

# 先进高重频激光处理对镀铬层结合特性的影响\*

周重光<sup>1</sup>, 杨明江<sup>2</sup>, 彭林华<sup>2</sup>, 雷炳旺<sup>3</sup>, 易 更<sup>1</sup>, 温钢柱<sup>3</sup>

(1. 兵器工业 第五二研究所, 包头 014034; 2. 中国科学院力学研究所, 北京 100041; 3. 北方重工集团, 包头 014030)

**摘要:**采用特殊声光调制的高重频激光技术对钢基体强化处理,使基体表面形成按一定几何规律排列的微米量级的微坑,使得基体的表面形貌、微观组织、铬层与基体的结合等特征均发生了本质的变化。它有效地增加了基体的表面积,有利于电沉积初期铬原子沿基体原有晶格的外延生长;有效地改善了铬层与基体的结合效果,提高了铬层抵抗复杂应力破坏的能力。

**关键词:**高重频激光技术;镀铬层;结合强度

**中图分类号:**TG174.41 **文献标识码:**A **文章编号:**1004—244X(2003)05—0015—04

早在十九世纪二十年代,镀铬技术在工业制造上的应用就已经发展起来了,为了满足恶劣的工况条件,使零部件获得相当长的使用寿命,传统采用在零部件表面电镀铬层<sup>[1]</sup>。随着工业技术的发展,电镀技术的提高,使得镀铬层的综合性能得到了很大程度的改善。工业镀铬层的突出应用包括:量具、工具以及一般机器零部件。在军工兵器领域,主要应用在火炮身管内膛抗烧蚀、抗磨损等技术方面。为使火炮身管内膛电镀以获得不同性能的铬层,世界各国作了广泛地研究,包括改进镀铬工艺,改善基体表面的净洁程度,提高与基体的结合强度,从而使得火炮身管寿命得到大幅度提高。

镀层与基体材料的结合强度是影响镀层使用性能的重要因素,而基体金属表面对电镀层性能的影响也起着重要性的作用,其影响的范围和程度已有很多的讨论<sup>[2]</sup>。但是,结合力的提高必须依靠在镀层和基体金属间建立起来的某种键合来实现。广泛认为,镀层和基体金属表面各处之间键合强度达到的某种程度,是实现有效结合的根本。为了达到此目的,人们开展了激光表面强化技术的研究,传统采用大功率气体激光器和连续固体激光器对金属表面的铬层进行相变和熔融处理<sup>[3]</sup>。德国莱茵公司的发明专利较详细地介绍了激光处理对炮管内膛铬层热处理的技术和有关设备的技术特点<sup>[4]</sup>。我国的高重频激光处理技术是在 YAG 固体脉冲激光器的基础上发展起来的一种先进的激光加工技术。它利用了激光高亮度、高方向性和固体激光高吸收率的特性,采用了先进的特殊调制技术,使 YAG 激光波

形高重频可控。经光波型调制的脉冲激光产生足够的能量使金属表面的处理区域发生汽化——熔化——固态相变的不同结果,而且处理速度快,是常规激光热处理速度的几倍。此项技术属世界先进水平。我国从二十世纪八十年代以来,长春光机研究所、上海光机电研究所、中科院金属研究所和北方重工集团分别结合不同型号的火炮开展了炮管内膛铬层激光处理的研究,均取得了一定成绩,但由于受到处理后的铬层产生严重的破碎性裂纹以及铬层表面质量等问题的困扰,未能将此技术用于生产。我们结合火炮身管的特殊要求,选择高重频激光技术对钢基体展开不同处理工艺的研究。经高重频激光处理的钢基体产生了不同于机械加工的表面形貌,崭新的物理化学表面特性使电镀铬层发生了本质的变化。

## 1 材料与实验结果

材料选择了  $\varnothing 120\text{mmPCrNi3MoVA}$  钢,改锻成  $\varnothing 40\text{mm} \times 400\text{mm}$ 、 $15\text{mm} \times 60\text{mm} \times 240\text{mm}$  坯料,经调质热处理,力学性能见表 1。

然后加工成  $\varnothing 20\text{mm}$  非标准拉力试样,磨削表面粗糙度  $R_a 0.8\mu\text{m}$ 。在一组试样标距段实施了高

表 1 试样力学性能

试样号	b / MPa	p <sub>0.1</sub> / MPa	p <sub>0.2</sub> / MPa	s / %	s / %	A <sub>kv</sub> /J (常温)	HRC
1	1 290	1 150	1 190	46	14	38	42
2	1 290	1 150	1 180	46	14	35	42
3	1 300	1 160	1 180	45	14	35	42

\* 收稿日期:2002 - 10 - 31;修订日期:2003 - 03 - 11

作者简介:周重光(1953 - ),男,高级工程师,从事特殊钢和表面技术研究

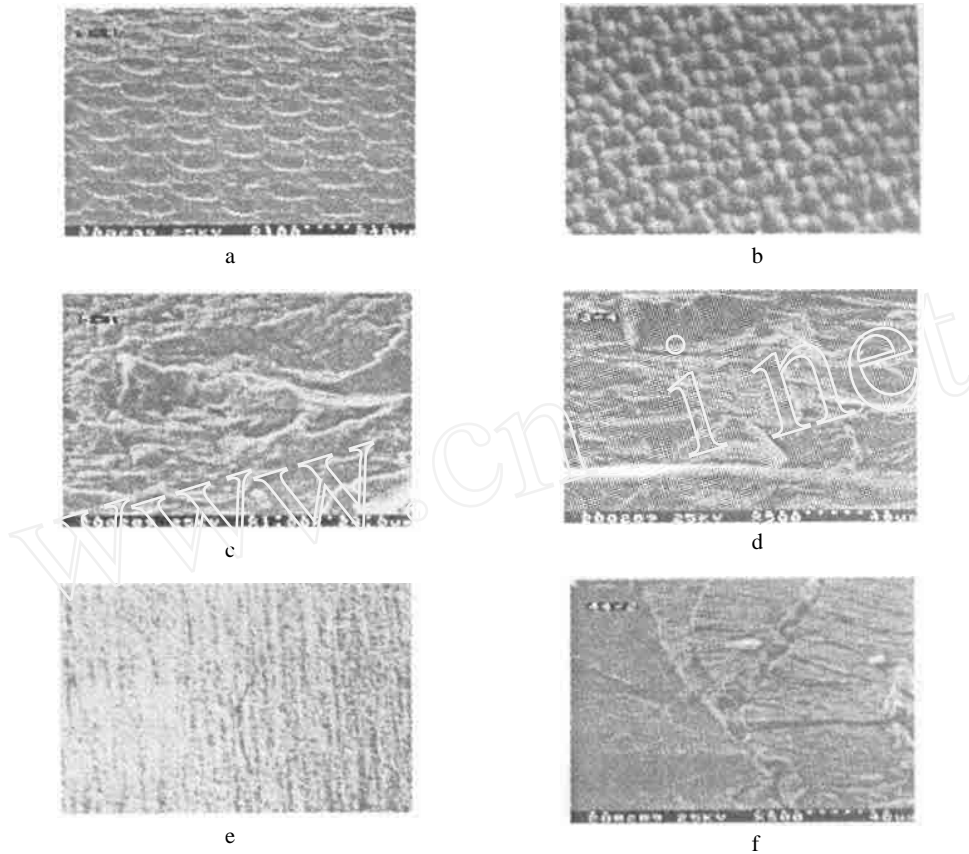


图 1 铬层被机械破坏后的断面形貌

重频激光表面处理,粗糙度  $R_a 4.0 \mu\text{m}$ ,微坑覆盖率约 43%,表面形貌如图 1a,与另一组表面磨光的试样作对比试验。试样经  $250^\circ\text{C} \times 3\text{h}$  去应力回火后,按某型号火炮身管内膛镀铬工艺镀铬。用机械破坏的方式使铬层局部脱落,通过扫描电镜进行断面观察形貌,结果见图 1。图 1b 是基体表面经高重频激光处理的镀层经拉伸变形 8% 左右的表面形貌,不同位向电结晶的表面形貌清晰可见,排列有序,粗糙度  $R_a 1.5 \sim 2 \mu\text{m}$ ;图 1c、d 是铬层被机械破坏后的形貌;图 1e 是基体磨光的镀层经 8% 左右拉伸变形的表面形貌,铬层表面较光滑,粗糙度  $R_a 0.5 \mu\text{m}$  左右,变形后裂纹明显;图 1f 是该处铬层经机械破坏的表面形貌。从图 1c、f 的对比可以看出,高重频激光镀前处理产生的微坑使铬层脱落表面明显变得粗糙,裂纹减少,另一种铬层断面平坦,裂纹较多。

## 2 结果分析

### 2.1 快速相变对电沉积过程的影响

电镀铬层质量的好坏与被镀件表面洁净状况及表面组织结构的关系较大。从理论上分析,表面洁净、位错密度高,会促进电沉积原子在基体材料表面

按原有晶格结构共格外延生长,对增强铬层与基体的结合强度将起到很好的效果。工程应用中的金属表面主要是指金属宏观的光泽表面,而金属的物理特性却揭示了另外一种情况,而它的特征对表面工程具有非常意义。用肉眼所观察到的光滑完整的金属表面,从微观甚至亚微观的角度来看却是很不均匀的。一般来讲金属表面原子的浓度在每平方米  $10^{15}$  个数量级,其螺旋位错的露头处会形成许多平行的原子平面平台,因而,在一低位错单晶面上,一个平台大约包含  $10^9$  个原子,而这种原子平台被放大十万倍进行观察,会发现被  $0.5 \sim 10\text{nm}$  高的阶梯所分割,因此可以看出金属表面存在着多种配位数不同的位置,如平台、阶梯、折皱等。当然,这种原子量级的表面点阵类型与体向的类型是一致的,但是这种表面点阵使原子的周期排列遭到破坏,尤其在表面吸附物质的作用下,表面的键合作用难免会重新调整以达到平衡,即导致原子的重排<sup>[5]</sup>。考虑到实际上金属表面有很多阶梯、空穴、位错等缺陷,位错密度高达每平方米  $10^{10} \sim 10^{12}$  个,吸附原子进入这些位置时,需要的能量相对较低,而且较稳定。晶面上的吸附原子扩散到位错的阶梯边缘,可以沿

位错线生长,随着位错线不断向前推移,晶体将沿着螺旋位错生长,生长速度决定于吸附原子的浓度。同时,位错空位对原子的吸附过程也有一定的影响。高重频激光处理的基体表面在极快速熔化、凝结和冷却过程的作用下发生相变,其位错密度可高达每平方米  $10^{12}$  个以上,有可能提高到普通相变金属位错密度的两个数量级以上。由此可见,经过激光相变处理的金属表面有利于电镀过程中的电沉积,在电沉积的初期,位错密度的增加,可以提高沉积速度,提供沉积原子外延生长的条件。

外延生长(epitaxy)是镀层金属原子沿基体金属晶格生长的一种方式,一般发生在镀层形成和生长的初始阶段,然后恢复到沉积金属的晶体结构,外延生长的程度取决于基体金属与沉积金属的晶格类型与晶格常数。基体金属与沉积金属的晶体结构相匹配,晶格类型相同,或者晶格常数相差不大时,利于结晶初期的外延生长,易得到高结合力的镀层。铁和铬的物理性质见表 2,从表中可以看出铁与铬的晶格常数十分接近,在高密度位错条件是完全可以形成沉积铬原子的外延生长。

表 2 铁与铬的物理性质

元素	原子序数	原子量	18 时的密度 / (g cm <sup>-3</sup> )	原子一次电离时的电势	温度 /		空间晶格类型	20~25 时的晶格常数	配位数为 12 时的原子直径
					熔点	沸点			
Fe	26	55.847	7.87	7.83	1539	2740	体心立方	2.8610	2.55
Cr	24	52.966	7.19	6.74	1800	2327	体心	2.8713	2.57

由于在不同晶面上电位不同、金属的沉积速率不同,不同晶面上原子排列方式和原子数量的不同,吸附原子与不同晶面结合的键能不同以及不同晶面生长速度的不同,便会改变原有晶体的结构,出现新的晶面。从不同镀前处理状态的镀铬层表面形貌可以看出:平滑基体金属的镀层(图 1e)表面显得细腻、较平滑,形成了有结晶取向的组织镀层。破坏形成的解理断面(图 1f)形貌和严重的裂纹,说明铬层抵抗破坏和变形的能力很差;在图 1b 中,经高重频激光处理的基体获得的铬层表面由许多细小的不同结晶取向的晶团组成,打破了单一方向的组织结构,使铬层在形成中产生多取向生长的多晶结构,增加了铬层本身的结构强度,提高了铬层承受复杂应力的能力。经高重频激光强化处理的铬层脱落表面变得粗糙,多取向小平面和呈现准解理破坏特征的断面,裂纹明显减少,显现出提高抵抗破坏的能力。

### 2.2 高重频激光处理对基体表面积的影响

通过高重频激光处理,基体表面形成了不同覆盖率(50%~100%)的微坑,假设微坑为直径 70 $\mu$ m 的球缺,可计算出不同表面粗糙度的基体表面积,见表 3。

表 3 不同粗糙度的基体表面积

粗糙度 $R_z/\mu\text{m}$	公式	面积/ $\mu\text{m}^2$	与圆面积相比的提高幅度(倍)
	$r^2$	3 848	
20	$(r^2 + h^2)$	5 105	1.3
30	$(r^2 + h^2)$	6 075	1.7

注:  $r$  为 70 $\mu$ m 的一半,  $h$  为粗糙度  $R_z$  值。

在基体表面形成密集排列的微坑使基体的表面积增加了 30%~70%,有效地增加了镀铬层与基体的结合面积。这种高密度的点状强化效果,对宏观铬层与基体的结合如同起到了钉扎效果,与相同镀铬工艺相比,可提高镀铬层与基体的结合强度。

### 2.3 高重频激光处理对基体与铬层界面受力状况的影响

对身管在射击过程中铬层受力状况进行分析可知,在膛面上复杂的剪切力作用下,铬层以开裂和点状脱落形式开始,膛面铬层逐渐遭到破坏。在内膛基体的光滑表面上,剪切力在任何方向上对铬层的剪切破坏作用都是相同的,但经高重频激光处理后的基体表面呈现着良好排列规律性的微坑阵列,基体表面在任意方向上受到的剪切力在微坑处都将发生变化。将微坑简化成顶角为 90 的圆锥形,通过简单计算可以得出表面的受力状况。受力分析如图 2 所示。

图 2 右边式中: 微坑斜面的分力(剪切力)  
 $n$  垂直于微坑斜面的分力(正压力)  
 刀痕或微坑顶角(90)的一半

在炮管内膛面上  $n$  和  $\tau'$  是引起铬层产生剪切破坏的应力,  $n$  是对微坑斜面的正压力,是引起表面破坏的次要因素,所以在微坑处的剪切力减小了 30%。在实际生产中,由于加工刀痕存在明确的方向性,在刀痕的延长线方向上的剪切力就等于射击

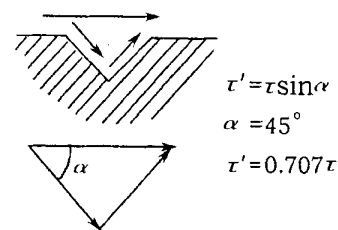


图 2 表面受力分析图

过程中产生的破坏剪切力。而高重频激光处理后,在基体表面产生的有一定深度的微坑在任何方向上阻止剪切力破坏的作用都是一致的。经以上分析可知:在身管内膛表面采用高重频激光处理,能够有效的提高铬层抗剪切破坏的能力。

### 3 结论

(1)高重频激光在钢基体表面 50 $\mu\text{m}$  范围内产生的超快速相变,大幅度提高了表面的位错密度,改善了表面活化程度,有利于镀铬层原子电沉积与结晶。

(2)高重频脉冲激光作用在内膛钢基体几十微米的表面层内,产生无数形貌和分布可控的强化微坑,有效增加了基体的表面积,增加了镀铬层与基体相结合的面积。与同等镀铬工艺相比,可提高镀铬层与基体的结合强度。

(3)高重频激光处理后,在基体表面获得的有规律的直径仅有几十微米的微坑,改善了铬层承受复杂应力破坏的能力。

(4)利用高重频激光技术对火炮身管内膛表面实施相应的处理,是一条有效提高火炮身管使用寿命的新的先进技术途径。

### 参考文献:

- [1] 洛温海姆 弗利德克 A. 现代电镀[M]. 1982. 108 - 113.
- [2] 李名儒等. 大口径高膛压火炮身管内膛镀铬[A]. 高膛压火炮系统论文集[C]. 1989. 129 - 137.
- [3] 陈永才等. 火炮身管采用激光淬火工艺的应用研究[J]. 兵工快报, 1999, 5: 168.
- [4] 宋继鑫. 提高镀铬身管的高能束热处理方法[J]. 兵工快报, 2001, 5: 44 - 46.
- [5] 赵文珍. 材料表面工程导论[M]. 西安交通大学出版社, 1998 - 10. 193 - 199.

### Effect of advanced high - frequency laser treating on joining condition of chrome cladding material

ZHOU Chong - guang<sup>1</sup>, YANG Ming - jiang<sup>2</sup>, PENG Lin - hua<sup>2</sup>,  
LEI Bing - wang<sup>3</sup>, YI Geng<sup>1</sup>, WEN Gang - zhu<sup>3</sup>

(1. No. 52 Institute of China Ordnance Industries, Baotou 014034, Chian; 2. Mechanics Institute, China Academy of Sciences, Beijing 100041, China; 3. North Basic Industry Group, Baotou 014030, China)

**Abstract:** The steel matrix as intensified by means of a special high frequency laser technology adjusted with sound - light. The micro - magnitude - class tiny pits formed on the matrix surface as geometrical orderliness. The basic changes took place on the surface morphology, microstructures as well as joining between the chrome cladding material and matrix. The surface area of the matrix enlarged effectively. At the beginning of the deposition, the chrome atoms grew along the outside of the matrix original crystal lattice. There fore, the joining conditions between the chrome cladding material and the matrix were improved and the resisting capability of the chrome cladding material under the complicated stress destruction was increased.

**Key words:** high - frequency laser technology; chrome cladding material; joining strength

## 汽车管材、换热器和冷却器用铝合金

最近,美国某公司研究了一种铝合金,可用于制造汽车管材、热交换器和空气冷却器,其专利号为 = US6153025 - A。这种合金具有高的抗腐蚀性、高的拉伸强度和很好的可挤压性。

这种合金的成分(质量百分数)为: 0.06% ~ 0.25%的铁, 0.05% ~ 0.15%的硅, 含有高于 0.1%的锰, 高于 0.25%的钛, 高于 0.18%的铬, 高于 0.5%的铜, 高于 0.7%的锌, 高于 0.02%的杂质, 其余为 Al。

高康 译