

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2018.06.002

基于爆炸焊接技术对磨损失效轧辊的修复研究^{*}

王宇新^① 李晓杰^① 王小红^① 闫鸿浩^① 范述宁^②

①大连理工大学工程力学系(辽宁大连,116024)

②太原钢铁(集团)有限公司复合材料厂(山西太原,030003)

[摘 要] 为了提高轧辊的修复质量和降低工艺成本,采用爆炸焊接技术对磨损失效的轧辊进行修复,在轧辊基体上爆炸复合耐磨性和强度较好的金属管,对轧辊进行修复。本文中,基于爆炸焊接理论分析、数值计算和实验开展轧辊修复的研究,并在连轧生产线上实际运行检验。与堆焊技术修复的轧辊相比,采用爆炸焊接技术修复的轧辊耐磨性和抗腐蚀性都比较高。

[关键词] 爆炸焊接;轧辊修复;复合管;焊接窗口

[分类号] TG456.6

Study on Repair of Worn Roller Using Explosive Welding Technology

WANG Yuxin^①, LI Xiaojie^①, WANG Xiaohong^①, YAN Honghao^①, FAN Shuning^②

① Department of Engineering Mechanics, Dalian University of Technology (Liaoning Dalian, 116024)

② Composite Material Factory, Taiyuan Iron & Steel (Group) Co., Ltd. (Shanxi Taiyuan, 030003)

[ABSTRACT] Explosive welding technology was used for the repair of roller failed by wearing to improve the quality and cut cost. The roller was repaired by blast cladding high strength metal pipe with good wear-resistance. Research for roller repairing was carried out based on the theoretical analysis of explosive welding, numerical calculation and experiments. The repaired roller was successfully tested on a continuous casting production line. Compared with that repaired by hard-facing, the roller repaired by explosive welding has higher wearing and corrosion resistance.

[KEYWORDS] explosive welding; repair of roller; clad pipes; explosive welding window

引言

在钢铁企业的连续轧制生产线设备中,轧辊是重要部件,经过长时间作业后,轧辊除了由于冷热交替作用导致表面材料发生龟裂外,还会在轧制生产过程中受到周期性挤压摩擦力和液体腐蚀的作用,致使轧辊工作面发生磨损,甚至出现表层材料破损和剥落的现象,这也是轧辊磨损失效的主要形式。对于磨损失效的轧辊需要重新修复才能再次使用,传统的轧辊修复技术有热喷涂技术^[1]、激光表面熔覆技术^[2]和堆焊技术^[3]等几种方法。堆焊技术被广泛地用于轧辊修复,但是堆焊工艺实施比较复杂,生产效率不高,轧辊表面堆焊层容易产生气孔、夹渣

以及焊瘤等缺陷。

为了解决传统轧辊修复技术所遇到的问题,笔者采用爆炸焊接技术对磨损失效轧辊进行修复。轧辊爆炸焊接修复属于圆管爆炸复合技术。史长根对复合轧辊爆炸焊接做了初步实验,并给出了基本的爆炸焊接技术方案^[4];太原钢铁公司复合材料厂也采用爆炸焊接技术对磨损失效轧辊做了尝试性的实验研究。尽管取得了一些成果,但是要实现大批量修复和达到企业生产标准,还要从理论计算和实验分析等方面开展研究。

本文中,基于爆炸焊接理论、爆炸焊接窗口、软件数值计算和实验研究对磨损失效轧辊的爆炸焊接修复提出比较完善的技术工艺方法。据此,不仅可以提高轧辊修复效率和降低加工成本,还通过理论计算与实验研究相结合,应用爆炸焊接技术对连轧

^{*} 收稿日期:2018-07-24

基金项目:国家自然科学基金资金资助项目(11672067)

作者简介:王宇新(1972-),男,博士,副教授,从事爆炸冲击动力学研究。E-mail:wyxphd@dlut.edu.cn

通信作者:李晓杰(1963-),男,博士,教授,从事爆炸冲击动力学研究。E-mail:dalian03@qq.com

生产线上磨损失效的轧辊实现批量修复,这也是爆炸焊接理论与技术在轧制行业中新的应用与拓展。

1 爆炸焊接初试分析

为了研究轧辊爆炸焊接修复技术,太原钢铁集团有限公司复合材料厂对连轧生产线上常用的轧辊进行初试实验。爆炸焊接实验用的轧辊规格有两种:一种是外径 294 mm、长度 580 mm、中间为直径 90 mm 通孔的冷轧辊;另外一种为外径 310 mm、长度 880 mm、中间为直径 95 mm 通孔的热轧辊。轧辊的基体材料均为 42CrMo,轧辊表面耐磨材料是通过堆焊包覆厚度 5 mm 的 1Cr13Ni4Mo。当轧辊运转工作一段时间以后发生磨损,通常的修复方式是在轧辊表面重新堆焊一层 1Cr13Ni4Mo 材料。堆焊技术的修复周期较长,成本较高。为了摸索轧辊的爆炸焊接修复技术方法,先对外径 294 mm、长度 580 mm 的轧辊进行初试。复合管材料采用厚度 4 mm 的 3Cr13,轧辊表面做车削加工,车削厚度为 3 mm 左右。炸药组分为粉状铵油,爆速为 3 000 m/s,复合管与轧辊同轴装配,轧辊表面与复合管内壁间距为 1.0 mm。装药圆筒采用厚度 2 mm 的透明聚乙烯塑料,塑料卷成直径为 400 mm 的圆筒。为了保证装药密度均匀,铵油炸药需要沿着轴线方向环形均匀地向塑料圆筒中自然散落装药,装药厚度 50 mm。起爆雷管采用电雷管,置于轧辊顶端中心位置。表观检测:轧辊底端复合管材料出现断裂,两端轴头出现裂纹,沿着轧辊长度方向出现颈缩现象,从中间位置向两端测量外圆直径,尺寸逐渐缩小而呈现鼓形,最大尺寸差达到 5 mm,经无损检测,发现存在很多大小面积不等的不复合区,见图 1 所示。



图 1 磨损失效轧辊初次爆炸焊接实验
Fig.1 The preliminary explosion welding experiment for worn roller

轧辊爆炸复合要求复合率在 95% 以上,复合界面剪切强度大于 240 MPa。从爆炸焊接实验整体情况看,初次实验的轧辊颈缩尺寸公差和复合率都不满足技术要求,需要在爆炸焊接装配工艺和技术参数上加以改进。从实验的表观分析以及对复合界面进行检测的结果来看,存在的问题及原因如下:

1)轧辊爆炸焊接后出现较多面积不等的不复合区块,主要由于旧辊表面材料即使经过车削加工,原有的堆焊材料仍然有部分存在,并且在不同区域的残留厚度也不同,导致旧辊表面材料成分和硬度分布不均匀,并且残留的堆焊材料硬度要比轧辊基体材料硬度高很多。如果按照轧辊基体材料计算爆炸焊接窗口下限,那么得到的焊接下限数值就偏小,从而出现未复合区块大小不等的现象。为此,对轧辊基体材料沿着轴向长度方向选择了 8 个点进行布氏硬度检测,硬度测量值如表 1 所示。

表 1 轧辊基体表面硬度测量

Tab.1 Hardness measurement on the surface of roller matrix								
测点	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]	6 [#]	7 [#]	8 [#]
硬度	292	274	286	315	290	278	270	282

2)轧辊复合管材料表面出现断裂,由于 3Cr13 属于耐磨不锈钢材料,在使用供态进行爆炸复合时容易出现裂纹,需要在爆炸焊接之前做退火热处理,退火之后进行布氏硬度检测,硬度测量值见表 2。

表 2 复合管材料硬度测量

Tab.2 Hardness measurement of compound pipe material								
测点	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]	6 [#]	7 [#]	8 [#]
硬度	232	226	230	260	227	260	225	236

3)轧辊爆炸复合后出现颈缩和两端轴头断裂现象,两端直径大小相差 5 mm,主要是由于对轧辊和两端轴头部位未采取保护措施和炸药厚度偏大,从而导致轧辊基体变形较大。

根据初次轧辊修复的爆炸焊接实验结果,需要重新制定爆炸焊接工艺参数和轧辊爆炸焊接修复的结构装配工艺,才能保证磨损失效轧辊的修复质量。

2 理论计算

为了保证磨损失效轧辊爆炸焊接修复质量和满足连轧生产线的运转性能,在爆炸焊接实验之前,还需要进行理论分析和数值计算才能确定合理的爆炸焊接技术参数。虽然依靠多次实验也可以摸索出适当的爆炸焊接参数,但是这可能会耗费更多的时间和成本。理论计算主要包括轧辊基体材料 42CrMo 与复管材料 3Cr13 的爆炸焊接窗口、在滑移爆轰载荷作用下的复板飞行姿态、复板与基板的间距以及炸药的调配参数等。

2.1 计算爆炸焊接窗口

爆炸焊接窗口是指两种不同金属爆炸焊接的可焊参数范围,爆炸焊接窗口包括流动限、上限、下限和声速限 4 个参数,由此绘制出 4 条直线或曲线构成的封闭区域来确定不同金属爆炸焊接的可焊参数范围。爆炸焊接窗口一般采用半圆柱法、台阶法和小倾角法等实验方式来确定,随着爆炸焊接理论研究深入,将实验与理论计算相结合,同样可以确定不同双金属的爆炸焊接窗口^[5-8]。

关于双金属焊接窗口 4 个参数的理论计算方法,李晓杰等^[7,9-10]做了很多研究工作,并给出了相应的理论计算公式。本文中,公式里参数下标 1、2 表示基板和复板。

1) 焊接下限:基板与复板的碰撞速度 v_p 必须大于最小速度 $v_{p,min}$,这样复合界面才能形成金属微射流,焊接下限计算公式为

$$v_{p,min} = K_c \sqrt{\frac{H_v}{\rho}} \quad (1)$$

式中: H_v 为维氏硬度; K_c 为系数,其值与金属界面粗糙度与射流厚度的比值有关,通常取值在 0.6 ~ 1.2 之间,对于板厚超过 5 mm 的爆炸焊接,金属射流能减小复合界面粗糙度的影响, K_c 一般可以取 0.6。 ρ 为基板、复板中密度较小的金属板材的密度。

2) 流动限:复板与基板的碰撞点移动速度要大于最小数值 $v_{c,min}$,否则在复合界面碰撞点不能产生射流。流动限是界面碰撞点形成射流的重要条件,即要形成足够的驻点压力,使得碰撞点处金属发生熔化和塑性流动,通常驻点压力要大于材料静态屈服强度 σ_b 的 10 倍以上。在爆炸焊接实验中,驻点压力取强度较大、密度较小的金属材料作为判别条件,其计算公式为

$$v_{c,min} = \sqrt{2.0 K_v \frac{\max(\sigma_{b1}, \sigma_{b2})}{\min(\rho_1, \rho_2)}} \quad (2)$$

式中: K_v 为流动限系数。

3) 声速限:复板与基板的碰撞点移动速度小于材料声速才能形成射流,因此炸药爆速要小于材料声速。双金属爆炸焊接取两种材料较小声速作为对 v_c 的限制,声速限计算公式为

$$v_{c,max} = \min(c_{01}, c_{02}) \quad (3)$$

4) 焊接上限:焊接上限是用界面材料发生塑性流动所沉积的最大能量来衡量的,当复板与基板碰撞动能过大时,造成复合界面处材料塑性变形的沉积能量过高,当冲击载荷卸载以后,界面材料仍然处于热软化或者熔化状态,会导致复合界面过熔而发生开裂,根据碰撞界面材料传热理论,对复板与基板

的冲击动力学行为、能量沉积和传热过程进行计算,据此推导出焊接上限计算公式为

$$v_{p,max} = \frac{f}{v_c} \sqrt{1 + \frac{\rho_1 h_1}{\rho_2 h_2}} \sqrt[4]{\frac{\min(1, \frac{h_2 c_{01}}{h_1 c_{02}})}{h_1}} \quad (4)$$

式中: h_1 和 h_2 为基板和复板厚度; f 是与材料有关的实验系数,对于大部分金属材料取 0.039。

基于以上爆炸焊接窗口理论,首先对磨损失效轧辊的爆炸焊接窗口进行计算,轧辊基体材料为 42CrMo,复合外管材料为 3Cr13,在确定这两种金属材料的爆炸焊接窗口之前,需要通过实验测试材料性能参数,包括材料强度、硬度、密度、材料声速等,见表 3。

表 3 42CrMo 与 3Cr13 材料性能

Tab. 3 Material properties of 42CrMo and 3Cr13

参数	42CrMo	3Cr13
密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	7 850	7 750
布氏硬度	177	152
屈服强度 σ_b / MPa	762	540
材料声速 $c / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	5 196	5 315
表面系数 K_c	0.6	0.6
强度系数 K_v	10	10
厚度 H / mm	102	4

由于磨损失效的轧辊表面车削后,仍然残留一定厚度的堆焊材料 1Cr13Ni4Mo,轧辊表面硬度分布不均,如果按照轧辊基体材料硬度计算下限来设计爆炸焊接参数,则会出现初次实验中多块未复合区的现象。要对轧辊的车削表面进行多区域和多点测试,正如表 1 所测量的轧辊表面硬度,最大布氏硬度为 315,最小布氏硬度为 270。那么,确定轧辊 42CrMo 和复合管 3Cr13 的爆炸焊接窗口就需要按照轧辊表面的最大硬度来计算。本文中,应用自主研发的爆炸焊接工程分析软件 EWCAE 计算这两种金属的爆炸焊接窗口曲线^[9],见图 2。

图 2 中, v_p 为复板与基板在界面碰撞点处冲击速度, v_d 为炸药爆轰速度,42CrMo 与 3Cr13 爆炸焊接下限计算结果为 $v_{p,min} = 368 \text{ m/s}$;按上限函数曲线,爆炸焊接上限随着爆速增加而减小;爆炸焊接通常采用粉状铵油炸药,炸药爆速选择必须大于流动限并且小于声速限。基于工程实际经验,壁厚 4 mm 的 3Cr13 作为复合圆管,在调配炸药爆速时可以偏高一些。为了避免和减小轧辊结构变形,尽可能地减小炸药装药厚度,炸药爆速可以调制在 2 800 m/s 左右,装药厚度为 35 ~ 40 mm。根据图 2 爆炸焊接窗口曲线可知,复板与基板的碰撞点速度应该选择

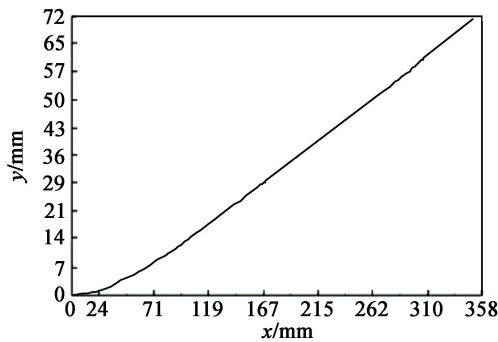


图 4 y - x 复管位移的变化

Fig.4 Displacement curve of compound pipe

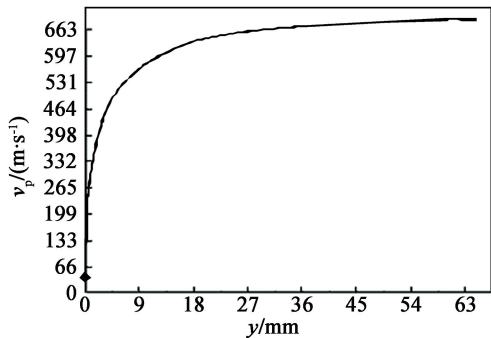


图 5 v_p - y 碰撞点速度与复管径向位移的关系

Fig.5 Relationship between impact velocity and radius displacement of compound pipe

根据图 4、图 5 的 2 条曲线就可以确定合理的碰撞点速度和炸高选取范围,由爆炸焊接理论和以往的工程实际经验可知,碰撞点速度和炸高两个技术参数范围选择在 v_p - y 碰撞点速度与径向位移曲线的加速段中后部区域比较合理。截取该数值计算曲线加速段区域,在该区域内复管径向飞行速度与径向位移关系的计算数据如表 4 所示。

表 4 复管碰撞点速度与径向位移关系的计算结果

Tab.4 Calculated impact velocity as a function of radial displacement for compound pipe

径向位移/mm	碰撞点速度 $v_p/(m \cdot s^{-1})$
1.02	257
1.50	300
2.03	338
2.55	367
3.22	397
4.06	427
5.16	457
6.07	476
7.17	496
8.50	515

根据 42CrMo-3Cr13 爆炸焊接窗口计算结果可知,两种材料的爆炸焊接下限计算值为 368 m/s,结

合复板飞行姿态特征线法的计算结果,可以得到复管径向位移与飞行速度的关系,即在滑移爆轰压力下复管径向速度变化,复管距离爆轰波头 O 点的飞行速度计算值就是碰撞点速度 v_p ,从图 5 中的 v_p - y 曲线和表 4 所列的计算数据可知,轧辊初次爆炸焊接实验所设计的炸高 1 mm(复合管内壁与轧辊外圆表面的间距)明显偏小,应该选择在 3 ~ 5 mm 之间比较合理。

3 轧辊修复爆炸焊接实验

3.1 实验方案

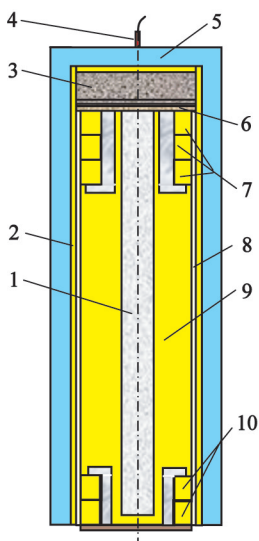
从磨损失效轧辊初试实验、爆炸焊接窗口和复管飞行姿态的计算结果来看,在爆炸焊接技术参数设计和结构装配工艺上需要改进,对外径 294 mm、长度 580 mm 的轧辊与长度 830 mm、壁厚 4 m、内径 308 mm 的 3Cr13 复合圆管在爆炸焊接实验之前进行炸药调制和结构装配,炸药采用粉状铵油炸药,装药密度 550 kg/m³,装药厚度 40 mm,爆速经过实际测量为 2 850 m/s,在复合外管内壁上下两端环向圆周与轧辊表面之间采用 3 ~ 5 mm 的炸高。由于轧辊中间存在通孔,为了减小轧辊基体的径向收缩变形,在轧辊中间通孔内注满清水,或者增加芯棒、沙子与水混合物等。

轧辊两端轴头不允许发生破坏和变形,在炸药爆轰压力的作用下,这两个部位容易发生变形和损坏,需要增加保护措施,可以使用钢制保护套将两端轴头保护起来。起爆方式采用顶端中心起爆,为了降低起爆炸药爆轰波对顶端轴头的影响,可以填充沙土或其他颗粒物质,并用圆盖板覆盖,基本的结构装配见图 6。

按照上述装配工艺和技术参数进行轧辊爆炸焊接修复实验,可以获得较好的复合质量和变形精度要求,见图 7。经过表观检查和尺寸测量,轧辊直径符合技术要求,两端轴头保护完好,轧辊基体直径尺寸缩减小于 1.0 mm,对轧辊复合界面进行无损检测,复合率达到 100%,完全可以满足轧辊修复的技术要求。

3.2 实验测试分析

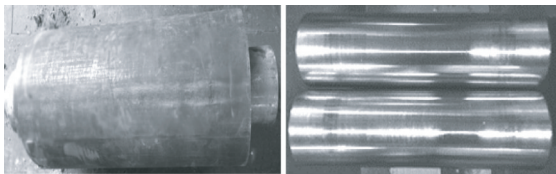
爆炸焊接复合后的轧辊还要进行切削加工和表面处理,为了提高复合轧辊工作面的硬度和耐磨性,对复层材料表面采用中频淬火热处理,淬火温度保持在 1 000 ~ 1 050 ℃ 之间。同时,对堆焊轧辊和爆炸焊接复合轧辊表面的布氏硬度进行测量,见表 5。



1 - 清水注满轧辊内腔;2 - 复管;3 - 沙土;4 - 电雷管;
5 - 铵油炸药;6 - 盖板;7 - 保护套;8 - 轧辊与复管间距;
9 - 轧辊基体;10 - 保护套。

图 6 轧辊爆炸焊接修复结构装配图

Fig. 6 Structure assembly drawing of explosion welding to repair roller



(a) 爆炸复合后 (b) 加工并热处理后

图 7 爆炸焊接修复的轧辊

Fig. 7 Repaired roller by explosive welding

表 5 堆焊轧辊与爆炸焊接修复的轧辊
工作面布氏硬度测量

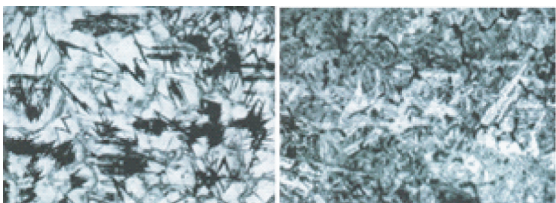
Tab. 5 Hardness measurement on working surface of repaired rollers by hard-facing and by explosive welding

测点	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]	6 [#]
爆炸焊接轧辊	510	516	520	542	505	515
堆焊轧辊	340	320	370	393	402	326

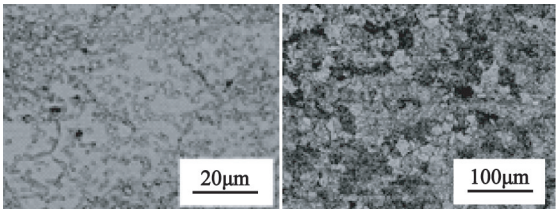
从两种轧辊工作面的硬度测量结果可知,爆炸焊接修复的轧辊工作面硬度高于堆焊轧辊工作面的硬度,而且堆焊轧辊工作面不同测点的硬度值相差比较大,这也说明了在堆焊过程中材料存在着不均匀性。

接下来,对这两种轧辊复层材料和堆焊材料的金相组织进行分析,分别取样制作金相试块,并拍摄金相照片,见图 8。

从金相组织照片看,堆焊层金属材料晶粒粗大并且不均匀,容易出现微裂纹,抗腐蚀能力差,爆炸



(a) 焊丝 H25Cr3Mo2MnV 堆焊层^[12]



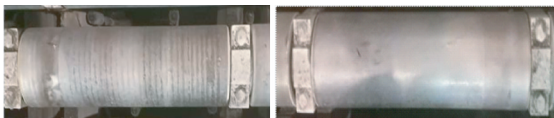
(b) 爆炸焊接轧辊复管

图 8 堆焊材料与爆炸焊接的复管金相图

Fig. 8 Metallographic comparison between hard-facing material and compound pipe material

焊接复管金属材料组织晶粒细小而均匀。由此可见,爆炸焊接修复轧辊的复层材料性能要优于堆焊修复轧辊的堆焊材料。

为了进一步检验爆炸焊接修复轧辊工作状态的运转情况,将其投入到连轧生产线上连续试用 30 d,并与同一生产线采用堆焊修复的轧辊进行实测对比,见图 9。



(a) 堆焊轧辊 (b) 爆炸焊接修复轧辊

图 9 堆焊轧辊与爆炸焊接修复轧辊性能对比

Fig. 9 Performance comparison between repaired rollers by hard-facing and by explosive welding

从两种轧辊在连轧生产线上连续运转测试情况看,爆炸焊接修复的轧辊工作面保持完好,复层材料没有剥落和开裂等现象,工作面也没有出现明显的磨损与腐蚀问题。而采用堆焊修复的轧辊表面出现了微裂纹和明显的焊道条纹,而且堆焊材料层表面存在轻微的磨损和液体腐蚀,出现这些问题的主要原因还是与堆焊层材料本身存在金相组织缺陷和微裂纹有关。

4 结论

爆炸焊接技术修复磨损失效轧辊也是爆炸加工技术应用领域的拓展;与传统的热喷涂、堆焊、激光熔覆等技术工艺相比,爆炸焊接修复的成本相对较

低,生产周期短,可以批量生产,而且轧辊修复的质量高。经过企业在连续轧制生产线上实际运转检验,爆炸焊接修复的轧辊工作性能良好,与传统堆焊技术修复的轧辊相比,稳定性、耐磨性和抗腐蚀性都得到大幅度提高。

此外,在磨损失效轧辊修复的爆炸焊接实验中,通过自主研发的爆炸焊接工程分析软件 EWCAE 进行数值计算,根据计算数据和曲线可以制定合理的爆炸焊接技术工艺参数,改变了过去单纯依赖实验方式或经验公式计算的不足,也大大提高了爆炸复合的质量和效率。基于计算机辅助分析手段,对于金属爆炸焊接新产品开发与应用也具有重要的促进作用,这也是爆炸焊接生产企业应该加强的方面。

参 考 文 献

- [1] 陈新倬, 门正兴, 赵欣, 等. 轧辊循环利用技术发展[J]. 大型铸锻件, 2015, 3(2): 20-22.
CHEN X Z, MEN Z X, ZHAO X, et al. Development of roll recycling technology[J]. Heavy Casting and Forging, 2015, 3(2): 20-22.
- [2] 陈长军, 张敏, 张诗昌, 等. 轧辊的失效及其激光修复与强化技术[J]. 物理测试, 2009, 27(1): 1-4.
CHEN C J, ZHANG M, ZHANG S C, et al. Failure of roller and laser hardening and repairing technology[J]. Physics Examination and Testing, 2009, 27(1): 1-4.
- [3] 成中庚. MC5 冷轧工作辊局部堆焊修复焊条研制[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014: 15-35.
CHENG Z G. Development of the electrode for part surfacing repair of MC5 cold working roll[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014: 15-35.
- [4] 史长根. 3Cr13Mo-42CrMo 高耐磨耐蚀爆炸焊接复合轧辊试验研究[J]. 爆破器材, 2010, 39(5): 28-30.
SHI C G. Trial study of high wear-resisting and acid-resisting cladding rolling of 3Cr13Mo-42CrMo in explosivewelding[J]. Explosive Materials, 2010, 39(5): 28-30.
- [5] T Z 布拉齐恩斯基. 爆炸焊接成型与压制[M]. 李富勤, 吴柏青, 译. 北京: 机械工业出版社, 1988.
T Z BULAJIC BYRNESS KI. Explosive welding forming and suppress[M]. LI F Q, WU B Q, translated. Beijing: Machinery Industry Press, 1988.
- [6] 赵铮, 王金相, 杭逸夫, 等. 双金属复合板爆炸焊接窗口研究[J]. 科学技术与工程, 2009, 9(5): 1126-1130.
ZHAO Z, WANG J X, HANG Y F, et al. Research on explosive welding window of bimetal composite plate[J]. Science Technology and Engineering, 2009, 9(5): 1126-1130.
- [7] 李晓杰, 杨文彬, 奚进一, 等. 双金属爆炸焊接下限[J]. 爆破器材, 1999, 28(3): 22-26.
LI X J, YANG W B, XI J Y, et al. The lower limit of explosive welding parameter window for bimetal[J]. Explosive Materials, 1999, 28(3): 22-26.
- [8] 汪旭光. 爆破设计与施工[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2015: 487-507.
WANG X G. Blasting design and construction[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2015: 487-507.
- [9] 王宇新, 李晓杰, 闫鸿浩, 等. 爆炸焊接 CAE 软件开发及工程应用[J]. 工程爆破, 2018, 24(1): 1-7.
WANG Y X, LI X J, YAN H H, et al. Research and development of CAE software for explosive welding[J]. Engineering Blasting, 2018, 24(1): 1-7.
- [10] 王宇新, 杨文彬, 李晓杰. 爆炸焊接二维复板飞行姿态计算机仿真[J]. 爆破器材, 1999, 28(5): 1-4.
WANG Y X, YANG W B, LI X J. Two-dimensional simulation for attitude of flying plate in explosive welding[J]. Explosive Materials, 1999, 28(5): 1-4.
- [11] 赵春风. 基于通用状态方程的爆炸焊接特征线法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2010: 16-24.
ZHAO C F. Study of characteristic method based on universal equation of state for explosive welding [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010: 16-24.
- [12] 龚建勋. 时效硬化耐磨堆焊焊条的研制[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2002: 21-28.
GONG J X. Development of age hardening wear resistance electrode for hardfacing[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2002: 21-28.