接头拉伸实验的简化模型。

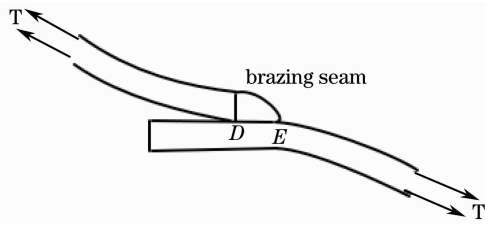


图 7 拉伸接头的简化模型

Fig. 7 Simplified model of tensile joint

从图 7 可以看出当搭接接头进行拉伸实验时, 由于剪切力的存在, 位置 D、E 成为接头中裂纹最容

易萌生的地方, 而从断口的宏观形貌可以看出 D 处成为了裂纹开始扩展的地方。结合图 6(a) 和 (b), 可以观察到 1 号和 3 号试样的断裂路径基本一致, 从钎脚处起裂, 然后裂纹从钎脚处向焊缝扩展, 最后在钎料靠近上母材的地方发生断裂。图 8 是断裂路

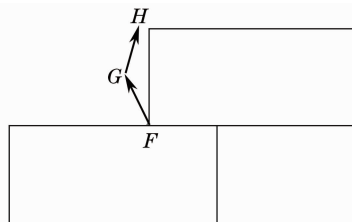


图 8 断裂路径示意图

Fig. 8 Sketch of fracture path

径的示意图： $F \rightarrow G \rightarrow H$ 。

图9(a)和(b)分别是1号和3号试样 $F \rightarrow G$ 区域的SEM形貌图,图中可以观察到这一区域的断口呈现韧窝状,属于典型的塑性断裂。

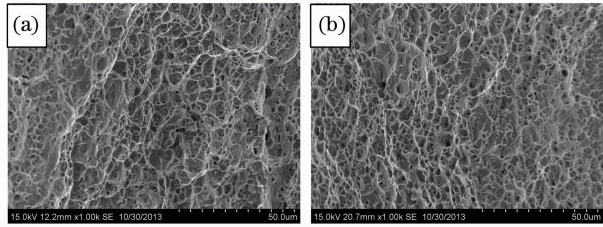


图9 试样断口形貌。(a) 1号试样;(b) 3号试样

Fig. 9 Fracture morphology of samples.

(a) Sample 1#; (b) sample 3#

图10(a)和(b)分别是1号和3号试样 $G \rightarrow H$ 区域的SEM形貌图,从图中可以清楚地看到,1号试样这一区域的断口形貌呈现解理面状,3号试样虽然呈现韧窝状,但是韧窝非常的浅,2个试样在这一区域的断裂可以看成脆性断裂。

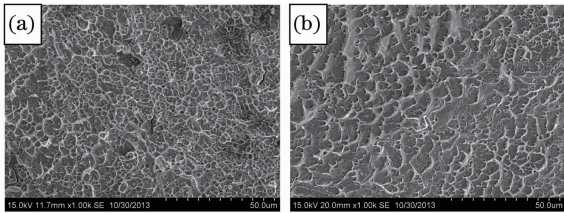


图10 试样断口形貌。(a) 1号试样;(b) 3号试样

Fig. 10 Fracture morphology of samples.

(a) Sample 1#; (b) sample 3#

结合图9,10可以判断在本次实验中钎焊接头的断裂是一种组合型的断裂方式。起裂点在搭接钎缝的底部(图8中 $F$ 点),属于塑性断裂。止裂点在焊缝顶部靠近母材的地方(图8中 $H$ 点),是脆性断裂。起裂点1处于钎脚处,除了这里是应力集中的部位,还因为这里界面结合是最弱的地方。在同一焊缝中,不同部位的钎料与母材之间的界面反应是不一样的,顶部受到激光的直接照射,接收到的热量最多,上母材出现了微熔,熔化的母材与液态钎料混合流到钎缝底部,在这里发生混合,溶解,扩散形成界面。而钎脚处的热量来源主要是通过液态钎料对激光能量的传递作用,热量损失大,同时母材的热传导也造成能量损失,使得钎脚处的能量输入最低,固液界面的温度最低,温度的降低造成这里的表面张力的增大,从而造成液态钎料在钎脚处的润湿性变差,界面结合变弱,成为起裂点。这说明镀锌钢板激光钎焊的接头质量在很大程度上取决于钎脚处。

## 4 结 论

通过改变送丝速度来研究它对镀锌钢的激光钎焊接头力学性能的影响,得到了如下结论:

1) 在利用 $\text{CuSi}_3$ 激光填丝钎焊镀锌钢板时,焊接接头有 $\text{Fe-Si(Cu)}$ 相的析出,这些相的分布随着送丝速度的改变而发生变化,当送丝速度为 $2 \text{ m/min}$ 时,相的分布最为密集;当送丝速度为 $1.7 \text{ m/min}$ 和 $2.3 \text{ m/min}$ 时, $\text{Fe-Si(Cu)}$ 相只是零星地分布在焊接接头内;

2) 拉伸实验结果显示了 $\text{Fe-Si(Cu)}$ 析出相对于接头的强化作用。当送丝速度为 $2 \text{ m/min}$ 时,析出相对焊接接头的力学性能的提高最大,甚至使接头的力学性能超过了母材;当送丝速度为 $1.7 \text{ m/min}$ 和 $2.3 \text{ m/min}$ 时,接头力学性能比母材差,拉伸实验断裂在焊缝处,断裂方式属于韧性-塑性组合型。

## 参 考 文 献

- 1 H Heinrich. MIG-brazing of galvanized thin sheets and profiles [J]. Schweissen-Schneiden, 1998, 50(6): E102-E104.
  - 2 B Belkacem. Low-heat process enhances joining of coated sheet metals[J]. Welding Journal, 2003, 82 (1): 26-30.
  - 3 J P Bergmann, J Wilden, M Dolles, *et al.*. Working zinc-coated steels and making steel-aluminium alloy joints using high power lasers-brazing and braze welding [J]. Welding International, 2006, 20(1): 37-44.
  - 4 H Hanebuth, P Hoffmann, M Geiger. Laser beam brazing using the twin spot technology[C]. SPIE, 1994, (2207): 146-153.
  - 5 Xiaosong Feng, Liquan Li, Yanbin Chen, *et al.*. Laser brazing with filler wire for galvanized steel sheets[J]. China Welding, 2005, 14(1): 9-14.
  - 6 Zhishui Yu, Fangming Zhou, Kai Qi, *et al.*. Fracture behavior analysis of MIG brazed joint with Cu-based filler metals[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2001, 22(6): 29-32.
  - 7 Reifeng Li, Zhishui Yu, Kai Qi. Interfacial structure and joint strengthening in arc brazed galvanized steels with copper based filler[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2006, 16(2): 397-401.
  - 8 Zhishui Yu, Reifeng Li, Kai Qi. Growth behavior of interfacial compounds in galvanized steel joints with  $\text{CuSi}_3$  filler under arc brazing[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2006, 16(6): 1391-1396.
  - 9 Z S Yu, R F Li, F M Zhou, *et al.*. Joint evolution and strengthening mechanisms in arc brazed galvanized steels with  $\text{Cu}_9\text{Si}_3$  filler[J]. Materials Science and Technology, 2004, 20 (11): 1479-1483.
  - 10 F G Lu, B F Lu, X H Tang, *et al.*. Study of influencing factors and joint performance of laser brazing on zinc-coated steel plate [J]. Int J Adv Manuf Technol, 2008, 37(9): 961-965.
  - 11 J Xie, P Denny. Galvanized steel joined with lasers[J]. Welding Journal, 2001, 80(6): 59-61.
  - 12 Li Jian. Fundamentals of Materials Science [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2010. 179.
- 李 见. 材料科学基础[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2010. 179.

栏目编辑:张浩佳