文章编号: 1001-5078(2006)07-0587-03

多冲碰撞载荷下激光涂层的接触损伤分析

傅戈雁,石世宏
(苏州大学机电学院,江苏 苏州 215021)

摘 要:进行了激光熔覆试件的多冲碰撞试验,并对多冲碰撞接触疲劳损伤的表象和机理进行了微观分析。观察到多冲碰撞载荷下试件表面的微观点蚀较为普遍;接触疲劳点蚀深度大约为 0.05～0.1mm或更浅,比一般滚动或滚滑接触疲劳的点蚀坑浅得多。激光涂层多冲碰撞表面点蚀剥落一般在较小的应力下发生,裂纹萌生周期较长;而表面剥层一般在较大应力下发生,裂纹萌生周期较短。

关键词:多冲碰撞;接触疲劳;趋表效应
中图分类号: TH87 **文献标识码**: A

Analysis of Contact Damnification of Laser Coating under Repeated Impact Loading

FU Ge-yan, SHI Shi-hong
(College of Mechanical and Electronical Engineering, Suzhou university, Suzhou 215021, China)

Abstract: Repeated impact tests on samples of laser cladding is done and microcosmic analysis to the appearance and mechanism of repeated impact contact fatigue damnification is mode. It shows that under repeated impact loading, it is prevalent for microcosmic point corrosion to be on sample's surface. Depth of contact fatigue point corrosion is about 0.05～0.1mm or even less, which is more shallow than the hole of point corrosion of rolling or skidding contact fatigue. Generally, under repeated impact contact, peeling of point corrosion on laser cladding surface is happened under lower stress, and the period of the increment of the crack is longer. However, peeling on laser cladding surface is happened under higher stress, and the period of the increment of the crack is shorter.

Key words: repeated impact; contact fatigue; skin effect

1 引 言

本文所述多冲碰撞载荷是指两工件表面作垂直于冲击表面的反复接触与脱离的相对运动,且冲击应力和冲击能量远小于材料的强度极限(屈服极限)和冲击韧性的一类载荷。因多冲碰撞载荷兼具疲劳载荷和能量负荷性质,而激光熔覆表面强化零件由于其外强内韧,特别适合于抵抗这类载荷从而控制表面损伤失效。

关于表面接触疲劳的研究工作大多针对两接触曲面作相对滚动或滚滑情形。一般认为蚀坑深度与接触条件、赫之应力及表面硬化层深度无明显对应关系[1]。在反复循环应力作用下,表层内部由于塑性变形而形成硬化带,硬度峰位于表层下 0.3mm左右,与最大切应力位置相吻合。点蚀裂纹一般从表面开始,以 20～40向下扩展,达到硬化带后改变成与表面平行方向扩展。蚀坑深度大约在 0.3～0.85 mm之间[2]。文献[3]则认为宏观点蚀深度大约在 0.2mm左右。作者在激光熔覆试件的多冲碰撞试验[4]中,发现其接触疲劳损伤与通常的滚动或滚滑情况相比,具有一些不同的特点,本文对多碰接触疲劳损伤的表象和机理进行了微观分析。

2 试验方法

试件由基体与涂层两部分组成,几何尺寸见图 1,基体材料为 1Cr18Ni9Ti奥氏体不锈钢,涂层材料为专门研制的抗多冲激光熔覆材料,其牌号和成分见表 1。涂层采用预置粉末方式并在 TJ-HL-T5000型 CO_2激光器上熔覆加工,涂层熔覆后硬度为 HRC41～45。

试验在自制的弹簧蓄能式多冲疲劳试验机上进行。冲击行程 20mm,频率 4Hz。通过调节弹簧的预

基金项目:湖南省自然科学基金(02JJY2072)资助项目。
作者简介:傅戈雁(1959-),女,教授,主要研究方向为表面强化设计理论与方法等。E-mail: fugeyan@suda.edu.cn
收稿日期: 2005-09-25

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

压缩量获得不同的冲击力。冲头形状与试件基本相同,其表面为平面。冲头接触平面经研磨后表面粗糙度 Ra0.2。冲头材料选取 9CrSi模具钢,熔覆后硬度为 HRC55～60。

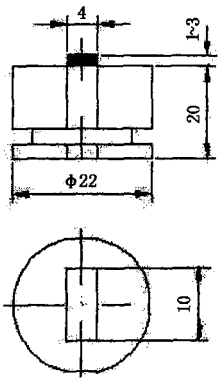


图 1 试件简图

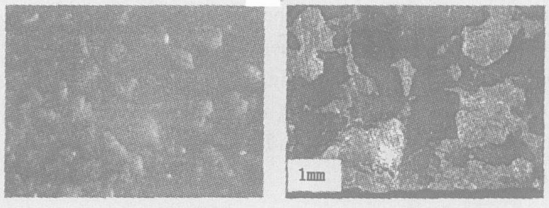
设冲头与涂层两表面轮廓粗糙度的均方差分别为σ_1和σ_2,它们的接触情况可转换为一个光滑的刚性表面和另一个具有均方差 $\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$的粗糙表面接触情形[1]。

3 表面接触疲劳损伤现象与分析

当碰撞达到一定次数时,观察涂层表面会出现一些随机分布的麻点,如图 2。在体视显微镜下可观察到这些麻点实际上是一个个形状不规则的小蚀坑,有面积较小的点蚀(见图 2(a)),也有面积较大的剥层(图 2(b))。随碰撞次数的增加,蚀坑面积会逐步增多。这对于有尺寸或配合精度要求的表面,过多的表面蚀坑是不允许的,即为表面疲劳失效。另一方面,由于蚀坑而变得粗糙的涂层很容易诱发二次裂纹,使得点蚀程度不断扩大。严重时还会引发宏观裂纹(图 3),导致涂层开裂失效。点蚀裂纹一般从表面起源,一开始沿与表面呈 30～40°方向扩展(图 3(a)),此时一小块金属成为一楔形悬臂梁状态。一种可能是这一小块金属在后续的碰撞力作用下沿根部断裂而形成点蚀,另一种可能是裂纹转向水平方向扩展一段后,再折向表面,形成片蚀。

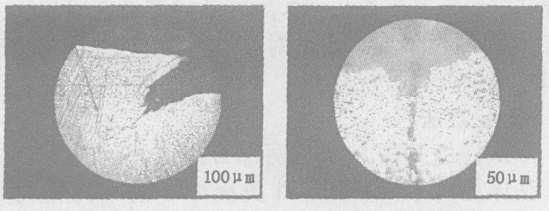
表 1 涂层材料成分

序号	牌 号	材料成份 p(重量百分率%)											
		C	Ni	Cr	Si	B	Co	W	Mo	V	Mn	Fe	Re
1	WFc1-11(Co基)	0.5～0.7	10.0～12.0	26.0～28.0	1.0～1.5	0.4～0.6	余	4.0～6.0	3.0～5.0				<1.0
2	WF-312(Fe基)	0.1～0.2	10.0～12.0	17.0～19.0	2.5～3.5	2.0～2.5			0.5～0.6	0.4～0.6	1.0～1.5	余	



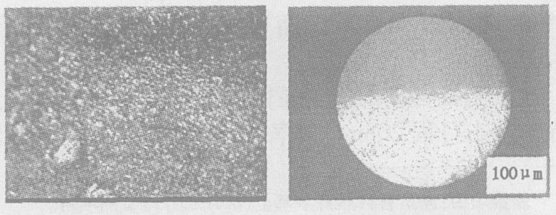
(a)点蚀(1#涂层,100MPa,48 万次,10×) (b)剥层(2#涂层,253MPa,27 万次)

图 2 涂层表面蚀坑



(a)1#涂层,270MPa,118 万次 (b)2#涂层,363MPa,1.25 万次

图 3 蚀坑底部引发二次裂纹



(a)1#涂层表面的微观点蚀群(20×) (b)2#涂层蚀坑垂剖面形貌,深度约 25μm

图 4 激光涂层表面的微观点蚀

3.1 微观点蚀分析

当冲头与涂层表面接触时,真实接触面积只有粗糙峰的凸起部分,所以其真实接触压力比名义载荷高得多[1,5]。微凸峰上将作用密集的应力流线并在凸峰附近发生强烈弯曲,形成集中应力,即所谓微观赫之应力。微观赫之应力的作用使凸峰周围应力场不断变化而出现塑性变形,进而出现疲劳裂纹并向凸峰内部扩展,造成疲劳损伤。由于为平面接触碰撞,参与接触的峰点数较多;又由于载荷的冲击性质,峰点上受力由表及里迅速衰减,所以一开始还来不及诱发更深层次的宏观点蚀裂纹。因此,各接触凸峰在反复的微观赫之应力作用下,许多凸峰上的一小点金属脱离下来形成微观点蚀(图 4),蚀坑深度大约为 20～30μm。微观点蚀的形成对整个表面的疲劳损伤是有利有弊的。一方面,微观点蚀去除了一部分凸峰材料,各凸峰接触应力趋于均匀,实际接触面积增大,促进了表面跑合,使进一步的疲劳损伤变得困难。观察表明,涂层表面出现较均匀普遍的微观点蚀后,随之有一段较长时间的稳定期,表面损伤发展非常缓慢。另一方面,微观点蚀坑底部的微裂纹又给宏观点蚀裂纹的生成留下隐患,在足够多的循环次数后,从它的底部可诱发出二次裂纹、三次裂纹,依次向纵深扩展,发展成宏观点蚀(图 3)。

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

3.2 多碰疲劳损伤的趋表效应

观察大量多冲载荷下蚀坑深度,大约都在 0.05～0.1mm或更浅,比一般滚动或滚滑接触疲劳点蚀坑浅得多见图 3。较浅的蚀坑深度是多冲碰撞表面疲劳的另一特征,本文称之为"趋表效应 "。产生趋表效应的原因是由于碰撞载荷的冲击性质,使得涂层内能量和应力传播沿层深非均匀分布,而是呈指数型应力衰减[6]:

$$\sigma = \sigma_0 e^{-ax} \quad (1)$$

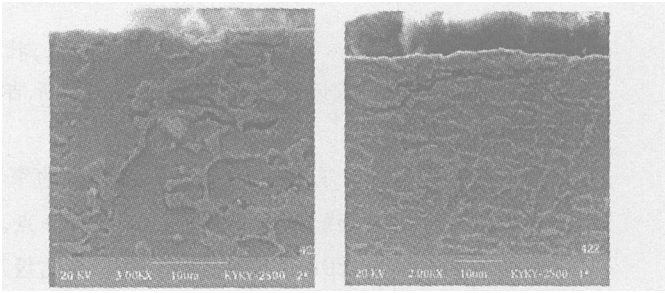
式中,a—应力衰减系数;x—材料离撞击部位的距离。式(1)说明随着 x的增大,应力将沿着涂层—基体方向降低。当 $x=0$时,也就是在涂层表面,受撞击的部位应力为 σ_0,在离开撞击部位较远部位的各点,即在 x大于 0的部位,应力水平 σ随着离开撞击部位的距离按指数规律衰减,衰减率受到应力衰减系数的控制。这种应力衰减特性使得最大表面应力上移,导致涂层内最大切应力的上移,塑性硬化层因此更接近表层,初始裂纹的萌生位置自然上移。

3.3 剥层现象与机理分析

多冲碰撞试验中还观察到了剥层现象。图 5中SEM照片记录了 1#涂层表层剥落的起源与形成情况。由图可清晰地看到剥层裂纹的萌生、连接与扩展情况。运用剥层理论[2]可较好地解释冲击表面的剥层现象。当两个表面互相冲击接触时,在表层产生剪切塑性变形并不断积累,这就在金属表层内出现周期的位错。由于映像力的作用,距离表面深度约为几十微米的表层位错消失。这样靠近表层的位错密度小于内部的位错密度,即最大的剪切变形发生在一定深度以内。在摩擦过程中,剪切变形不断积累,使表面下一定深度出现错位堆积,进而导致形成裂纹或空穴 (图 5(a))。当裂纹在一定深度形成后,根据应力场分析,平行表面的正应力阻止裂纹向深度方向扩展,所以裂纹在一定深度沿平行于表面的方向延伸 (图 5(b))。当裂纹扩展到临界长度后,在裂纹与表面之间的材料将以片状磨屑的形式剥落下来。

表面点蚀剥落和剥层都属于表面接触疲劳失效。但从前面对点蚀剥落和剥层的形成条件进行分析,可以得出以下一些规律:表面点蚀剥落一般在较小的应力下发生,裂纹萌生周期相当长。裂纹的萌生与扩展过程没有或很少伴随显著的塑性变形,因而扩展较快。其接触疲劳寿命主要取决于裂纹形成阶段,属于应力疲劳;而表面剥层一般在较大应力下发生,裂纹萌生周期较短。如图 5的空穴形成是典型的延性断裂型,扩展的同时伴随大量塑性变形,因此扩展起来较为缓慢。其接触疲劳寿命主要取决于裂纹扩展阶段,属于应变疲劳。

由于两种疲劳现象的差别,不同多碰条件下对涂层材料应有不同的选用原则。显然,对于高周低应力场合,其主导过程是裂纹萌生阶段,为了提高疲劳磨损寿命,应当提高材料的强度;对于低周高应力情况,在发生的大量的塑性变形时,裂纹容易萌生。如果材料具有较高的塑性和韧性,裂纹扩展将遇到较大阻力。所以为了提高这种应变疲劳磨损寿命,应当提高材料的塑性。图 6表达了上述观念。



(a)亚表层材料失稳形成空穴 (b)平行表面的剥层裂纹形成

图 5 表面剥层的起源与形成 (1#涂层,290MPa,0.5万次)

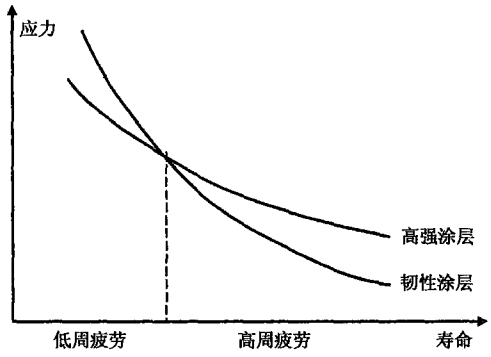


图 6 不同类型涂层材料抵抗多冲接触疲劳能力示意图

4 结 论

(1)多冲碰撞载荷下,在微观赫之应力作用下的微观点蚀较为普遍。多冲碰撞接触疲劳点蚀深度大约为 0.05～0.1mm或更浅,比一般滚运或滚滑接触疲劳的点蚀坑浅得多。造成这种趋表效应的原因是碰撞载荷的冲击性质所致;

(2)激光涂层表面点蚀剥落一般在较小的应力下发生,裂纹萌生周期较长,属于应力疲劳;而表面剥层一般在较大应力下发生,裂纹萌生周期较短,属于应变疲劳。可根据损伤性质和预期疲劳寿命来决定选用高强涂层或韧性涂层。

参考文献:

[1] 温诗铸,黄平. 摩擦学原理 [M]. 北京:清华大学出版社,2002.

[2] 刘家浚. 材料磨损原理及耐磨性 [M]. 北京:清华大学出版社,1993.

[3] 郑林庆. 摩擦学原理 [M]. 北京:高等教育出版社,1994.

[4] 傅戈雁,石世宏,钟鸣. 激光涂层零件的疲劳撞击可靠性寿命试验分析 [J]. 中国机械工程,2004,(19).

[5] N J Mahony, R J Grieve, T Ellis A simpale experiment method for studying the impact wear of materials [Z]. Wear, 1984, 79 - 87.

[6] Collins J A. Failure of materials in Mechanical Design [Z]. John Wiley & Sons, Inc., 1981.

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net