

引用格式: 姜力鹏, 邓兆雪, 张宇慧, 等. 镁合金表面激光熔覆的研究现状与发展趋势[J]. 中国材料进展, 2025, 44(11): 996-1008.

JIANG L P, DENG Z X, ZHANG Y H, *et al.* Research Status and Development Trend of Laser Cladding of Magnesium Alloy[J]. Materials China, 2025, 44(11): 996-1008.

镁合金表面激光熔覆的研究现状与发展趋势

姜力鹏¹, 邓兆雪², 张宇慧¹, 张胜宝¹, 李响³

(1. 中国航发哈尔滨东安发动机有限公司, 黑龙江 哈尔滨 150066)

(2. 哈尔滨理工大学建筑工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

(3. 西北有色金属研究院先进材料研究所, 陕西 西安 710016)

摘要: 镁合金是最有前途的轻质结构材料之一, 但较差的耐蚀性和耐磨性限制了其在工业领域的进一步应用。激光熔覆作为一种表面改性技术, 以其独特的高效性以及涂层与基体间可形成冶金结合等优点, 可有效提升镁合金表面性能。但镁合金的低熔点特性使得激光工艺参数和材料选择对镁合金表面性能的改善至关重要。为此, 详细讨论了激光熔覆工艺参数(激光功率、扫描速度和波长)对熔覆后涂层组织和性能的影响, 同时对目前镁合金表面激光熔覆的主要材料体系进行总结; 综述了镁合金表面激光熔覆技术的发展和现状, 提出了镁合金表面激光熔覆面临的主要问题; 对今后镁合金表面激光熔覆研究的发展方向进行了展望。

关键词: 激光熔覆; 镁合金; 材料体系; 工艺参数; 发展趋势

中图分类号: TG174.4; TG146.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2025)11-0996-13

Research Status and Development Trend of Laser Cladding of Magnesium Alloy

JIANG Lipeng¹, DENG Zhaoxue², ZHANG Yuhui¹, ZHANG Shengbao¹, LI Xiang³

(1. AECC Harbin Dong An Engine Co., Ltd., Harbin 150066, China)

(2. School of Architecture and Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

(3. Advanced Materials Research Central, Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

Abstract: Magnesium alloys are one of the most promising lightweight structural materials, but the poor corrosion and wear resistance of magnesium alloys restrict their applications. As a surface modification technology, laser cladding can effectively improve the surface properties of magnesium alloys because of its unique high efficiency and metallurgical bonding of coating and substrate. Due to the characteristics of magnesium alloy, laser cladding process parameters and material selection are of vital importance to improve the surface properties of magnesium alloys. The influence of laser cladding process parameters (laser power, scanning speed and wavelength) is discussed in detail, and the main material systems for laser cladding of magnesium alloys are summarized. In addition, the development and status of laser cladding for magnesium alloys are discussed, and the main problems of laser cladding for magnesium alloys are put forward, the future development is proposed.

Key words: laser cladding; magnesium alloys; material systems; process parameters; development trend

1 前言

镁合金被认为是 21 世纪最具开发前途和应用潜力的“绿色”工程材料之一^[1]。它们具备良好的铸造性、可加工性, 并且由于地球上镁储量丰富, 镁合金在价格上也有一定优势。镁合金密度小, 同时还具备高的比强度和比刚度, 在航空航天和汽车领域已得到广泛的应用, 例如方向盘框架、座椅框架、发动机缸体等; 此外, 镁合

收稿日期: 2024-10-19 修回日期: 2025-02-05

基金项目: 黑龙江省省属本科高校基本科研业务费专项资金资助项目(2023-KYYWF-0122)

第一作者: 姜力鹏, 男, 1992年生, 工程师,

Email: jlp18845109758@163.com

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202410014

金优异的电磁屏蔽性能和阻尼性能使其在保护信号和降低噪声方面具有一定的优势，因此，镁合金在 3C 领域也得到了广泛的应用^[2-5]。图 1 展示了目前镁合金在工业领域的应用现状，采用镁合金制备框架及器件，不仅降低了原料成本，还改善了设备整体的轻便性。然而，镁合

金较差的耐蚀性严重缩短了镁合金零件在某些应用环境下的使用寿命，特别是在潮湿和含盐环境中。同样，镁合金的低硬度和较差的耐磨性也严重限制了其在工业中的进一步应用和发展^[6-8]。

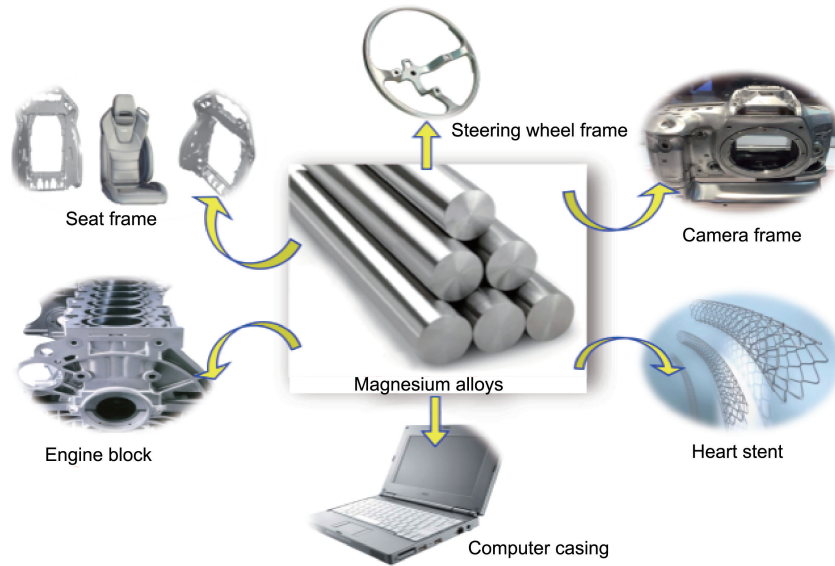


图 1 镁合金在工业领域的应用

Fig. 1 The application of magnesium alloys in the industrial field

为了保持镁合金原有的优异性能，采用表面处理技术对镁合金表面进行改性以提高其耐腐蚀性。目前，常用于提高镁合金表面性能的技术有化学镀^[9]、物理气相沉积(physical vapor deposition, PVD)^[10]、化学气相沉积(chemical vapor deposition, CVD)^[11]、微弧氧化(micro-arc oxidation)^[12]和冷喷涂(cold spraying)^[13]等。表 1 总结了一些常用于镁合金表面改性的技术，尽管包括微弧氧化、

化学镀、气相沉积以及冷喷涂在内的表面改性技术已经应用于镁合金的表面改性，但是这些方法存在一定的局限性。例如化学镀工艺较繁琐，所制备的涂层与基体结合强度较低；气相沉积技术制备的涂层较薄，难以承受重载；微弧氧化制备的氧化膜涂层脆性大，且对氧化膜生长机制的研究也不够完善。

表 1 常用的镁合金表面改性技术的特性对比

Table 1 Comparison of the characteristics of common surface modification technologies for magnesium alloys

Method	Degree of substrate deformation	Grain size of coating/ μm	Dilution rate	Bonding type	Coating thickness/mm	Environmental impact
Laser beam	No deformation	0.5~1.0	<10%	Metallurgical bonding	0.20~3.00	Green and pollution-free
Chemical plating	No deformation	<0.1	—	Chemical bonding	<0.05	Toxic, harmful gas emissions
Chemical deposition	Deformation	0.2~0.5	—	Chemical bonding	<0.05	Toxic, harmful gas emissions
Micro-arc oxidation	No deformation	<0.05	—	Metallurgical bonding	<0.15	Toxic, harmful gas emissions
Cold spraying	No deformation	<5	—	Mechanical bonding	0.05~0.50	Noise pollution

近几十年来，激光因其高能量密度在工业制造中得到广泛的应用，其中激光熔覆技术一直是研究热点并得到快速发展。相比于其他表面改性技术，激光熔覆具备一些显著的优势，首先，熔覆层与基体为冶金结合，且

热影响区较浅^[14]；其次，快的加热和冷却速率确保了精细均匀的微观组织^[15]；再次，大量原位中间相的形成和未熔融强化相的保留有利于涂层获得更高的耐腐蚀性和耐磨性^[16]；更重要的是，激光表面改性具有操作简单、

节省时间、节能环保、耗材少的优势^[17]。

目前,采用激光熔覆对镁合金进行表面改性已经发展成为新的研究领域。为此,本文重点从激光熔覆工艺参数优化、熔覆材料体系选择等方面介绍镁合金表面激光熔覆的相关研究,总结其发展现状并提出目前存在的问题,同时对未来的发展趋势进行展望。

2 镁合金激光熔覆工艺

如前言所述,激光熔覆技术可以在涂层和基材之间获得良好的冶金结合。为了促进镁合金的进一步应用,应在镁合金激光熔覆工艺方面进行更多的研究。由于镁熔点低、密度小、化学性质活泼等特点,镁合金表面激光熔覆具有以下特点:①为避免试验中镁发生任何形式的反应(通常是与大气中的氧气或者氮气),需要在惰性气体氛围中进行试验^[18, 19];②镁的化学性质活泼,在激光熔覆过程中易与涂层内金属元素形成金属间化合物,从而提升涂层硬度和耐磨性^[20, 21];③镁熔点低、密度小,在激光熔覆过程中易向涂层扩散形成冶金结合,但涂层质量同样容易因成分被镁稀释而受到影响,导致涂层性能下降^[20];④镁合金对激光束吸收率低,这将影响改性后表面涂层质量,可采取蚀刻或表面氧化工艺对镁合金表面进行处理,增大镁合金表面吸光率^[22]。因此,本节总结影响熔覆层质量的主要因素,包括材料进料方式和工艺参数。

2.1 熔覆材料进料方式

激光熔覆亦称激光包覆,是利用高能量密度的激光热源在基板上移动,使基材表层与熔覆材料一起熔融的方法,在基材表面形成与其冶金结合的具有优异的物理、化学或力学性能的改性层^[21]。根据熔覆材料添加方式的不同,可将激光熔覆分为预置法和同步送粉法两种(图 2)。

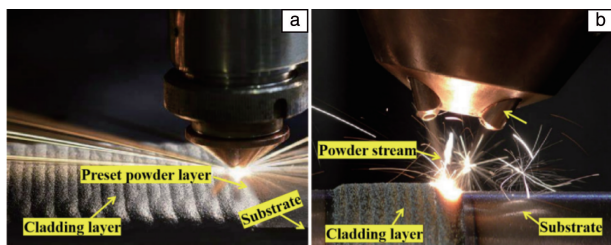


图 2 不同进料方式的激光熔覆:(a)预置法,(b)同步送粉法
Fig. 2 Different feeding methods of laser cladding: (a) preset method, (b) synchronous powder send method

对比两种进料方式,预置法较为简单且成本低,但由于预置层疏松,熔覆过程中会导致气孔等缺陷的产生^[23-25]。Qian 等^[24]使用连续波 CO₂ 激光器在 AZ91D 镁合金表面熔覆 Al-Si 涂层,该团队首先采用等离子喷涂

方法在镁合金表面预置 Al-Si 层,而后进行激光熔覆处理。结果表明,激光熔覆处理后,镁合金表面具有良好的耐蚀性,但熔覆层底部残留少量孔洞,如图 3 所示。相比于预置法,同步送粉法可控性好,容易实现自动化控制,减少缺陷的产生,但该方法粉末利用率低,需要配置复杂装置,试验中需要考虑粉末流量、送料距离及激光束与送料喷嘴轴线间的夹角等参数^[26, 27]。Carcel 等^[26]使用 Nd:YAG 连续波激光器,采用同步送粉的方式对 AZ61、ZK30 和 WE54 这 3 种不同型号镁合金表面熔覆 Al-Si 粉末以提高镁合金的耐磨性和耐蚀性。结果表明,激光熔覆后可以获得具有良好冶金结合的无裂纹和无孔涂层,且熔覆层的耐磨性和耐蚀性均远高于基体。

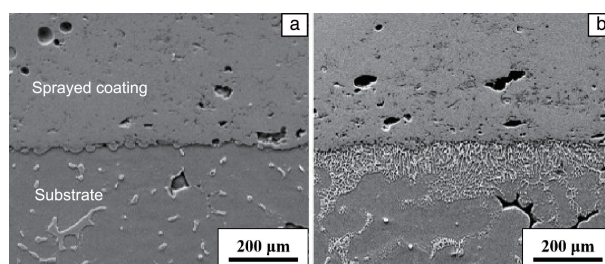


图 3 等离子体喷涂(a)和进一步激光熔覆(b)的 Al-Si 涂层的微观结构^[24]

Fig. 3 Microstructure of Al-Si coating prepared by plasma spraying (a) and followed laser cladding (b)^[24]

2.2 工艺参数

激光工艺参数是影响改性层质量的关键因素,工艺参数包括激光功率、扫描速度、光斑直径、搭接率,对于同步送粉工艺,还需考虑送粉量、送料距离及激光束与送料喷嘴轴线间的夹角等^[26-29]。而镁合金熔点低,在激光改性过程中极易熔化甚至蒸发造成较大稀释率,故激光工艺参数的变化极易对改性层显微组织及性能产生影响^[20]。为此,对近年来用于镁合金熔覆的材料对应的激光工艺参数进行了总结,如图 4 所示。其中主要列举了扫描速度、光斑直径及激光功率 3 个主要工艺参数。从图中可初步看出,目前对铝基熔覆层的研究较为成熟,其他材料体系的工艺参数仍属探索阶段。因此,为了制备成分均匀、微观结构致密、性能优良的表面熔覆层,工艺参数优化是必要手段。

一般来说,与激光能量源相关的输入参数包括激光功率、扫描速度、光束焦点位置和激光束的波长,选择时主要取决于熔覆层和基体材料的种类。其中,激光功率和扫描速度对熔覆层的影响通常是一起研究的,因为熔覆过程中材料接收的能量密度与上述参数直接相关,也与激光光斑直径相关,激光能量密度 $D(\text{J}/\text{mm}^2)$ 与以上参数有式(1)所示关系^[30]:

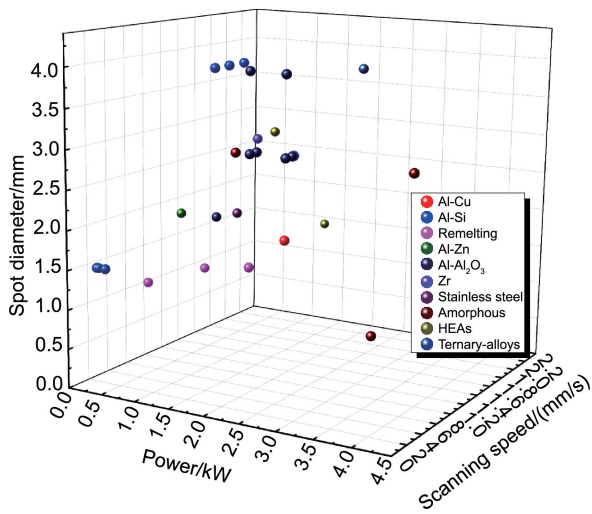


图 4 镁合金表面激光熔覆各材料体系对应的工艺参数

Fig. 4 Process parameters for each material system of laser cladding on magnesium alloy surface

$$D = \frac{P}{S \times d} \quad (1)$$

其中, P 表示激光功率 (W), S 表示扫描速度 (mm/s), d 表示光斑直径 (mm)。

激光能量密度表示被熔池吸收的可用能量, 研究表明, 激光能量密度高或低不仅影响相的组成, 还影响表面形貌^[31, 32]。尤其对于低熔点镁合金, 高的能量密度会导致基体表面蒸发和陨石坑的形成, 相反, 低能量密度

会导致不充分的熔化和混合以及硬颗粒的不均匀分布。

Riquelme 等^[33]研究了扫描速度和激光功率对 ZE41 镁合金熔覆 Al/SiC 涂层的影响, 发现涂层的宏观几何形状与扫描速度和激光功率有关。Yue 等^[34]研究了不同激光功率和扫描速度对熔覆层和基体界面状态的影响。他们先采用热喷涂的方式将 Al-Si 共晶合金粉末喷涂在 SiC 强化的 ZK60 镁合金复合材料表面, 然后进行激光熔覆处理。研究发现, 当激光功率一定、扫描速度增加时, 熔覆层与基体的界面从完全熔合, 即界面处没有可见裂纹等缺陷的状态, 转变为熔覆层和与基体结合的界面处面积减小, 且熔覆层最上部出现未完全熔化而凝固的不规则状态。继续增加扫描速度, 界面处最终出现不完全熔合状态; 当扫描速度一定、激光功率增加时, 熔覆层与基体的界面从开始的不完全熔合转变为完全熔合, 但激光熔覆层的表面粗糙度显著增加, 界面处还出现了裂纹和气孔。

综上, 为了获得高质量的熔覆层, 有必要获得扫描速度和激光功率的最佳组合, 而对于不同熔覆层或不同牌号的镁合金, 最佳工艺参数组合也不同。在熔覆过程中, 扫描速度、激光功率与熔池尺寸、冷却速度直接相关, 同时镁合金的熔点较低, 热量的传递过程对微观结构有相当大的影响, 因此对于镁合金这种基材来说, 研究热量传递过程也是非常重要的。

此外, 基材表面的光束焦点的不同位置也会影响熔覆层的几何形状、稀释率、熔融区和热影响区。为此, Riquelme 等^[33]对此问题进行了探究, 如图 5 所示, 他们

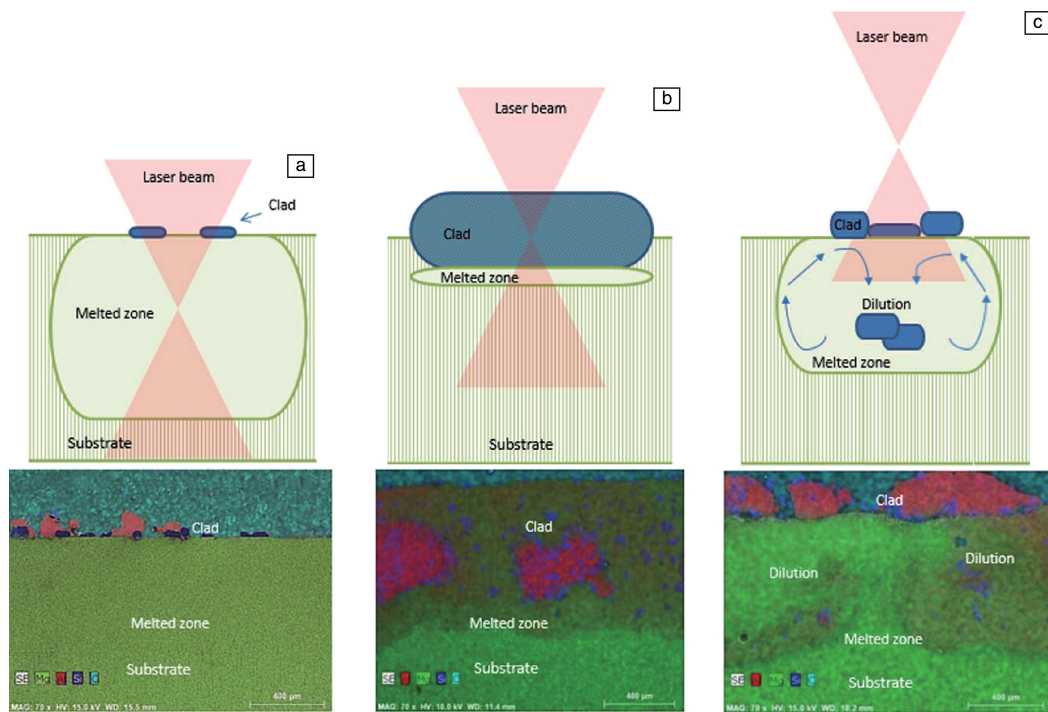


图 5 激光束焦点位置示意图及对应熔覆层组织^[33]: (a) 负散焦, (b) 聚焦, (c) 正散焦

Fig. 5 Schematic of various laser beams and corresponding clad microstructure^[33]: (a) negative defocus, (b) focus, (c) positive defocus plane

发现不同的光束焦点位置会导致熔覆层产生不同特性的变化,出现 3 种聚焦模式。在负散焦模式下,熔融区深度更高,熔覆层非常薄,在某些区域,熔覆层并未达到覆盖整个基材表面的效果(图 5a);在正散焦模式下,观察到涂层和基材之间出现高稀释现象(图 5c);在聚焦模式下,熔融区最小,熔覆层性能更好(图 5b)。

一些研究表明^[30, 35, 36],激光束的波长对金属的激光吸收也有重要影响,如图 6 所示,波长较短的激光更有利于被金属吸收。另外,由于不同种类的激光器波长不同,故在镁合金表面激光熔覆方面,激光器的选择也应因地制宜。表 2 列举了一些用于镁合金表面工程的激光器类型,可以看出镁合金激光改性领域主要采用 CO₂ 和 Nd:YAG 激光器,其中 Nd:YAG 激光器通常用于镁合金

表面重熔;而 CO₂ 激光器多用于镁合金表面熔覆。为了解镁合金在激光束作用下的行为,Ignat 等^[22]对激光处理中基材吸收的光束能量进行研究。激光与物质相互作用的能量效率 η 见式(2):

$$\eta = \frac{E_a}{E_i} \quad (2)$$

其中, E_a 是被辐照材料吸收的能量(通过等温微分 Calvet 微量热计测得), E_i 是激光束的入射能量(将光束困在由吸收材料制成的空心球上来测量)。通过式(2)计算波长为 1.06 μm 的脉冲 Nd:YAG 激光器的激光束的能量效率,结果表明,通过阳极氧化和光罩法获得的预处理层对激光束与材料的相互作用具有积极的影响。

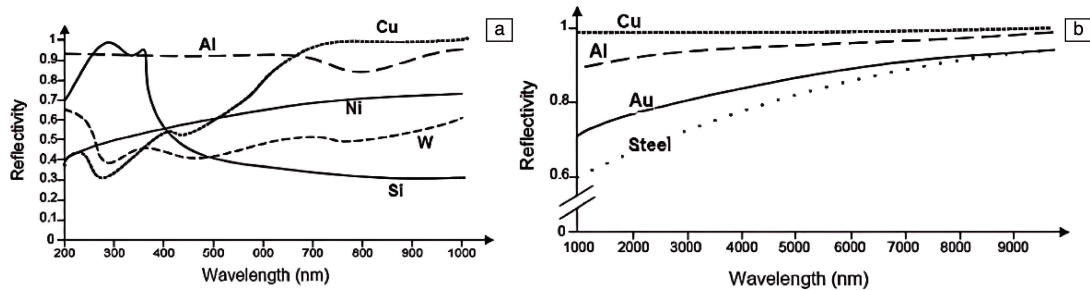


图 6 不同金属在不同波长范围内的反射率与光束波长之间的相关性^[30]: (a)200~1000 nm, (b)1000~9000 nm

Fig. 6 Correlation between reflectivity and beam wavelength for different metals in two different wavelength ranges^[30]: (a) 200~1000 nm, (b) 1000~9000 nm

表 2 用于镁合金表面工程的激光器

Table 2 Laser for magnesium alloy surface engineering

Laser type	Applications	Magnesium alloy type	Ref.
CO ₂ (TJ-HL-T5000)	Cladding (preset method)	AZ80	[37]
5 kW CW CO ₂	Cladding (preset method)	AZ91HP	[38]
5 kW CW CO ₂	Cladding (preset method)	AZ31B	[39]
10 kW CW CO ₂	Cladding (powder feed)	MEZ	[21]
5 kW CW CO ₂	Cladding (preset method)	GW103K	[25]
5 kW CW CO ₂	Cladding (powder feed)	Magnesium	[27]
4 kW CW CO ₂	Remelt (after plasma spraying)	AZ91D	[7]
4 kW CW CO ₂	Remelt (after deposit)	AZ91D	[18]
6 kW CW CO ₂	Remelt (after plasma spraying)	AZ91D	[24]
Nd:YAG	Cladding (preset method)	AZ91D	[40]
Nd:YAG	Cladding (preset method)	AZ91D	[41]
Nd:YAG	Remelt	WE43/ZE41	[22]
Nd:YAG	Remelt	89.9% Mg-8.57% Al-0.68% Zn-0.15% Mn-0.52% Ce	[42]
Nd:YAG	Remelt	AZ91D	[43]
Nd:YAG	Remelt	AZ91D/AM60B	[44]

稀释率也是影响熔覆层好坏的关键，在激光熔覆过程中镁合金基体极易熔化上浮，在熔覆层下方形成稀释区，稀释率过大将容易造成熔覆层内组织不均匀且致密性不好，形成孔洞等缺陷^[20]。稀释率总是随工艺参数变化而变化，为了控制熔覆过程中基体的稀释率，必须适当调整工艺参数。通常，稀释率可由式(3)计算^[45]：

$$\eta = \frac{S_1}{S_1 + S_2} \quad (3)$$

其中， S_1 为基体的熔深面积； S_2 为基体表面上方的涂层面积，如图 7 所示。 S_1 和 S_2 可分别由式(4)和式(5)计算^[45]：

$$S_1 = \left\{ \left[\left(\frac{W}{2} \right)^2 + H_1^2 \right] / 2H_1 \right\}^2 \times \arcsin \left\{ \frac{W \times H_1}{\left[H_1^2 + \left(\frac{W}{2} \right)^2 \right]} \right\} - W \left[\left(\frac{W}{2} \right)^2 - H_1^2 \right] / 4H_1 \quad (4)$$

$$S_2 = \left\{ \left[\left(\frac{W}{2} \right)^2 + H_2^2 \right] / 2H_2 \right\}^2 \times \arcsin \left\{ \frac{W \times H_2}{\left[H_2^2 + \left(\frac{W}{2} \right)^2 \right]} \right\} - W \left[\left(\frac{W}{2} \right)^2 - H_2^2 \right] / 4H_2 \quad (5)$$

式中， W 为熔覆层宽度， H_1 为熔深， H_2 为熔高。结合式(3)~式(5)可对涂层稀释率进行计算，通过对比不同工艺参数下涂层的稀释率，可达到优化工艺参数的效果。

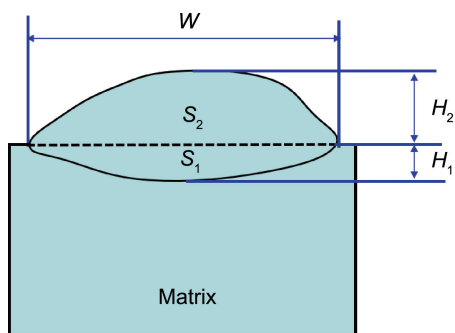


图 7 涂层稀释率计算示意图

Fig. 7 Schematic diagram of coating dilution rate calculation

为了研究稀释率与激光功率、扫描速度的关系，夏镇琪等^[46]采用控制变量法探究了激光功率和扫描速度对熔覆层稀释率的影响。研究发现，当激光功率一定时，稀释率随扫描速度的增加而下降；当扫描速度一定时，随着激光功率的增加，能量输入增加，稀释率也随之增加。为了对比激光功率与扫描速度对稀释率影响的强弱，该团队还采用正交实验对比分析激光功率与扫描速度对熔覆层的熔深、熔宽和稀释率的影响，发现激光功率对稀释率的影响最大，而扫描速度对熔高的影响最大。

Ignat 等^[47]对稀释率与激光工艺参数之间的关系进行了研究，他们采用同步送粉方式对 WE43 和 ZE41 两种镁合金进行激光熔覆。通过控制工艺参数对 ZE41 基材和熔覆层界面处进行优化，得到无缺陷界面(图 8b)。与 ZE41 相比，WE43 基材与熔覆层界面处表现出一些差异(图 8a 和 8c)，虽然优化后消除了孔洞，但有裂纹缺陷

产生(图 8d)。这是由于两种基材的热导率存在差异，WE43 的热导率比 ZE41 的低两倍(51 与 $109 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)，当相同的冲击热量作用时，WE43 上用于产生熔池的能量更多，稀释率变得更高；同时，熔覆层内部更大的应力水平导致了裂纹的形成。

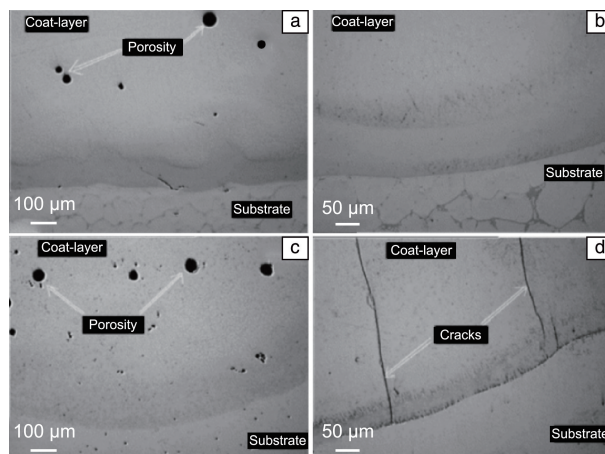


图 8 ZE41(a, b)和 WE43(c, d)基体与熔覆层界面微观结构^[47]

Fig. 8 Interface microstructure of ZE41(a, b) and WE43(c, d) substrates and cladding^[47]

综上所述，镁合金表面激光熔覆层质量的好坏取决于激光功率、扫描速度和光斑直径等参数。可以通过对激光工艺参数的优化来控制熔覆层的稀释率、组织均匀性、层厚等变量，减少孔洞、裂纹等缺陷，以此保证激光熔覆层的质量。

3 镁合金表面激光熔覆材料体系

在镁合金表面激光熔覆中，除了工艺参数外，熔覆材料的选择也尤为重要，它在控制熔覆层的微观结构和性能方面也起着重要作用。图 9 列举了一些镁合金表面激光熔覆常用材料的显微硬度和极化曲线测试结果。显然，迄今为止大多数研究主要集中于铝基合金熔覆层。铁基、非晶、高熵合金等熔覆层虽已应用于镁合金表面激光熔覆，但关于这些熔覆层的研究报道有限，相对于铝基合金体系来说仍属于探索阶段。对比可以发现，铝基合金熔覆层耐腐蚀性较好，但硬度不足；非晶合金熔覆层具有好的硬度和耐腐蚀性能，但非晶合金熔覆层的成分设计复杂，且要获得非晶，对熔覆的工艺要求较高；多组元合金熔覆层具有较好的硬度与耐腐蚀性能，但其在镁合金表面应用的研究尚浅。因此，为在镁合金表面获得性能优异的激光熔覆涂层，在材料体系的设计方面应开展进一步的研究。

3.1 熔覆材料设计原则

熔覆层材料是否与基体有良好的匹配关系是激光熔覆能否成功的关键之一，因此，为获得质量较好的熔覆层，

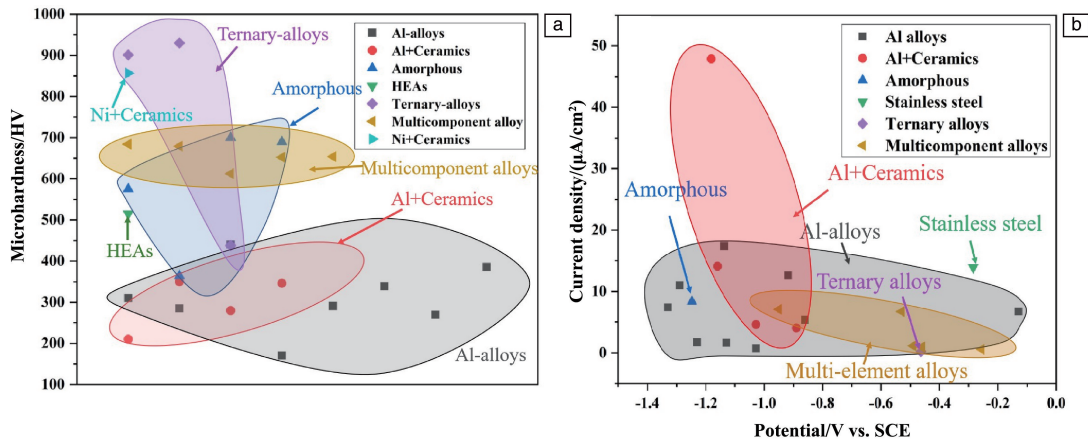


图9 镁合金表面不同材料激光改性涂层的显微硬度(a)和极化曲线(b)测试结果

Fig. 9 Test results of microhardness (a) and polarization curves (b) of laser modified coatings of different materials on magnesium alloy surface

熔覆材料的选择应遵循以下原则：① 与基体熔点接近；② 与基体具有良好的润湿性；③ 与基体热物性参数相近。

在选择熔覆材料时，首先应考虑材料的熔点与基体是否相近，尤其是对于熔点较低的镁合金。若熔覆层材料的熔点过高，应选择较高的能量输入，此时会造成镁合金的过度稀释，严重影响涂层的性能，而较低的能量输入难以熔化熔覆材料，导致熔覆层表面出现不连续的球化现象。因此，镁合金表面激光熔覆通常选择熔点相近的铝合金作为熔覆材料。王建宏等^[48]在 AZ31 镁合金表面激光熔覆 Ti-C-Al，并研究了 Al 含量对熔覆层性能的影响。研究发现，随着 Al 含量的增加，熔覆层的孔隙率减小，晶粒得到细化，力学性能得到明显改善。铝合金的熔点与镁合金接近，可作为镁合金激光熔覆的理想材料体系，但其力学性能相对较差，在提高镁合金硬度和耐磨性能方面作用有限，故亟需开发新的材料体系或挖掘相关的新工艺。

在激光熔覆过程中，熔覆材料与基体会发生化学反应，存在相互扩散、相互溶解等传质过程，这属于润湿反应，润湿性通常与材料成分、基体表面粗糙度以及温度有关。熔覆材料于镁合金而言属于异质金属，二者张力明显存在差异，从而影响熔覆过程中熔覆层对基体的润湿性。此外，镁合金在空气中极易被氧化，低张力的氧化膜也会影响润湿性，导致熔覆层球化^[49]。因此，需对镁合金进行去氧化膜处理，或者根据文献^[8, 50]所报道的加入一些活性成分，提高材料的润湿性。

激光熔覆过程还应防范因热应力过大而导致熔覆层与基体结合处开裂的问题。宋武林等^[51]的研究表明，熔覆层开裂主要与热应力 σ 有关， σ 可用式(6)计算：

$$\sigma = \frac{E\Delta\alpha\Delta T}{1-\gamma} \quad (6)$$

式中， E 表示弹性模量， $\Delta\alpha$ 表示熔覆材料与基体的热膨

胀系数之差， ΔT 表示熔覆层温度与室温之差， γ 表示泊松比，可以看出热应力大小主要与 $\Delta\alpha$ 有关。因此，在选择熔覆材料时，要优先选择热膨胀系数与镁合金接近的材料体系。

3.2 熔覆材料体系

在激光熔覆过程中，熔覆层的微观结构不仅取决于工艺参数，也与沉积在镁合金上的熔覆材料体系有关。熔覆材料的选择除需满足上述原则外，还应考虑材料体系自身的性能优势。随着镁合金表面激光熔覆技术的发展，熔覆材料已经从单一的纯金属、二元合金、陶瓷涂层发展到三元合金、非晶合金、高熵合金以及金属基复合涂层。

3.2.1 铝基二元合金涂层

Al 的熔点 (660 °C) 与 Mg 的熔点 (648.8 °C) 接近，同时又是 Mg 合金中众所周知的固溶增强剂^[52]。因此，在二元合金体系中 Al 是最常见的成分。目前，已有较多的研究者利用激光熔覆技术将 Al 与不同元素组合应用于镁合金的表面强化。其中，主要以 Al-Si 的研究为主。

(1) Al-Si 合金涂层

由于 Al-Si 合金的熔点与镁合金的熔点差异很小，且两者的热膨胀系数十分接近，Al-Si 的热膨胀系数约为 $2.4 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ ，镁合金的热膨胀系数约为 $2.5 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ 。为此，许多研究者致力于在镁合金表面制备具有良好的微观结构和力学性能的 Al-Si 涂层。Zhang 等^[53]在 Mg-6Zn-1Ca 镁合金表面激光熔覆 Al-Si 粉，探究不同扫描速度对涂层性能的影响。由于熔覆层中多种金属间化合物的存在且晶粒细化，Mg-6Zn-1Ca 合金的耐蚀性和硬度均得到显著提高。Lei 等^[54]在 AZ91D 镁合金表面熔覆 Al-Si 共晶粉末，获得了具有良好冶金结合的致密无裂纹、无孔涂层。如图 10 所示，该涂层顶部由树枝状 Mg_2Si 、 $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ 基体和针状 Al_3Mg_2 相组成；底部由树枝状的

α -Mg 固溶体、不规则的块状 Mg_2Si 相和玫瑰状共晶 (α -Mg+ $Al_{12}Mg_{17}$) 组成。他们还利用 Thermo-Calc 软件对涂层的相分数、相组成和固化过程进行计算, 计算结果与实验结果非常吻合, 这表明热力学计算对设计并获得具有所期望的微结构和力学性能的涂层是有益的。Chen 等^[25] 以不同的激光扫描速度对 Mg 基的 Mg-Gd-Y-Zr 合金进行 Al-Si 粉末激光熔覆, 结果表明, 激光熔覆层主要包含分布在 Mg 基体中的 Mg_2Si 、 $Al_{12}Mg_{17}$ 和 Al_2 (Gd, Y) 相, 激光熔覆层的厚度随着扫描速度的降低而增加, 镁-稀土合金表面性能得到有效的改善。

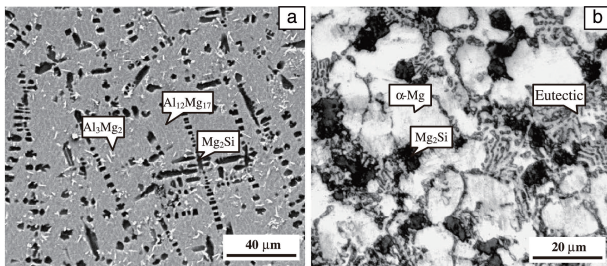


图 10 AZ91D 镁合金表面 Al-Si 激光熔覆层的微观形貌^[54]: (a) 上层, (b) 底层
Fig. 10 Morphology of Al-Si laser cladding on AZ91D^[54]: (a) upper, (b) bottom

随着对镁合金表面激光熔覆 Al-Si 涂层的深入研究, 研究者们发现在 Al-Si 涂层体系中引入稀土元素可有效改善涂层的整体性能, 这是因为一方面稀土元素的添加可有效改善熔池的流动性; 另一方面稀土元素和熔覆材料可形成新的增强相。Gao 等^[55] 在 AZ91HP 镁合金表面激光熔覆了 Al-Si+7.5% Y_2O_3 粉末(质量分数), 并探究了不同激光功率对涂层耐腐蚀性能的影响。研究发现, 通过分析不同功率下涂层相组成的演变过程(图 11)可知, 激光功率增大会导致涂层的稀释率增加, 产生了大量的 α -Mg, 取代电位差较小的金属间化合物作为新的腐蚀对。其次, 晶粒变粗, 晶界距离增加, 导致阴极腐蚀的有效面积增加。Wan 等^[56] 和 Zhang 等^[57] 在不同镁合金表面熔覆 Al-Si- Y_2O_3 粉末, 研究了 Y_2O_3 含量对涂层性能的影响。研究发现, Y_2O_3 的添加改善了涂层的表面形貌, 细化了晶粒, 显著提高了涂层的性能。随着 Y_2O_3 含量的增加, 涂层晶粒呈现逐渐变细后变粗的变化, 表面硬度和耐磨性也表现为先增强后减弱。

(2) Al 二元合金涂层

一些研究者还在镁合金表面制备其他铝基合金涂层。Gao 等^[38] 在 AZ91HP 镁合金表面熔覆 Al-Cu 合金, 形成的 $AlCu_4$ 和 $Mg_{17}Al_{12}$ 晶粒嵌入 Al-Mg 基体中, 提高了涂

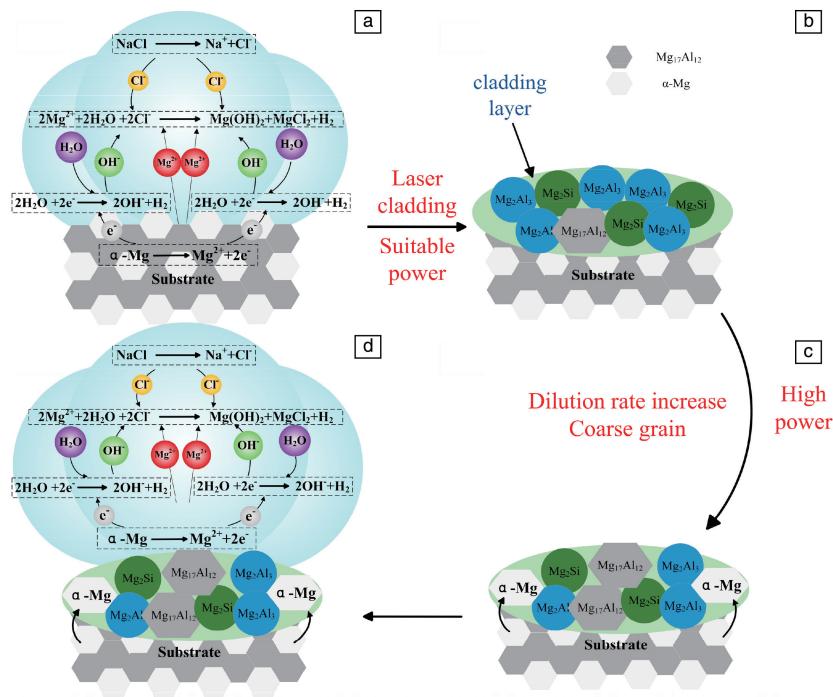


图 11 镁-稀土合金基体和添加 Y_2O_3 粉末的 Al-Si 涂层的电化学腐蚀示意图^[55]: (a) 基体电化学腐蚀机理, (b, c) 不同激光功率下涂层相组成, (d) 涂层电化学腐蚀机理
Fig. 11 Schematic diagram of electrochemical corrosion of magnesium-rare earth alloy and Al-Si coating added with Y_2O_3 ^[55]: (a) electrochemical corrosion mechanism of substrate, (b, c) phase composition of coatings with different laser power, (d) electrochemical corrosion mechanism of coating

层的显微硬度和耐磨性。Chen 等^[58]通过在 ZM5 镁合金表面激光熔覆预置的 Al+Ir 粉末以增强其耐腐蚀性,熔覆层中形成的 AlIr、 $Mg_{17}Al_{12}$ 和富 Al 相有助于改善涂层的耐腐蚀性能。随着镁合金激光熔覆 Al-Cu 涂层技术的日渐成熟,Wan 等^[59]将 Al-Cu 体系应用到激光熔覆对镁合金表面强化中,研究了 Cu 含量的变化对涂层性能的影响,发现随着 Cu 含量的增加,涂层的耐腐蚀和耐摩擦性能呈现出先提升后降低的趋势。

镁合金表面激光熔覆 Al 基二元合金涂层在一定程度上改善了其自身的耐磨性和耐腐蚀性,这与涂层中含有的耐氯化物相 $Mg_{12}Al_{17}$ 和其他硬质相有关,同时,涂层与基体间良好的物化相容性也是获得整体性能良好的涂层的关键。但 Al 基二元合金涂层也存在一定的局限性,该涂层体系中强化相少,力学性能与耐蚀性有限,只适用于在较低载荷和腐蚀条件较弱的环境下应用。因此,研究者们采用向该体系中添加强化相的方式,以期获得性能更加优异的涂层。

(3) 铝基陶瓷复合涂层

金属-陶瓷复合涂层是将陶瓷相作为强化相添加到涂层中,陶瓷相通常为氧化物、碳化物或者硼化物。铝基陶瓷复合涂层体系具有高的硬度、耐磨和耐蚀性,同时与镁合金具有良好的互溶性,近几年受到研究者的广泛关注。此外,增加陶瓷颗粒还有望改善镁合金表面熔覆铝基涂层出现的涂层开裂和微孔缺陷问题,Li 等^[60]将 Al_2O_3 作为

微孔或裂缝中的填料,在 AZ31 镁合金表面制备了 Al+ Al_2O_3 复合涂层,熔覆后的涂层成型性好,无气孔、裂纹等缺陷,涂层的整体性能较铝基涂层也有较大的提升。Majumdar 等^[61]采用同步送粉的方式在 MEZ 镁合金表面熔覆 Al+ Al_2O_3 粉末,表面硬质陶瓷颗粒的存在和复合层表面的 Al 的合金化使得改性后的镁合金表面具有优良的耐磨性。除 Al_2O_3 外,也有研究者向铝基涂层中直接添加 SiC 相,以提高涂层的耐蚀与耐磨性能。Liu 等^[62]在 Mg-Zn-Y-Zr 稀土镁合金表面熔覆 Al+SiC 复合涂层,研究不同含量的 SiC 粉末对涂层性能的影响。研究发现,添加 5% (质量分数)SiC 的样品具有最低的摩擦系数和最好的耐磨性,而添加 10%SiC 的样品具备最好的耐蚀性。

此外,采用原位合成法制备 Al 基陶瓷复合层也是改进镁合金激光表面改性的有效方法。与直接添加陶瓷粉末相比,原位合成法通过冶金反应合成的陶瓷颗粒更易与基体相容,从而使界面处更清晰^[63, 64]。Yang 等^[63]使用脉冲 Nd:YAG 激光在 AZ91D 镁合金表面原位合成制备 Al-TiC 复合涂层,Ti 和 B_4C 混合粉末按质量分数 5:1 配制,然后将混合后的 Ti+ B_4C 粉末视为一个整体,记为 M,将 M 与质量分数分别为 10%、15%和 20%的 Al 粉混合。图 12 为原位反应中化合物的形成过程,激光束的能量将 B_4C 分解成 B 和 C 元素(图 12a);随着温度的升高,AZ91D 中的 Mg 元素扩散到涂层中(图 12b),形成 Al_3Mg_2 和 $Al_{12}Mg_{17}$ 金属间化合物;然后,C 元素与 Ti 元素反应形成 TiC 陶瓷

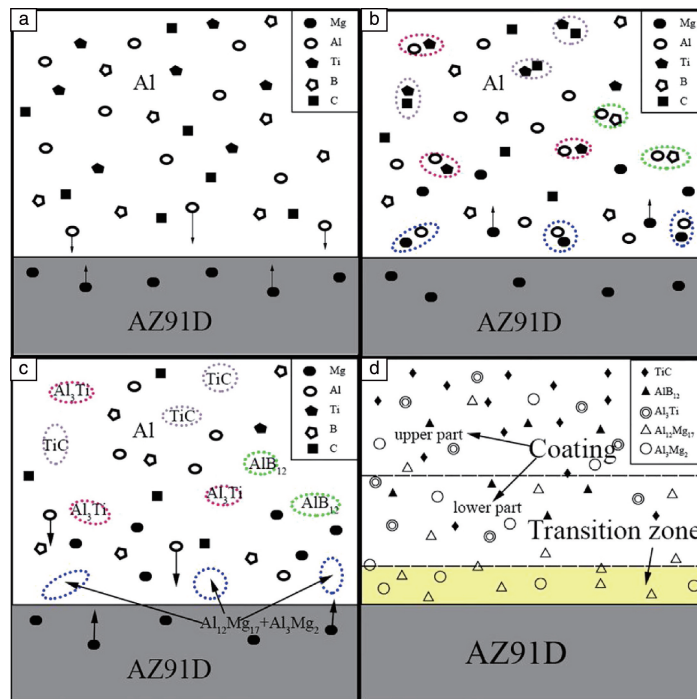


图 12 Ti+ B_4C +Al 混合粉末原位反应中形成 TiC 陶瓷相及 Al_3Mg_2 和 $Al_{12}Mg_{17}$ 金属间化合物的示意图^[63]

Fig. 12 Schematic diagram of TiC ceramic phase, Al_3Mg_2 and $Al_{12}Mg_{17}$ intermetallic compounds forming during the *in-situ* reaction of Ti+ B_4C +Al mixed powder.^[63]

相(图 12c);凝固过程中,涂层中的 Ti 元素和 Al 元素形成了稳定的 Al_3Ti 结构; B 元素和 Al 元素组成 AlB_{12} (图 12d)。研究结果表明涂层的显微硬度约为 AZ91D 的 5~6 倍,腐蚀电流密度比 AZ91D 低两个数量级。

3.2.2 多元合金涂层

(1) 三元合金涂层

由于镁合金的低熔点和高导热率,当熔覆与镁合金熔点差异大的材料(Co 基、Ni 基、Fe 基合金)时,会导致裂纹形成和高稀释率。通过簇线准则设计出与镁合金相容性好,且力学性能和化学性能优良的三元合金体系可解决这一相关问题。

Wang 等^[65]通过簇线准则在 AZ91HP 镁合金表面熔覆 Ni-Zr-Al 合金,结果表明涂层主要由非晶相及具有 $Ni_{10}Zr_7$ 和 $Ni_{21}Zr_8$ 型结构的二元金属间化合物组成,具有较高的耐磨性和耐蚀性。此外,簇线准则还可设计三元共晶涂层。Wang 等^[66]还设计了 Ni-Ti-Al 共晶涂层,并将其熔覆在 AZ91HP 镁合金上。Ni-Ti-Al 合金簇线准则设计如图 13 所示,首先选择 $Ti_{76}Ni_{24}$ 的共晶点作为起始成分,然后将该共晶点与 Ni-Ti-Al 体系成分图中的第三元素 Al 连接,构建了一条成分线,通过比较所选成分的显微硬

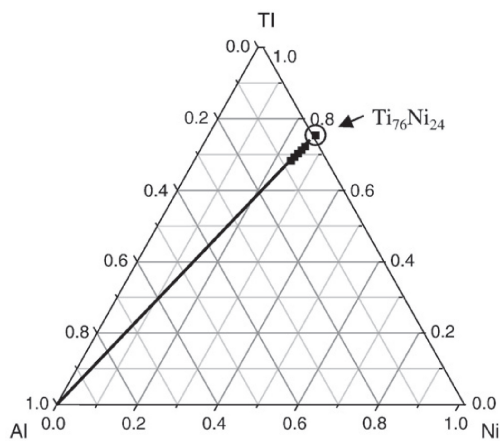


图 13 Ni-Ti-Al 系统组成图^[66]

Fig. 13 Composition diagram of Ni-Ti-Al^[66]

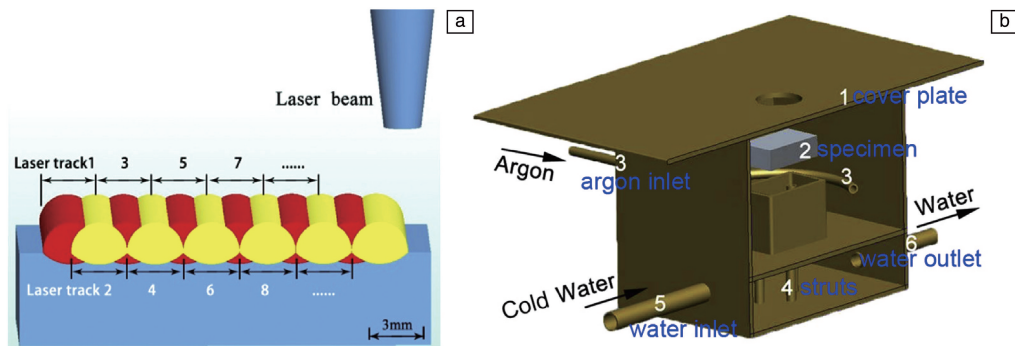


图 14 激光熔覆过程(a)和保护装置(b)示意图^[68]

Fig. 14 Schematic diagram of laser cladding process (a) and protection device (b)^[68]

度、耐蚀性,最终确定熔覆 $Ti_{70.3}Ni_{22.2}Al_{7.5}$ 合金。结果表明,涂层主要由 β -Ti 固溶体和 Ti_2Ni 金属间化合物组成,具有较高的硬度、良好的耐磨性和耐腐蚀性。

(2) 非晶涂层

非晶态合金又称金属玻璃,具有极高的强度、韧性、耐磨性和耐蚀性^[67]。随着非晶态涂层的发展,目前非晶态合金已应用于镁合金表面激光熔覆。Yue 等^[27]采用同步送粉方式在商用纯镁基体上制备 $Zr_{65}Al_{7.5}Ni_{10}Cu_{17.5}$ 非晶涂层。当涂层厚度达到 1.1 mm 时,涂层的显微组织为非晶态结构,涂层的耐磨性和耐蚀性优于基体,磨损损失降低约 13 倍,腐蚀电流密度降低了 3 个数量级。为防止熔覆过程中熔覆层氧化,可以提高熔覆试样的冷却速度,同时细化晶粒,Tan 等^[68]在自制的保护装置(图 14)辅助下,在 AZ80 镁合金表面激光熔覆制备非晶-纳米晶复合涂层。试验中保护气体(氩气)以 $10 L \cdot min^{-1}$ 的流量吹入,试样部分浸入 $0 \sim 5 \text{ }^\circ\text{C}$ 流动的冷水中(通过调节进出口阀门来控制水位)。结果如图 15 所示,TEM 分析证实了涂层中存在非晶和纳米晶复合结构。与基体相比,涂层的摩擦系数大幅降低,相对耐磨性增加至基体的 5.5 倍。此外,腐蚀电流密度降低了两个数量级。

(3) 高熵合金涂层

高熵合金是一种很有前景的材料体系,其微观结构简单,至少由 5 种元素组成,每种元素原子数分数介于 5%~35%^[69-72]。由于高熵合金良好的耐磨、耐蚀、抗氧化等性能,近几年,陆续有学者在镁合金表面通过激光熔覆制备高熵合金涂层。

Meng 等^[73]采用激光熔覆技术在 AZ91D 镁合金表面制备 AlCoCrCuFeNi 高熵合金涂层。研究发现,当增强相高熵合金颗粒的体积分数达到 40% 左右时,涂层的磨损体积损失仅为基体材料的 1/7。而后 Meng 等^[74]又在 AZ91D 表面激光制备 1 层、2 层和 3 层 AlCoCrCuFeNi 高熵合金涂层,并对其凝固行为及形态演变进行了研究。结果表明,通过熔覆 3 层 AlCoCrCuFeNi 高熵合金的方法,

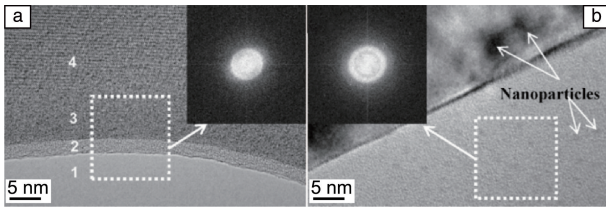


图 15 熔覆层中的非晶相(a)和非晶-纳米晶复合相(b)^[68]

Fig. 15 Amorphous phase (a) and amorphous-nanocrystalline composite phase (b) of cladding layer^[68]

获得了颗粒分布均匀且与基体结合良好的高熵合金涂层。界面处的基体主要由 Mg 枝晶和枝晶间的 Mg+Q 共晶组成。此外,激光熔覆 2 层高熵合金涂层可以显著降低 Mg 对涂层的稀释,熔覆 3 层可以完全抑制稀释。尽管高熵合金具备优异的性能,但高熵合金与镁合金的熔点差异大也是亟需解决的问题。高熵合金熔点高,熔覆过程中需要高的热输入,而高的热输入会导致涂层与基体界面区出现裂纹等缺陷。针对这一问题,Wen 等^[75]设计了一种新型的 Ni₂MnCuSnAl_{0.1} 多组元合金涂层,该团队在合金体系中加入低熔点的 Sn 元素,并将 Sn 作为过渡层,以此来缓解 Mg 元素的稀释和蒸发。Jiang 等^[76]提出了一种多步超声波辅助激光重熔技术来提高涂层性能的方法,在这项工作中,该团队在镁合金表面制备了一种新型的 Cu_{2.3}Al_{1.3}Ni_{1.7}SnCr_{0.3} 多组元合金涂层,由于超声波引起的晶粒细化效应,涂层的耐磨性与耐蚀性均得到显著提高。

(4) 梯度功能涂层

梯度功能涂层可设计为成分梯度的结构,以满足特定属性要求,例如耐蚀、耐磨、耐冲击等^[77]。将功能梯度涂层引入镁合金激光表面改性,可改善表面改性层与镁合金因热物性差异导致的开裂、涂层与基体结合不牢等问题。

Jiang 等^[78]根据 Al-Cu 与镁合金具备良好结合的特性,设计了中间层为 Cu-Al、顶层为 Ni-Ti-Cu 的梯度涂层,并在镁合金表面成功制备了 Ni-Ti-Cu/Cu-Al 梯度涂层。中间层的存在极大地降低了 Mg 元素稀释对顶层性能的影响,涂层的自腐蚀电流密度比镁合金低 3 个数量级。Yue 等^[79]研究了在纯镁上通过激光熔覆制备 Ni/Al/Cu 梯度功能涂层,结果表明 Mg-Al、Al-Cu 和 Cu-Ni 各层的界面处均实现了冶金结合,Al 层中融入大量 Mg 和 Cu 元素,形成了 Mg-Al-Cu 三元相。此外,Cu 的稀释率较低,Ni 层获得单相结构的(Ni)固溶体。因此,表层具有优异的耐蚀性和耐磨性。在设计梯度功能涂层时,除考虑各层间的相容性外,还应注意电偶腐蚀问题。Yue 等^[80]在 ZK60/SiC 镁合金复合材料表面以黄铜和铜作为中间层,采用热喷涂与激光重熔相结合的方法制备不锈钢层。虽然镁合金表面的耐蚀性得到了改善,但由

于快速凝固导致液相分离,在不锈钢层中形成了富铜的小球体,铜和不锈钢在海水中将发生电偶腐蚀,影响不锈钢层的耐蚀性。因此,在选择中间层材料时,应注意不同相之间是否会形成原电池,影响涂层耐蚀性。

4 镁合金表面激光熔覆应用和待解决问题

4.1 应用范围

目前对镁合金表面激光熔覆的研究大多数集中于对其表面耐蚀和耐磨性的提升。除此之外,部分研究者致力于采用激光熔覆对镁合金零件进行修复。

Wang 等^[81]对镁零件表面的受损区域进行修复,采用自发明的保护气体设备在镁合金表面形成了均匀的涂层,通过对 YAG 激光熔覆参数进行优化,获得了细颗粒状的微观结构以及具有良好粘结界面的无缺陷涂层。Cao 等^[82]采用与基础材料成分相似的焊丝对 ZE41A-T5 航空航天镁合金部件进行激光熔覆修复。通过优化焊缝间距,或提高离焦量和填充量,最终获得无缺陷的多层熔覆层。

由于激光熔覆低稀释率、工艺可控和绿色环保等技术特点,除了可修复常规的几何形状外,还可对复杂结构或小而局部的零件进行修复^[83]。随着对镁合金零件激光修复研究的逐步成熟,将来在损坏的镁零件上进行激光熔覆将会获得广泛的应用,从而达到对镁合金的高利用率。

4.2 存在的问题

虽然镁合金表面激光熔覆领域的研究已经取得一定进展,但镁合金熔点低、化学性质活泼的特点仍使其在表面熔覆过程中具有一定的挑战性。工艺参数的偏差、材料热物性差异大或是保护装置不完善等都会导致涂层中产生裂纹、气孔等缺陷。这些问题可通过优化工艺参数、完善熔覆材料体系、增加过渡层及模拟与试验相结合等办法来解决。

5 结 语

近 20 年来,镁合金表面激光熔覆一直是研究热点。经过研究者们不懈努力,虽然取得了不错的进展,但仍有一些需要注意的问题。为拓宽激光在镁合金表面熔覆中应用,获得均匀精细的组织 and 令人满意的性能,应基于以下问题开展更多的研究。

(1) 镁合金表面处理:采用波长较短的激光对基体进行预热或在基体表面添加活化剂等,以此提高基体吸光率,改善表面改性层质量。

(2) 多技术耦合:镁合金表面激光熔覆时,涂层易产生缺陷。可采用耦合超声振动、电磁搅拌等技术辅助激光制备涂层,这不仅可改善涂层成形质量,还可以起到细化晶粒、提升涂层性能等作用。

(3) 材料体系设计:目前镁合金表面激光熔覆材料

大多为低熔点合金体系，为满足将来镁合金应用的更多需求，应从力学、耐磨性和耐腐蚀性能角度考虑，设计和开发更多的材料体系。

(4) 工艺参数探索：工艺参数是影响熔覆层质量的重要因素，工艺参数的改变可直接影响熔覆层成形质量、相组成、晶粒尺寸及组织均匀性等，这也间接影响熔覆层性能。目前对镁合金表面激光熔覆工艺参数的研究仍属于不成熟的阶段。因此，工艺参数的探索仍是镁合金表面激光熔覆的研究重点。

(5) 数值模拟：加大关于镁合金表面激光熔覆数值模拟方面的研究。通过对激光作用过程中材料表面温度场、应力场等进行数值模拟，以达到对实验结果的预测，减少消耗，缩短实验周期。

参考文献 References

- [1] YANG H H, WEI Q L, WU J Y, *et al.* Optics and Laser Technology [J], 2024, 175: 110785.
- [2] XIE H C, ZHAO H, GUO X, *et al.* Journal of Materials Science [J], 2024, 59(22): 9969–10002.
- [3] BAI J Y, YANG Y, WEN C, *et al.* Journal of Magnesium and Alloys [J], 2023, 11(10): 3609–3619.
- [4] WANG G G, WEILER J P. Journal of Magnesium and Alloys [J], 2023, 11(1): 78–87.
- [5] LI Y F, ZHANG A, LI C M, *et al.* Journal of Materials Research and Technology [J], 2023, 26: 2919–2940.
- [6] 单智伟, 杨博, 郑芮, 等. 中国材料进展 [J], 2024, 43(12): 1053–1062.
SHAN Z W, YANG B, ZHENG R, *et al.* Materials China [J], 2024, 43(12): 1053–1062.
- [7] 宋晓霞, 王文礼, 刘雅菲, 等. 稀有金属材料与工程 [J], 2025, 54(11): 2844–2850.
SONG X X, WANG W L, LIU Y F, *et al.* Rare Metal Materials and Engineering [J], 2025, 54(11): 2844–2850.
- [8] 闫钊鸣, 张治民. 中国材料进展 [J], 2024, 43(12): 1084–1091.
YAN Z M, ZHANG Z M. Materials China [J], 2024, 43(12): 1084–1091.
- [9] CHEN C A, LEE J L, JIAN S Y, *et al.* Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers [J], 2023, 147: 104881.
- [10] THIRUGNANASAMBANDAM A, GUPTA M, MURUGAPANDIAN R. Metals [J], 2024, 14(6): 607.
- [11] FU C, WU L T, WANG C C, *et al.* Tribology International [J], 2023, 190: 109042.
- [12] ZHANG Y X, LIAO B K, XU L, *et al.* Surface & Coatings Technology [J], 2024, 483: 130794.
- [13] NIVERTY S, KALSAR R, NACCARELLI A J, *et al.* Materials & Design [J], 2024, 238: 112579.
- [14] LIU D Y, YANG X F, ZHAO A T, *et al.* International Journal of Advanced Manufacturing Technology [J], 2024, 134(7/8): 3107–3137.
- [15] GUO N, GAO Y, GAO Y K, *et al.* Journal of Materials Research and Technology [J], 2023, 25: 6459–6471.
- [16] YAN Z B, LI W Z, LEI S Y, *et al.* Journal of Thermal Spray Technology [J], 2024, 33(5): 1404–1416.
- [17] HE G H, DU Y B, LIANG Q, *et al.* International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology [J], 2023, 10(5): 1207–1222.
- [18] YUE T M, XIE H, LIN X, *et al.* Journal of Alloys and Compounds [J], 2012, 512(1): 328–331.
- [19] WANG A H, XIA H B, WANG W Y, *et al.* Materials Letters [J], 2006, 60(6): 850–853.
- [20] GAO Y L, XIONG D S, WANG C S, *et al.* Acta Metallurgica Sinica (English Letters) [J], 2009, 22(3): 167–173.
- [21] 杨胶溪, 黄凯, 武飞宇, 等. 热加工工艺 [J], 2024, 53(4): 16–21+26.
YANG J X, HUANG K, WU F Y, *et al.* Hot Working Technology [J], 2024, 53(4): 16–21+26.
- [22] IGNAT S, SALLAMAND P, GREVEY D, *et al.* Applied Surface Science [J], 2004, 233(1–4): 382–391.
- [23] LIU K, LI Y J, WANG J, *et al.* Materials & Design [J], 2015, 87: 66–74.
- [24] QIAN M, LI D, LIU S B, *et al.* Corrosion Science [J], 2010, 52(10): 3554–3560.
- [25] CHEN E L, ZHANG K M, ZOU J X. Applied Surface Science [J], 2016, 367: 11–18.
- [26] CARCEL B, SAMPEDRO J, RUESCAS A, *et al.* Physics Procedia [J], 2011, 12: 353–363.
- [27] YUE T M, SU Y P. Applied Surface Science [J], 2008, 255(5): 1692–1698.
- [28] 张仁, 肖泽辉. 热加工工艺 [J], 2009, 38(18): 90–92+95.
ZHANG R, XIAO Z H. Hot Working Technology [J], 2009, 38(18): 90–92+95.
- [29] ZHANG J, WU W N, ZHAO L Z. Applied Mechanics and Materials [J], 2014(487): 199–203.
- [30] RIQUELME A, RODRIGO P. Metals [J], 2021, 11: 1993.
- [31] JUN Y, SUN G P, WANG H Y, *et al.* Journal of Alloys and Compounds [J], 2006, 407(1/2): 201–207.
- [32] WU B L, DONG P F, YU W Y, *et al.* Journal of Thermal Spray Technology [J], 2023, 33(1): 221–232.
- [33] RIQUELME A, RODRIGO P, ESCALERA-RODRÍGUEZ M D, *et al.* Optics and Lasers in Engineering [J], 2016, 78: 165–173.
- [34] YUE T M, WANG A H, MAN H C. Scripta Materialia [J], 1999, 40(3): 301–311.
- [35] TAN C Y, WEN C E, ANG H Q. Journal of Magnesium and Alloys [J], 2024, 12(1): 72–97.
- [36] BERGSTRÖM D, POWELL J, KAPLAN A F H. Applied Surface Science [J], 2007, 253(11): 5017–5028.
- [37] 朱红梅, 谭超林, 匡同春, 等. 中国激光 [J], 2015, 42(10): 1003005.
ZHU H M, TAN C L, KUANG T C, *et al.* Chinese Journal of Lasers [J], 2015, 42(10): 1003005.
- [38] GAO Y L, WANG C S, PANG H J, *et al.* Applied Surface Science

- [J], 2007, 253(11): 4917-4922.
- [39] 崔泽琴, 王文先, 吴宏亮, 等. 中国激光[J], 2011, 38(6): 0603020.
CUI Z Q, WANG W X, WU H L, *et al.* Chinese Journal of Lasers [J], 2011, 38(6): 0603020.
- [40] LIU Y H, GUO Z X, YANG Y, *et al.* Applied Surface Science[J], 2006, 253(4): 1722-1728.
- [41] ZHU R D, LI Z Y, LI X X, *et al.* Applied Surface Science [J], 2015, 353: 405-413.
- [42] LIU S Y, HU J D, YANG Y, *et al.* Applied Surface Science [J], 2005, 252(5): 1723-1731.
- [43] JUN Y, SUN G P, JIA S S. Journal of Alloys and Compounds [J], 2008, 455(1/2): 142-147.
- [44] DUBÉ D, FISET M, COUTURE A, *et al.* Materials Science and Engineering: A [J], 2001, 299(1/2): 38-45.
- [45] WEN X, CUI X F, JIN G, *et al.* Journal of Alloys and Compounds [J], 2020, 835: 155449.
- [46] 夏镇琪, 李菊英, 董仕节. 武汉轻工大学学报[J], 2024, 43(5): 96-105.
XIA Z Q, LI J Y, DONG S J. Journal of Wuhan Polytechnic University [J], 2024, 43(5): 96-105.
- [47] IGNAT S, SALLAMAND P, GREVEY D, *et al.* Applied Surface Science [J], 2004, 225(1-4): 124-134.
- [48] 王建宏, 曹亚峰. 热加工工艺[J], 2016, 45(8): 187-189.
WANG J H, CAO Y F. Hot Working Technology [J], 2016, 45(8): 187-189.
- [49] QI X D, LIU L M. Journal of Materials Science [J], 2010, 45(14): 3912-3920.
- [50] 孟庆贺. Al, Ni 对 Zr-Cu 合金在几种基板表面润湿性的影响[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
MENG Q H. Effect of Al and Ni on the Wetting of Several Substrates by Zr-Cu Based Alloys [D]. Changchun: Jilin University, 2013.
- [51] 宋武林, 朱蓓蒂, 张杰, 等. 激光技术[J], 1998(1): 35-37.
SONG W L, ZHU B D, ZHANG J, *et al.* Laser Technology [J], 1998(1): 35-37.
- [52] WANG A A, SIRCAR S, MAZUMDER J. Journal of Materials Science [J], 1993, 28(19): 5113-5122.
- [53] ZHANG X L, ZHANG K M, ZOU J X. Transactions of Nonferrous Metals Society of China [J], 2018, 28(1): 96-102.
- [54] LEI Y W, SUN R L, TANG Y, *et al.* Surface & Coatings Technology [J], 2012, 207: 400-405.
- [55] GAO Y L, LU P Y, BAI S C, *et al.* Coatings [J], 2023, 13(7): 1289.
- [56] WAN X F, TIAN C, LI Y, *et al.* Materials [J], 2023, 16(1): 338.
- [57] ZHANG D D, HE X Y, GAO Y L, *et al.* Coatings [J], 2023, 13(2): 308.
- [58] CHEN C J, WANG M C, WANG D S, *et al.* Rare Metals [J], 2007, 26(5): 420-425.
- [59] WAN S M, CUI X F, JIN G, *et al.* Surface & Coatings Technology [J], 2023, 460: 129430.
- [60] LI S, YI L H, LIU T F, *et al.* Materials and Corrosion-Werkstoffe und Korrosion [J], 2019, 71(6): 980-991.
- [61] MAJUMDAR J D, CHANDRA B R, MORDIKE B L, *et al.* Surface & Coatings Technology [J], 2004, 179(2/3): 297-305.
- [62] LIU Y Y, GAO S Y, ZHAO W. Journal of Materials Science [J], 2020, 55(27): 13270-13293.
- [63] YANG L Q, LI Z Y, ZHANG Y Q, *et al.* Applied Surface Science [J], 2018, 435: 1187-1198.
- [64] GUO Y, ZHANG Y Q, LI Z Y, *et al.* Surface & Coatings Technology [J], 2018, 334: 471-478.
- [65] WANG C S, CHEN Y Z, LI T, *et al.* Applied Surface Science [J], 2009, 256(5): 1609-1613.
- [66] WANG C S, LI T, YAO B, *et al.* Surface & Coatings Technology [J], 2010, 205(1): 189-194.
- [67] ZHU Q J, WANG X H, QU S Y, *et al.* Transactions of Nonferrous Metals Society of China [J], 2008, 18(2): 270-273.
- [68] TAN C L, ZHU H M, KUANG T C, *et al.* Journal of Alloys and Compounds [J], 2017, 690: 108-115.
- [69] CAI Z B, CUI X F, JIN G, *et al.* Micron [J], 2017, 103: 84-89.
- [70] 陈凯旋, 熊志平. 稀有金属材料与工程 [J], 2024, 53(7): 2083-2093.
CHEN K X, XIONG Z P. Rare Metal Materials and Engineering [J], 2024, 53(7): 2083-2093.
- [71] 赵燕春, 宋海转, 王晓昱, 等. 稀有金属材料与工程 [J], 2024, 53(1): 102-112.
ZHAO Y C, SONG H Z, WANG X Y, *et al.* Rare Metal Materials and Engineering [J], 2024, 53(1): 102-112.
- [72] 李志明. 中国材料进展 [J], 2025, 44(1): 111-122.
LI Z M. Materials China [J], 2025, 44(1): 111-122.
- [73] MENG G H, YUE T M, LIN X, *et al.* Optics & Laser Technology [J], 2015, 70: 119-127.
- [74] MENG G H, PROTASOVA N A, KRUGLOV E P, *et al.* Journal of Alloys and Compounds [J], 2019, 772: 994-1002.
- [75] WEN X, CUI X F, JIN G, *et al.* Optics & Laser Technology [J], 2021, 142: 107243.
- [76] JIANG L P, CUI X F, JIN G, *et al.* Journal of Materials Science & Technology [J], 2023, 152: 220-236.
- [77] OCYLOK S, WEISHEIT A, KELBASSA I. Physics Procedia [J], 2010, 5: 359-367.
- [78] JIANG L P, CUI X F, JIN G, *et al.* Applied Surface Science [J], 2022, 575: 151645.
- [79] YUE T M, LI T. Surface & Coatings Technology [J], 2008, 202(13): 3043-3049.
- [80] YUE T M, HU Q W, MEI Z. Materials Letters [J], 2001, 47(3): 165-170.
- [81] WANG A H, XIA H B, WANG W Y, *et al.* Materials Letters [J], 2006, 60(6): 850-853.
- [82] CAO X, JAHAZI M, FOURNIER J, *et al.* Journal of Materials Processing Technology [J], 2008, 205(1-3): 322-331.
- [83] CAPELLO E, COLOMBO D, PREVITALI B. Journal of Materials Processing Technology [J], 2005, 164-165: 990-1000.