铁镍梯度材料抗低应力多冲碰撞塑性变形性能研究

张倩茹，傅戈雁

（苏州大学 机电工程学院，江苏 苏州 215021）

摘　要：目的　研究梯度材料抗低应力多冲碰撞塑性变形能力。**方法**　对纯铁材料、铁镍突变材料和铁镍梯度材料进行多次冲击碰撞试验，分析 3 种材料的累积变形量、不同层深处的应变和形变硬化程度、表面微观组织。**结果**　总形变量、不同层深处的应变和形变硬化程度方面，纯铁材料略大于铁镍突变材料，远大于铁镍梯度材料。铁镍突变材料和纯铁材料表层为单相多晶组织，且界面密度较小；铁镍梯度材料表层为多相多晶组织，且界面的密度大，其形变被抑制。**结论**　铁镍梯度材料的抗低应力多冲碰撞塑性变形的能力最强，铁镍突变材料次之，纯铁材料最差。

关键词：低应力多冲碰撞；塑性变形；梯度材料

中图分类号：TG174.44　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001-3660(2014)06-0028-05

Research of Resistance to Plastic Deformation of Iron-Nickel Gradient Materials under the Low and Repeated Impact Stress

ZHANG Qian-ru, *FU Ge-yan*

(Mechanical and Electrical Engineering, Soochow University, Suzhou 215021, China)

ABSTRACT: Objective To study the resistance to plastic deformation of iron-nickel gradient materials under the low and repeated impact stress. **Methods** Repeated impact tests were conducted on pure iron material, iron-nickel mutation material and iron-nickel gradient material. The cumulative deformation, strain and deformation hardening degree with different depths, and the surface microstructure were analyzed and compared. **Results** The total deformation, strain and deformation hardening degree with different depths of the pure iron material were a little larger than those of the iron-nickel mutation material, and much larger than those of the iron-nickel gradient material. The surface of the pure iron material and the iron-nickel mutation material was single-phase polycrystalline structure and the density of interface was small. The surface of the iron-nickel gradient material was multiphase polycrystalline structure, the density of interface was larger, and the plastic deformation was more suppressed. **Conclusion** For the resistance ability to plastic deformation under the low and repeated impact stress, the iron-nickel gradient material was the strongest, followed by the iron-nickel mutation material, and the pure iron material specimen was the worst.

KEY WORDS: repeated impact under low stress; plastic deformation; gradient material

---

收稿日期：2014-07-02；**修订日期：**2014-09-13

Received: 2014-07-02; **Revised**: 2014-09-13

基金项目：国家自然科学基金项目(11172191)；江苏省科技支撑计划(BE2012068)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China(11172191) and Jiangsu Science and Technology Support Program(BE2012068)

作者简介：张倩茹(1991—)，女，镇江人，硕士，主要研究方向为材料表面工程。

Biography: ZHANG Qian-ru (1991—), Female, from Zhenjiang, Master, Research focus: material surface engineering.

通讯作者：傅戈雁(1959—)，女，邵阳人，博士，教授，主要研究方向为材料表面工程。

Corresponding author: FU Ge-yan(1958—), Female, from Shaoyang, Ph. D., Professor, Research focus: material surface engineering.

经典塑性理论认为:只有当外加载荷达到或超过材料的屈服极限以后,材料才会发生不可恢复的永久性宏观塑性变形。但在工程应用中,发现在多冲碰撞的工况下,即使在应力远小于屈服极限时,材料仍会发生宏观塑性累积变形而失效[1—3],给实际生产带来经济损失和安全隐患。

目前,一般采用整体强化和表面强化的方式来提高零构件抗低应力多冲碰撞的能力[1,4—7]。然而,这两种方法都存在一定的缺陷:整体强化成本较高,易导致韧性不足;涂层表面强化由于结合面处的应力集中,导致涂层开裂或剥落,使涂层失效。

鉴于材料低应力多冲碰撞塑性变形的"趋表效应"以及功能梯度材料的各种优异性能[8—10],文中提出采用两种材料逐级梯度变化,抑制结合面处的应力集中,提高不同材料之间的结合强度,从而提高零构件抗低应力多冲碰撞塑性变形的性能。

1　实验

实验采用自制的凸轮驱动式多冲碰撞试验机,其原理如图 1 所示。工作时,电动机驱动凸轮转动,凸轮与圆柱销相互作用,带动轴上下往复运动,从而使重物和冲头上下往复运动,对下方的试件进行反复多次冲击。试验机可通过控制电机的转速调整冲击频率,通过控制重物的质量、冲头和试件之间的距离来调整冲击力。

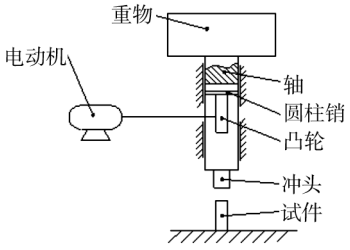
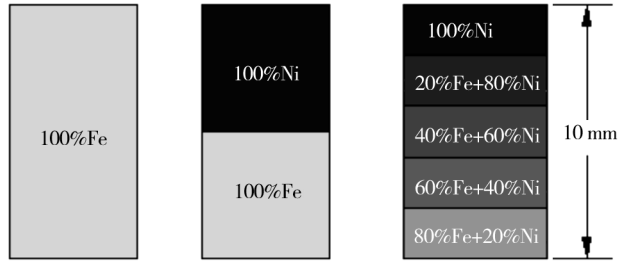


图 1　凸轮驱动式多冲碰撞试验机原理示意

Fig. 1 Schematic of the cam-driven repeated impact test machine

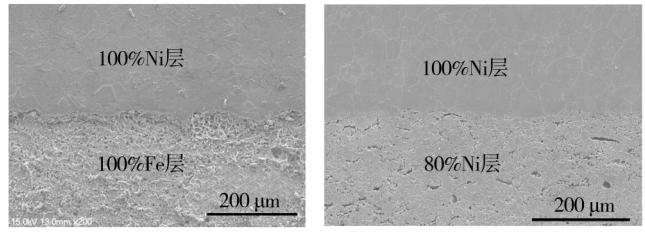
实验中 3 种材料试件均采用对粉末进行放电等离子烧结(SPF)[16—17]的方法进行制备。纯铁材料、铁镍突变材料、铁镍梯度材料采用纯铁粉(纯度大于 99.9%)和纯镍粉(纯度大于 99.8%)按成分设计的比例(如图 2 所示,其中比例均为质量分数,全文同)进行球磨混合,逐层铺设烧结。对铁镍突变材料和铁镍梯度材料截面进行扫描电镜分析,可以看到清晰的分层,如图 3 所示。其中,突变材料的过渡区存在较多的孔洞,而梯度材料的组织较致密,层间结合相对较好。



a 纯铁材料　　b 铁镍突变材料　　c 铁镍梯度材料

图 2　3 种材料成分分布

Fig. 2 Composition distribution of the three kinds of material



a 100%Ni-100%Fe过渡区　　b 100% Ni-80% Ni过渡区

图 3　试件过渡区的 SEM 形貌

Fig. 3 SEM micrographs of the specimen transition zone

采用激光刻线的方法,在试件的侧面刻上均匀的网格,网格尺寸为 0.5 mm×0.5 mm。试件被均匀划分成不同的层,层高即为 0.5 mm,如图 4 所示。通过测量冲击碰撞前后试件上网格层高的变化计算试件的形变。

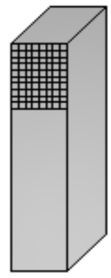


图 4　试件网格形貌

Fig. 4 Morphology of the specimen grid

碰撞应力为 50 MPa,频率为 4 Hz,次数间隔分别为 2×10^3,4×10^3,8×10^3,16×10^3,32×10^3,…,碰撞次数按 2 的幂级数递增,直至不再发生碰撞形变,试验停止。每次碰撞间隔均需取下试样,用体式显微镜对网格进行放大并拍摄照片,将网格照片导入图像处理

软件,测量每层网格的高度。用显微硬度计测量试件不同层深处的硬度值。

2 结果与讨论

2.1 试件累积形变分析

根据不同冲击次数下试件的层高数据,可以计算试件的累积形变量,并绘制出累积形变量随冲击次数变化的关系曲线(如图 5 所示)。累积形变量计算公式如下:

$$\Delta_{总}=\sum_{i=1}^{n}h_{i0}-\sum_{i=1}^{n}h_{if}\quad(i=1,2,\cdots,n)$$

式中:$\Delta_{总}$ 为累积形变量,h_{i0}为第 i 层网格初始高度,h_{if}为距表层不同的深度处第 i 层网格变形后高度,n 为参与变形的层数。

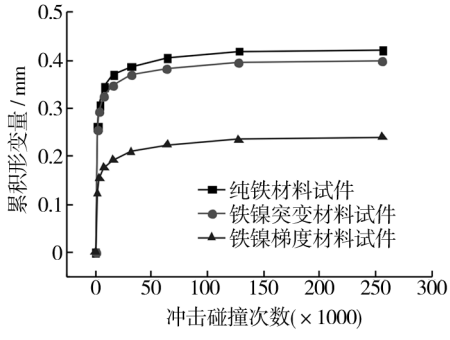


图 5 各试件累积形变量与冲击碰撞次数的关系

Fig. 5 Relationship between the cumulative deformation and the number of collisions for each specimen

由图 5 可见,3 种材料的累积变形规律相同,累积形变量随碰撞次数的增加而增加;形变量变化(曲线斜率)随冲击次数的增大而减小,达到一定冲击次数后,形变量的变化为零,累积形变量趋于某一恒定值。纯铁材料、铁镍突变材料、铁镍梯度材料的总形变量分别为 0.421,0.398,0.240 mm。

2.2 试件距表层不同深度处的应变分析

由各试件累积形变量趋于稳定后的层高数据,可以求得试件各层(距表层不同深度处)的应变 ε_{if},计算公式如下:

$$\varepsilon_{if}=\frac{h_{i0}-h_{if}}{h_{i0}}\quad(i=1,2,\cdots,n)$$

3 种材料试件应变与层深的关系如图 6 所示。由图 6 可见应变随层深的变化规律基本相同,最大应变出现在碰撞表面,随着距冲击表面深度(层深)的增加,应变逐渐减小至零,具有“趋表效应”。纯铁材料、铁镍突变材料、铁镍梯度材料的最终表层最大应变分别为 20.89%,19.41%,12.07%,3 种材料试件的形变终止层深分别为 9.0,8.5,7.5 mm。

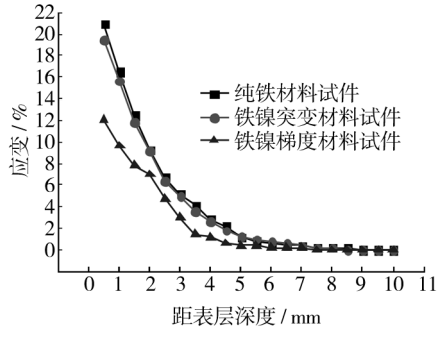


图 6 各试件应变与层深的关系

Fig. 6 Relationship between strain and layer depth for each specimen

2.3 形变硬化分析

采用 HXD-1000B 数字显微硬度计测量冲击前后不同层深下的硬度值,测量时硬度计加载 300 g,维持载荷 15 s。同一层深处取 3 点进行测量,取平均值。通过冲击前后的硬度值可计算出各试件不同层深下的硬化程度,计算公式如下:

$$\Delta H=H_{if}-H_{i0}\quad(i=1,2,\cdots,n)$$

式中:ΔH 为试件第 i 层网格的硬化程度,H_{if}为距表层不同深度处第 i 层网格最终变形后硬度值,H_{i0}为第 i 层网格初始硬度值,n 为参与变形的层数。

图 7 为 3 种材料试件不同层深的硬度变化。由图 7 可见,3 种材料试件的硬化程度总体上都随距碰撞表层深度的增加而减小,最终趋于零。硬化是伴随着塑性变形而产生的,因此硬化程度随距表层深度的变化规律基本与应变随距表层深度的变化规律一致,

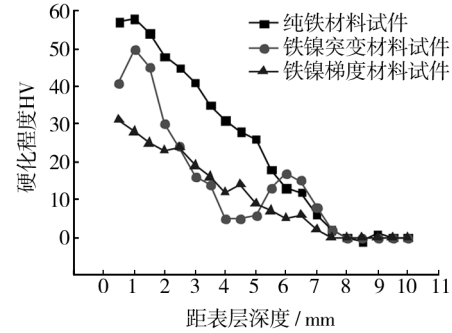


图 7 各试件的硬化程度与距表层深度的关系

Fig. 7 Relationship between the degree of hardening and the depth from the surface layer for each specimen

具有“趋表效应”。

3 种材料试件的最大应变均在冲击表层,其中纯铁材料和铁镍突变材料的硬化程度最大处均在距冲击表面 1 mm 处,即冲击次表层处。由于多次冲击碰撞后试件表面可能出现了坑蚀、微裂纹、剥层等缺陷[3],这些缺陷导致表层材料硬化程度减小;而次表层不存在这些缺陷,因此硬化程度达到最大。

铁镍突变材料试件在突变界面 5 mm 后,铁镍梯度材料在梯度过渡界面 2,4,6 mm 后,硬化程度均有起伏,新区域的最大硬度均处在靠近过渡界面后的某一层深处,而铁镍突变材料的硬化程度起伏较大,铁镍梯度材料硬化程度起伏较小。这是由于:1)新材料的强度相对变小,故形变量有所增加,硬化程度有所增加,出现起伏;2)材料变化的界面处有稀松的孔洞,硬化程度有所减小,所以材料出现变化后,最大硬度未出现在新材料的表层而是在次表层;3)铁镍突变材料在结合面处的材料成分变化比铁镍梯度材料大,强度变化也比铁镍梯度材料大,且突变材料的过渡区存在较大的孔洞(如图 3 所示),而梯度材料的组织较致密,所以铁镍突变材料的硬化程度起伏比铁镍梯度材料大。

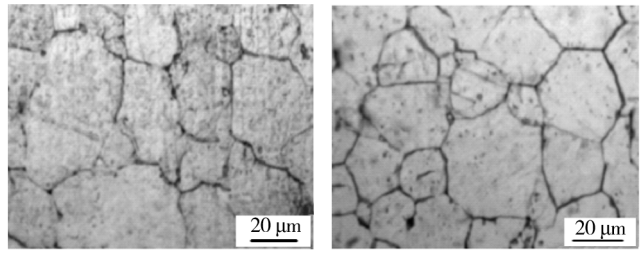
最终各试件表层形变硬度如下:纯铁材料 57HV,铁镍突变材料 41HV,铁镍梯度材料 31HV。总体上试件形变硬化程度由大到小依次为:纯铁材料、铁镍突变材料、铁镍梯度材料。纯铁材料试件的形变硬化终止层深约为 8.5 mm,铁镍突变材料试件的形变硬化终止层深约为 8 mm,铁镍梯度材料试件的形变硬化终止层深约为 7.5 mm。

2.4　微观组织分析

图 8 为通过光学显微镜(OLYMPAUS GX51)观察到的铁镍突变材料试件中 Ni 层冲击碰撞前后的金相微观组织。冲击碰撞前晶粒较粗大均匀,而多次冲击碰撞后晶粒出现了明显的碎化。塑性变形的产生主要是由于位错的滑移,位错在滑移时遇到晶界阻碍产生堆积,便会产生应力集中,当应力达到一定数值时,就会促使晶粒碎化。

图 9 为铁镍梯度材料试件表层的多相多晶组织。铁镍梯度材料试件表层单位面积上的界面(晶界和相界)数多于铁镍突变材料试件表层。

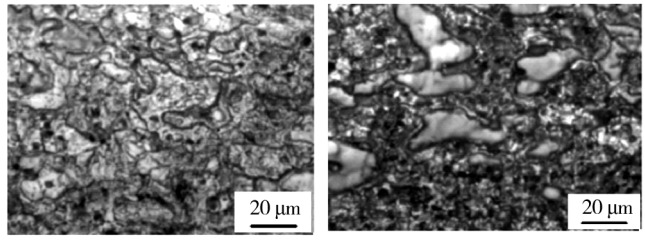
多晶体的形变需克服界面的阻碍,克服界面能。界面能由两部分组成:一部分是不同相之间因同类键、异类键的结合强度和数量变化引起的化学能,另一部分是由界面原子的不匹配产生的点阵畸变能。单相晶体的界面能只有因界面原子的不匹配产生的点阵畸变能,而多相晶体的界面能包括化学能和点阵畸变能两部分,因此多相晶体的界面能高于单相晶体。界面能越高,应变能越低,即形变需克服的能量越高,形变越难。故多相晶体对形变有一定的抑制作用。铁镍梯度材料表层的界面密度多于铁镍突变材料表层,对变形的阻碍更多。



a　冲击碰撞前(400×,王水腐蚀)　　b　冲击碰撞后(400×,王水腐蚀)

图 8　铁镍突变材料试件冲击碰撞前后表层(100% Ni)的微观组织

Fig. 8　The microstructure of the collision surface (100% Ni) of the iron-nickel mutation material specimen before and after the impact



a　冲击碰撞前(400×,王水腐蚀)　　b　冲击碰撞后(400×,王水腐蚀)

图 9　铁镍梯度试件冲击碰撞前后表层(20% Ni 与 80% Fe)的微观组织

Fig. 9　The microstructure of the collision surface (20% Ni and 80% Fe) of the iron-nickel gradient material specimen before and after the impact

因此铁镍梯度材料试件的低应力多冲塑性形变比铁镍突变材料试件和纯铁试件相对要小。

3　结论

通过对于铁镍梯度材料、纯铁材料、铁镍突变材料试件的总形变量、不同层深处的应变及硬化程度、应变及形变硬化终止层深的分析表明,对于抗低应力多冲碰撞塑性变形的能力,铁镍梯度材料最强,铁镍突变材料次之,纯铁材料最差。

参考文献

[1] 李学敏. 冲击载荷下热喷涂涂层的塑性变形行为分析[J]. 甘肃工业大学学报,1997(2):25—30.
LI Xue-min. Analysis of Plastic Deformation Behavior of Thermal Spray Coatings under Impact Load [J]. Journal of Gansu University of Technology,1997(2):25—30.

[2] 傅戈雁,石世宏,欧阳八生,等. 覆层零件多冲碰撞试验与失效特征[J]. 材料科学与工程学报,2004,22(2):216—219.
FU Ge-yan, SHI Shi-hong, OUYANG Ba-sheng, et al. Repeated Impact Test and Failure Characteristic of Mechanical Components with Cladding Layer[J]. Journal of Materials Science and Engineering,2004,22(2):216—219.

[3] 刘磊. 低应力多碰宏观塑性变形理论研究与建模[D]. 苏州:苏州大学,2010.
LIU Lei. Study on Repeated Impact Test and Low Stress Macroscopic Plastic Deformation and Modeling [D]. Suzhou: Soochow University,2010.

[4] 王爱华,谢长生,李树栋. 铝合金表面激光熔覆 Fe-Al 青铜过渡区的组织结构及其在小能量多冲作用下的行为[J]. 稀有金属材料与工程,1999,28(5):289.
WANG Ai-hua, XIE Chang-sheng, LI Shu-dong. Organizational Structure and Behavior under Small Energy Multi-impact of Laser Cladding Fe-Al Bronze Transition Zone on Aluminum Alloy Surface[J]. Rare Metal Materials and Engineering,1999,28(5):289.

[5] ZENKER R,SACHER G,BUCHWALDER A ,et al. Hybrid Technology Hard Coating—Electron Beam Surface Hardening [J]. Surface and Coatings Technology, 2008, 2 (4): 804—808.

[6] BANTLE R, MATTHEWS A. Investigation into the Impact Wear Behavior of Ceramic Coatings[J]. Surface and Coatings Technology,1995,74 (2):857—868.

[7] 李珍,陈跃,上官宝,等. 铸钢表面 WC-高碳铬铁铸渗层冲击的磨损性能[J]. 表面技术,2005,34(4):32—34.
LI Zhen, CHEN Yue, SHANGGUAN Bao, et al. Impact Wear Resistance of Tungsten-hi-Cr Cast Iron Compound Layer on the Cast Steel[J]. Surface Technology, 2005, 34 (4):32—34.

[8] 石世宏,傅戈雁,欧阳八生. 多冲接触载荷下涂层零件低应力宏观塑性行为[J]. 机械工程学报,2005,41(4):137—142.
SHI Shi-hong, FU Ge-yan, OUYANG Ba-sheng. Low Stress Macroscopic Plastic Behavior of Coated Part under Repeated Impact Contact Load[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2005,41(4):137—142.

[9] 傅戈雁,石世宏,唐卫东. 激光涂层零件的多冲碰撞形变效应与分析[J]. 激光杂志,2005,26(4):79—81.
FU Ge-yan, SHI Shi-hong, TANG Wei-dong. Repeated Impact Deformation Effect and Analysis of Laser Coating[J]. Laser Journal,2005,26(4):79—81.

[10] 卢华强. 多碰载荷下 45 钢的分层塑性响应及机理分析[D]. 苏州:苏州大学,2011.
LU Hua-qiang. The Layered Plastic Response and Mechanism for Multi-touch Load of 45 steel[D]. Suzhou: Soochow University,2011.

[11] 师昌绪. 材料大词典[M]. 北京:化学工业出版社,1994.
SHI Chang-xu. Materials Dictionary[M]. Beijing: Chemical Industry Press,1994.

[12] FU Z Y,LIU J P,ZHANG J Y,et al. Fabrication of (TiB_2-Fe)/Fe Functional Gradient Material by SHS/QP[J]. Key Engineering Materials,2003,249:105—108.

[13] SHEN Q,ZHANG L M,TAN H,et al. Preparation of Mg-Ti System Alloy and FGM with Density Gradient by Spark Plasma Sintering Technique[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Materials Science Edition), 2004, 19 (1):58—60.

[14] TAKAGI K,LI J F,YOKOYAMA S,et al. Fabrication and Evaluation of PZT/Pt Piezoelectric Composites and Functionally Graded Actuators[J]. Journal of the European Ceramic Society,2003,23(10):1577—1583.

[15] 徐智谋,郑家燊,张联盟. 功能梯度材料和低温制备研究现状及展望[J]. 表面技术,2000,29(2):1—5.
XU Zhi-mou, ZHENG Jia-shen, ZHANG Lian-meng. Research Status and Prospect of Functionally Gradient Materials and Fabrication Techniques under Low Temperature [J]. Surface Technology,2000,29(2):1—5.

[16] 林文松. 功能梯度材料涂层制备技术的研究进展[J]. 表面技术,2004,33(4):7—9.
LIN Wen-song. Development of Preparation Technology of Functionally Gradient Materials [J]. Surface Technology, 2004,33(4):7—9.

[17] 冯海波,周玉,贾德昌. 放电等离子烧结技术的原理及应用[J]. 材料科学与工艺,2003,11(3):327—331.
FENG Hai-bo,ZHOU Yu,JIA De-chang. Principle and Application of Spark Plasma Sintering Technology[J]. Materials Science and Technology,2003,11(3):327—331.