

doi:10.19677/j.issn.1004-7964.2021.04.003

## 铬鞣黄牛革全生命周期评价

袁琳琳<sup>1</sup>,姚庆达<sup>2</sup>,但年华<sup>1</sup>,王璐<sup>1</sup>,李明辉<sup>1</sup>,但卫华<sup>1,2\*</sup>,李正军<sup>1</sup>

(1. 四川大学制革清洁技术国家工程研究中心,四川 成都 610065;2. 福建省皮革绿色设计与制造重点实验室,福建 晋江 362271)

**摘要:**铬鞣法是目前制革工业中最成熟、产品质量最可靠、适合性最广的鞣革方法。然而,由于制革过程需要添加多种化学制剂,所排放的固废、废液、废气等会污染环境,因此,污染成为制革行业发展的最大制约因素。制革过程涉及多工段、多化料,操作复杂,科学合理地评价制革污染成了关乎制革业发展的关键问题。生命周期评价(Life cycle assessment, LCA)是一种可以量化评价一个产品从原料皮到成品革的生命周期环境影响评价方法。本文根据生命周期评价(LCA)的原理及理论框架,采用 eFootprint 供应链 LCA 网络平台,以全球变暖潜值(GWP)、一次能源消耗(PED)、酸化潜值(AP)等作为环境影响评价指标,并对铬鞣工艺的黄牛革产品加工过程的主要工序进行了全生命周期评价。这为建立制革行业 LCA 数据库提供参考示例,为实现我国皮革行业的绿色产业链提供数据支撑。

**关键词:**生命周期评价;eFootprint;铬鞣;制革清洁生产

**中图分类号:**TS 513 **文献标志码:**A

## Life Cycle Assessment Evaluation of Chrome Tanned Cattle Leather

YUAN Linlin<sup>1</sup>, YAO Qingda<sup>2</sup>, DAN Nianhua<sup>1</sup>, WANG Lu<sup>1</sup>, LI Minghui<sup>1</sup>, DAN Weihua<sup>1,2\*</sup>, LI Zhengjun<sup>1</sup>

(1. National Engineering Research Center of Clean Technology in Leather Industry, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. Fujian Key Laboratory of Green Design and Manufacture of Leather, Jinjiang 362271, China)

**Abstract:** Chrome tanning is currently the most mature, reliable, and suitable tanning method in leather industry. However, since the leather production needs to add a variety of chemicals, the discharge of the waste solid, liquid, and gas can pollute the environment. Therefore, pollution has become the biggest constraint for the development of leather industry. The leather production process involves multiple stages, multiple materials, and complex operations. Scientific and reasonable pollution evaluation of leather production has become a key issue related to the development of the leather industry. Life cycle assessment (LCA) is an assessment method that can quantitatively evaluate the environmental impact of a product's life cycle from raw hide to leather. Based on the principles and theoretical framework of LCA, this paper adopted the eFootprint supply LCA network platform, global warming potential (GWP), primary energy consumption (PED), acidification potential (AP), etc. as environmental impact assessment indicators. Also, the main processes of leather production were evaluated throughout the LCA. This work provided a reference example for the establishment of the LCA database for leather industry, and gave the information support for the realization of the green industrial chain of the leather industry in China.

**Key words:** life cycle assessment; eFootprint; chrome tanning; green leather production

收稿日期:2020-02-07

基金项目:生态制革技术研究,2020QT-GXB2025-17-2;泉州市科技计划项目,2020C038R

第一作者简介:袁琳琳(1995-),女,四川大学轻工科学与工程学院 2018 级硕士研究生,E-mail:1015682903@qq.com。

\*通信联系人:但卫华(1956-),男,教授,博导,E-mail:danweihua\_scu@126.com,主要从事制革清洁技术的研究、开发与产业化。

## 引言

皮革工业化学品消耗量高,且废弃物处理困难<sup>[1]</sup>。日益严重的全球污染以及持续的能源危机给制革行业带来了严峻挑战。发达国家不断通过设置贸易壁垒、增加关税等措施打压中国制革企业<sup>[2]</sup>。为了减少制革污染物排放量,中国地方政府和部门也出台了众多行业标准和规范,以规范制革生产<sup>[3]</sup>。加之 2020 年新冠疫情对世界经济的持续影响,中国制革企业承受着多重压力<sup>[4]</sup>。基于以上困境,中国制革行业必须坚定不移地走绿色制造的发展之路<sup>[5]</sup>。

我国皮革工业要实现绿色制造和绿色发展,需要建立皮革绿色设计、绿色制造及其评价的基本方法<sup>[6]</sup>。生命周期评价方法注重“量化”和“全程”两个关键点,可以科学地评价产品生产全过程<sup>[7]</sup>。使人们对其所从事活动的资源消耗和环境影响有一个彻底、全面、综合的认识,以便寻求机会,采取措施,减轻对环境的影响<sup>[8]</sup>。因此本文将利用生命周期的方法对基于铬鞣工艺的黄牛革进行分析和评价,为建立制革行业 LCA 数据库提供重要的参考示例。

预浸水→去肉→主浸水→浸灰→软化→鞣制→浸酸→脱毛→脱灰→去肉→片皮→挤水伸展→中和→复鞣→回软→削匀→染色加脂→套色水洗→真空干燥→坯革。

## 1 目标与范围定义<sup>[9,10]</sup>

本研究的数据集名称为“黄牛革-铬鞣工艺-中国-2020”,功能单位为生产 1 m<sup>2</sup> 黄牛革(厚度 1.3~1.5 mm),数据代表 LCA 行业平均水平(采用行业/技术/多家企业资料),产品的系统边界为包括所有上游原材料和能源的生产过程、产品生产过程、原材料的运输和废弃处置的所有过程。eFoot-



图 1 eFootprint 模型

Fig.1 eFootprint model

表 1 黄牛革加工单元表

Tab.1 The production units of cattle leather

过程名称	主要原材料	排放
鞣前及鞣制	原料皮、石灰、杀菌剂、铬鞣剂	皮屑、含铬废水、硫离子、氨氮、COD、含铬污泥
染整及干整饰	复鞣剂、染料、成膜剂、颜料、	树脂、色料、VOC
污水/污泥沉降处理	石灰、硫酸亚铁	废水、污泥

print 模型图见图 1。

## 2 实景过程数据代表性

铬鞣是制革的主要鞣制方式<sup>[11]</sup>。本研究采用铬鞣工艺,生产规模类型为 620 万 m<sup>2</sup>。以电能为主要能耗,主要原料类型包括原料皮、各种化学品和生物制品,如渗透剂、防霉剂、酶制剂、鞣剂、加脂剂、染料、涂饰剂等。主要数据来源为企业清洁生产审核报告、企业生产统计资料、制革行业清洁生产评价指标体系、皮革研究论文等。黄牛革的加工单元过程分为鞣前及鞣制处理、湿态染整和干态整饰和污水/污泥处理三个过程,加工单元表见表 1。

表 2 主要评估指标

Tab.2 Main evaluation indicators

中文名称	缩写(单位)	指标说明
气候变化	GWP(kg CO <sub>2</sub> eq)	1 m <sup>2</sup> 黄牛革从原料皮到成品皮排放的二氧化碳当量
初级能源消耗	PED(MJ)	1 m <sup>2</sup> 黄牛革从原料皮到成品皮需要的能量消耗
非生物资源消耗潜值	ADP(kg Sb eq)	1 m <sup>2</sup> 黄牛革从原料皮到成品皮需要的非生物能量消耗
水资源消耗	WU(kg)	1 m <sup>2</sup> 黄牛革从原料皮到成品皮需要的水资源消耗
酸化	AP(kg SO <sub>2</sub> eq)	1 m <sup>2</sup> 黄牛革从原料皮到成品皮排放的二氧化硫当量
富营养化潜值	EP(kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq)	1 m <sup>2</sup> 黄牛革从原料皮到成品皮排放的磷酸根当量
可吸入无机物	RI(kg PM <sub>2.5</sub> eq)	1 m <sup>2</sup> 黄牛革从原料皮到成品皮排放的 PM <sub>2.5</sub> 当量
臭氧层消耗	ODP(kg CFC-11 eq)	1 m <sup>2</sup> 黄牛革从原料皮到成品皮排放的卤族元素的化合物当量
光化学臭氧合成	POFP(kg NMVOC eq)	1 m <sup>2</sup> 黄牛革从原料皮到成品皮排放的非甲烷挥发性有机物当量

表3 黄牛革 LCA 清单数据表(鞣前及鞣制处理)  
Tab.3 LCA data of cattle leather (pre-tanning and tanning treatment)

消耗的物料	消耗量	上游数据来源	消耗的物料	消耗量	上游数据来源
牛原皮	1 m <sup>2</sup>	实景过程数据	工业盐	0.17 kg	C
浸灰剂	0.05 kg	E	硫化钠	0.082 kg	E
浸水剂	0.041 kg	E	硫酸钠	0.049 kg	C
脱灰剂	0.059 kg	C	小苏打	0.005 kg	C
防霉剂	0.005 kg	E	甲酸钠	0.02 kg	E
HLS 铬粉	0.082 kg	C	纯碱	0.018 kg	C
甲酸	0.018 kg	E	石灰	0.174 kg	C
硫酸	0.037 kg	C	电力	0.976 kWh	C
杀菌剂	0.016 kg	C			

表4 黄牛革 LCA 清单数据表(湿态染整和干态整饰处理)  
Tab.4 LCA data of cattle leather (wet dyeing and dry finishing treatment)

消耗的物料	消耗量	上游数据来源	消耗的物料	消耗量	上游数据来源
铬鞣剂	0.086 kg	E	小苏打	0.008 kg	C
加脂剂	0.147 kg	E	甲酸	0.05 kg	E
丙烯酸	0.115 kg	C	甲酸钠	0.028 kg	E
中和单宁	0.011 kg	E	水性涂料	0.073 kg	E
栲胶	0.13 kg	C	手感剂	0.041 kg	E
填料	0.159 kg	E	油脂(涂饰)	0.006 kg	E
染料	0.039 kg	E	电力	3.3 kWh	C

表5 黄牛革 LCA 清单数据表(污水/污泥处理)  
Tab.5 LCA data of cattle leather (sewage and sludge treatment)

消耗的物料	消耗量/g	上游数据来源	消耗的物料	消耗量	上游数据来源
石灰	204.659	C	盐酸	0.365 g	C
硫酸亚铁	146.603	C	次氯酸钠	1.232 g	C
片碱	16.202	E	液碱	0.355 g	C
甲醇	0.254	C	PAC	0.357 g	C
PAM	2.737	E	电力	0.854 kWh	C

表6 黄牛革 LCA 结果  
Tab.6 LCA results of cattle leather

环境影响类型指标	影响类型指标单位	LCA 结果	不确定度
初级能源消耗(PED)	MJ	1.64E+03	±17.07%
非生物资源消耗潜值(ADP)	kg Sb eq	4.90E-02	±10.79%
水资源消耗(WU)	kg	1.09E+03	±9.62%
气候变化(GWP)	kg CO <sub>2</sub> eq	8.56E+01	±8.86%
臭氧层消耗(ODP)	kg CFC-11 eq	3.62E-06	±13.52%
酸化效应(AP)	kg SO <sub>2</sub> eq	8.23E-01	±16.24%
可吸入无机物(RI)	kg PM <sub>2.5</sub> eq	1.13E-01	±9.17%
光化学臭氧合成(POFP)	kg NMVOC eq	2.38E-01	±11.86%
富营养化潜值(EP)	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq	6.17E-01	±14.85%

### 3 清单数据收集与建模

本研究按照经济价值,对牛肉和皮革进行了经济价值的分配。对于单头牛,牛肉按照 6000 元计算,原料皮按照 400 元计算,则原料皮的价值占比为 6.25%,并连接 live weight-cattle for slaughtering 作为原料皮的背景数据库。本报告无再生循环,按照 CLCD 取舍规则<sup>[12]</sup>,忽略了颜料膏、软化剂、脱脂剂等消耗,总忽略物料重量比为 2.179%。主要的评估指标有 9 个,详见表 2。采用 eFootprint 系统<sup>[13]</sup>,在线完成建模、

计算分析、数据质量评估、LCA 结果发布等工作。

分别对黄牛革生产的三个单元过程,即鞣前及鞣制处理、湿态染整和干态整饰处理和污水/污泥处理,进行清单数据收集。主要原料数据库采用 CLCD 0.8 (简称 C)、Ecoinvent3.1 数据库 (简称 E); 主要背景数据集包括 Ecoinvent3.1-red meat, live weight-cattle for slaughtering, live weight to generic market for red meat, live weight (Global)CLCD0.8- 金属铬, CLCD0.8- 全国平均电网电力传输<sup>[14]</sup>,收集到的清单数据见表 3、表 4 和表 5。

## 4 LCA 结果与分析

### 4.1 LCA 结果

对收集到的数据进行整理,利用 eFootprint 软件建模并计算 1 m<sup>2</sup> 铬鞣黄牛革的环境影响,选取初级能源消耗(PED)、水资源消耗(WU)、气候变化(GWP)、酸化(AP)、可吸入无机物(RI)等指标<sup>[10]</sup>,得出铬鞣黄牛革 LCA 数据结果,详见表 6。

### 4.2 单元过程结果分析

黄牛革 LCA 单元结果结果分析<sup>[15]</sup>如表 7 所示。由表 7 可知,对所有指标而言,贡献率最大的均为鞣前处理及鞣制过程,其 GWP、ADP、AP 和 RI 的贡献值分别为 91.1%、89.52%、92.64% 以及 86.52%。其次贡献率较大的为湿态染整和干态整饰过程,其 ADP 贡献值达到了 60.32%。污水/污泥处理过程对结果的影响很小,贡献值均处于 2.6% 以下。因此,鞣前处理及鞣制过程应该为重点改进过程,这与制革行业污染处理主要来源相一致。

表 7 黄牛革 LCA 单元过程结果分析

Tab.7 Analysis of unit process results of cattle leather

过程名称	GWP/%	PED/%	ADP/%	AP/%	RI/%
鞣前及鞣制	89.79	91.25	98.96	93.08	87.18
湿干态染整	8.85	7.93	0.90	5.41	9.72
污水/泥处理	1.37	0.83	0.03	0.63	2.52

表 8 黄牛革 LCA 累计贡献表(鞣前及鞣制处理)

Tab.8 LCA cumulative contribution of cattle leather (pre-tanning and tanning treatment)

过程名称	GWP/%	PED/%	ADP/%	AP/%	RI/%
鞣前及鞣制(总)	89.79	91.25	98.96	93.08	87.18
原料皮	82.58	85.69	97.91	87.21	72.70
浸水剂	0.24	0.27	0.06	0.14	0.20
脱灰剂	0.14	0.09	0.01	0.18	0.33
防霉剂	0.02	0.03	0.01	0.01	0.01
HLS 铬粉	4.73	3.78	0.50	4.10	10.44
甲酸	0.07	0.08	0.02	0.03	0.03
硫酸	0.02	0.01	0.01	0.10	0.04
杀菌剂	0.01	0.01	0	0.01	0.02
工业盐	0.04	0.02	0	0.01	0.09
硫化氢钠	0.19	0.17	0.08	0.15	0.18
硫酸钠	0.02	0.02	0	0.01	0.03
小苏打	0.20	0.11	0.33	0.34	0.46
甲酸钠	0.03	0.04	0.01	0.02	0.03
石灰	0.28	0.08	0	0.05	1.13
电力	1.17	0.81	0.02	0.64	1.37

表 9 铬鞣黄牛革 LCA 累计贡献表(湿态染整和干态整饰)

Tab.9 LCA cumulative contribution of cattle leather (wet dyeing and dry finishing treatment)

过程名称	GWP/%	PED/%	ADP/%	AP/%	RI/%
湿干整饰(总)	8.85	7.93	0.90	5.41	9.72
甲酸	0.18	0.23	0.05	0.08	0.09
甲酸钠	0.04	0.05	0.01	0.03	0.04
小苏打	0.02	0.01	0.00	0.03	0.05
电力	3.89	2.69	0.08	2.13	4.55
铬鞣剂	3.06	2.72	0.38	2.19	3.67
加脂剂	0.17	0.41	0.03	0.09	0.12
丙烯酸	0.28	0.34	0.09	0.10	0.30
中和单宁	0.06	0.08	0.02	0.03	0.05
烤胶	0.13	0.45	0.01	0.07	0.12
填料	0.15	0.13	0.03	0.10	0.15
染料	0.08	0.14	0.04	0.05	0.07
水溶性涂饰树脂	0.51	0.48	0.12	0.19	0.27
涂饰手感剂	0.16	0.16	0.04	0.08	0.11
(涂饰用) 油脂	0.12	0.04	0	0.24	0.13

### 4.3 过程累积贡献分析

#### 4.3.1 鞣前及鞣制处理 LCA 累计贡献

由表 8 可知,在鞣前及鞣制处理过程中,牛原皮对 PED、GWP、AP 和 RI 的贡献最高,分别为 91.1%、89.52%、92.64% 和 86.52%。值得注意的是,铬粉在鞣制及鞣前处理中<sup>[6]</sup>,显示出较高的贡献值,

其 PED、GWP、AP 和 RI 的贡献值分别为 3.78%、4.73%、4.10%、10.44%,故而减少铬鞣剂的使用,采用无铬鞣、多金属结合鞣和有机鞣等方式,对于清洁环保是非常有必要的<sup>[7]</sup>。

#### 4.3.2 湿态染整和干态整饰 LCA 累计贡献

由表 9 可知,对于湿态染整和干态整饰过程,铬鞣剂的使用,依旧对环境的影响较大,其 PED、GWP、AP 和 RI 贡献值分别为 2.72%、3.06%、2.19% 和 3.67%。因此,通过优化工艺或者寻求鞣制替代品,减少铬鞣剂的使用量刻不容缓<sup>[8]</sup>。

其次,电力消耗的影响值也较大,其 PED、GWP、AP 和 RI 贡献值分别为 2.69%、3.89%、2.13%、4.55%,因此,科学、有效的供配电方式显得尤为重要。这不仅可以为整个行业的用电工艺和用电设备的改善提供相应的保障,还可以通过提升劳动生产率,确保整个企业取得良好的经济效益和生态效益<sup>[9]</sup>。

#### 4.3.3 污水/污泥处理 LCA 累计贡献表

污水/污泥处理过程中的累计贡献表详见表 10,整体来说,该过程对各项指标的贡献都较小。相对较高的贡献值主要集中在电力和石灰上,因为,通过相应手段,来降低电力和石灰的使用,也可以起到一定的清洁环保的作用<sup>[20]</sup>。

### 4.4 灵敏度分析

除累计贡献外,可通过灵敏度分析识别关键清单数据。还可以对各项 LCA 结果进行清单灵敏度分析,系统地识别产品全生命周期各环节的改进重点和改进潜力,从而提出改进建议。灵敏度是指清单数据(各项消耗与排放数据)单位变化率引起的某一项 LCA 结果变化率<sup>[21]</sup>。灵敏度大的清单数据既是产品生命周期改进的重点,也是提高 LCA 数据质量

表 10 铬鞣黄牛革 LCA 累计贡献表(污水/污泥处理)

Tab.10 LCA cumulative contribution of cattle leather (sewage and sludge treatment)

过程名称	GWP/%	PED/%	ADP/%	AP/%	RI/%
污水/泥处理(总)	1.37	0.83	0.03	0.63	2.52
次氯酸钠	0	0	0	0	0
石灰	0.32	0.10	0	0.05	1.31
电力	1.01	0.70	0.02	0.55	1.18
硫酸亚铁	0	0	0	0	0
片碱	0.03	0.02	0	0.02	0.03
PAM	0.01	0.01	0	0.01	0.01
盐酸/液碱	0	0	0	0	0
PAC/甲醇	0	0	0	0	0

表 11 主要清单灵敏度结果  
Tab.11 List of the main sensitivity results

过程名称	清单名称	平均灵敏度/%	GWP/%	PED/%	ADP/%	AP/%	RI/%
黄牛革	鞣前及鞣制	93.04	89.79	91.25	99.07	93.11	87.19
整饰	牛原皮	66.72	82.58	85.69	7.01	87.24	72.70
整饰	HLS 铬粉	11.16	4.73	3.78	0.50	4.10	10.44
整饰	小苏打	10.37	0.20	0.11	91.33	0.34	0.46
整饰	硫酸钠	3.06	0.02	0.02	0	0.01	0.03
黄牛革	铬鞣剂	2.26	3.06	2.72	0.38	2.19	3.67
黄牛革	电力	1.69	3.89	2.69	0.08	2.13	4.55
黄牛革	污水/污泥处理	0.71	1.37	0.83	0.03	0.63	2.52
整饰	电力	0.51	1.17	0.81	0.02	0.64	1.37
黄牛革	水性涂料	0.48	0.51	0.48	0.12	0.19	0.27
污水处理	电力	0.44	1.01	0.70	0.02	0.55	1.18

和结果可信度的关键。如表 11 所示,在黄牛革生产过程中,鞣前及鞣制处理的平均灵敏度最大,为 93.04%,是生产改进的重点,其次为整饰过程。

#### 4.5 CLCD 数据质量评估与改进

eFootprint 系统采用 CLCD 谱系矩阵评估主要消耗和排放(灵敏度 >1%)的不确定度,以及主要消耗连接的背景数据的匹配不确定度。通过数据质量评估计算可以得出各清单对 LCA 指标不确定度的贡献率<sup>[22]</sup>。然后根据不确定度贡献率,补充收集数据,迭代改进。

在铬鞣黄牛革全生命周期评价中,通过数据分析可知,对 GWP 不确定度贡献最大的是鞣前处理及鞣制,因此可通过改进鞣前处理及鞣制来降低 LCA 结果不确定度。同时,因数据实际代表性与目标代表性在主要数据来源上有差异,目标代表性为代表行业平均数据,实际代表性为企业生产统计或实测数据。排放数据中,不确定度最大的为二氧化硫排放,数据的实际代表性与目标代表性在主要数据来源上有差异,导致数据合成不确定度较大<sup>[23]</sup>。因此,将主要数据来源由企业生产统计或实测数据改为温室气体核算标准/行业内标准/清洁生产标准默认值后,该条数据的不确定度由 15%降低为 10%,GWP 结果不确定度由 8.86%降低到 8.04%。

## 5 结论与展望

(1)对于铬鞣黄牛革的全生命周期评价,在三个单元过程中,对各个指标贡献值最大的均为鞣前处理及鞣制过程,其 GWP、ADP、AP 和 RI 的贡献值分别为 91.1%、89.52%、92.64%和 86.52%。其次贡献率较大的为湿态染整和干态整饰过程,污水/污泥处理过程对结果的影响很小,贡献值均处于 2.6%以

下。因此,在铬鞣黄牛革生产过程中,鞣前处理及鞣制过程为重点改进过程。在鞣前及鞣制工段中,铬鞣剂显示出较高的贡献值,其 PED、GWP、AP 和 RI 的贡献值分别为 3.78%、4.73%、4.10%和 10.44%。

(2)虽然铬鞣方法操作简单、工艺成熟。但铬鞣革难生物降解、铬资源短缺、铬对环境的污染严重等问题已经逐渐促使

人们转向对新型无铬鞣剂、清洁化鞣制技术等研究。基于制革材料及产品 LCA 数据结果,无铬鞣、具有吸附甲醛功能的填充剂、高性能助剂、少盐浸酸和高吸收铬鞣等方法,对制革清洁化生产具有较为乐观的发展潜能。在未来,可以通过生命周期评价的方法,科学评价新化料、新工艺对制革行业的环境影响,建立我国制革行业的全生命周期绿色管理方法。

#### 参考文献:

- [1] 赵浩然.皮革加工工艺污染物排放特征研究[D].黑龙江大学,2018.
- [2] 章培昆,刘健西.绿色壁垒与中国皮革贸易[J].西部皮革,2012,34(4):34-40.
- [3] 陈小珂,刘鹏杰.不规范无春天——解读《制革行业规范条件》[J].中国皮革,2014,43(13):54-58.
- [4] 王世成,谢帆,苏芳,等.新冠疫情对中国轻工会展行业的影响[J].皮革科学与工程,2021,31(2):84-87.
- [5] 吴永申.皮革的绿色化发展研究[J].皮革制作与环保科技,2020,1(2):83-85.
- [6] 李波,但卫华,但年华.关于制革生产的智能化发展思考[J].皮革科学与工程,2021,31(1):20-23.
- [7] Bovea MD, Serrano J, Bruscas G M, et al. Application of life cycle assessment to improve the environmental performance of a ceramic tile packaging system[J]. Packaging Technology & Science, 2006, 19(2): 83-95.
- [8] Michael D. LCA for leather and leather products [J]. Leather international, 2010, 212(4802): 22-24.
- [9] Franca, W T, Barros M V, Salvador R, et al. Integrating life cycle assessment and life cycle cost: a review of environmental-economic studies [J]. International Journal of Life Cycle Assessment, 2021, 26(2), 244-274.
- [10] Chen W, Hong J, Wang C, et al. Water footprint assessment

- of gold refining: Case study based on life cycle assessment [J]. *Ecological Indicators*, 2021, 122: 107319.
- [11] 徐晓颖,石佳博,王坤余.基于 LCA 法对比传统铬鞣工艺和改性戊二醛鞣工艺[J].*皮革科学与工程*,2015,25(1):5-12.
- [12] 单晨,丁绍兰.牛皮革与 PU 革的生命周期评价比较[J].*西部皮革*,2011,33(6):12-15.
- [13] 王洪涛.势在必行的生命周期评价[J].*高科技与产业化*,2014,(5):54-57.
- [14] 范闪,郝东艳,马飞,等.基于 LCA 方法单皮鞋生产环境影响评价体系[J].*资源节约与环保*,2018,197(4):54.
- [15] Castiello D, Puccini M, Seggiani M, et al. Life Cycle Assessment (LCA) of the Oxidative Unhairing Process by Hydrogen Peroxide [J]. *Journal of the American Leather Chemists Association*, 2008, 103(1):1-6.
- [16] Bender M A, Farach-Colton M. The LCA Problem Revisited [C]. *Latin American Symposium on Theoretical Informatics*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2000, 1776, 88-94
- [17] Shi J, Zhang R, Mi Z, et al. Engineering a sustainable chrome-free leather processing based on novel lightfast wet-white tanning system towards eco-leather manufacture [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 282: 124504.
- [18] Rosa R, Pini M, Neri P, et al. Environmental sustainability assessment of a new degreasing formulation for the tanning cycle within leather manufacturing [J]. *Green Chemistry*, 2017, 19(19): 4571-4582.
- [19] 欧永智.工厂供配电系统设计中节电措施的应用及意义解析[J].*工程技术*,2016,(5):297-297.
- [20] Guel S, Spielmann M, Lehmann A, et al. Benchmarking and environmental performance classes in life cycle assessment—development of a procedure for non-leather shoes in the context of the Product Environmental Footprint [J]. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2015, 20(12):1640-1648.
- [21] Tasca A L, Puccini M. Leather tanning: Life cycle assessment of retanning, fatliquoring and dyeing [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 226: 720-729.
- [22] 惠婧璇,万里扬.生命周期评价方法及应用于我国可再生能源领域研究进展 [J]. *中国能源*,2020,42(3):42-47.
- [23] 邓南圣.生命周期评价[M].北京:化学工业出版社环境科学与工程出版中心,2003.

(上接第 10 页)

- of tanning: Present thinking and future implications for industry, *Journal of the Society of Leather Technologists and Chemists*, 2001, 85(1): 24-34.
- [2] Brown E M, Dudley R L, Elsetinow A R. A conformational study of collagen as affected by tanning procedures, *Journal of the American Leather Chemists Association*, 1997, 92(9): 225-232.
- [3] Ramasami T. Approach towards a unified theory for tanning: Wilson's dream, *Journal of the American Leather Chemists Association*, 2001, 96(8): 290-304.
- [4] 韩文康,韩国元,张美娜,等.有机鞣剂 DC 与皮胶原作用机理研究[J].*皮革科学与工程*,2020,30(1):33-36.
- [5] 张嵘,魏德卿.X-射线衍射法研究丙烯酸类聚合物鞣制机理[J].*中国皮革*,1999,(5):3-5.
- [6] 张奇,唐春雪,丁克毅,等.胶原中氢键变化的红外光谱、拉曼光谱分析[J].*中国皮革*,2020,49(1):16-21.
- [7] 丁云桥,李天铎,陈正隆.铬鞣机理的分子模拟研究[A].中国化学会.中国化学会第 29 届学术年会摘要集——第 15 分会:理论化学方法和应用[C].中国化学会:中国化学会,2014:1.
- [8] 李亚,邵双喜,单志华. THPC 鞣革机理研究[J].*中国皮革*,2005,(19):15-18.
- [9] Romer F H, Underwood A P, Senekal N D, et al. Tannin Fingerprinting in Vegetable Tanned Leather by Solid State NMR Spectroscopy and Comparison with Leathers Tanned by Other Processes [J]. *Molecules*, 2011, 16 (2): 1240-1252.
- [10] Covington A D, Hancock R A. 27Al NMR analysis on aluminium (III) tanned hide powder before and after shrinkage, *Journal of the Society of Leather Technologists and Chemists*, 1989, 73(1): 1-7.
- [11] 丁克毅.有机酸蒙圈铝配合物的组成、结构和与胶原的反应性研究[D].四川大学博士学位论文,2001.
- [12] 邵双喜,史楷歧,李亚,等.四羟甲基氯化磷无铬鞣的机理(英文)[J].*Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2008,(03):446-450.
- [13] Zhang Z T, Liu J, Wang J C, et al. Insight into Understanding Incorporation of Glycidoxypolytrimethoxysilane for Improving Hydrothermal Stability and Porous Structure of Silicic Acid Tanned Leather[J]. *Journal of the American Leather Chemists Association*, 2019, 114(8): 300-312.
- [14] Matthews N S, Lloyd G R. Use of phosphonium compounds in the production of leather [J]. *Journal of Cleaner Production*, 1993, 87: 39-49.