

激光熔覆层裂纹研究进展

邱星武^a, 刘春阁^b

(四川建筑职业技术学院 a. 材料工程系; b. 交通与市政工程系, 四川 德阳 618000)

摘要: 为了揭示激光熔覆过程中裂纹的成因并采取有效措施对其防止, 以其为获得性能优异的激光熔覆层提供依据。对国内外关于激光熔覆层裂纹研究现状进行了概括总结, 提出了裂纹产生的原因及防止办法; 合理地选择激光工艺参数及合理设计熔覆材料的成分和组织。

关键词: 激光熔覆; 裂纹; 研究进展

中图分类号: TG156.99 **文献标识码:** A

文章编号: 1674-6457(2010)05-0041-03

Research Progress of Crack in Laser Cladding

QIU Xing-wu, LIU Chun-ge

(Sichuan College of Architectural Technology, Deyang 618000, China)

Abstract: In order to reveal the causes of cracks in laser cladding process and take effective measures to prevent, and provide the basis for laser cladding with outstanding performance, the research at home and abroad on the status of cracks in laser cladding layer was summarized. The reason leading to cracks and prevention method were described; rational choice of process parameters and design of composition and microstructure of cladding materials.

Key words: laser cladding; crack; research progress

激光熔覆技术作为新型的技术已在工业生产和科学研究中引起了普遍关注, 特别是在冶金行业的设备修复过程中, 激光熔覆技术显示出了广阔的发展前景。激光熔覆层具有很多优异的性能, 如高硬度, 良好的耐磨性、耐蚀性及抗高温性能等。由于激光熔覆过程中易产生裂纹, 尤其在大量激光熔覆时, 裂纹更易形成, 这无疑对激光熔覆层的性能有一定的影响。文中就国内外对熔覆过程产生的裂纹研究现状进行了综述, 并探讨了裂纹产生的原因及防止办法。

1 国内外研究现状

国内外专家学者对激光熔覆工艺产生的裂纹有很多报道, 报道最多的是研究工艺参数对熔覆层组织、性能和开裂敏感性的影响。吴祥海、李绍杰等^[1]通过优化工艺参数, 在镍基高温合金叶片上得到无裂纹的涂层, 从而达到修复和强化叶片的目的。刘富荣、高谦等^[2]在 Ti 基合金粉末中添加 WC 颗粒, 在 Ti-6Al-4V 基体材料上进行激光熔覆, 熔覆层内存在弥散裂纹。裂纹往往源于碳化物颗粒与基体的

交界面,尤其是形状不规则的碳化物颗粒的一些曲率半径较小的尖角处。由于应力集中系数较大,激光快速加热和冷却形成的热应力很容易使这些区域萌生裂纹。源于激光熔覆层边缘的粗大裂纹,由于激光加热冷却的温度场在激光熔覆熔池中的不同区域,造成一些温度梯度较大的边界区,在冷却过程中形成粗大的冷裂纹。陶锡麒等^[3]研究了不同搭接宽度和层数对激光熔覆的显微组织及开裂性的影响,结果表明:随着搭接宽度和层数的增加,显微组织变大;随着搭接宽度的增加,开裂性降低;随着熔覆层数的增加,开裂性增加。

石世宏^[4]在熔覆阀门密封面时,发现熔层开裂是主要缺陷,熔覆材料和工艺因素对开裂影响很大。Przybylowicz J., Kusinski J.^[5]对镍基合金和钴基合金中分别添加 WC 在碳钢上进行激光熔覆研究,发现减少激光功率或增大熔覆速度,熔层中会有高气孔率和裂纹。随着 WC 含量的增大,通过提高激光功率和增大熔覆速度,熔覆层才可减少或避免气孔和裂纹,但 WC 含量增大,熔覆层外表面粗糙度增大。宋武林、周刚^[6]在研究铁基合金激光熔覆中发现,熔层组织中共晶团是熔覆层开裂的薄弱地方。Hidoui^[7]在熔覆镍基合金加 WC 颗粒时发现,WC 使镍基合金熔层的硬度增大,但是熔层开裂的倾向增大。Hernandez 等^[8]在马氏体不锈钢 Z10CNDV12-2 基体上激光熔覆 stellite 合金和 Ni 基合金,然后测定了熔覆层横向和纵向的残余应力。Pilloz^[9]测定了在低碳钢 XCl0 基材上熔覆 Ni 基和 Co 基合金时的应力场。激光熔覆中由于温度梯度大,冷却速度快,导致熔覆层承受很大的拉伸应力,使得熔覆层开裂。为减小拉应力,在高铬马氏体钢表面先熔覆一层塑性好的奥氏体合金粉末作为过渡层,在过渡层上再熔覆 Stellite 6 合金粉末作为功能层,测试 Stellite 6 合金层残余应力,发现过渡层对降低残余应力没有影响。在降低熔覆层拉应力的研究中,Kovalenko, Volodymyr S 等^[10]在激光熔覆时加入电场、磁场,可以改变熔覆层的应力状况,经测试,熔层表面可由原先的拉应力变为压应力,对抑制开裂有益,可惜相关的后续报道一直没有看到。基体形状和表面状态影响着熔覆层的开裂,徐志刚、王茂才^[11]在合金表面预处理状态对激光熔覆裂纹敏感行为的影响的研究中,通过对比 3 种高温合金表面预处理状态对激光熔覆层裂纹敏感性的影响,发

现降低合金表面铝含量,增加镍含量均可降低熔层裂纹敏感性。在熔覆方法抑制熔覆层开裂研究中,宋武林^[12]在研究铁基合金熔覆层开裂问题时,采用真空熔覆,可以降低熔覆层开裂倾向。真空条件下,熔覆层中显微缺陷如气孔等减少,合金元素烧损减少,提高熔层抗开裂能力。袁斌、龚知本等^[13]提出一种新的搭接熔覆方法,可以降低熔覆层的开裂敏感性。宋光明、吴钢等^[14]在激光熔覆 Ni60 合金粉末时,正常熔覆工艺条件下,熔层开裂敏感性很强,采用单向送粉,双向扫描激光熔覆,可以显著降低熔覆层的开裂倾向,同时,双向扫描也提高了熔覆层的平整度。目前国内外尚无商品化的专用于激光熔覆的合金粉末,较多是采用热喷涂或热喷焊用合金粉末。熔覆材料的成分要根据使用要求与基体的状况选配,一般采用自身能起熔剂作用的自熔性合金粉末,自熔性合金粉末一般加入了 B 和 Si,但 B 和 Si 增大熔层开裂倾向。在粉末中添加合金元素,提高熔覆层抗开裂能力,主要在于合金化增加韧性相,提高熔覆层的韧性,对抑制裂纹的产生是一种有效的方法。在 Ni-Cr-B-Si 中加入 FeV, FeTi, FeSi 合金,发现激光熔覆层中韧性相 γ 相有了增加,同时熔覆层开裂敏感性降低。在 2Cr13 基材上熔覆 Fe 基合金,随镍含量的增加,熔覆层塑性增加,韧性提高,裂纹敏感性降低,主要是镍使熔覆层组织中韧性相 γ 相含量增加。加入稀土元素可改善晶界结构,改变液态金属的结晶方式,抑制柱状晶和树枝晶的产生,细化熔覆层组织的作用,提高材料的强韧性,可以降低熔覆层的开裂敏感性^[15-16]。

对熔覆层裂纹机理研究中,陈静、林鑫等^[17]采用 316L 合金粉末在 45 钢上激光熔覆,发现裂纹多发生在晶界,呈现出典型的沿晶界开裂特征。对断口的观察,可看到氧化色,其断口特征为典型的冰糖葫芦状断口,表明裂纹是在高温下由于晶界处液膜分离所形成的,是典型的凝固裂纹,属于热裂纹范畴。张永忠等^[18]在研究铸铁表面激光熔覆裂纹形成原因时,发现激光能量密度 ρ 和熔覆层与基体表面的润湿角 θ 是控制裂纹形成与否的 2 个重要因素。能量密度 ρ 增大,裂纹数减少,而润湿角 θ 反映了熔覆粉末和基体材料的相容性。

综上所述,激光熔覆层裂纹已引起了国内外专家、学者的广泛关注,对裂纹的成因、机理、不同基体材料、熔覆材料、工艺参数对裂纹的影响进行了深入

的研究与探讨,并提出了相应的防止措施,使得激光熔覆技术的发展上了新的台阶。

2 裂纹的产生

激光熔覆层内有较大残余拉应力存在,从而导致其开裂,这种内应力是激光熔覆过程中热应力、组织应力和拘束应力综合作用的结果^[19-20],其中热应力的作用最为明显。热应力与基材和覆材热膨胀系数差值的关系为^[21]:

$$\sigma = E \times \alpha \times T / (1 - \nu)$$

式中: σ 为热应力; E, ν 分别为涂层的杨氏模量和泊松比; α 为涂层与基材的热膨胀系数的差值; T 为涂层凝固温度与室温之差。此关系式表明:当涂层的热膨胀系数大于基材的热膨胀系数时, $\alpha > 0$,熔覆冷却后涂层中的热应力表现为拉应力;相反, $\alpha < 0$,涂层中的热应力表现为压应力。在后一种情况下将会有效地减小涂层中的残余拉应力,减小涂层的开裂敏感性。

激光熔覆是一个典型的快速加热快速冷却过程,这是造成激光熔覆过程较大的残余应力的根本原因。激光熔覆时扫描速度增加,显微组织变得细小,但熔覆过程的加热冷却过程更加激烈,使得应力增加,导致裂纹增加。为了解决这一问题可通过预热缓冷来减少应力,因而降低裂纹倾向。

3 裂纹的控制及防止

综合现有的研究成果改善激光熔覆层的应力状态和消除裂纹的方法有以下几种。

1) 合理地选择激光熔覆工艺参数。熔覆工艺参数主要包括功率、扫描速度、离焦量、光斑直径及大面积激光熔覆中搭接率等。这些参数对熔覆层质量的影响是相互关联的,在实际选取工艺参数时,根据覆层的几何尺寸和使用性能的要求,通过调整搭接率、激光功率、光斑的形状和尺寸、送粉速率和扫描速度来控制激光能量密度和作用时间,以达到最佳的熔覆层质量。

2) 合理设计熔覆材料的成分和组织。由于不同的熔覆材料具有不同的热物理参数(热膨胀系数、熔点弹性模量等),它们与基体材料在热物性上的差异越大,在熔覆过程中越易产生很大的内应力,从而

形成裂纹源,裂纹源扩展形成裂纹。熔覆材料体系的选择,须根据覆层要求的使用性能和工艺条件,合理选择热物性相近的熔覆材料,必要时可以融入适当的合金元素,以提高韧性相含量。同时,还可以制成梯度涂层,有效减少熔覆裂纹。

参考文献:

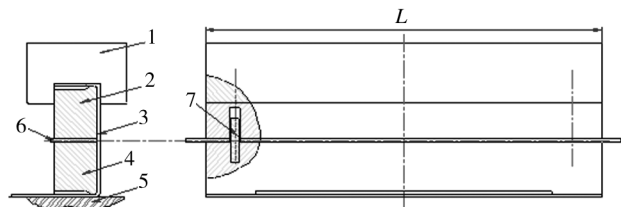
- [1] 吴祥海,李绍杰,刘其斌. 工艺参数对航空发动机叶片激光熔覆开裂敏感性的影响[J]. 现代机械, 2005(1): 76—78.
- [2] 刘富荣,高谦,高登攀,等. 激光熔覆 WC 增强复合涂层开裂行为分析[J]. 材料工程, 2003(5): 37—39.
- [3] 陶锡麒,陈培峰. 激光熔覆用钴基合金粉末的研究[J]. 材料保护, 2002, 35(10): 12—14.
- [4] 石世宏. 激光熔覆工艺与粉末对覆层开裂行为的影响[J]. 激光杂志, 1998, 19(3): 31—32.
- [5] PRZYBYLOWICZ J, KUSINSKI J. Structure and Properties of Laser Cladded Al_2O_3 -CoCrAlY Composite Ceramic Coatings on W18Cr4V Steel[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 1999, 27(4): 445—451.
- [6] 宋武林,周刚. 铁基合金中 Creq/Nieq 对其激光熔覆层组织结构和开裂敏感性的影响[J]. 激光技术, 1999, 23(3): 142—145.
- [7] 陈传忠,王文中,曹怀华,等. 激光熔覆 Al_2O_3 -NiCrAl 层的脆性及摩擦磨损特性[J]. 中国激光, 1999, 26(9): 841—846.
- [8] 刘其斌,朱维东,陈江. 高温合金激光熔覆涂层中裂纹防止方法的研究[J]. 贵州工业大学学报(自然科学版), 2000, 29(5): 26—29.
- [9] FENG Li-ping, HUANG Wei-dong, LIN Xin, et al. Laser Multi-layer Cladding Experiment on the DD3 Single Crystal Using FGH95 Powder: Investigation on the Microstructure of Single Crystal Cladding Layer[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2002, 15(2): 121—127.
- [10] GÄUMNN M, BEZENCON C, CANALIS P, et al. Single-crystal Laser Deposition of Superalloys: Processing-microstructure Maps[J]. Acta Mater, 2001, 49(6): 1051—1062.
- [11] 徐志刚,王茂才. 镍基高温合金 K17 的激光熔覆处理热裂纹敏感性研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 1996, 8(1): 54—58.
- [12] 宋武林,章桥新. 激光熔覆层热膨胀系数对其开裂敏感性的影响[J]. 激光技术, 1998, 22(1): 34—36.
- [13] 袁斌,龚知本. 铝硅钛合金表面激光熔覆 G312 铁基合金的研究[J]. 激光杂志, 1999, 20(2): 33—34.

形,一个工作循环结束。再按前面的顺序依次循环,进行生产。

4 工艺及模具特点

该模具及工艺有如下显著特点。

- 1) 充分利用了现有折弯机施力范围狭长的特点,使压力更集中,成形效果更好。
- 2) 采用对称设计,模具便于加工,使用安全性好。
- 3) 模具结构简单,制造成本低,适于小批量生产。
- 4) 一模多用,可满足该产品中 2 个零件的成形加工,如图 4 所示。图中工件为不等边单面凸包 U



1. 凸模 1 2. 凹模 1 3. 工件 4. 凹模 2 5. 工作台 6. 垫板 7. 导向销

图 4 模具结构示意

Fig. 4 Mould structure

型结构。生产时,按图 4 结构装夹即可完成零件的凸包成形。

5) 采用该工艺消除了冲凸包“扛刀”的隐患。

6) 零件受力对称,不易产生零件失稳或微量偏移,提高了成形精度,且稳定性好。

5 结语

用该模具生产的零件外观质量良好,尺寸符合图纸要求。

采用该工艺路线和成形模具能有效解决“U”型凸包零件在成形过程中易产生失稳及扛刀等工艺缺陷问题,明显提高了其变形程度和抗失稳能力,同时有助于提高生产效率,降低生产成本。

经实际使用证明,工艺及模具结构均能满足生产要求,且生产效率与产品质量都有很大提高。

参考文献:

- [1] 潘宪曾. 冲压模具设计与制造手册(第 2 版)[M]. 北京:机械工业出版社,1999:124—127.
- [2] 冯炳尧,韩泰荣,蒋文森. 模具设计与制造简明手册(第 2 版)[M]. 上海:上海科学技术出版社,2007:244—245.
- [14] 宋光明,吴钢,黄婉娟. 单向送粉双向扫描激光熔覆工艺防止裂纹的试验研究[J]. 金属热处理,2005,30(5):26—28.
- [15] 王慧萍,戴建强,张光钧,等. 激光熔覆制备纳米 WC/Co 复合涂层的研究[J]. 实验室研究与探索,2005,24(12):21—24.
- [16] 刘其斌,李绍杰. 航空发动机叶片铸造缺陷激光熔覆修复的研究[J]. 金属热处理,2006,31(3):52—55.
- [17] 陈静,林鑫. 316L 不锈钢激光快速成形过程中熔覆层的热裂机理[J]. 稀有金属材料与工程,2003,32(3):183—186.
- [18] 张永忠,石力开,张萍之,等. 激光快速成形镍基高温合金研究[J]. 航空材料学报,2002,22(1):22—25.
- [19] 王华明. 金属材料激光表面改性 with 高性能零件激光快速成形技术研究进展[J]. 航空学报,2002,23(5):473—478.
- [20] 邓迟,王勇. 稀土对激光熔覆生物陶瓷涂层纵截面组织形貌的影响[J]. 表面技术,2006,35(2):31—33.
- [21] 钟敏霖,刘文今. 45 kW 高功率 CO₂ 激光熔覆过程中裂纹行为的实验研究[J]. 应用激光,1991,19(5):193—197.

(上接第 43 页)