

改性戊烷在金属材料焊割中 应用与研究

白凯杰, 李运泉

广东省特种设备检测研究院顺德检测院 广东佛山 528300

摘要: 针对在金属材料焊割过程中不同燃料选择会对切割能耗及低碳环保存在影响的问题, 对改性丙烷、改性戊烷及乙炔3种焊割燃料在切割不同厚度钢板过程中的燃料消耗量、耗氧量、切割速度、CO₂排放量等参数进行试验研究, 并以燃料消耗量、耗氧量、切割速度、CO₂排放量作为热切割性能表征方式, 对比分析3种不同焊割燃料用于热切割时的性能表现。研究结果表明: 改性戊烷在相同测试条件下具有较好的热切割性能。此外, 还对热切割性能较好的液态改性戊烷在不同汽化温度下, 与空气混合燃烧后的排放污染物进行分析。结果显示: 改性戊烷液态温度越低, 燃烧后大气污染物排放值越低。该研究成果为工业生产选择低碳节能环保的焊割燃料提供了技术依据和参考。

关键词: 改性戊烷; 焊割燃料; 热切割性能; 节能环保

Application and research of modify pentane in welding and cut of metal materials

BAI Kaijie, LI Yunquan

Guangdong Institute of Special Equipment Inspection and Research Shunde Branch, Foshan 528300, Guangdong, China

Abstract: In order to solve the problem that different fuel choices will affect the cutting energy consumption and low-carbon environmental protection in the process of welding metal materials, the parameters such as fuel consumption, oxygen consumption, cutting speed and carbon dioxide emission of modified propane, modified pentane and acetylene in the process of cutting steel plates with different thicknesses are studied experimentally, and the performance of three different welding fuels in hot cutting is compared and analyzed by taking fuel consumption, oxygen consumption, cutting speed and carbon dioxide emission as the characterization methods. The results show that the modified pentane has good thermal cutting performance under the same test conditions. Then, this paper analyzes the emission pollutants of liquid modified pentane with good thermal cutting performance after mixing with air at different vaporization temperatures. The results show that the lower the liquid temperature of modified pentane, the lower the emission value of air pollutants after combustion. The research results provide technical basis and reference for industrial production to choose low-carbon, energy-saving and environmental-friendly welding and cutting fuels.

Keywords: modified pentane; welding fuel; hot cutting performance; energy saving and environmental protection

基金项目: 锅炉用T91耐热钢老化等级检测技术研究及其便携式检测设备研发(2021CY-2-02)。

1 序言

我国作为全球第一工业大国，钢铁产量长期位居世界第一。如此巨大的钢铁需求和消耗量，对我国环境保护和节能低碳战略有着重大影响^[1, 2]。钢材在使用过程中需要按照使用要求进行切割，不同的切割方法对钢材的质量、燃料的消耗等都有较大影响。现阶段，比较成熟的切割方式主要有激光切割^[3-5]、水刀切割^[6, 7]、气体切割^[8]、火焰切割^[9-11]及等离子切割^[12-14]等。其中，激光切割因加工速度快、对非加工区域热影响小等特点而被广泛使用，但是在实际切割过程中，激光功率稳定性、辅助气体等因素均会对切割质量造成影响。等离子切割具有切割精度高、效率更高的特点。相比而言，传统的火焰切割受气压、割嘴高度及预热时间等因素影响^[15]，切割精度及效率较依赖操作人员，但其具有切割范围广、切割厚度大、设备价格低等优点^[16]。本文针对传统火焰切割的不同燃料在燃烧过程中的消耗量、耗氧量、切割速度、CO₂排放量等参数进行试验研究，为企业在生产过程中选用切割效率更高、单位产品能耗更低的燃料提供理论依据。

2 试验条件与方法

对改性丙烷、改性戊烷及乙炔3种焊割燃料在切割不同厚度钢板过程中的消耗量、耗氧量、切割速度、CO₂排放量等参数进行试验研究，对比分析3种不同焊割燃料用于热切割时的性能表现。试验切割钢材及切割操作方式等信息见表1。

表1 钢材及切割操作方式

钢材牌号	钢材厚度/mm	钢材长度/mm	切割方式
Q235WB	50	1300	半自动
	100	1300	半自动
	155	1300	半自动

在开展测试过程中，需满足以下试验条件与方法。

1) 切割前，保证被切割钢板表面清理干净，无缺陷，无氧化物、挂渣等杂质附着。同时，对被测钢板有效切割长度的起始端和终止端进行标记。其中，有效切割起始端在预热并开始切割后、沿切割前进方向约15mm处，有效切割长度均取为1.3m。

2) 切割时，分别记录预热和有效切割两个阶段的时间与切割燃料、O₂的消耗量。

3) 切割后，通过加强空气对流的方式对钢板切割部位进行降温，利用红外测温仪对钢板表面温度进行监测，保证钢板切割部位温度相对一致，再进行下一次切割操作，从而将温度对切割性能结果影响降至最低。

4) 测试后，对改性丙烷、改性戊烷及乙炔3种燃料组分进行化验分析。

对改性戊烷燃料在不同戊烷（液态）汽化温度下，与空气混合后的燃烧排放性能试验在燃油（气）蒸汽发生器上进行，其实物如图1所示。



图1 燃油（气）蒸汽发生器实物

试验前，在≥1m的直管段等径烟道中间开测试孔（孔径50mm），以保证测试过程中气流稳定，连续监测烟气中O₂、CO₂、CO、SO₂、NO_x和H₂S含量。戊烷（液态）供应、汽化罐、燃烧设备、烟道（含测试孔）及各部分连接管道正常连接，燃烧系统正常运行，燃油（气）蒸汽发生器参数见表2。

试验时，首先测量改性戊烷（液态）汽化温度，并调整至规定温度，使其保持稳定状态，启动戊烷汽化系统及燃烧系统，并稳定运行1h。将烟气取样杆按要求插入烟道并启动低浓度自动烟尘烟气综合测试仪，待实时显示数据稳定后，正式开始采集烟气组分参数相关数据。测试过程持续30min，每隔3min记录一组数据。按要求调整戊烷（液态）至所需温度，并重复上述过程。

本次试验所需仪器设备相关信息见表3。

试验项目所用仪器、仪表均经过专业校验，且

表2 燃油（气）蒸汽发生器参数

制造单位	制造日期	产品型号	产品编号	额定蒸发量 / (t/h)	额定容量 / L	额定工作压力 / MPa	额定蒸汽温度 /℃
镇江金能锅炉有限公司	2020年8月	LWS0.3-0.7-Y.Q	20R286	0.3	48.6	0.7	170

表3 试验仪器信息

序号	测试仪器	型号	精度		量程
1	低浓度自动烟尘烟气综合测试仪	ZR-3260D	O ₂ (质量分数, %)	0.1	0~30
			CO/ (mg/m ³)	1	0~5000
			NO ₂ / (mg/m ³)	1	0~200
			NO/ (mg/m ³)	1	0~1300
			SO ₂ / (mg/m ³)	1	0~5700
			CO ₂ (质量分数, %)	0.1	0~20
			H ₂ S/ (mg/m ³)	1	0~300
2	气相色谱仪	7890B	—		—
3	红外测温仪	Fluke 59	0.5级		-18~275℃
4	钢卷尺	—	±1mm		0~5m
5	温湿度计	TB-130S	±1℃ ±5%RH		-30~60℃ 10%RH~100%RH
6	秒表	803	±0.1s		0.1~900s
7	质量流量计	HL-RSL	1.5%		0.5~40Nm ³ /h
8	电子秤	TC200KB	±1g		20g~200kg

在校验有效期内。此外，在每次试验前后，均采用了具备有效校验证证书的标准气体对烟气分析仪进行标定。

3 性能参数计算方法

3.1 切割燃料消耗量

切割燃料消耗量计算公式为

$$m = m_1 - m_2 \tag{1}$$

式中 m ——切割燃料消耗量 (g)；

m_1 ——正式开始切割时，位于电子秤上切割燃料及容器整体质量 (g)；

m_2 ——正式切割完成时，位于电子秤上切割燃料及容器整体质量 (g)。

3.2 切割速度

切割速度计算公式为

$$V = \frac{S}{t} \tag{2}$$

式中 V ——切割速度 (mm/s)；

S ——正式切割钢板长度 (mm)；

t ——正式切割钢板所消耗时间 (s)。

3.3 CO₂排放量核算

将切割中的化学反应视作充分燃烧过程，则可通过式 (3) 计算预热或切割过程中CO₂排放量，即

$$AE = mC \times OF \times \frac{44}{12} \tag{3}$$

式中 AE ——CO₂排放量 (g)；

C ——单位质量切割燃料碳含量 (质量分数，%)；

OF ——碳氧化率，取值为1。

在开展试验过程中，将切割燃料近似视作理想气体，据阿伏加德罗定律及推论可知，同温同压下，气体组分之间物质的量之比等于体积比。因此，单位质量切割燃料碳含量 C 可由式 (4) 求得，即

$$C = \frac{12\beta_1 + 12\beta_2 + 24\beta_3 + 24\beta_4 + 24\beta_5 + 36\beta_6 + 48\beta_7 + 60\beta_8 + 72\beta_9}{\sum(M_i \times \beta_i)} \tag{4}$$

式中 β_1 ——切割燃料中CO组分的体积分数 (%)；

β_2 ——切割燃料中甲烷组分的体积分数 (%)；
 β_3 ——切割燃料中乙烷组分的体积分数 (%)；
 β_4 ——切割燃料中乙烯组分的体积分数 (%)；
 β_5 ——切割燃料中乙炔组分的体积分数 (%)；
 β_6 ——切割燃料中丙烷组分的体积分数 (%)；
 β_7 ——切割燃料中丁烷组分的体积分数 (%)；
 β_8 ——切割燃料中戊烷组分的体积分数 (%)；
 β_9 ——切割燃料中己烷组分的体积分数 (%)；
 β_i ——切割燃料中某一组分的体积分数 (%)；
 M_i ——切割燃料中某一组分的摩尔质量 (g/mol)。

单位切割产品CO₂排放量可由式 (5) 获得，即

$$AE_{\text{单}} = \frac{AE}{S \times h} \times 10^6 \quad (5)$$

式中 $AE_{\text{单}}$ ——切割单位长度和厚度 (单位面积) 钢板的CO₂排放量 (g/m²)；
 h ——正式切割钢板厚度 (mm)；
 S ——正式切割钢板长度 (mm)。

3.4 单位切割产品能耗核算

单位切割产品能耗核算公式为

$$q = \frac{Q \times m}{S \times h \times 1000} \times 10^3 \quad (6)$$

式中 q ——切割单位长度和厚度 (单位面积) 钢板的能耗 (MJ/m²)；
 Q ——切割燃料低位发热量 (kJ/kg)。

3.5 大气污染物折算

实测的锅炉烟尘、SO₂、氮氧化合物，烟气中SO₂、NO_x排放浓度按式 (7) 折算为基准氧含量排放浓度，即

$$\rho = \rho' \times \frac{21 - \phi(O_2)}{21 - \phi'(O_2)} \quad (7)$$

式中 ρ ——大气污染物基准氧含量排放浓度 (mg/m³)；
 ρ ——实测的大气污染物排放浓度 (mg/m³)；
 $\phi(O_2)$ ——基准氧含量 (质量分数，%)；
 $\phi'(O_2)$ ——实测的氧含量 (质量分数，%)。

本文试验设备为燃油 (气) 蒸汽发生器，基准氧含量 (O₂) 取值按3%计算。此外，燃料燃烧过程中会生成NO和NO₂，两者之和用NO_x表示，通常情况下NO₂在NO_x的比例约为5%，本文NO_x按实测浓度除以0.95计算。

4 试验结果

4.1 燃料组分化验

改性丙烷、改性戊烷及乙炔3种切割燃料组分化验结果见表4，由化验结果可知，3种燃料主要组分各不相同。在热值方面，乙炔低位发热量最高，为48.3407MJ/kg，改性丙烷为46.3758MJ/kg，改性戊烷最低，为45.5977MJ/kg。

表4 燃料组分化验结果

序号	组分含量	改性丙烷	改性戊烷	乙炔
1	β_1 (%)	0	0	0
2	β_2 (%)	0.48	9.71	1.56
3	β_3 (%)	0.15	0.02	0
4	β_4 (%)	0	0	0
5	β_5 (%)	0	0	98.17
6	β_6 (%)	98.15	0	0
7	β_7 (%)	0	0	0
8	β_8 (%)	1.22	90.27	0.27
9	β_9 (%)	0	0	0
10	低位发热量 / (MJ/kg)	46.3758	45.5977	48.3407

4.2 切割数据及计算结果

本文按前述操作要求，利用3种不同切割燃料分别对3种不同厚度钢板进行切割，其测试结果见表5。

4.3 大气污染物排放

按GB/T 16157—1996《固定污染源排气中颗粒物测定与气态污染物采样方法》进行采样测试，并按式 (7) 进行相关浓度折算，不同戊烷 (液态) 汽化温度下大气污染物排放结果见表6。

5 结果分析

3种切割燃料在不同厚度钢板上的切割时间与切割速度对比如图2所示。

3种切割燃料在不同厚度钢板上相应的切割燃料消耗量与O₂消耗量对比如图3所示。

3种切割燃料在不同厚度钢板上的等长度切割CO₂排放量与总能耗对比如图4所示。

表5 切割数据及计算结果

测试项目	改性丙烷			改性戊烷			乙炔		
钢板厚度/mm	50	100	155	50	100	155	50	100	155
预热时间/s	15	21	12	13	10	11	8	6	8
预热燃料消耗量/g	5	4	6	3	3	4	3	2	2
预热氧气消耗量/Nm ³	0.007	0.008	0.015	0.004	0.005	0.005	0.004	0.003	0.005
切割时间/s	272	368	582	274	304	375	305	435	463
切割燃料消耗量/g	67	88	299	41	59	102	90	154	179
切割氧气消耗量/Nm ³	0.517	1.060	1.689	0.366	0.668	1.224	0.542	1.212	1.539
切割速度/ (mm/s)	4.780	3.533	2.234	4.745	4.276	3.467	4.262	2.989	2.808
挂渣量	少	少	少	少	少	少	多	多	多
CO ₂ 排放量/g	201.0	264.0	897.2	125.0	179.9	310.9	303.8	519.9	604.3
单位切割面积CO ₂ 排放量/ (g/m ²)	3093	2031	4453	1923	1384	1543	4675	3999	2999
有效切割总能耗/MJ	3.107	4.081	13.866	1.870	2.690	4.651	4.351	7.445	8.653
单位切割面积能耗/ (MJ/m ²)	47.803	31.393	68.816	28.762	20.694	23.082	66.933	57.265	42.943

表6 大气污染物排放结果

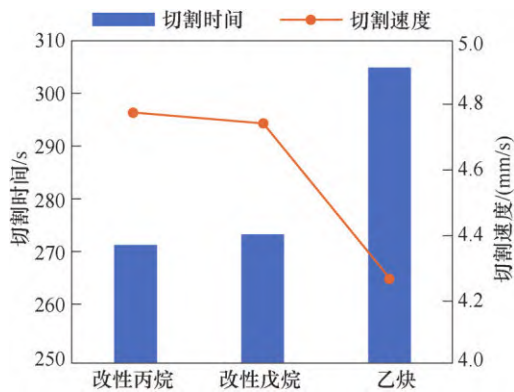
测试内容	汽化温度/℃			
	8.4	10.4	15.4	20.9
	测试结果			
实测O ₂ 含量（质量分数，%）	8.56	8.10	8.06	8.35
折算基准O ₂ 含量（质量分数，%）	3.5	3.5	3.5	3.5
折算CO ₂ 含量（质量分数，%）	12.83	13.02	12.95	13.06
折算SO ₂ 含量/（mg/m ³ ）	0.00	0.00	0.00	0.00
折算CO含量/（mg/m ³ ）	0.00	0.00	0.00	0.70
折算NO _x 含量/（mg/m ³ ）	6.14	16.77	24.50	37.32
折算H ₂ S含量/（mg/m ³ ）	12.39	14.38	15.69	17.99

由图2～图4可知，改性丙烷、改性戊烷及乙炔3种燃料在相同切割条件下的热切割性能差异明显，具体如下。

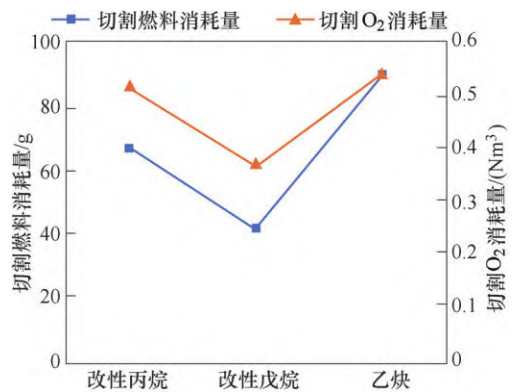
1）切割速度对比分析：改性戊烷在100mm和155mm厚度上的切割速度明显高于其他两种燃料，在50mm厚度切割时与改性丙烷差异不明显（均为

4.7mm/s左右），但远高于乙炔的切割速度。

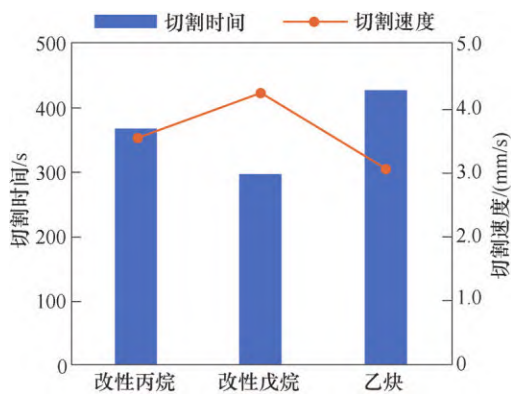
2）燃料与O₂消耗量对比分析：改性戊烷在3种厚度切割时的燃料消耗量与O₂消耗量均为最低，改性丙烷在50mm和100mm厚度切割时的燃料消耗量与O₂消耗量均低于乙炔，而在155mm厚度切割时，乙炔的燃料消耗量和O₂消耗量较改性丙烷偏低。



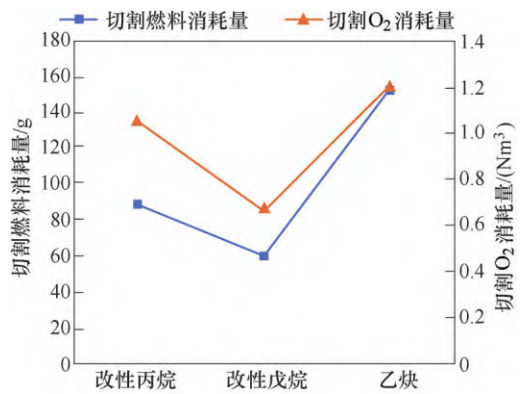
a) 钢板厚度50mm



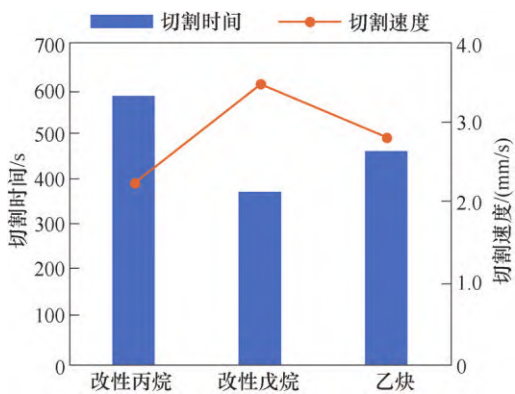
a) 钢板厚度50mm



b) 钢板厚度100mm

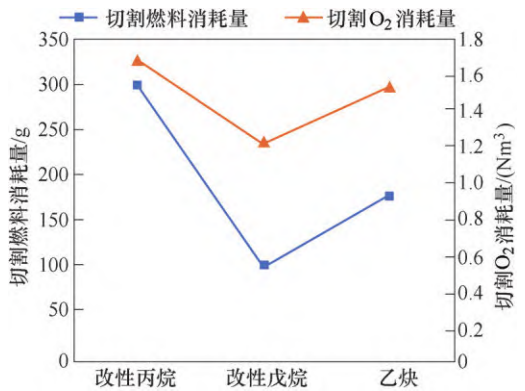


b) 钢板厚度100mm



c) 钢板厚度155mm

图2 切割时间与切割速度对比



c) 钢板厚度155mm

图3 切割燃料消耗量与O₂消耗量对比

3) 切割燃料消耗折合CO₂排放量与总能耗对比分析: 改性戊烷在3种厚度切割时的CO₂排放量与总能耗均为最低, 且在155mm厚度切割时与乙炔在50mm厚度切割时差异不大(前者为310.9g, 后者为303.8g); 改性丙烷在50mm和100mm厚度切割时的CO₂排放量与总能耗均低于乙炔, 而在155mm厚度切割时, 乙炔的CO₂排放量与总能耗较改性丙烷偏低。

4) 割口质量对比分析: 从切割面来看, 使用改性戊烷的割口上挂渣少, 而使用改性丙烷和乙炔的割口挂渣较多。

对改性戊烷燃料在不同戊烷(液态)汽化温度下, 与空气混合后的燃烧大气污染物进行连续监测, 不同戊烷(液态)汽化温度下燃烧烟气各成分含量对比如图5~图8所示。

本文测试在环境温度约为24.0℃的情况下,

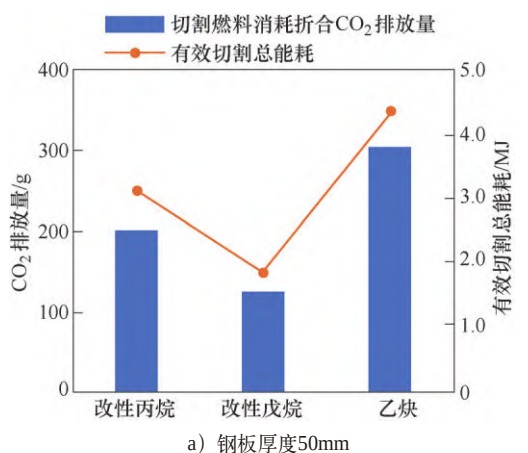
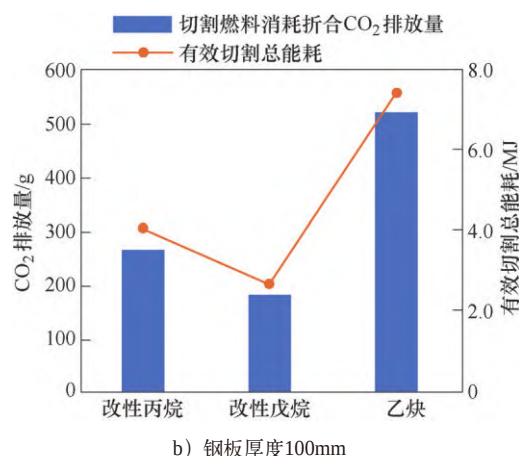
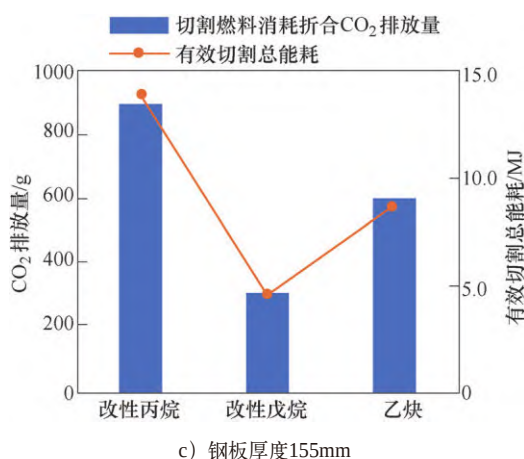


图4 等长度切割CO₂排放量与总能耗对比

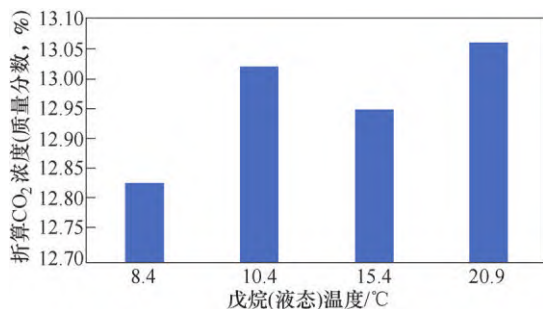


图5 不同戊烷(液态)汽化温度下折算CO₂浓度

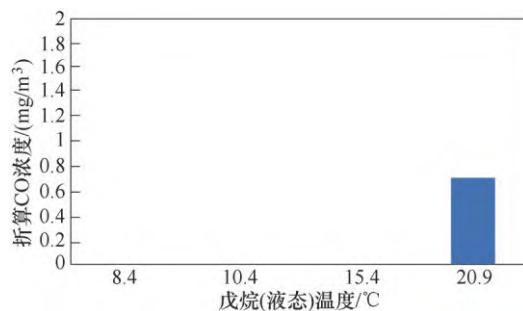


图6 不同戊烷(液态)汽化温度下折算CO浓度

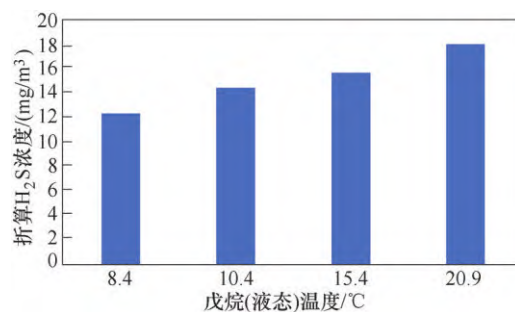


图7 不同戊烷(液态)汽化温度下折算H₂S浓度

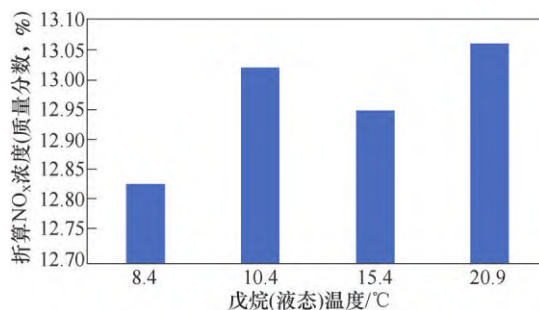


图8 不同戊烷(液态)汽化温度下折算NO_x浓度

通过专用的汽化设备将液态戊烷分别在8.4℃、10.4℃、15.4℃和20.9℃下进行混空气体汽化燃烧,从图5~图8分析可得出以下结论。

1) 不同汽化温度下汽化所得的混空气体进入燃烧设备燃烧后,大气污染物排放值(SO₂和氮氧化物)均低于DB 44/765—2019《锅炉大气污染物排放标准》要求限定值。

2) 不同汽化温度下汽化所得的混空气体进入燃烧设备燃烧后,折算H₂S、NO_x浓度均随着戊烷汽化温度的升高而增加。

3) 不同汽化温度下汽化所得的混空气体进入燃烧设备燃烧后,折算CO浓度基本为0(20.9℃时为0.7mg/m³),表明燃料燃烧充分;折算CO₂浓度随温度变化不大,在13%附近波动,说明燃烧反应配风恰当,燃烧设备运行稳定。

6 结束语

通过自主设计的切割系统,从燃料消耗量、耗氧量、切割速度、CO₂排放量等维度,成功对改性丙烷、改性戊烷及乙炔3种切割燃料的热切割性能进行对比分析,得出以下结论。

1) 改性戊烷在3种不同钢板厚度上的切割速度高于其他两种燃料。

2) 改性戊烷在3种不同钢板厚度上切割时的燃料消耗量与O₂消耗量均低于其他两种燃料。

3) 改性戊烷在3种不同钢板厚度上切割时的CO₂排放量均低于其他两种燃料。

4) 从切割面来看,使用改性戊烷的割口上挂渣少,而使用改性丙烷和乙炔的割口挂渣较多。

本文随后又对热切割性能较好的液态改性戊烷在不同汽化温度下,与空气混合燃烧后的排放污染物进行分析,得出以下结论。

1) 不同汽化温度下汽化所得的混空气体进入燃烧设备燃烧后,大气污染物排放值(SO₂和NO_x)均低于DB 44/765—2019标准要求限定值。

2) 不同汽化温度下汽化所得的混空气体进入燃烧设备燃烧后,折算H₂S、NO_x浓度均随着戊烷汽化温度的升高而增加。

3) 不同汽化温度下汽化所得的混空气体进入燃烧设备燃烧后,折算CO浓度基本为0,表明燃料燃烧充分;折算CO₂浓度随温度变化不大,在13%附近波动,说明燃烧反应配风恰当,燃烧设备运行稳定。

综上所述,改性戊烷在相同测试条件下具有较好的热切割性能,并且改性戊烷液态温度越低,燃烧后大气污染物排放值越低。该研究成果为工业生产选择低碳节能环保的焊割燃料提供了技术依据和参考,对推进社会节能减排工作有着重要意义。

参考文献:

- [1] 缴翼飞. 3月粗钢日均产量创新高部分钢企已开始主动减产[N]. 21世纪经济报道, 2023-04-27 (6) .
- [2] 邢奕, 崔永康, 田京雷, 等. 钢铁行业低碳技术应用现状与展望[J]. 工程科学学报, 2022, 44 (4) : 801-811.
- [3] 陈谦哲, 刘列, 韩良华. 激光切割Q235钢板在救

援破拆中的研究[J/OL]. 激光技术: 1-11[2024-004]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1125.TN.20240620.1744.002.html>.

- [4] 薛新莲, 臧华平, 王洪建, 等. 铝合金板激光切割实验工艺研究[J]. 激光杂志, 2024, 45 (9) : 183-187.
- [5] 傅中明. 激光高效切割技术在工程机械制造中的应用[J]. 金属加工 (热加工), 2015 (18) : 18-19.
- [6] 钱智婷. 水切割机床大件智能设计系统的研究与开发[D]. 南京: 东南大学, 2018.
- [7] 刘辉, 侯建华. 装饰石材板材切割技巧[J]. 石材, 2022 (1) : 35-47.
- [8] 熊凡凡. ANG用于切割气瓶技术开发的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
- [9] 彭章祝, 曹龙韬, 孟腾逸, 等. 火焰切割对16Mn DR钢焊接接头组织性能影响研究[J]. 金属加工 (热加工), 2023 (5) : 76-80.
- [10] 陈志兵. 金属材料的火焰切割[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2014.
- [11] 廖学勇. 超厚板数控火焰切割[J]. 金属加工 (热加工), 2015 (6) : 64-66.
- [12] 张成龙, 徐宝卫, 乔健, 等. 新型等离子切管机技术的应用[J]. 世界制造技术与装备市场, 2023 (2) : 98-100.
- [13] 王永飞. 等离子切割技术概况及应用: “第十六次全国焊接学术会议”论文集[C]. 哈尔滨: 中国焊接学会, 2011.
- [14] 董超, 赵颖. 数控等离子切割与火焰切割综合分析[J]. 制造技术与机床, 2020 (12) : 25-26, 31.
- [15] 宋韬惠. 火焰切割质量的影响因素及优化方法研究[J]. 金属加工 (热加工), 2019 (4) : 39-41.
- [16] 陈立敏, 周昀, 宋世和. 厚板火焰切割的影响因素及工艺性研究[J]. 电焊机, 2024, 54 (5) : 98-103.

MW 20240807