

金属基带的连续非接触式电化学抛光

高永超, 程好, 杨淑平, 庄维伟, 蔡渊, 张国栋

(苏州新材料研究所有限公司, 江苏 苏州 215125)

摘要: **目的** 研发一种适合工业生产连续带材的非接触式电化学抛光方法。**方法** 采用以磷酸-硫酸为主要氧化剂的环保型电化学抛光液对金属基带进行电化学抛光, 研究阳极电流密度(J_A)、电解液温度(t)、基带与电极间的距离(L)和走带速度(v)对基带表面粗糙度的影响, 优化抛光工艺条件。**结果** 优化的工艺条件如下: J_A 为 $1500 \sim 2500 \text{ A/m}^2$, t 为 $40 \sim 80 \text{ }^\circ\text{C}$, L 为 $4 \sim 12 \text{ mm}$, v 为 $0.5 \sim 1.8 \text{ m/min}$ 。在此工艺条件下进行电化学抛光, 极为有效地降低了金属基带的表面粗糙度, 光亮度达到镜面状态, 原子力显微镜测试 $5 \text{ }\mu\text{m} \times 5 \text{ }\mu\text{m}$ 范围内的表面平均粗糙度值低于 1.0 nm 。**结论** 该抛光工艺实现了千米级基带的连续性抛光, 达到工业化生产要求。

关键词: 非接触式; 电化学抛光; 工艺条件; 平均粗糙度

中图分类号: TG175

文献标识码: A

文章编号: 1001-3660(2014)02-0105-04

Non-contact and Continuous Electrochemical Polishing of the Metal Strip

GAO Yong-chao, CHENG Hao, YANG Shu-ping, ZHUANG Wei-wei, CAI Yuan, ZHANG Guo-dong

(Suzhou Advanced Material Research Institute, Suzhou 215125, China)

ABSTRACT: **Objective** To develop a non-contact electrochemical polishing method which is suitable for producing continuous metal strip in industry. **Methods** Using environment friendly phosphoric acid-sulfuric acid as the main antioxidant electrochemical polishing solution, the influences of the anodic current density (J_A), the electrolyte temperature (t), the distance between electrodes and metal strip (L), the tape speed (v) on the surface roughness of the metal strip were studied, and the polishing process conditions were optimized. **Results** The optimized process conditions are as following: J_A : $1500 \sim 2500 \text{ A/m}^2$, t : $40 \sim 80 \text{ }^\circ\text{C}$, L : $4 \sim 12 \text{ mm}$, v : $0.5 \sim 1.8 \text{ m/min}$. The results showed that the electrochemical polishing process could effectively reduce the surface roughness of the metal strip under the optimized conditions, the brightness of the polished tape could reach the mirror state, the average surface roughness R_a value was less than 1.0 nm as tested by AFM around the $5 \text{ }\mu\text{m} \times 5 \text{ }\mu\text{m}$ micron. **Conclusion** The polishing process achieved the continuous polishing of metal strip at kilometer level and met the requirements for industrial production.

KEY WORDS: non-contact; electrochemical polishing; process conditions; average roughness

常规电化学抛光是指金属工件在一定电解液中发生阳极溶解, 从而表面粗糙度降低, 光亮度达到镜面效果, 并产生一定金属光泽的表面光整技术^[1-4]。它与机械抛光及其他抛光技术相比, 明显存在优点,

如效率高、光亮度高、存在表面非加工硬化层和非内应力作用、耐腐蚀等。该技术已在需要控制表面质量与光洁度的表面精加工领域获得了极其广泛的应用。

关于电化学抛光的研究很多。方景礼^[5]详细论

收稿日期: 2013-10-24; 修订日期: 2013-12-05

Received: 2013-10-24; Revised: 2013-12-05

作者简介: 高永超(1984—), 男, 河南永城人, 硕士, 化学工程师, 主要研究方向为非接触式电化学抛光。

Biography: GAO Yong-chao(1984—), Male, from Yongcheng, Henan, Master, Chemical engineer, Research focus: non-contact electrochemical polishing.

述过电化学抛光的注意事项、抛光液配方及废弃物处理等;刘守栋、刘欣杰及杜炳志等^[6-8]研究了 NiTi 合金的电化学抛光工艺及性能;王雪等^[9]研究了 NiW 合金基带的电化学抛光;Phol M、于美等^[10-11]详细研究了钛及钛合金的抛光工艺及耐腐蚀性能。文中拟探索一种新的非接触式电化学抛光工艺。目前关于非接触式电化学抛光和带材连续性电化学抛光的报道很少^[12-13],文中简要介绍将非接触式电化学抛光技术应用于连续带材的抛光中。

1 实验

1.1 抛光工艺

所用实验设备为连续性电化学抛光设备。采用直流电源,由整流器控制电压变化幅度为 0~24 V,通常为 8~12 V;电流为 0~150 A,一般根据抛光效果选择 60~140 A。

实验中采用特殊材料合金带材,电极为特制材料加工的阳极和阴极。双带抛光主要经过四个步骤:抛光前清洗→电化学抛光→抛光后清洗→干燥。

电解液为环保型磷酸-硫酸混合溶液^[14]。采用环保型磷酸-硫酸型强腐蚀性抛光液对合金基带进行电化学抛光时,抛光效果会受到很多因素的影响,研究者们通过长期实践^[15-18],总结出阳极电流密度(J_A)、电解液温度(t)、基带与电极间的距离(L)、走带速度(v)等为主要影响因素,实验中通过确定这四个参数,找出最佳抛光工艺条件。

1.2 分析测试

采用 Nova nano-SEM 450 扫描电子显微镜(SEM, FEI)观察样品表面形貌。采用 INNOVA 原子力显微镜(AFM, Bruker)观察样品表面三维结构,并测定表面平均粗糙度 Ra 。采用 DM-2500 金相显微镜(Leica)观测样品表面形貌及表面光洁度。

2 结果与分析

2.1 抛光工艺参数的确定

2.1.1 阳极电流密度 J_A 的确定

固定电解抛光温度、基带距电极距离和走带速度,分别在 900, 1200, 1500, 1800, 2100, 2400, 2700, 3000 A/m² 进行抛光。测得样品 5 μm ×5 μm 范围内

的表面平均粗糙度(Ra),如图 1 所示。可以看出,当 J_A 小于 1500 A/m² 和大于 2400 A/m² 时,抛光效果较差。这是因为当 J_A 过小时,抛光速率慢,表面光亮度不够,整平效果差;当 J_A 过大时,抛光速度过快,易造成局部发热,产生过度腐蚀,甚至局部出现麻坑,抛光面有瑕疵,从而影响抛光效果。在较大的阳极电流密度下抛光,虽然能达到良好的镜面效果,但是易造成阳极铂膜的脱落,缩短阳极寿命。综合考虑抛光效果及经济成本因素,选择阳极电流密度为 1705~2046 A/m²。

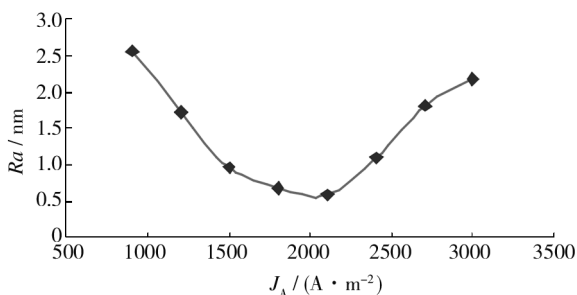


图1 表面粗糙度随阳极电流密度的变化

Fig. 1 Variation of Ra value with the change of the anodic current density

2.1.2 电解液温度 t 的确定

电化学抛光过程是在电解液中进行的,电解液的温度是影响抛光效果的重要因素。固定基带距电极距离、走带速度及阳极电流密度,分别在 30, 40, 50, 60, 70, 80 $^{\circ}\text{C}$ 进行基带电化学抛光,结果如图 2 所示。可以看出,温度太低时,抛光效果较弱,表面不光亮;温度过高时,整体抛光效果提高不明显,且高温对电化学抛光液影响较大,会缩短抛光液寿命。分析认为, t 维持在 50~70 $^{\circ}\text{C}$ 的抛光效果最佳。

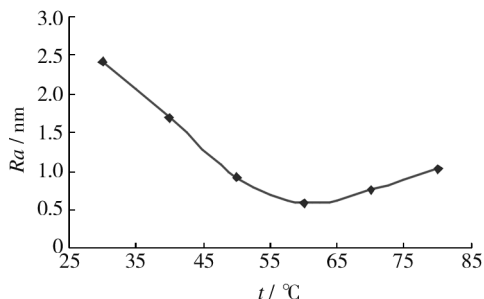


图2 表面粗糙度随抛光温度的变化

Fig. 2 Variation of Ra value with the change of the temperature

2.1.3 基带距电极距离 L 的确定

基带与电极间的距离 L 与电场作用力成反比, L 的大小直接影响抛光效果。与接触式抛光有所不同,

非接触式电化学抛光是将抛光工件置于阴阳两极感应产生的双极性电场里,样品无需直接接触电极,因此抛光基带与电极间的距离至关重要,直接关系到电场对抛光带材的电场力作用。固定电解液抛光温度、走带速度和阳极电流密度,分别在 L 为 3, 5, 7, 10, 12, 15 mm 的条件下进行电化学抛光,结果如图 3 所示。可以看出,抛光基带与电极距离适宜时,抛光效果较佳。若距离过近,电场作用过强,会导致基带边缘尖端放电较严重,基带边缘地带过抛;若距离过远,电场作用较弱,则基带边缘抛光不明显。分析认为, L 保持在 4 ~ 8 mm 之间为宜。

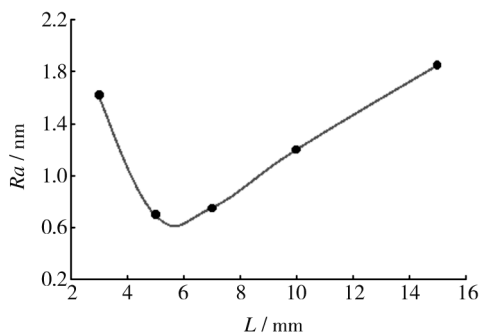


图3 表面粗糙度随基带距电极距离的变化

Fig. 3 Variation of Ra value with the change of the distance

2.1.4 走带速度 v 的确定

运行速度决定基带单位长度的抛光时间,有必要考察其对抛光效果的影响。固定电解液温度、阳极电流密度和基带距电极距离,分别在 v 为 0.3, 0.5, 0.7, 1.0, 1.2, 1.5, 1.8, 2.0 m/min 条件下进行电化学抛光,结果如图 4 所示。可以看出,走带速度较慢时,抛光时间过长,导致基带表面过度腐蚀,出现麻点,粗糙度过大;走带速度较快时,抛光时间过短,抛光效果弱,基带边缘地带发白,达不到理想抛光要求。分析认为, v 维持在 0.5 ~ 1.4 m/min 时的抛光效果最好。

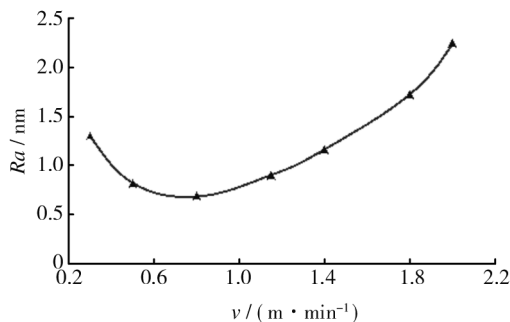


图4 表面粗糙度随走带速度的变化

Fig.4 Variation of Ra value with the change of the speed

2.2 表面形貌

对抛光前后的基带进行 SEM 观测,形貌如图 5 所示。基带抛光前,表面油污和颗粒较多,突起及纹路较明显;抛光后的基带表面光滑均匀,无明显突起及颗粒。

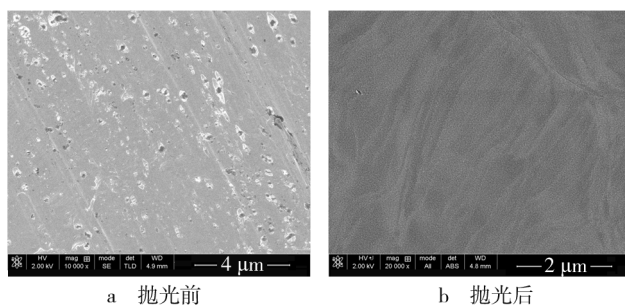


图5 样品的SEM形貌

Fig. 5 SEM images of the samples

采用原子力显微镜对基带抛光前后表面的空间三维形貌及粗糙度进行进一步测定,结果见图6。可以看出,基带抛光前,沟壑突起对比明显,平滑度差,测试范围 $5\text{ }\mu\text{m}\times 5\text{ }\mu\text{m}$ 内, R_a 约为 11.2 nm ;经过抛光后,突起被削平,沟壑被填补,达到镜面效果, R_a 值低至 0.68 nm 。这也进一步验证了抛光效果。

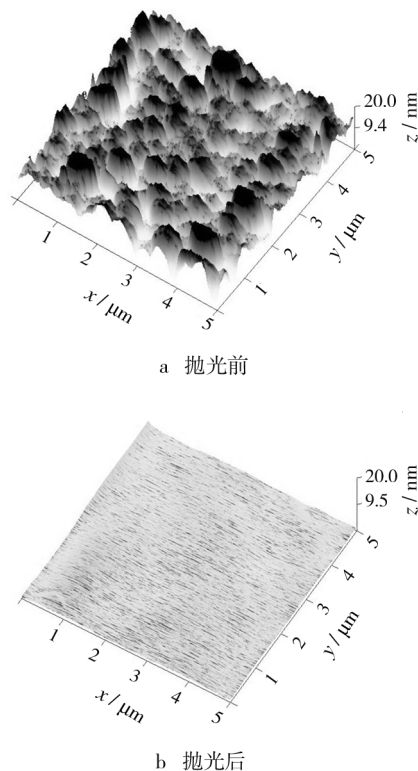
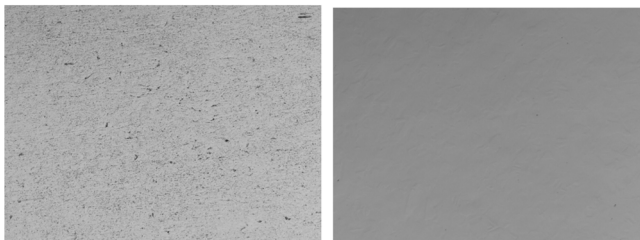


图6 样品的粗糙度三维图

Fig. 6 3-D images of the samples

采用金相光学显微镜对基带进行较大范围的形貌观测。从图7可以清楚看到,基带抛光前,表面有许多黑点、凹坑,粗糙不平;抛光后,基带的平整度、光滑度提升明显。该结果表明,非接触式电化学抛光能达到连续性、均一性的镜面抛光效果。



a 抛光前

b 抛光后

图7 样品在光学显微镜下的形貌

Fig. 7 Morphology of the samples under optical microscope

3 结论

基带最佳抛光工艺条件如下:阳极电流密度 J_A 为 $1500 \sim 2500 \text{ A/m}^2$, 电解液温度 t 为 $40 \sim 80 \text{ }^\circ\text{C}$, 基带与电极间的距离 L 为 $4 \sim 12 \text{ mm}$, 走带速度 v 为 $0.5 \sim 1.8 \text{ m/min}$ 。在此工艺条件下可实现双带连续抛光,抛光表面均匀光滑,粗糙度较低, $5 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$ 范围内的平均粗糙度值低于 1.0 nm , 光学显微镜下的表面平整度较好,达到了镜面效果。该工艺极大地改善了金属带材的表面形貌和光亮度。

此抛光工艺开创了国内金属带材的非接触式连续性抛光新领域,并达到了工业化生产要求,为后续多带连续抛光工艺研究奠定了基础。特殊合金带材是制备超导带材的基底,其抛光质量的好坏直接影响到隔离层薄膜的制备,采用此抛光工艺对基带进行处理有利于隔离层薄膜的研究。

参考文献

- [1] 谢格列夫. 金属的电抛光和化学抛光[M]. 巩德全,译. 北京:科学出版社,1965.
ТРИШЕ G. The Electrochemical Polishing and Chemical Polishing of the Metal[M]. GONG De-quan, Translate. Beijing: Science Press, 1965.
- [2] 杜炳志,漆红兰. 电化学抛光技术新进展[J]. 表面技术, 2007, 36(2): 56—58.
DU Bing-zhi, QI Hong-lan. Development of Electrochemical Polishing Technology[J]. Surface Technology, 2007, 36(2): 56—58.
- [3] 韦瑶,杜高昌,蓝伟强. 电化学抛光工艺的研究及应用[J]. 表面技术, 2001, 30(1): 19—24.
WEI Yao, DU Gao-chang, LAN Wei-qiang. The Study and Application of Electrochemical Polishing Technology[J]. Surface Technology, 2001, 30(1): 19—24.
- [4] 李异,刘均泉,李建三. 金属表面抛光技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
LI Yi, LIU Jun-quan, LI Jian-san. The Polishing Technology of the Metal Surface[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.
- [5] 方景礼. 金属材料抛光技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
FANG Jing-li. The Polishing Technology of the Metal Materials[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2005.
- [6] 卢守栋,韩会民,刘欣杰. NiTi 合金电化学抛光工艺[J]. 材料保护, 2008, 41(7): 26—29.
LU Shou-dong, HAN Hui-min, LIU Xin-jie. The Electrochemical Polishing Technology for NiTi Alloys[J]. Materials Protection, 2008, 41(7): 26—29.
- [7] 刘欣杰,韩会民,卢守栋,等. 电化学抛光 NiTi 合金表面性能的研究[C]//第六届中国功能材料及其应用学术会议论文集. 武汉, 2007: 1776—1779. (余不详)
LIU Xin-jie, HAN Hui-min, LU Shou-dong, et al. Surface Characterization of Electrochemical Polishing for NiTi Alloys[C]//The Sixth China Functional Materials and Applications of Academic Conference Proceedings. Wuhan, 2007: 1776—1779. (余不详)
- [8] 杜炳志. 超导材料 NiW 合金基带电化学抛光工艺研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2007.
DU Bing-zhi. Electrochemical Polishing Process Conditions for NiW Alloy Substrate in Superconductivity Materials[D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2007.
- [9] 王雪,李成山,于泽铭,等. NiW 合金基带电化学抛光过程研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2012, 41(6): 1075—1079.
WANG Xue, LI Cheng-shan, YU Ze-ming, et al. Electropolishing Process Research of NiW Alloy Substrates[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2012, 41(6): 1075—1079.
- [10] PHOL M, HE Bing C, FRENAEL J. Electrolytic Processing of NiTi Shape Memory Alloys[J]. Materials Science and Engineering: A, 2004, 378(1/2): 191—199.
- [11] 于美,徐永振,李松梅,等. 钛合金的环保电化学抛光工艺[J]. 北京科技大学学报, 2009, 31(1): 68—73.
YU Mei, XU Yong-zhen, LI Song-mei, et al. Environment-friendly Electropolishing of Titanium Alloys[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2009, 31(1): 68—73.

- Pigments and Fillers in Thermal Insulation Coatings [J]. Materials Review, 2008, 22(5): 26—30.
- [12] 马淑雅, 吴松林. 室温固化 RT-III 耐热涂层及其应用 [J]. 航天制造技术, 2002(4): 22—25.
- MA Shu-ya, WU Song-lin. RT-III Heat-resistant Coatings Cured at Room Temperature and Its Application [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2002(4): 22—25.
- [13] 钱逢麟, 笠玉书. 涂料助剂 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- QIAN Feng-lin, LI Yu-shu. Paint Additives [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003.
- [14] 付学勇. 颜料分散机理的探讨及新的分散方法 [J]. 涂料工业, 2010(7): 67—68.
- FU Xue-yong. Discussion on Pigment Dispersion Mechanism and New Dispersion Method [J]. Paint & Coatings Industry, 2010(7): 67—68.
- [15] 李琳, 许韶华, 杨久霞, 等. 树脂对颜料分散体系的影响 [J]. 现代显示, 2008(1): 71—74.
- LI Lin, XU Shao-hua, YANG Jiu-xia, et al. The Influence of Resin on the Dispersive System of Pigment [J]. Advanced Display, 2008(1): 71—74.
- [16] 王强华. 一种新的填料分散技术(一) [J]. 玻璃钢, 2009(2): 39—45.
- WANG Qiang-hua. A New Filler Dispersion Technology [J]. Fiber Reinforced Plastics, 2009(2): 39—45.
- [17] 肖军. 抗高温高速烧粘腐蚀结构设计及表面防护研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2004.
- XIAO Jun. Research on High Temperature and High Corrosion Resistant Burning-sticking Structural Design and Surface Protection [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2004.
- [18] 高焕方. 填料及液体橡胶对降低环氧厚涂层内应力的作用 [J]. 表面技术, 2002, 31(4): 53—54.
- GAO Huan-fang. The Role Filler and Liquid Rubber Plays in Reducing the Internal Stress of Thick Epoxy Coatings [J]. Surface Technology, 2002, 31(4): 53—54.

(上接第 108 页)

- [12] ANDRADE L S, XAVIER S C, ROMEU C, et al. Electropolishing of AISI-304 Stainless Steel Using an Oxidizing Solution Originally Used for Electrochemical Coloration [J]. Electrochimica Acta, 2005, 50(13): 2623—2627.
- [13] KREISKOTT S, ARENDT P N, BRONISZ L E, et al. Continuous Electropolishing of Hastelloy Substrates for Ion-beam Assisted Deposition of MgO [J]. Superconductor Science and Technology, 2003, 16(5): 613—616.
- [14] CHEN S C, TU G C, HUANG C A. The Electrochemical Polishing Behavior of Porous Austenitic Stainless Steel (AISI 316L) in Phosphoric-Sulfuric Mixed Acids [J]. Surface and Coatings Technology, 2005, 200(7): 2065—2071.
- [15] 李青. 电抛光 [J]. 表面技术, 1994, 23(2): 53—55.
- LI Qing. Electropolishing [J]. Surface Technology, 1994, 23(2): 53—55.
- [16] 曾华良. 电镀工艺手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1989.
- ZENG Hua-liang. Electroplating Process Manual [M]. Beijing: China Machine Press, 1989.
- [17] 张玉萍, 鞠鹤, 蔡天晓. 外加金属阴极保护用钛阳极 [J]. 装备环境工程, 2011, 8(5): 96—99.
- ZHANG Yu-ping, JU He, CAI Tian-xiao. Titanium Anodes for Impressed Current Cathodic Protection [J]. Equipment Environmental Engineering, 2011, 8(5): 96—99.
- [18] ANDRADE L S, XAVIER S C, ROCHA-FILHO R C, et al. Electropolishing of AISI-304 Stainless Steel Using an Oxidizing Solution Originally Used for Electrochemical Coloration [J]. J Electrochem Soc, 1990, 137(10): 3016—3023.

(上接第 141 页)

- [49] 朱振, 张宏, 张箭, 等. 超音速火焰喷涂 WC-CrNi 涂层的滑动磨损特性研究 [J]. 表面技术, 2012, 41(3): 12—15.
- ZHU Zhen, ZHANG Hong, ZHANG Jian, et al. Study on Sliding Wear Characteristic of HVOF Sprayed WC-CrNi Composite Coatings [J]. Surface Technology, 2012, 41(3): 12—15.
- [50] 时海芳, 郜世喜, 李智超. 坡缕石对三元硼化物陶瓷涂层磨损性能的影响 [J]. 表面技术, 2012, 41(1): 41—43.
- SHI Hai-fang, GAO Shi-xi, LI Zhi-chao. Effect of Palygors-kite on Wear Performance of Mo_2FeB_2 [J]. Surface Technology, 2012, 41(1): 41—43.
- [51] 谢小鹏, 冯伟, 黄敦烈. 基于能量耗损的摩擦学系统状态识别方法研究 [J]. 润滑与密封, 2010, 35(2): 27—31.
- XIE Xiao-peng, FENG Wei, HUANG Dun-lie. Study on State Recognition Method of Tribological System Based on Energy Loss [J]. Lubrication Engineering, 2010, 35(2): 27—31.