

中文引用格式:国汉君,马秋菊,康荣学. 基于生物能量系统原理的人体伤害机制[J]. 中国安全科学学报,2025,35(6):1-9.

英文引用格式:GUO Hanjun, MA Qiuju, KANG Rongxue. Study on human body injury mechanism based on principle of biological energy system[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(6): 1-9.

基于生物能量系统原理的人体伤害机制^{*}

国汉君¹研究员, 马秋菊²副教授, 康荣学^{**3}研究员

(1 国家能源集团, 北京 100011; 2 中国矿业大学(北京) 应急管理与安全工程学院, 北京 100083; 3 应急管理部 国家自然灾害防治研究院, 北京 100085)

中图分类号:X910

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.06.0121

【摘要】 为深化安全生产理论认识,应用人体生物能量系统(BES)原理,针对生产作业,开展人体伤害机制研究。从生物能量活动和生物组织机能2方面构建生产作业人体安全模型;归纳出与人体交互的物质能量类型,包括摄入能量、活动能量、生产物质能量、物理环境能量,分析各类型能量与人员作业安全的关联关系;根据伤害后果状态,构建人体伤害程度表征函数;从人体BES视角,揭示物质能量作用下的人体伤害机制。结果表明:在生产过程中,与人体交互的物质能量活动异常,对人体产生过度作用,导致人体生物能量活动受阻或失衡,生物组织损伤,机能丧失,是造成人体伤害的根源。对人体产生作用的能量不仅是来自外部的物质能量,还来自人体内部的生物能量,将导致健康与安全问题的根源归结为能量作用,从理论上形成统一的人体伤害机制。

【关键词】 生物能量系统(BES); 人体伤害; 物质能量; 异常作用; 生产作业

Study on human body injury mechanism based on principle of biological energy system

GUO Hanjun¹, MA Qiuju², KANG Rongxue³

(1 China Energy Investment Corporation Limited, Beijing 100011, China; 2 School of Emergency Management and Safety Engineering, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 3 National Institute of Natural Hazards, Ministry of Emergency Management of the People's Republic of China, Beijing 100085, China)

Abstract: In order to enhance safety in production, a human injury mechanism of operation was studied based on the principles of human BES. A safety model for human factors in operations was integrated from biological energy and the functional capabilities of biological tissues. The energies interacting with the human body were categorized into four types: the ingested energy, the activity energy, the substance energy in production and the energy from surrounding. The way they influenced the operation safety was analyzed. Based on injury consequence state, the characterization function of human injury degree was constructed, and mechanism of human injury under the action of substance energy was revealed. It shows that the abnormality of substances and energies in production operation produces overaction in the human

* 文章编号:1003-3033(2025)06-0001-09; 收稿日期:2025-02-13; 修稿日期:2025-04-18

** 通信作者:康荣学(1972—),男,山东费县人,博士,研究员,主要从事化工安全、重大危险源监控、应急管理等方面的工作。E-mail: kangrx@chinasafety.ac.cn。

body and leads to the blockage or imbalance of biological energy activities, which results in biological tissue damage and loss of function. This is the root cause of human injury. The substances and energies which interact with the human body come from external surroundings and internal (e. g. the body's biological energy). All the root causes of occupational health injury and production safety injury can be traced to energy interactions. That helps us to form a unified mechanism of human injury theoretically.

Keywords: biological energy system (BES); human body injury; substance energy; abnormal action; production operation

0 引言

当前,安全生产事故能量论在安全领域内已逐步被广泛认知和接受,国内外诸多学者依据该理论开展安全生产事故相关研究。在国外,GIBSON^[1]提出能量意外释放理论,认为不正常或不希望的能量释放,是造成事故伤害的直接原因;HADDON^[2]完善了GIBSON理论,提出伤害的根本原因是能量的转移,并将伤害分为2类:第1类伤害是由于施加局部或全身性损伤阈值的能量引起的;第2类伤害是由于影响局部或全身性能量交换引起的,如中毒、窒息等。ZABETAKIS等^[3]指出,大多数伤亡事故是由于过多的能量作用于人体或扰乱了人体与外界正常能量交换造成的。上述内容构成了能量意外释放理论的核心。在国内,与能量相关的安全生产事故致因理论包括2类危险源理论^[4]和内外因事故致因理论^[5],前者认为能量是导致事故的第1类危险源,后者认为物质能量是导致事故的内因。后期鲜有新的论述发展,当前主要围绕GIBSON、HADDON等早期提出的能量释放和转移理论,针对具体问题开展研究。

能量意外释放理论是代表性事故致因理论,在安全生产实践中发挥了积极指导作用,诸多事故防控模型及风险评价方法都是在此理论的基础上构建而成^[6-8],然而,根据生产实践,能量意外释放理论在理论深度等方面还存在一定的局限性,分别为:①该理论还停留在早期的论述上,鲜见结合现代生产实际对能量作用机制做出更深入地系统阐述,缺乏对能量作用的影响要素及逻辑关系的系统剖析。②在生产实践中,要同时面临健康与安全2方面人身伤害问题,而能量释放理论主要适用于安全生产事故,没有对疲劳损伤等职业健康伤害相关问题作出具体解释,制约了该理论在实践中的有效应用。当前有关安全生产与事故预防等方面的研究,多注重从反向分析导致事故伤害的因素,进而针对这些因素提出控制措施,缺乏从人体实现安全生产的客

观要求出发的正向分析,导致提出的控制措施具有局限性。

鉴于此,笔者拟基于人体生物能量系统(Biological Energy System,BES)原理,采用正向分析方法,系统性分析作业过程中人体能量活动,并建立人体安全模型,从能量角度诠释人体安全客观要求,以期从理论上实现人身健康与安全的统一分析,指导生产实践。

1 人体安全模型

1.1 人体 BES 特性

人体是由生物组织组成的复杂生物能量活动系统,人体生物组织具有相应各类机能,既是体内生物能量载体,又是依靠体内生物能量驱动实现生物组织的机能,其中,生物组织机能体现的是静态特性,生物能量活动体现的是动态特性。根据物质能量二元性观点^[9],生物组织机能与生物能量活动二者紧密关联,相互作用,生物能量的正常活动需要生物组织机能作保障,生物组织机能的实现需要生物能量活动作支撑。体内生物能量活动包括能量的吸收、转换、消耗等环节,维持生命的新陈代谢和正常的生产活动。

根据人体 BES 的静态与动态特性,生产实践中,人体安全性体现在2个方面:①人体生物组织机能的完好性;②体内生物能量活动的可靠性。其中,任一方面出现问题,均会导致人体伤害,危及生命安全。同时,二者相互影响,人体生物组织损伤,机能丧失,将会导致生物能量活动的异常;反之,人体生物能量活动异常,生物组织受到的能量作用超过一定限度,将会导致生物组织损伤,机能丧失。

1.2 人体生物能量活动模型

人的生产作业活动实质是人体内生物能量活动,生物能量活动涉及能量的外部摄入、体内新陈代谢、活动输出等。具体分析人体新陈代谢等生物能量活动规律已超出本领域研究范畴,文中仅从安全

生产角度,重点研究人体能量的外部摄入、活动输出及相互作用关系。

首先,根据人体生理需求,需要从外部输入体内物质能量,相关属性包括种类、摄入方式、质量、数量等。主要物质能量种类包括食物、水和氧气等;各类能量摄入体内的条件方式不同,食物和水是间歇性摄入,而氧气必须持续性摄入;各种物质能量均有严格的质量指标要求,物质成分要符合人体需要,且不含有毒有害成分;正常情况下,为维持人体生命延续与活动,需及时补充适量能量。

其次,人体活动需要输出能量,相关属性包括劳动强度、持续时间和特定周期内输出能量的总量等。输出能量应限定在适当的范围内,上述属性指标都存在一定的限度。在生产作业过程中,能量不断消耗,当体内能量储备耗竭且来不及补充时,人体就会产生疲劳,进而导致伤害。总体上,摄入能量与生产活动输出能量应保持平衡,输出能量不应透支摄入能量。基于上述分析,构建人体生物能量活动理论模型。

人体摄入物质能量模型:

$$E_i = E_i(Q, m_i) \quad (1)$$

式中: E_i 为人体输入能量; Q 为能量物质摄入量; m_i 为摄入能量物质成分。

通常,摄入总量存在合理区间,同时, m_i 和 Q 具有特定阈值要求,建立摄入能量物质约束条件:

$$\begin{cases} E_{i,\min} \leq E_i \leq E_{i,\max} \\ Q_{\min} \leq Q \leq Q_{\max} \\ m_{i,\min} \leq m_i \leq m_{i,\max} \end{cases} \quad (2)$$

式中下标 $\min$ 和 $\max$ 分别为最小和最大阈值。

人体活动输出能量模型:

$$E_o = E_o(I, t) \quad (3)$$

式中: E_o 为人体活动输出能量; I 为活动输出能量强度; t 为活动时间。

通常,在持续时间 t 内人体输出能量的总量 E_o 、能量强度 I 都存在一定的限度,具有特定阈值要求,建立输出能量约束条件:

$$\begin{cases} E_o \leq E_{o,\max} \\ I \leq I_{\max} \end{cases} \quad (4)$$

在生产过程中,在特定时间周期 T 内,人体生物能量活动应满足平衡方程:

$$\int_T [E_i(Q, m_i) - E_o(I, t) - E_b(t)] = 0 \quad (5)$$

式中 E_b 为人体新陈代谢消耗的能量。

式(1)一式(5)构成人体生物能量活动理论模

型,揭示了在生产作业过程中,要保障生物能量活动可靠性,人体摄入的物质能量以及活动输出的能量需符合人的生理要求,保持体内生物能量均衡。

1.3 人体生物组织机能模型

能量对生物组织机能的作用影响主要体现在2方面:①能量(含身体内部和外部能量)对生物组织的直接作用;②外部物理环境条件对生物组织机能的影响。

1.3.1 能量的直接作用

生物组织一方面在异常情况下受到来自生产现场的外部物质能量作用,另一方面作为能量载体,受到体内生物能量作用。

能量是某种强度量对相应广延量的累积效应,能量对人体组织作用程度取决于能量强度、能量作用频率和持续作用时间等要素。人体对外部危害物质能量的持续、多频次、大剂量或高强度的接触吸收,以及人体内生物能量对人体组织的异常过度作用,将导致人身伤亡和职业健康伤害;后果取决于能量作用程度和人体生物组织承受度,能量越大、越集中,作用人体部位越脆弱,造成的伤害越严重。基于上述分析,构建人体生物组织机能理论模型。

能量对人体生物组织作用模型:

$$E_h = E_h(I_h, t, f) \quad (6)$$

式中: E_h 为作用于人体的能量; I_h 为能量作用于人体机体的强度; f 为能量作用于人体的频率。

根据人体生物组织对各种能量作用的承受度,建立约束条件:

$$\begin{cases} E_h < E_{h,\max} \\ I_h < I_{h,\max} \end{cases} \quad (7)$$

传统上,由于外部能量过度作用而导致人体伤害已被广泛认知。实际上,由于人体内部能量的长时间过度作用将导致劳损等职业健康伤害,其伤害机制相同。式(6)、式(7)建立了统一的能量对人体生物组织机能作用的理论模型,既适用于安全生产事故伤害分析,也适用于职业健康伤害分析。

1.3.2 物理环境条件影响

人的日常生活与生产活动受到外部物理环境条件的影响,物理环境条件因素包括空气、温度、湿度、光线(照明)、声音(噪声)、气压等,是人类生存面对的客观要求,对人体生物组织机能、生物能量活动都会产生重要影响。这些物理环境条件对人体的影响实质也是外部能量对人体生物组织的作用,其中,空气的作用机制不同,人体吸入空气中的氧气起到补

充人体能量作用,也属于摄入能量,其他物理环境因素则是从外部对人体机体组织产生影响作用。根据作用机制不同,将空气纳入摄入能量研究范畴。

物理环境条件取决于自然环境、生产现场及周边环境(包括相邻企业)的共同作用。人体对外部物理环境条件具有特定要求,应限定在人体客观适宜的范围内,否则当物理环境条件不适,会影响人的工作状态,易引发连锁负面变化;超过一定范围,甚至直接导致人体伤害。

物理环境因素具有特定衡量指标,为研究方便,采用通用物理环境因素衡量指标 H ,建立约束模型:

$$H_{min} \leq H \leq H_{max} \tag{8}$$

式(6)一式(8)构成人体生物组织机能理论模型,揭示了在生产过程中,要保持人体生物组织机能完好性,人体需免受外部物质能量与体内生物能量对人体组织的过度作用,保持物理环境条件适宜。

综上,基于人体 BES 原理,构建系统的人体安全模型,其逻辑关系如图 1 所示。

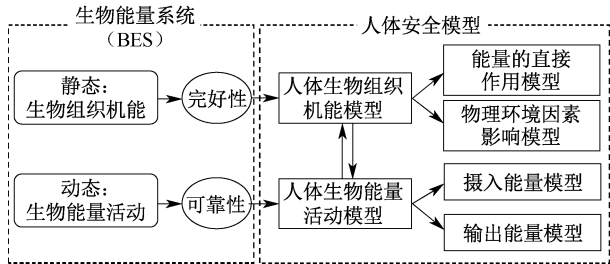


图 1 基于 BES 的人体安全模型
Fig.1 Human safety model based on BES

2 能量类型及危害作用

根据生物能量活动可靠性和组织机能完好性 2 类模型,与人体交互的物质能量分为摄入能量、活动能量、生产物质能量、物理环境能量 4 种类型,是导致人身伤害的根源与内因。为验证划分的合理性与实用性,以现行我国安全生产事故与职业病伤害分类^[10-11]标准为依据,系统分析物质能量类型、能量异常作用形式、人体伤害分类、安全阈值要求间的关联关系。

1) 摄入能量是为满足生存与生产需要,吸入人体内的能量。摄入物质能量的种类、摄入方式、质量、数量等应符合人体生理要求。

当摄入的物质能量出现异常,超过安全阈值,将造成人体伤害,主要包括:摄入能量物质的质量不符合要求,会引发中毒、营养不良等;摄入物质能量不足与过量,饥饿、缺水等导致窒息、低血糖、高血氧症

等。特别是人员从事生产作业时,必须保障正常合格的空气质量,否则将因缺氧导致窒息死亡^[12]。

表 1 为常见摄入物质能量异常作用形式与对人体伤害分类、安全阈值要求间的关联关系。

表 1 摄入能量异常作用与人体伤害关联关系

Table 1 Abnormal forms of action of human intake energy and types of body injuries

能量类型	能量异常作用形式	人体伤害分类	安全阈值要求
人体摄入能量	摄入物质质量不合格	营养不良	与营养均衡性有关
		食物中毒	针对特定物质而定
	摄入能量不足与过量	低血糖	与食物摄入不足有关
		窒息	作业空间氧含量应≥19.5% ^[13]
		高血氧症	动脉血氧分压≤120 mmHg

2) 活动能量是从事生产活动时从人体内输出的生物能量。生产作业活动时,人体应以适度强度和频率输出活动能量,及时补充能量,恢复并保持精力与体力;同时,作业活动过程中要注重正确的动作姿势。

在生产过程中,当活动能量出现异常,人体能量的输出超过安全阈值,将造成人体伤害。①当体内能量储备耗竭且来不及补充,人体产生疲劳,疲劳过度积累,将逐渐演化为器质性病变,造成疲劳损伤,丧失活动能力^[14-15],疲劳也会致使人的精力和体力下降,容易导致人的不安全行为,引发其他连锁事故,甚至造成人员伤亡^[16]。②由于长期不正确的动作姿势,人体自身能量活动造成身体生物组织损伤,如腰肌劳损等职业伤害^[17]。

表 2 为常见人体活动能量异常作用形式与对人体伤害分类、安全阈值要求之间的关联关系。

表 2 活动能量异常作用与人体伤害关联关系

Table 2 Abnormal forms of action of human activity energy and types of body injuries

能量类型	能量异常作用形式	人体伤害分类	安全阈值要求
人体活动能量	活动能量输出超过限度	疲劳	疲劳感与作业强度有关。例如:重体力劳动持续 10 min,一般作业持续 3 h 感受到疲劳 ^[18]
	不正确的动作姿势下过度活动	劳损	与涉及的人体具体部位有关

3) 生产物质能量是外部施加作用于人体,危害

生命与健康的物质能量。生产物质能量产生源于生产现场的设备设施、材料等生产资料及处于特定位置的人员等。生产现场中存在传导型能量体、蓄能型能量体和内能型能量体 3 类物质能量体^[9]。

人体受到外部物质能量作用,通过转化,被人体吸收,人体对物质能量作用存在一定的承受度。生产物质能量体中能量的异常释放和对人体的过度作用是造成人体伤害的主要形式,具体包括:①物质能量从人体外部作用,如高处落物、飞迸物、滚击物、倒

物等^[19-20]固态物质能量对人体打击,液态和气态物质能量对皮肤、眼、耳鼻、喉、口腔等人体表层的损伤等;②有害物质能量被人体吸入,从体内对机体组织产生作用,影响体内生物能量活动,如吸入粉尘及有毒有害物质等^[21];③人体携带能量释放后对自身作用,如高处坠落是人体处在高处时携带势能释放,作用于坠落人员导致伤害^[22]。

表 3 为常见生产物质能量异常作用形式与对人体伤害分类、安全阈值要求间的关联关系。

表 3 生产物质能量异常作用与人体伤害关联关系

Table 3 Abnormal mode of action of material energy and types of body injuries

能量类型	能量异常作用形式	人体伤害分类	安全阈值要求
生产物质能量	从人体外部作用	物体打击、机械伤害、车辆伤害	人体不同部位承受的应力限值不同。如避免中等脑神经损伤的应力 $\leq 17\text{ kPa}^{[23]}$;避免胸部肋骨骨折的应力 $\leq 124.2\text{ MPa}^{[24]}$
		爆炸	爆炸冲击波压力 $\leq 20\text{ kPa}^{[25]}$
		触电	电压 $\leq 36\text{ V}^{[26]}$,电流 $\leq 10\text{ mA}^{[27]}$
		灼烫	温度 $\leq 44\text{ }^{\circ}\text{C}^{[28]}$
		火灾	热辐射强度 $\leq 15.65\text{ kW/m}^2^{[29]}$
		坍塌	坍塌涉及物体打击、掩埋窒息等伤害,安全阈值参照相应伤害形式
		透水	透水涉及窒息、物体打击、失温等伤害;安全阈值参照相应伤害形式
		辐射	连续 5 年的年平均有效剂量 $\leq 20\text{ mSv}^{[30]}$
	吸入人体内部产生作用	皮肤、眼耳鼻喉口腔等人体表层损伤	针对具体物质和伤害形式而定
		尘肺等呼吸系统伤害	尘肺病粉尘的安全质量浓度阈值与粉尘类别和工况相关。如碳含量 $\geq 80\%$ 、氧含量 $\geq 10\%$ 、氢含量 $\geq 8\%$ 、硫含量 $\geq 2.0\%$ 的煤尘诱发尘肺病概率较高 ^[31]
		中毒	与具体有毒有害气体浓度有关。如工作场所的硫化氢质量浓度应 $\leq 10\text{ mg/m}^3^{[32]}$;工作人员短时间(15 min)接触的一氧化碳加权平均质量浓度应 $\leq 30\text{ mg/m}^3^{[32]}$
	高处人体携带能量释放	高处坠落	死亡率与坠落高度有关。事故统计数据显示,从 3 m 以下,3~7.62 m 及超过 7.62 m 高度坠落的死亡占比分别是 19.8%、59.6%及 20.6% ^[33]

4) 物理环境能量是影响人体生命与生产活动的外部条件能量。人体对外部物理环境条件的适应范围具有特定要求。

当物理环境条件出现异常,由于作业环境条件不适,会影响人员工作状态,易引发连锁事故;超过一定范围,将造成人体伤害作用,主要包括窒息、中暑、冻伤、眼盲、耳聋、减压病、高原病等,轻者身体组织机能下降及影响人体生物能量正常活动,重者将直接导致人员身体组织伤害,丧失机能,甚至危及生命。

表 4 为常见物理环境异常作用形式与对人体伤害分类、安全阈值要求间的关联关系。

需要说明的是,风、雨、雪、雾、雷电等属于自然环境,在极端情况下,也会对人员作业产生影响,造

成伤害,这些在自然灾害防控领域有专门研究,此处不再赘述。

3 人体伤害程度评价

3.1 伤害后果状态

针对生产作业的人体伤害后果有多种划分形式,从伤害性质上,分为死亡、伤残等;从伤害治疗康复结果上,分为可恢复性伤害和不可恢复的永久性伤害。总体上,可按生物组织破坏与机能丧失程度,划分人体伤害状态,依照伤害对日常生活自理能力的影响程度,伤残又可分为以下不同等级。

1) 死亡状态。生物组织彻底破坏,机能彻底丧失,体内生物能量活动永久停止。

2) 永久伤害状态。生物组织受到损伤,机能全

表 4 物理环境能量异常作用与人体伤害关联关系

Table 4 Abnormal action forms of physical environment energy and types of body injuries

能量类型	能量异常作用形式	人体伤害分类	安全阈值要求
物理环境能量	氧气异常(缺氧)	窒息	导致窒息的氧气含量与暴露时间有关。氧气含量 15%~19.5%:短时间暴露,工作效率会降低。长时间暴露,可能导致心脏和肺病问题;氧气含量 10%~14%:短时间暴露会呼吸急促、降低认知能力、损伤神经系统等;氧气含量 4%~8%:暴露 8 min 致命 ^[34]
	气压异常	高原病	高原病与海拔变化有关,从平原进入海拔 3 000 m 以上高原时,一般人体难以适应
		减压病	减压病与高压条件下工作后的减压速度有关
	温度异常	中暑	中暑温度与工作强度和持续时间相关。如在 42 ℃ 以上高温下,轻体力劳动工作时间应≤20 min,重体力劳动者应≤10 min;在 40 ℃ 高温下,轻体力劳动工作时间应≤30 min,而重体力劳动应≤15 min ^[35]
		冻伤	冻伤温度与风速和持续时间有关。例如:风速=5 km/h,气温=-20 ℃ 时,暴露 30 min 有冻伤风险;风速=10 km/h,气温=-15 ℃ 时,暴露 30 min 有冻伤风险 ^[36]
	光照异常	眼盲、眼胀、视力下降等眼部损伤	视觉疲劳照度与持续时间相关。例如:照度=50 lx 时,工作 32 min 出现视觉疲劳;照度=300 lx 时,工作 58 min 出现视觉疲劳;照度=750 lx 时,工作 42 min 出现视觉疲劳 ^[37]
	声音异常(噪声)	耳聋	听力伤害与持续时间相关。例如:噪声级=90 dB 时,工作时间应≤8 h;噪声级=115 dB 时,工作时间应≤15 min ^[15]

部或部分丧失,体内生物能量活动受到影响,人体伤害不可恢复。

3) 可恢复状态。在能量作用消除或改变后,人体伤害经治疗康复,人体可立即或经过一段时期后恢复正常。

4) 受影响状态。生物组织机能以及体内生物能量活动受到一定影响,但在能量作用消除或改变后,不经处置,人体可自行恢复正常,不会对生物组织造成持久损害。

5) 可承受状态。能量作用产生的影响在人体承受度范围内,不会对生物组织与机能,以及体内生物能量活动产生任何伤害。

3.2 人体伤害程度表征函数

为满足采用相关模型与算法等手段,开展更深入的人体伤害分析的需要,按照伤害状态与等级划分,引入人体机能完好度与生物组织结构完好度概念,建立伤害程度表征函数。

1) 人体机能完好度。构建人体机能完好度表征函数 $F(E)$:

$$F(E) = \begin{cases} 1, & \text{机能完好} \\ (0,1), & \text{机能部分丧失} \\ 0, & \text{机能完全丧失} \end{cases} \quad (9)$$

2) 生物组织结构完好度。构建生物组织结构完好度表征函数 $P(E)$:

$$P(E) = \begin{cases} 1, & \text{生物组织完好} \\ (0,1), & \text{生物组织部分损害} \\ 0, & \text{生物组织完全损害} \end{cases} \quad (10)$$

建立基于人体机能完好度和生物组织结构完好度的伤害程度表征函数特征值,见表 5。

表 5 人体伤害程度表征函数特征值

Table 5 Characteristic value of the harm severity state function

伤害结果状态	生物组织结构完好度 $P(E)$	人体功能完好度 $F(E)$
可承受状态	1	1
受影响状态	1	(0,1]
可恢复状态	(0,1]	(0,1]
永久伤害状态	[0,1)	[0,1)
死亡或重大损失状态	0	0

4 人体伤害机制与控制策略

4.1 人体伤害机制

综上,基于人体 BES 原理的生产作业人体伤害机制可阐释为:人体伤害源于与人体交互的物质能量活动异常及对人体过度作用。能量的过度作用导致人体生物能量活动受阻或失衡;人体生物组织损伤,机能丧失。各类伤害间相互影响,互为因果,能量异常作用程度,决定了人体伤害后果。能量作用

下的人体伤害机制如图 2 所示。

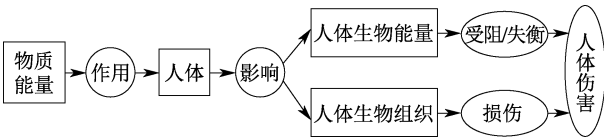


图 2 能量作用下的人体伤害机制

Fig. 2 Mechanism of body injuries based on impact of energies

由图 2 可知: 能量对人体的作用不仅是外部能量作用, 也包括体内生物能量作用, 进而将健康与安全问题的根源统合, 在理论上形成统一的人体伤害机制阐述, 根据能量类型划分, 能够全面诠释各类伤害的根源。伤害的阐述更加清晰, 特别是对传统理论中有关能量交换类伤害的诠释更加准确, 如窒息源于人体摄入能量的中断, 进而导致生物能量活动受阻; 冻伤源于物理环境能量对人体的异常作用等。

4.2 物质能量控制策略

根据人体伤害机制, 相关物质能量是导致人身伤害的根源。影响人体生物能量活动的能量包括摄入能量、活动能量、物理环境能量; 影响人体生物组织机能的能量包括活动能量、生产物质能量、物理环境能量。为保障人体安全, 从物质能量与人体伤害的关联性角度, 建立有针对性的物质能量控制策略, 如图 3 所示。下面从 4 个方面分别阐述。

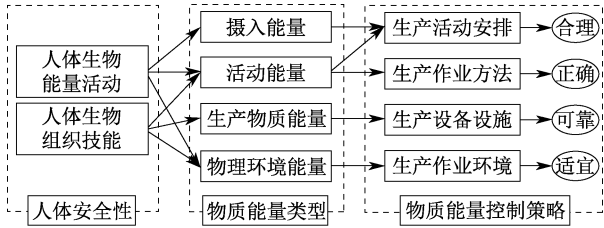


图 3 物质能量与人体危害的关联性控制策略

Fig. 3 Correlation between material energy and body injuries and energy control strategies

1) 生产活动安排合理。生产活动要与人的身体素质相适应, 按照人体生物特征, 控制作业活动负荷强度与持续时间, 科学安排生产作息, 保证人体物

质能量摄入, 注重身体机能恢复, 防止体能生物能量透支, 导致疲劳损伤, 以及疲劳作业的引发连锁事故。

2) 生产作业方法正确。人员作业应符合人体工效学要求, 防止由于作业姿势不当, 对体内生物组织产生危害, 导致人体疲劳损伤等职业病伤害。

3) 现场设备设施安全可靠。完善约束、调控及防护等安全防护措施^[9], 保障设备设施质量完好, 从本质上防止现场物质能量的异常释放而导致的人体伤害。

4) 生产作业环境适宜。根据人体需要, 提供安全适宜的生产作业物理环境条件, 防止作业环境异常, 导致窒息伤亡, 职业病伤害, 以及由于恶劣的作业环境条件而引发连锁事故。

5 结 论

1) 基于人体 BES 原理, 采用正向分析法, 构建人体安全模型, 揭示物质能量作用下的人体伤害机制, 将安全生产与职业健康 2 方面伤害的根源归结为能量作用, 从理论上形成统一的人体伤害模型, 能够更加全面、准确地诠释生产实践中的各类人体伤害, 弥补现有相关理论的局限性。

2) 从与人体交互角度划分能量类型, 并以现行我国安全生产事故与职业病伤害标准分类为样本, 阐明与人体伤害的关联关系, 提出控制策略, 验证能量类型划分的合理性、系统性。为在生产实践中准确系统分析人体伤害根源, 针对性制定管控措施提供了方法和途径。同时, 根据伤害后果状态, 构建人体伤害表征函数, 为开展更深入研究提供条件。

3) 物质能量的异常活动与过度作用是导致人体伤害的根源与内因, 而生产系统中人员作业行为、生产资料状态等方面存在的不安全因素, 是引发能量异常活动并对人体产生过度作用的外因条件。该理论不仅为预防控制能量活动与作用提供了方法途径, 也为分析相关外因条件提供理论依据, 但由于篇幅所限, 文中没有开展相关分析, 有待后续进一步研究。

参 考 文 献

[1] GIBSON J J. The contribution of experimental psychology to the formulation of the problem of safety: a brief for basic research[J]. Behavioral Approaches to Accident Research, 1961, 1: 77 - 89.

[2] HADDON W. The changing approach to the epidemiology, prevention, and amelioration of trauma: the transition to approaches etiologically rather than descriptively based[J]. American Journal of Public Health and the Nation's Health, 1968, 58(8): 1 431-1 438.

- [3] ZABETAKIS M, DEUL M, SKOW M. Methane control in United States coal mines[M]. Washington: United States Department of the Interior, 1973: 15.
- [4] 钱新明, 陈宝智. 重大危险源的辨识与控制[J]. 中国安全科学学报, 1994, 4(3): 16-21.
QIAN Xinming, CHEN Baozhi. On identification & control of major hazards[J]. China Safety Science Journal, 1994, 4(3): 16-21.
- [5] 国汉君. 内-外因事故致因理论与实现安全生产的途径[J]. 中国安全科学学报, 2007, 17(7): 46-53.
GUO Hanjun. Theory of accident causation based on internal-external factors and approaches for work safety [J]. China Safety Science Journal, 2007, 17(7): 46-53.
- [6] 黄浪, 吴超, 杨冕, 等. 基于能量流系统的事故致因与预防模型构建[J]. 中国安全生产科学技术 2016, 12(7): 55-59.
HUANG Lang, WU Chao, YANG Mian, et al. Modeling of accident causing and prevention based on energy flow system[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2016, 12(7): 55-59.
- [7] 梅振国, 王小平. 部队训练事故致因模型: 基于能量意外释放的角度[J]. 海军工程大学学报(综合版), 2021, 18(3): 63-66.
MEI Zhenguo, WANG Xiaoping. Construction of causation model of military training accidents: based on unexpected release of energy[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2021, 18(3): 63-66.
- [8] 李季梅, 陈宁, 姚晓晖. 锂电池火灾爆炸风险九度分析模型及安全防范策略研究[J]. 消防科学与技术 2025, 44(1): 1-9.
LI Jimei, CHEN Ning, YAO Xiaohui. Research on nine-dimensional model and safety prevention strategies of fire and explosion risk for lithium battery[J]. Fire Science and Technology, 2025, 44(1): 1-9.
- [9] 国汉君, 苏国锋, 林威, 等. 生产能量体二元属性及能量异常释放机制[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(4): 1-10.
GUO Hanjun, SU Guofeng, LIN Wei, et al. Duality of production-related energy objects and mechanism of abnormal release of energy [J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(4): 1-10.
- [10] GB 6441—1986, 企业职工伤亡事故分类[S].
GB 6441—1986, Classification for casualty accidents of enterprise staff and workers[S].
- [11] 国家卫生计生委, 人力资源社会保障部, 安全监管总局, 等. 国家卫生计生委等关于印发《职业病分类和目录》的通知[EB/OL]. (2013-12-23). https://www.gov.cn/gzdt/2013-12/30/content_2557352.htm.
- [12] 林其彪, 李鑫, 葛樊亮, 等. 基于数据驱动贝叶斯网络的化工事故风险分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2024, 20(4): 180-185.
LIN Qibiao, LI Xin, GE Fanliang, et al. Risk analysis of chemical accidents based on data-driven Bayesian network [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2024, 20(4): 180-185.
- [13] 应急管理部. 有限空间作业安全指导手册[EB/OL]. (2020-10-29). <https://www.mem.gov.cn/gk/tzgg/tz/202010/W020201102332723879957.pdf>.
- [14] 姜亢. 劳动卫生学[M]. 北京: 劳动社会保障出版社, 2007: 5-15.
- [15] 郭伏, 钱省三. 人因工程学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2018: 84-165.
- [16] 刘全龙, 彭雨蒙, 赵盼, 等. 基于 HFACS 模型的制造企业机械伤害事故致因分析[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(3): 51-59.
LIU Quanlong, PENG Yumeng, ZHAO Pan, et al. Analysis of causes of mechanical injury accidents in manufacturing based on HFACS model [J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(3): 51-59.
- [17] 方思瞳, 姚重界, 孔令军, 等. 慢性疲劳综合征评价量表选取及应用进展[J]. 中华中医药杂志, 2023, 38(9): 4 264-4 270.
FANG Sitong, YAO Chongjie, KONG Lingjun, et al. Progress in selection and application of scales for evaluation of chronic fatigue syndrome [J]. China Journal of Traditional Chinese Medicine and Pharmacy, 2023, 38(9): 4 264-4 270.
- [18] 王丁凤. 疲劳研究[J]. 经济管理, 1981(3): 66-70.
- [19] 何江, 蒙泳君, 赵庚亮, 等. 基于 VR 的地铁基坑施工安全教育系统设计与应用[J]. 中国安全生产科学技术, 2021, 17(8): 124-129.
HE Jiang, MENG Yongjun, ZHAO Gengliang, et al. Design and application of safety education system for subway foundation pit construction based on VR [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2021, 17(8): 124-129.
- [20] 郑霞忠, 刘奕成, 邵波, 等. 基于文本挖掘的水电工程施工物体打击事故致因分析[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(4): 50-57.
ZHENG Xiazhong, LIU Yicheng, SHAO Bo, et al. Accident causal analysis of object strike in hydropower project

- construction based on text mining [J]. China Safety Science Journal, 2024,34(4):50-57.
- [21] SCHENK L, FEYCHTING K, ANNAS A, et al. Records from the Swedish poisons information centre as a means for surveillance of occupational accidents and incidents with chemicals[J]. Safety Science,2018,104:269-275.
- [22] OLIVEIRA S S, SOARES W D A, VASCONCELOS B. Fatal fall-from-height accidents: statistical treatment using the human factors analysis and classification system(HFACS)[J]. Journal of Safety Research, 2023, 86: 118-126.
- [23] WILLINGER R. Head tolerance limits driven from numerical replication of real world accidents[C]. Ircobi Conference, 2000: 209-221.
- [24] MORDAKA J, MEIJER R, ROOIJ L V, et al. Validation of a finite element human model for prediction of rib fractures[R/OL]. (2007-04-16). <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2007-01-1161>.
- [25] 傅智敏, 黄金印, 臧娜. 爆炸冲击波伤害破坏作用定量分析[J]. 消防科学与技术, 2009,28(6):390-395.
FU Zhimin, HUANG Jinyin, ZANG Na. Quantitative analysis for consequence of explosion shock wave[J]. Fire Science and Technology, 2009,28(6):390-395.
- [26] 李沛. 电工电子技术工程实践[M]. 北京:清华大学出版社,2020: 3-6.
- [27] 何金良. 电力系统接地技术[M]. 北京:科学出版社,2006: 72-74.
- [28] WENG Wengguo, YANG Jie, WU Jialin, et al. Human thermoregulation and injury evaluation in fire environments: a review[J]. Fire Technology,2024,60:991-1 025.
- [29] 冯娇娇, 王静虹, 李佳, 等. 火灾事故下人群承受热辐射阈值差异分析[J]. 中国安全科学学报 2020,30(10): 134-140.
FENG Jiaojiao, WANG Jinghong, LI Jia, et al. Difference in thermal radiation threshold of people under fire accidents[J]. China Safety Science Journal, 2020,30(10):134-140.
- [30] GB 18871—2002, 电离辐射防护与辐射源安全基本标准[S].
GB 18871-2002, Basic standards for protection against ionizing radiation and for the safety of radiation sources[S].
- [31] 许茜茜. 不同变质程度煤种粉尘诱发煤工尘肺病因学研究及法医临床鉴定意义[D]. 青岛:青岛大学, 2021.
XU Qianqian. Etiological study of coal workers' pneumoconiosis induced by coal dust of different metamorphic degrees and forensic clinical identification significance [D]. Qingdao: Qingdao University, 2021.
- [32] GBZ 2.1—2019, 工作场所所有害因素职业接触限值第1部分:化学有害因素[S].
GBZ 2.1-2019, Occupational exposure limits for hazardous agents in the workplace: part 1: chemical hazardous agents[S].
- [33] DONG Xiuwen, JACKSON R, VARDA D, et al. Trends of fall injuries and prevention in the construction industry[EB/OL]. (2024-12-10). <https://stacks.cdc.gov/view/cdc/81140>.
- [34] 张涛, 曹阳, 赵会议. 缺氧对粮库进仓人员危害的探讨[J]. 粮油食品科技, 2014,22(1):130-132.
- [35] GB/T 4200—2008, 高温作业分级标准[S].
GB/T 4200-2008, Classified standard of working in the hot environment[S].
- [36] 昂晨. 高海拔徒步登山的风险管理研究:基于鳌太线的实地调查[D]. 金华:浙江师范大学,2023.
ANG Chen. Risk management in high-altitude trekking : Aoshan-Taibaishan line field study [D]. Jinhua: Zhejiang Normal University, 2023.
- [37] 徐明伟, 金龙哲, 田兴华, 等. 受限空间不同照度环境下 VDT 作业视觉疲劳[J]. 工程科学学报 2020,42(12): 1 605-1 612.
XU Mingwei, JIN Longzhe, TIAN Xinghua, et al. Visual fatigue of VDT operation under different illumination conditions in confined space[J]. Chinese Journal of Engineering, 2020,42(12):1 605-1 612.



作者简介: 国汉君 (1965—),男,内蒙古呼伦贝尔人,硕士,研究员,主要从事安全生产与应急救援等方面的工作。E-mail: harryguozz@163.com。