Vol. 25 No. 4 August 2012

doi: 10.3969/j.issn.1007-9289.2012.04.018

# 电子束改性 40Cr 材料表面微动摩擦磨损性能分析 \*

胡建军<sup>a</sup>,许洪斌<sup>b</sup>,陈元芳<sup>a</sup>,韩 超<sup>a</sup>

(重庆理工大学 a. 材料科学与工程学院 b. 汽车零部件制造及检测技术教育部重点实验室,重庆 400054)

摘 要:利用强流脉冲电子束技术对齿轮常用材料 40Cr 进行表面改性,利用光学显微镜、X 射线衍射仪、粗糙度仪、显微硬度仪和摩擦摩损仪对比分析 40Cr 材料表面电子束改性前后的材料表面形貌、组织和力学性能及其对摩擦磨损性能的影响。结果表明:40Cr 材料经电子束处理后,表面粗糙度增加,截面硬度在表层1 mm内增加,材料表层组织结构由于重熔快冷发生变化而产生残余奥氏体,硬度和组织的变化都起到改善材料微摩擦磨损性能的作用。电子束改性样品摩擦因数在实验初期相对稳定,随着摩擦磨损试验的进行,摩擦因数急剧升高并接近于电子束改性前的样品。微动摩擦性能得到提高,磨损量相当于改性前的 26.4%,降低近4倍。

关键词: 电子束; 40Cr; 表面改性; 摩擦性能; 耐磨性

中图分类号: TG115.58 文献标识码: A 文章编号: 1007-9289(2012)04-0107-05

## Analysis of Friction and Wear Properties of 40Cr by High Current Pulsed Electron Beam

HU Jian-juna, XU Hong-binb, CHEN Yuan-fanga, HAN Chaoa

(a. College of Material Science and Engineering b. Key Laboratory of Manufacture and Test Techniques for Automobile Parts, Ministry of Education, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054)

**Abstract:** The sample of 40Cr steel, common material used in gear manufacturing, was modified on surface with high current pulsed electron beam. Then the surface roughness, structure and property were tested and the effect to friction and wear property were analyzed and contrasted. Experimental results show that surface roughness increases after high current pulsed electron beam, while the surface section hardness increases 1 mm in depth from surface. The material surface structure changes and new retained austenite generates because of fast melting and cooling. The increase of microhardness and change of the structure positively influence the friction and wear property of 40Cr. The friction coefficient of modified samples is lesser and stable in the initial wear stage and increases to the approximate same level of original samples during the experiment process. The weight loss after electron beam is about 26.4% as that before electron beam, and this means that the wear extent decreases four times with the electron beam technology.

**Key words:** electron beam; 40Cr; surface modification; friction property; wear property

#### 0 引 言

40Cr 钢是机械制造业使用最广泛的钢之一。 具有良好的综合力学性能,良好的低温冲击韧性 和低的缺口敏感性,适于制作齿轮、模具等。然 而恶劣的工作状况常常引起 40Cr 零件的磨损超差,并影响表面精度。国内外学者常采用电镀、热堆积焊等表面技术进行修复,但存在结合力弱、组织不致密、热硬性不足等问题[1-3]。

**收稿日期**: 2012-05-07; **修回日期**: 2012-06-21; **基金项目**: \* 国家自然科学基金(50775229), 重庆市重点自然科学基金(cstc2012JJB70002)

作者简介: 胡建军(1974-), 男,河南遂平人,副教授,博士;研究方向:模具 CAD/CAM、数字化制造及表面工程技术

网络出版日期: 2012-07-06 09: 21; 网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905. TG. 20120706.0921.007. html 引文格式: 胡建军, 许洪斌, 陈元芳, 等. 电子束改性 40Cr 材料表面微动摩擦磨损性能分析 [J]. 中国表面工程, 2012, 25(4): 107-111. 近年来,利用脉冲高能束(电子束、离子束、激光束)进行金属材料表面加工和改性技术得到了迅速发展。随着电子束技术不断发展,电子束材料表面改性技术的研究日益扩大。电子束材料表面技术改性处理包含金属材料表面淬火、表面合金化、表面清洗及熔覆等,该技术不仅可以大大提高材料的耐腐蚀性能,还可在表面深度1mm内提高材料的硬度。电子束冲击产生的应力能阻碍位错的运动,延缓裂纹的扩展,可显著改变金属表面的化学、物理性能,从而显著提高零件的耐磨性,延长相应零件的使用寿命[4-5]。

国内外学者致力于脉冲电子束系统研究,在 材料表面改性方面开展了大量的研究工作。 Markov 等[6]建立了电子束轰击金属材料引发温 度场的物理模型,并进行了相关实验研究,得到 的数值计算结果与实验预测吻合较好。Ozur 和 Proskurovsky<sup>[7]</sup>在纯铁、钢和合金等金属材料的 表面改性方面进一步发展了 Markov 的模型,并 对温度场和应力场进行了数值解析,给出了材料 表层升温、熔化、凝固及冷却的大致过程,但这些 研究对实验性能部分研究不充分。郝胜智 等[4-5,8]对纯铝、H13、D2、镁等进行了电子束处理 的性能研究,但大多是针对模具材料进行研究。 文中以齿轮常用材料 40Cr 为对象,进行电子束 表面处理后,分析其微动摩擦性能。齿轮啮合由 于存在滑差,磨损更严重,极易由于摩擦磨损发 生失效,因此通过探讨 40Cr 作为齿轮或模具零 件材料,开展电子束工艺对其表面摩擦磨损性能 改善、提高的可行性研究。

### 1 试验

#### 1.1 试验材料

试验材料为 40Cr 钢(C 0.39%, Si 0.23%, Mn 0.70%, Cr 0.80%, Ni $\leqslant$ 0.30%),其临界点为 Acl为 780%, Ac3为 840%, Ms 为 350%。电子束表面处理前,对试块进行调质处理,即 850%下淬火 80 min,620%下回火 60 h。热处理后的样品经过机械磨光、丙酮清洗处理后,利用强流脉冲电子束进行电子束表面处理。

## 1.2 电子束处理

齿轮脉冲电子束表面处理采用 RITM-2M型电子束实验装置(俄罗斯科学院西伯利亚分院强电流研究所),工艺参数如表 1 所示。

#### 表1电子束照射参数

Table 1 Parameter of electron beam process

Voltage /kV	Distance /mm	Energy density/ (J•cm <sup>-2</sup> )	width	Frequency /Hz	Times
27	80	4	3	0.1	25

#### 1.3 测试方法

通过 TR300 粗糙度仪测定 40Cr 各样品粗糙度;采用 PME OLYMPUS TOKYO 光学显微镜测试表面形貌;XRD 在 DX-2500 型 X-Ray 衍射仪上进行;截面硬度测试设备为 HX-1000 显微硬度测试机,试验力 2.94 N,作用时间 10 s。在 HSR-2M 摩擦磨损仪上完成电子束前后试样的摩擦磨损试验,每个试样做两次微摩擦试验,测出样品的总失重,并对比表面磨痕宽度,实验载荷为 20 N,转速 300 r/min,测试时间为 10 min,对磨材料为 GCr15。

## 2 实验结果及分析

#### 2.1 表面粗糙度

40Cr 各样品粗糙度如图 1 所示。电子束处理前样品粗糙度为 0.086  $\mu$ m,经电子束照射后粗糙度为 0.294  $\mu$ m,粗糙度有了较明显的增高。

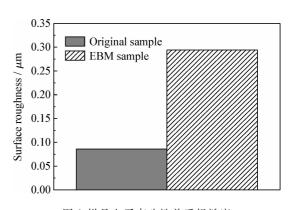
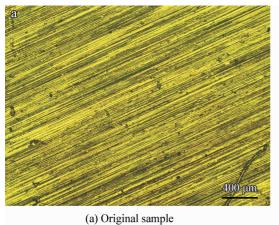


图 1 样品电子束改性前后粗糙度

Fig. 1 Roughness of samples before and after electron beam radiation

样品表面形貌如图 2 所示,可以看出,电子 束改性使原始样品产生大量熔坑,这是因为材料 表面吸收电子束能量以后,温度急剧升高,而亚 表层熔体发生膨胀出现喷射而引起<sup>[4,8,10]</sup>,大量的 火山坑使表面粗糙度明显升高。 理论上,电子束在材料表面的照射作用发生 快速熔化。微观上,熔化金属快速从表面的高峰 处流向洼地。因此,一方面电子束的照射有利于 降低金属材料表面的粗糙度,提高表面质量;另



一方面,电子束照射引起金属液体飞溅,出现火山坑,会促使金属表面粗糙度提高,因此有提高粗糙度的作用。电子束照射后材料表面粗糙度的变化是以上两个过程综合作用的结果。

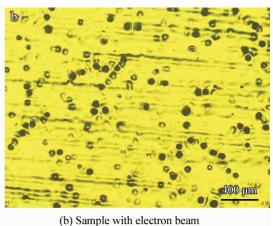


图 2 样品表面形貌 Fig. 2 Surface topography of samples

#### 2.2 组织分析

电子束改性前后 X 射线衍射图谱如图 3 所示。作为亚共析钢,40Cr 材料中碳化物的体积分

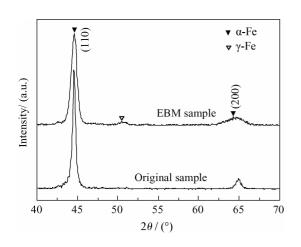


图 3 电子束改性前后 40Cr 钢 XRD

Fig. 3 XRD of samples before and after electron beam radiation  $\,$ 

数较低,衍射峰不明显,电子束改性后,原来铁素体的特征峰降低且在中间出现了新的奥氏体峰,这是电子能量输入材料表层重熔后,由于基体温度较低而快速冷却,奥氏体来不及转变为珠光体和铁素体而形成残余奥氏体。

#### 2.3 截面硬度

电子束改性前后样品截面硬度对比如图 4。

经电子束改性后,样品的硬度均得到明显提高。硬度在  $40~\mu m$  处达到最大值 350.12~HV,比改性前硬度 298.74~HV 提高 17%。各样品经电子束改性后,硬度影响深度超过  $700~\mu m^{[11]}$ 。硬度分布曲线呈震荡式,这是因为电子束技术不仅是热源改性,而且有电子的高速冲击作用,其综合作用产生的应力波和晶界反射发生综合作用使其硬度呈现复杂的形式<sup>[4]</sup>。

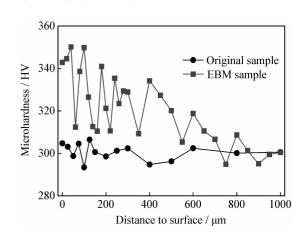


图 4 样品截面硬度分布

Fig. 4 Hardness distribution of 40Cr sample with depth

#### 2.4 摩擦磨损

所选样品均经过抛光预处理,40Cr 的摩擦因数一时间曲线图如图 5 所示[12]。由图 5 可以看

出,电子束改性前 40Cr 样品摩擦因数较稳定,波动范围在 0.6~0.65。而电子束改后,摩擦初期摩擦因数保持在 0.22 左右,随实验进行到 4~5 min时急剧升高,之后在 0.5~0.6 范围内波动。这说明经过电子束改性,材料表面的摩擦性能发生了变化,而 6 min 时摩擦性能与表面性能趋于稳定,但仍然低于基体。

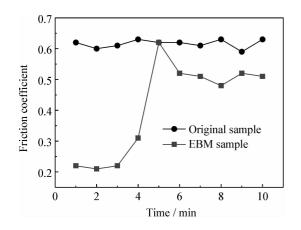


图 5 摩擦因数随时间的变化曲线 Fig. 5 Friction coefficient of sample with time

40Cr 样品的磨损量对比如图 6 所示,电子束改性前,40Cr 样品的磨损失重为 3.4 mg;电子束表面改性后,40Cr 样品的磨损失重仅为 0.9 mg,相当于改性前的 26.4%。这反映出经电子束改性处理后的 40Cr 材料样品的摩擦磨损性能有较大程度提高[13]。

对比分析 40Cr 各样品的磨痕(见图 7)。电子束改性前样品的磨痕宽度为 0.40 mm,电子束改性后为 0.25 mm,进一步验证了摩擦因数随时

间的变化曲线所反映的摩擦磨损试验结果。

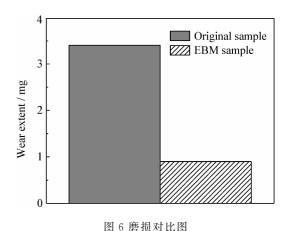


图 6 磨钡剂 L图 Fig. 6 Wear contrast

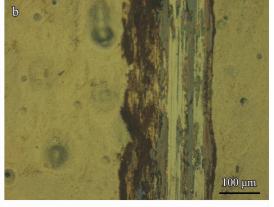
当样品受电子束改性后,材料的摩擦磨损性能受材料表面粗糙度、表面相变、硬度等引起的表面性能变化的共同作用。表面粗糙度增加可能会引起材料的微摩擦磨损性能的下降,而截面硬度增加能起到改善材料的微摩擦磨损性能的作用。实验结果证明,电子束改性后 40Cr 材料的微摩擦磨损性能得到提高。这一方面是由于截面硬度的升高,另一方面材料表层组织结构的变化,也是影响样品微摩擦磨损性能的一个重要因素[14-15]。

#### 3 结 论

(1) 40Cr 经过电子束照射以后,材料表面发生相变;在原始样品磨削其粗糙度较低的条件下,表面粗糙度有一定的升高。



(a) Original sample



(b) Sample with electron beam

图 7 样品磨痕 Fig. 7 Polishing scratch

- (2) 40Cr 经过电子束改性后,在表层 1 mm 以内发生性能的变化,硬度可以得到提高。
- (3) 40Cr 材料经电子束强化后,表面摩擦磨损性能发生变化,其摩擦因数减小,摩擦磨损性能有较大程度提高,磨损量可以降低 4 倍。

## 参考文献

- [1] 许洪斌, 胡建军, 陈元芳, 等. 脉冲电子束照射下材料表面熔化深度的数值解析 [J]. 重庆大学学报, 2008, 31 (12): 1351-4.
- [2] 高永建,张世堂,邓智昌,等.激光熔覆高温自润滑覆层的摩擦学特性[J].中国表面工程,2011,24(2):51-56.
- [3] 胡建军,陈元芳,许洪斌,等.强流脉冲电子束照射下 40Cr的表面形貌及 XRD 分析 [J]. 热加工工艺,2010,39 (4):28-31.
- [4] 吴平生, 郝胜智, 张向东, 等. 强流脉冲电子束处理对 SKD11 钢表面形貌和性能的影响 [J]. 材料热处理学报, 2008, 29(03): 168-170.
- [5] 张可敏, 邹建新, 杨大智. 316L 不锈钢强流脉冲电子束表面钛合金化及其耐蚀性 [J]. 材料热处理学报, 2006, 27 (5): 108-110.
- [6] Markov A B, Kolitsch A. Improving the properties of metallic materials by surface alloying induced with a pulsed electron beam [C]. Proceedings International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, IS-DEIV, Braunschweig, 2010: 486-489.
- [7] Proskurovsky D I, Rotshtein V P, Ozur G E, et al. Physical foundations for surface treatment of materials with low

- energy, high current electron beams [J]. Surface and Coatings Technology, 2000, 125: 49-56.
- [8] 郝胜智,吴平生,张向东,等.强流脉冲电子束表面处理[J]. 金属热处理,2008,33(1):77-81.
- [9] 字野義幸,冈田晃,薮下法康,等.大面积脉冲电子束对模具的精整与表面改性[J].制造技术与机床,2004(5):27-31.
- [10] 金铁玉. 强流脉冲电子束齿轮表面改性研究 [D]. 重庆: 重庆理工大学, 2010.
- [11] 刘志坚, 韩丽君, 江兴流, 等. 45 号钢脉冲电子束熔凝处 理及微结构研究 [J]. 航空材料学报, 2005, 25(5): 20-24.
- [12] 韩超. 模具材料电子束表面合金化及高温性能研究 [D]. 重庆: 重庆理工大学, 2011.
- [13] 安家财, 杜三明, 肖宏滨, 等. 等离子喷涂 ZrO2/Al2O3 陶 瓷涂层的摩擦磨损性能 [J]. 中国表面工程, 2011, 24(1): 20-24.
- [14] 杨祥伟, 揭晓华, 曾旭钊, 等. 7050 铝合金表面亚微米晶层摩擦磨损性能 [J]. 中国表面工程, 2011, 24(3): 38-42.
- [15] 陈元芳, 许洪斌, 胡建军, 等. 强流脉冲电子束对 3Cr2W8V 微摩擦磨损性能的影响 [J]. 武汉理工大学学报, 2011, 33(11): 19-24.

作者地址: 重庆市巴南区红光大道 69 号 400054 重庆理工大学 材料学院

Tel: (023) 6256 3868

E-mail: hujj@qq. com

\*

#### • 本刊理事单位介绍 •

#### 西北工业大学凝固技术国家重点实验室

西北工业大学凝固技术国家重点实验室是在原铸造专业的基础上,1989年经国家计委和教委批准,利用世界银行贷款建设的国家重点实验室。1995年10月建成,并通过国家验收,1998年4月通过专家组评估。2003年7月通过由国家科技部和国家自然科学基金委员会组织的评估,被确认为凝固技术与材料学领域科学研究、人才培养、技术创新和学术交流的基地。

实验室定位于材料科学与工程应用基础研究,涵盖材料加工工程和材料学两个国家重点建设学科,设立三个主要研究方向,即:现代凝固理论与先进凝固技术、材料精确成形和高性能控制技术和先进材料设计制备,研究领域涉及金属、半导体、陶瓷等多种结构和功能材料的加工制备成形及相关理论。

实验室现有人员共计 85 人,其中固定研究人员 59 人。研究人员中有教授 32 人,博士生导师 23 人,其中包括 4 位院士,分别是中国科学院院士周尧和教授、中国工程院院士傅恒志教授、中国工程院院士张立同教授和中国工程院院士周廉教授,3 位教育部"长江计划"特聘教授,5 位国家杰出青年科学基金获得者。