

火焰切割后局部钢材力学性能研究

宗亮^{1,2*}, 虞永博¹

(1. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300354; 2. 天津大学 滨海土木工程结构与
安全教育部重点实验室, 天津 300354)

摘要: 当钢结构达到服役年限,或因使用功能调整需拆卸构件时,常采用火焰切割方式完成拆卸。在火焰切割的热作用下,构件热切割面的微观组织结构及力学性能会发生改变,若需将该方式拆卸的构件再次利用,需对其火焰切割后钢材局部组织和力学性能进行评估。文中对国产Q355B钢材分别开展了手工火焰切割及半自动切割机火焰切割试验,随后对两种切割方式下的热影响区宽度、金相组织进行观察分析,同时对母材和火焰切割热影响区的力学性能开展定量研究。结果表明:20 mm厚的Q355B钢材手工火焰切割后其热影响区宽度约为3.4 mm,半自动切割机火焰切割后其热影响区宽度约为3 mm;两种火焰切割方式对Q355B钢材的屈服强度、抗拉强度无显著影响,但会导致其应力-应变曲线的屈服平台缩短甚至消失;对热影响区Q355B钢材的韧脆转变温度几乎无影响,韧脆转变区略有减小,上、下平台吸收能均有小幅度提升,裂纹尖端张开位移(crack tip opening displacement, CTOD)特征值基本无变化。由此可知,经火焰切割的钢材其力学性能无显著下降,且具备较强的可再利用性,本研究为该类型钢材火焰切割后的再利用提供了数据支撑。

关键词: 火焰切割; 热影响区; 静力拉伸; 断裂韧性; 钢材再利用; 韧脆转变温度; 裂纹尖端张开位移

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)11-0045-12

DOI: 10.13969/j.jzgjgz.20240520001

Investigation on Mechanical Properties of Steel Materials in the Local Region Produced by Flame Cutting

ZONG Liang^{1,2*}, YU Yongbo¹

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300354, China; 2. Key Laboratory of Coast Civil Structure and Safety of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300354, China)

*Corresponding author: zongliang@tju.edu.cn

Abstract: Flame cutting is often used to complete the process when the steel structures reach their service life or when need to be disassembled due to the change of use function. Under the influence of flame cutting heat, the microstructure and mechanical properties of the thermally cut surface will be changed. If the disassembled components by flame cutting are used again, it is necessary to evaluate the local microstructure and mechanical properties after flame cutting. In this study, after manual flame cutting and semi-automatic cutting machine flame cutting, the heat-affected zone width and metallographic structure of domestically produced Q355B steel were observed and analyzed. Quantitative research was also conducted on the mechanical properties of the base metal and the heat-affected zone. The results show that the heat-affected zone width after manual flame cutting of 20mm thick Q355B steel is approximately 3.4mm, while it is approximately 3mm after semi-automatic cutting. Both types of flame cutting have insignificant effects on the yield strength and tensile strength of Q355B steel. However, they can shorten or even eliminate the yield plateau of the

收稿日期: 2024-05-20

作者简介:

宗亮(1988—),男,博士,教授,主要从事钢结构与空间结构方面的研究。E-mail: zongliang@tju.edu.cn。(通信作者)

虞永博(2000—),女,硕士研究生,主要从事钢结构残余应力方面的研究。

stress-strain curve. The ductile-brittle transition temperature of the heat-affected zone of Q355B steel is almost unaffected, with a slight reduction in the transition zone and a small increase in energy absorption of the upper and lower platforms. The characteristic value of crack tip opening displacement (CTOD) remains essentially unchanged. This indicates that the mechanical properties of steel after flame cutting do not significantly decrease, demonstrating strong reusability. This study provides data support for the reuse of steel after flame cutting.

Keywords: flame cutting; heat-affected zone; static tensile strength; fracture toughness; reusable steel; ductile-brittle transition temperature; crack tip opening displacement (CTOD)

钢材具备优异的可循环利用性能,高度适配可持续建筑场景;但大量钢结构在初始设计阶段,可拆卸理念并未融入其中。当钢结构达到设计服役年限,或因使用功能调整需对构件进行拆卸时,常需要通过热切割方式实现。目前应用较广泛的热切割方式有等离子切割、激光切割与火焰切割。火焰切割由于设备简单、操作简易、成本低廉、效率较高等优点,是钢材粗加工的常用方式之一,更是实现钢材高效切割的经济有效途径^[1]。尤其是手工火焰切割,其采用的射吸式割炬价格便宜且尺寸较小,适用于多种场景和工况。

火焰切割是通过可燃气体和助燃气体混合燃烧产生高热量,先将钢材切割部位的预热点加热至特定温度,再利用氧与铁的化学反应使金属迅速氧化燃烧,最后以高速切割氧流的动量吹除熔渣,从而实现钢板切割分离的过程^[2]。在火焰切割热的作用下,切割面附近的金属会快速升温,之后再快速冷却,同时因为氧化还原反应,切割缝周围钢板的组织和性能会发生明显变化的区域,称为热影响区。与其他热切割方式相比,火焰切割热影响区的化学成分、显微组织、力学性能等均发生不同程度的变化^[3]。

若需将拆除后的钢材构件二次利用,且切割位置附近区域拟作为构件的连接部位,则热切割面能否直接用于装配与焊接,需通过评估火焰切割后该区域钢材的局部组织及力学性能来判定。

目前常用的火焰切割方式有半自动切割机火焰切割、数控火焰切割机切割与手工火焰切割。通过研究文献及实际操作经验表明,在火焰切割中影响切割质量的因素有:切割燃气的种类、氧气压力、切割燃气压力、切割速度、割嘴的选用和割嘴高度、火焰状态等。此外,火焰切割的长度、起割点、氧气浓度、被切金属的初始缺陷等都会影响火焰切割的质量。

孙震等^[2]、张萍等^[4]、周崎等^[5]分别以B-HARDE钢板、Q345B钢板及5 mm厚的50Mn热轧钢板为研究对象,探究了其火焰切割后的热影响区深度,研究发现火焰切割后热影响区深度与母材厚度有关,分别约为小于11 mm、5 mm、2 mm。高小勇等^[6]研究发现:火焰切割对Q345B低合金钢板的显微组织影响深度约为1.5 mm,当取样加工余量大于5 mm时,钢板的力学性能

与硬度不受影响。陈增有等^[1]通过试验研究发现:Q345E低合金钢的热影响区宽度表现为上表面宽于下表面,且基体未出现开裂;此外,该热影响区的硬度略高于母材硬度。彭章祝等^[7]针对16Mn DR钢焊接接头,结合不同切割方式给出了建议的机械打磨深度;同时,该研究试验结果表明,火焰切割会导致其热影响区硬度升高。马清波等^[8]通过试验研究发现:Q345E钢焊接接头中,火焰切割试件的焊接热影响区比机械加工试件的焊接热影响区更宽,且硬度更低,火焰切割试件的焊接接头还具有良好的抗裂性能、冲击性能及拉伸与弯曲性能。ANDRÉS等^[9]研究了S640M钢在不同切割工艺下的热影响区性能,其结果表明火焰切割热影响区对材料的影响较小。THIÉBAUD等^[10]通过建立火焰切割过程的三维模型,成功再现其切割过程中的温度曲线与热影响区特征。朱梓坤等^[11]、ZONG等^[12]分别针对Q690钢开展试验,前者聚焦其焊接热影响区的组织和性能,后者则研究焊接细节的疲劳损伤演化规律;此外,研究还指出,焊接与火焰切割均会在钢材中形成热影响区,其中焊接热影响区的性能对本文研究具有参考价值,且该区域存在冲击韧性有所降低、疲劳性能明显下降的特征。

文献调研结果表明,国内外现有研究主要集中于火焰切割后热影响区的宽度特征与显微组织变化规律,而对火焰切割后局部钢材的力学性能,目前仍缺乏系统的定量讨论。本文以国产Q355B钢材为例,对Q355B钢材分别采用手工火焰切割和半自动切割机火焰切割方式对其进行切割处理,通过宏观金相组织分析得到热影响区宽度,并对热影响区的钢材进行静力拉伸试验、冲击韧性试验和三点弯曲试验。对比火焰切割热影响区的钢材与母材的力学性能和断裂韧性,为Q355B钢材的再利用提供数据支撑。

1 火焰切割Q355B钢材

1.1 试验材料

本文中所有试验选用钢材均为天津东南钢结构有限公司生产的Q355B钢材,钢板厚度为20 mm。钢板经火焰切割后,沿切割线制取试件并开展试验,以期所取试件可完整覆盖热影响区范围。

1.2 火焰切割取样

为研究两种火焰切割方式对钢材力学性能的影响,在同一时间对同一块钢板分别采用手工火焰切割与半自动切割机火焰切割,这两种切割方式均具有占用空间较小、操作灵活性高的特点。

考虑到钢板长度为2 m,为避免火焰切割过程中钢板产生过大变形,先沿短边方向将钢板分为3份;然后再沿长边方向分别采用手工火焰切割和半自动切割机火焰切割,最终完成切割后共得到9块钢板。具体切割方式如图1所示。

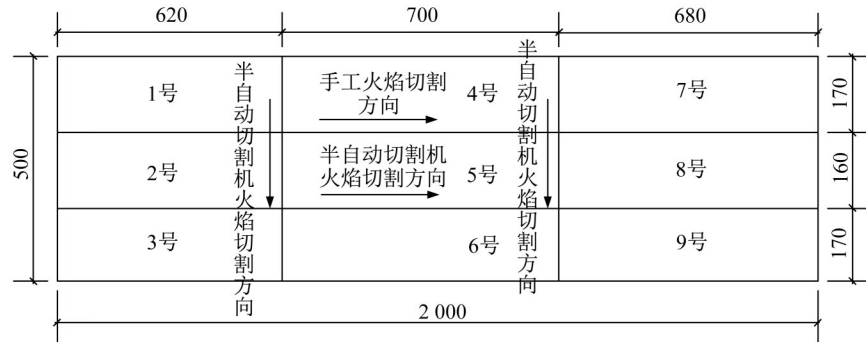


图1 钢板切割示意(单位:mm)

Fig. 1 Schematic of steel plate cutting (unit: mm)

根据《钢及钢产品 力学性能试验取样位置及试样制备》(GB/T 2975—2018)^[13]设计试件取样图。为准确测得火焰切割对Q355B钢材的影响,取样需沿切割线并且

紧邻切割面进行,母材的力学性能测试,则通过在距离钢板轧制边缘20 mm处取样测得。具体试件取样方式如图2所示。

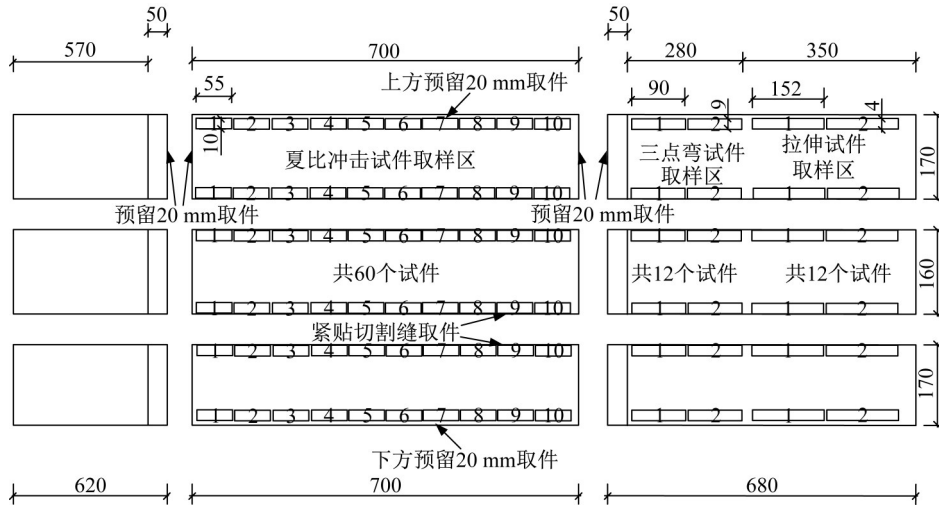


图2 试件取样示意(单位:mm)

Fig. 2 Schematic of specimen sampling (unit: mm)

1.3 火焰切割过程

Q355B钢材的火焰切割工作在天津东南钢结构有限公司进行。两种火焰切割方式所用燃气均为丙烷,丙烷设定压力为0.15 MPa,实际使用中约为0.1 MPa;氧气设定压力为1 MPa,实际使用中约为0.6 MPa;同时,两种切割方式均采用中性焰。手工火焰切割采用射吸式割枪,配套2号割嘴,其割嘴高度为7~8 mm,切割速度为230 mm·min⁻¹;半自动切割机火焰切割割嘴高度为10 mm,切割速度为280 mm·min⁻¹。两种火焰切割的过程如图3和图4所示。



图3 手工火焰切割

Fig. 3 Manual flame cutting

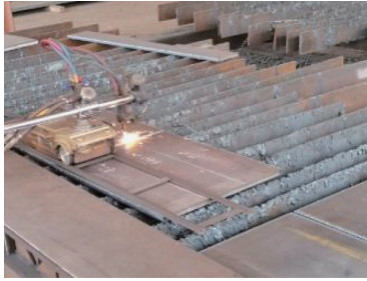


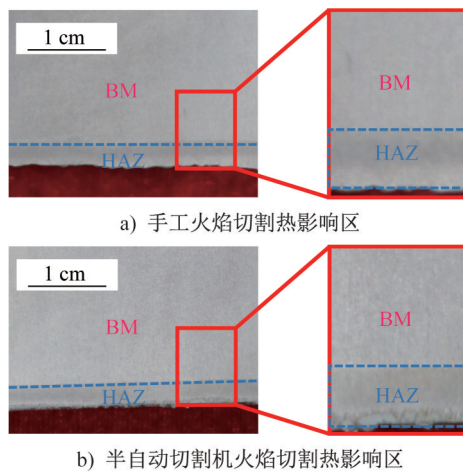
图4 半自动切割机火焰切割

Fig. 4 Semi-automatic cutting machine flame cutting

1.4 热影响区宏观金相分析

Q355B 钢材经火焰切割后,在其不同位置沿火焰切割线采用线切割方式制取下 6 个宽为 50 mm 的小块钢板,用于宏观金相检验分析。依据《金属显微组织检验方法》(GB/T 13298—2015)^[14]的规定对钢材试件进行处理,对试件需要观察分析的部分进行标记。先将切取的试件磨平,再进行砂纸磨制,在不同粒度的砂纸上由粗到细依次磨制,最后使用 3% 的硝酸酒精混合液浸蚀剂将处理后的试件进行化学浸蚀。

处理后的试件其宏观金相观测结果如图 5 所示,选取部分照片展示,可明显看到切割面附近的钢材颜色较深,且深色条状位置为热影响区。



a) 手工火焰切割热影响区

b) 半自动切割机火焰切割热影响区

图5 宏观金相组织观察

Fig. 5 Macroscopic metallographic structure observation

火焰切割后的钢板具有 12 条边及 8 个火焰切割面。分别测量 4 个手工火焰切割切割面热影响区的宽度和 4 个半自动切割机火焰切割切割面热影响区的宽度,并分别计算其平均值,用均值代表两种切割方式的热影响区宽度,具体数据如表 1 所示。厚度为 20 mm 的 Q355 钢材手工火焰切割热影响区宽度为 3.4 mm,半自动切割机火焰切割热影响区宽度为 3.0 mm。两种切割方式下,切割

后钢板的热影响区宽度都较小,但二者的切割质量与热影响区稳定性存在明显差异:手工火焰切割受多因素影响,工人的操作经验与工艺把控尤为关键,导致其切割面平整度差、切割变形量大,且热影响区分布不均匀;而半自动切割机火焰切割的优势更突出,不仅切割面更平整,热影响区宽度也保持较小波动,稳定性更强。

表1 热影响区宽度及均值

Table 1 Width and its mean value of heat-affected zone

试件编号	S1	S2	S3	S4	B1	B2	B3	B4
热影响区宽度/mm	3.0	3.5	3.0	4.0	3.0	3.0	3.0	3.0
宽度平均值/mm	3.4				3.0			

2 火焰切割后 Q355B 钢材力学性能试验

2.1 试验材料

为研究手工火焰切割和半自动切割机火焰切割对钢材基本力学性能的影响,沿切割线紧贴切割面取样。依据《金属材料 拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2021)^[15]的规定设计静力拉伸试验的试件尺寸,根据宏观分析得到的热影响区宽度确定试件取样方向,需使试件厚度方向与钢板厚度方向呈垂直关系。具体试件尺寸如图 6 所示。

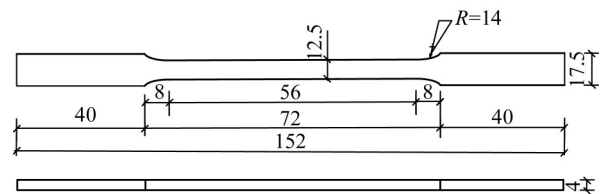


图6 静力拉伸试件尺寸示意(单位:mm)

Fig. 6 Schematic of static tensile test specimen dimension(unit: mm)

两种火焰切割工况各设置 4 个试件,母材设置 3 个试件,共计 11 个试件。母材试件编号为 M1~M3,采用手工火焰切割和半自动切割机火焰切割加工的试件编号分别为 S1~S4 和 B1~B4,试验分析参数如表 2 所示。

2.2 静力拉伸试验

本试验在天津大学建材实验室进行,使用岛津电子万能试验机进行试验,试验开始前使用精度为 0.01 mm 的游标卡尺分别对静力拉伸试件平行段的厚度、宽度等几何尺寸进行测量。

在施加力的过程中,采用标距为 50 mm 的引伸计对拉伸试件的平行段中段位置的变形量进行监测。试验开始前需先确定试验方法,并将加载速率设定为 $1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。如图 7 和图 8 所示。

表 2 试验试件分析参数
Table 2 Analysis parameters of test specimens

试验	试件编号	材料	试件尺寸/ mm	切割方式
静力拉伸 试验	M1~M3	Q355B	152×10×4	母材
	S1~S4			手工火焰切割
	B1~B4			半自动切割机 火焰切割
夏比冲击 试验	M1~M19	Q355B	55×10×10	母材
	S1~S20			手工火焰切割
	B1~B19			半自动切割机 火焰切割
三点弯曲 试验	M1~M3	Q355B	90×9×18	母材
	S1~S4			手工火焰切割
	B1~B4			半自动切割机 火焰切割

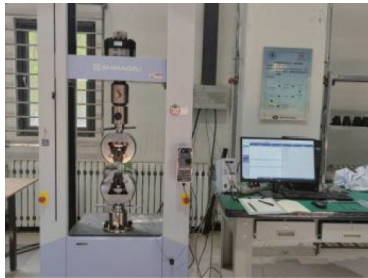


图 7 岛津电子万能试验机

Fig. 7 Shimadzu electronic universal testing machine

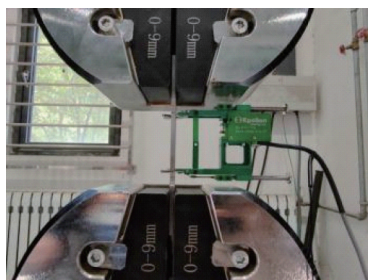


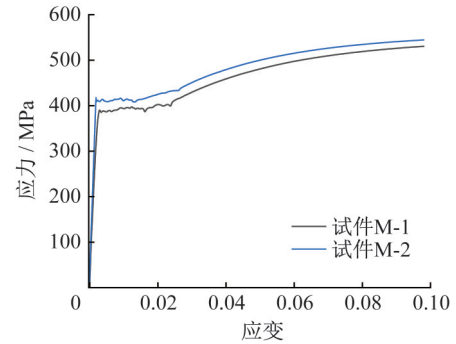
图 8 静力拉伸试验过程

Fig. 8 Static tensile testing process

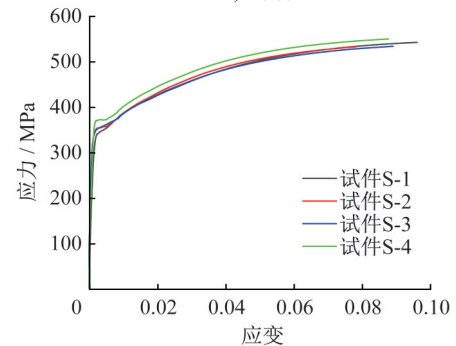
2.3 试验结果与分析

将试验测得 Q355B 钢母材和火焰切割后钢材的应力、应变进行均值处理,绘制如图 9 所示的应力-应变曲线,并对数据进行处理,得到试件的弹性模量、屈服强度和抗拉强度。在静力拉伸试验中,母材试件 M-3 的应力-应变曲线表现异常,且其屈服强度和抗拉强度均较低,考虑该现象由材料本身的不均匀性所致,故将该试件从试验数据中剔除。

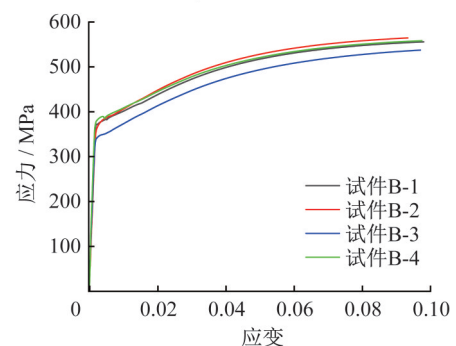
分析三种工况的应力-应变曲线发现:Q355B 钢母材在静力拉伸试验的屈服阶段,屈服平台特征较为明显,具



a) 母材



b) 手工火焰切割



c) 半自动切割机火焰切割

图 9 各试件应力-应变曲线

Fig. 9 Stress-strain curves of specimens

体表现为应力基本保持稳定,而应变呈显著增加的趋势。但是经火焰切割后,屈服平台缩短甚至消失,随着应变的增加,应力仍在增大。因此,在确定 Q355B 钢材的屈服强度时,需根据材料状态区分取值方式:对于母材,取试件屈服且力首次下降前的最大应力作为其屈服强度;对于火焰切割后的 Q355B 钢,则以 0.2% 塑性应变所对应的应力值作为其屈服强度。本次试验中的所有试件试验结果如表 3 所示。计算三种工况的屈服强度和抗拉强度平均值,如表 4 所示。

Q355B 钢材在经过火焰切割后屈服强度略有下降,相较于母材,手工火焰切割后,Q355B 钢材的屈服强度下降 14.32%,半自动切割机火焰切割后,Q355B 钢材的屈服强度下降 7.60%;抗拉强度也有小幅度提升。但整体变化幅度都不大,可以认为火焰切割对 Q355B 钢材的基本力学性能无影响,但对应力-应变曲线形状有影响,钢材屈服现象消失。

表3 静力拉伸试验结果
Table 3 Static tensile test results

试件编号	M1	M2	S1	S2	S3	S4	B1	B2	B3	B4
屈服强度/MPa	390.12	416.29	349.28	337.43	390.12	333.67	323.59	371.51	379.95	384.30
抗拉强度/MPa	542.83	552.62	546.60	545.50	542.83	440.66	544.53	557.08	559.78	571.26

表4 不同火焰切割方式下钢材的基本力学性能
Table 4 Basic mechanical properties of steel under different flame cutting methods

工况	无切割	手工火焰切割	半自动切割机切割
屈服强度/MPa	403.20	345.45	372.56
抗拉强度/MPa	547.73	548.43	557.68

3 火焰切割后 Q355B 钢材韧性试验

3.1 夏比冲击试验

对火焰切割后的 Q355B 钢材开展多温度下的冲击试验,获取其冲击吸收总功和韧脆转变温度;将上述试验结果与母材的冲击性能参数进行对比,可反映出火焰切割对 Q355B 钢冲击韧性的影响规律。

3.1.1 试件设计与试验设备

沿火焰切割线切取得到试验所用的冲击试件,并根据国家标准《金属材料 夏比摆锤冲击试验方法》(GB/T 229—2020)^[16]对试件进行加工,冲击试件采用标准 V 形缺口试件,尺寸为 55 mm×10 mm×10 mm,其中 V 形缺口夹角为 45°,根部半径为 0.25 mm,缺口深度为 2 mm,试件尺寸如图 10 所示。

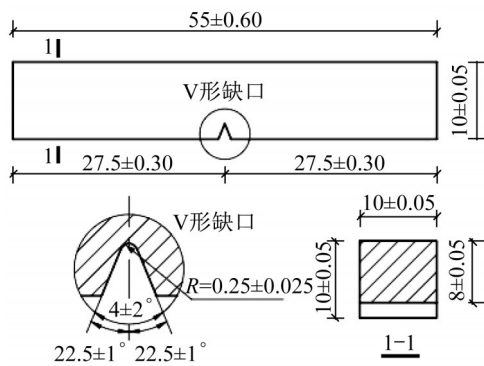


图 10 冲击试件尺寸(单位:mm)

Fig. 10 Impact test specimen dimension (unit: mm)

3.1.2 试验概况

参考国内外相关文献及相关学者的研究成果^[17],预估 Q355B 钢的韧脆转变温度为 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$,本次试验共设置 5 个温度点,记录试验中的实际温度,并在每个温度点加工 3~4 个试件进行试验,三种工况的温度点设置

如表 5 所示。

表5 三种工况的温度点设置
Table 5 Temperature points for three operating conditions

工况	温度/ $^{\circ}\text{C}$				
	20	0	-20	-40	-60
无切割	4	4	3	4	4
手工火焰切割	4	4	4	4	4
机器火焰切割	4	4	4	4	3

本次试验在天津大学结构工程实验室进行,选择标准打击能量为 300 J 的夏比摆锤冲击试验机进行试验。以保温箱作为低温环境载体,并采用液氮汽化生成的气体介质对试验系统进行冷却,其装置布置如图 11 所示。试验中将两个铂电阻(Pt-100)固定于试件表面,并将其置于保温箱被测试件组中间处,用于监测试件的温度变化。冲击试验现场如图 12 所示。



图 11 保温箱布置

Fig. 11 Arrangement of insulation box



图 12 冲击试验现场

Fig. 12 Impact test site

3.1.3 试验结果

针对 Q355B 钢, 试验测得各工况下 5 个温度点对应的冲击功 A_{kv} , 首先将原始数据进行修正, 减去开始试验时测得的 0.28 J 摩擦损耗能量, 再计算同一工况、相同温度点下修正后冲击功的平均值, 结果如表 6、表 7 和表 8 所示。

表 6 母材冲击试验结果

Table 6 Base material impact test results

试件编号	温度/°C	冲击功/J	冲击功 平均值/J
M-1	20	183.26	182.04
M-2	20	186.76	
M-3	20	176.21	
M-4	20	181.91	
M-5	-6	172.37	164.20
M-6	-6	182.45	
M-7	-6	155.75	
M-8	-6	146.24	
M-9	-25	130.25	133.24
M-10	-25	141.19	
M-11	-25	128.29	
M-12	-38	74.07	73.00
M-13	-38	81.07	
M-14	-38	54.23	
M-15	-38	82.64	
M-16	-62	29.51	24.18
M-17	-62	35.18	
M-18	-62	13.48	
M-19	-62	18.54	

由表 6、7、8 可以看出: 随着温度的降低, 冲击功呈逐渐下降的趋势, 试件由韧性断裂转变为脆性断裂。试验数据结果与试验过程中观察到的现象较符合, 具体表现为: 随着温度降低, 试件的断裂形态从不完全断裂到易发生完全断裂; 与此同时, 试件断裂时发出的声音更清脆, 断口表面更光滑平整, 且断口处有光泽的晶状区面积逐渐增大, 无金属光泽的纤维形貌区面积相应减小, 韧性断裂和脆性断裂断口照片如图 13 所示。

根据相关文献, 采用 Boltzmann 函数对试验数据进行拟合, 拟合结果的相关系数均表现良好, 结果如图 14 所示。

通过分析图 14 与表 9 可知: 相较于母材, 火焰切割后的 Q355B 钢材, 其韧脆转变温度基本无显著变化, 但

表 7 手工火焰切割冲击试验结果

Table 7 Manual flame cutting steel impact test results

试件编号	温度/°C	冲击功/J	冲击功 平均值/J
S-1	20	192.35	182.91
S-2	20	190.23	
S-3	20	189.96	
S-4	20	159.10	
S-5	-4	187.03	191.18
S-6	-4	182.72	
S-7	-4	211.69	
S-8	-4	183.26	
S-9	-20	154.64	155.96
S-10	-20	161.05	
S-11	-20	149.60	
S-12	-20	158.54	
S-13	-43	73.04	50.34
S-14	-43	60.51	
S-15	-43	34.53	
S-16	-43	33.26	
S-17	-59	40.63	40.79
S-18	-57	38.21	
S-19	-57	34.11	
S-20	-57	50.21	

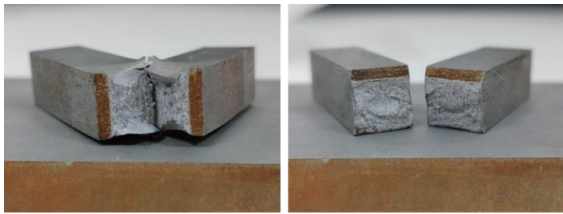
韧脆转变区呈减小趋势; 手工火焰切割试件的韧脆转变区减小了 41.49%, 半自动切割机火焰切割试件的韧脆转变区减小了 18.09%; 上平台能和下平台能都有所提高, 尤其是下平台能的提升幅度较大, 手工火焰切割和半自动切割机火焰切割后钢的下平台能分别相较母材的下平台能提升了 24.3 J 和 15.8 J。对比两种火焰切割方式, 手工火焰切割的韧脆转变温度、韧脆转变区以及上下平台能的变化更大, 但未表现出规律性, 可能与数据离散性大有关。整体分析, 火焰切割后的 Q355B 钢表现出较好的冲击韧性, 且火焰切割对其冲击韧性的整体影响程度较小。

3.2 三点弯曲试验

基于弹性卸载柔度法, 开展 Q355B 钢母材和火焰切割后钢材的三点弯曲试验, 得到三种工况钢材的 CTOD 特征值, 并计算阻力曲线。在试验过程中, 对试件实施循环加卸载与持荷操作, 在此过程中, 由计算机实时记录荷载及裂纹尖端张开位移的试验数据。

表8 半自动切割机火焰切割冲击试验结果
Table 8 Semi-automatic cutting machine flame cutting steel impact test results

试件编号	温度/°C	冲击功/J	冲击功平均值/J
B-1	20	189.96	182.43
B-2	20	178.93	
B-3	20	182.99	
B-4	20	177.84	
B-5	-3	178.66	180.15
B-6	-3	185.42	
B-7	-3	160.49	
B-8	-3	196.04	
B-9	-19	154.36	157.07
B-10	-19	177.84	
B-11	-19	161.60	
B-12	-19	134.46	
B-13	-40	78.72	68.96
B-14	-40	86.87	
B-15	-40	41.30	
B-16	-57	31.16	
B-17	-56	42.87	38.36
B-18	-56	32.00	
B-19	-56	47.42	



a) 韧性断裂断面 b) 脆性断裂断面

图13 冲击试验断面

Fig. 13 Impact test fracture surface

3.2.1 试件制备

本次试验的试件通过两种方式制取:一种是在距钢板边缘20 mm处切取,另一种是沿切割线切取,根据国家标准《金属材料 准静态断裂韧度的统一试验方法》(GB/T 21143—2014)^[18]的规定,进行试件的设计和加工,并在试件侧面开槽。共计加工11个试件进行试验,试件尺寸如图15所示。

3.2.2 试验流程

试验过程根据国家标准《金属材料 准静态断裂韧度

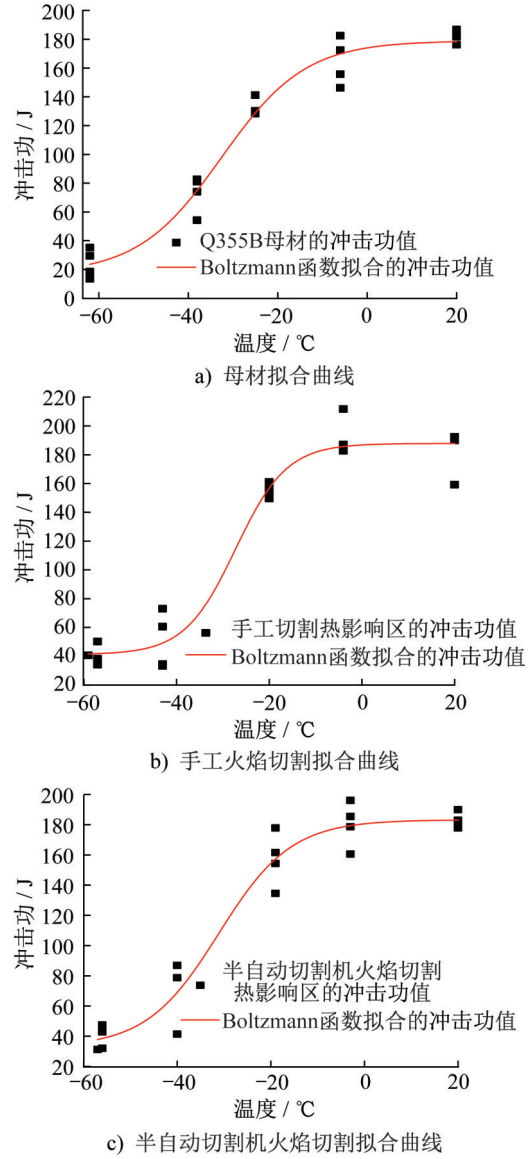


图14 Boltzmann函数拟合曲线

Fig. 14 Boltzmann function fitting curve

表9 冲击试验结果分析

Table 9 Analysis of impact test results

工况	下平台能 A_1 /J	上平台能 A_2 /J	韧脆转变温度 T_0 /°C	韧脆转变区 ΔT /°C
无切割	16.9	178.9	-32.5	9.4
手工火焰切割	41.2	187.8	-27.3	5.5
半自动切割机火焰切割	32.7	183.2	-31.1	7.7

的统一试验方法》(GB/T 21143—2014)的规定,首先采用长春仟邦高频疲劳试验机QBG-300预制疲劳裂纹,其荷载取值如表10所示。随后采用岛津电子万能试验机对试件进行三点弯曲加载,试验中使用配套夹式引伸计测量试件刀口的张开位移(图16)。三点弯曲加载阶段结

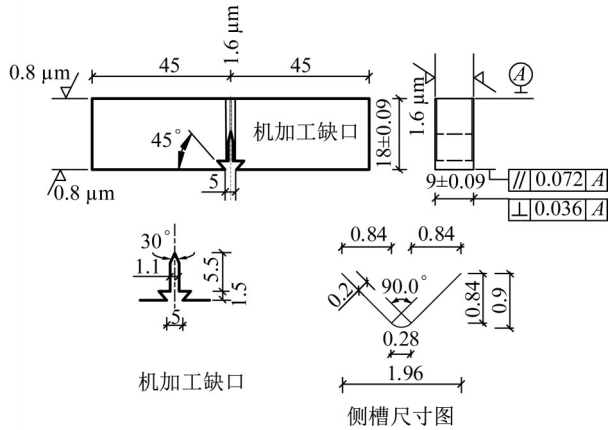


图 15 三点弯曲试件尺寸示意(单位: mm)

Fig. 15 Schematic of three-point bending test specimen dimension (unit: mm)

束后,先采用电炉加热试件以实现氧化发蓝,随后对其断口的裂纹前端进行标记,为后续测量试件的初始裂纹长度提供便利;完成发蓝后,在低温箱中用无水乙醇和液氮使试件降温;再将冷脆的试件拿出并压断,其过程如图 17 所示。通过观察断口,可以确定初始裂纹长度;最后可根据三点弯曲试件的荷载-位移曲线($P-V$ 曲线)其最大荷载点(P_m, V_m)计算得到裂纹尖端张开位移 CTOD 特征值 δ_m 。

表 10 预制疲劳裂纹荷载

Table 10 Prefabricated fatigue crack load kN			
最大荷载	最小荷载	静载	动载
2.84	0.28	-1.56	1.28

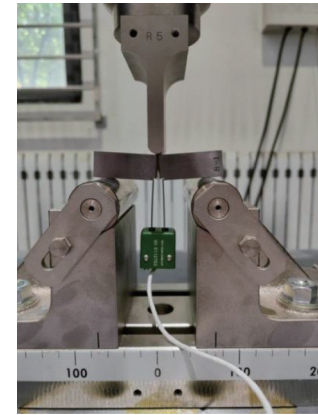
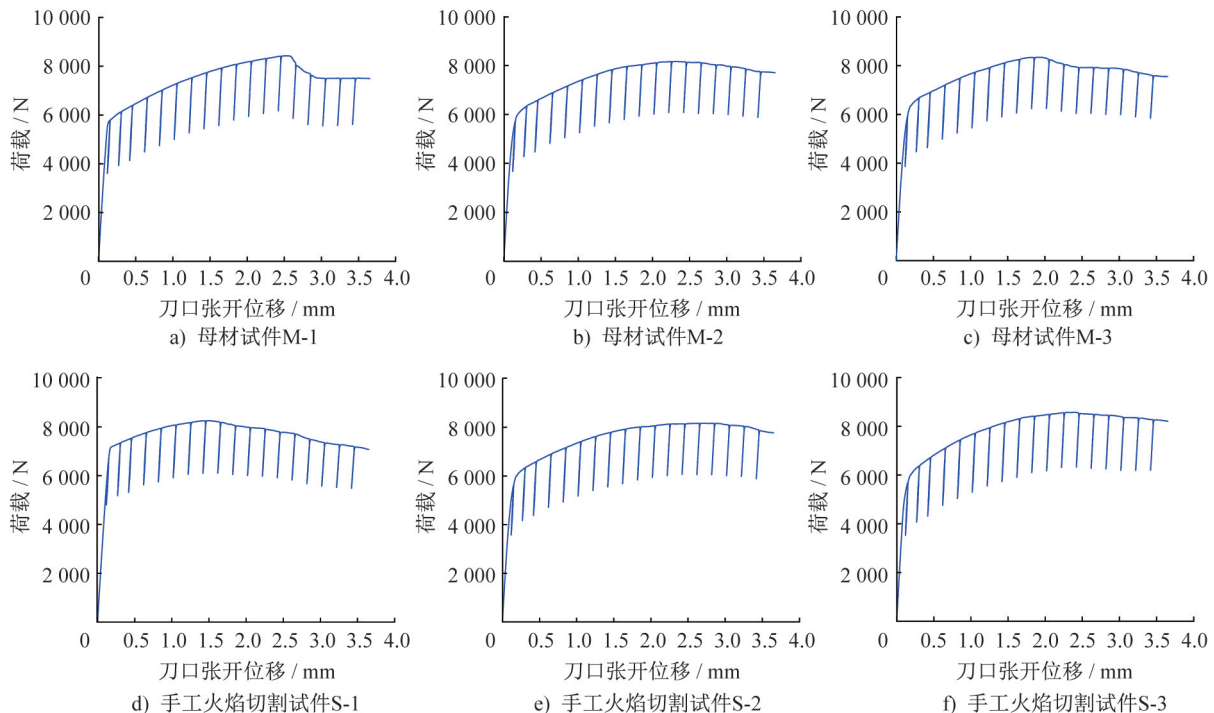


图 16 三点弯曲试验

Fig. 16 Three-point bending test

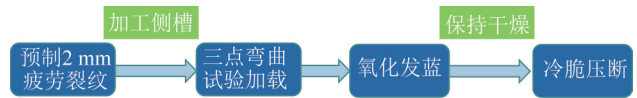
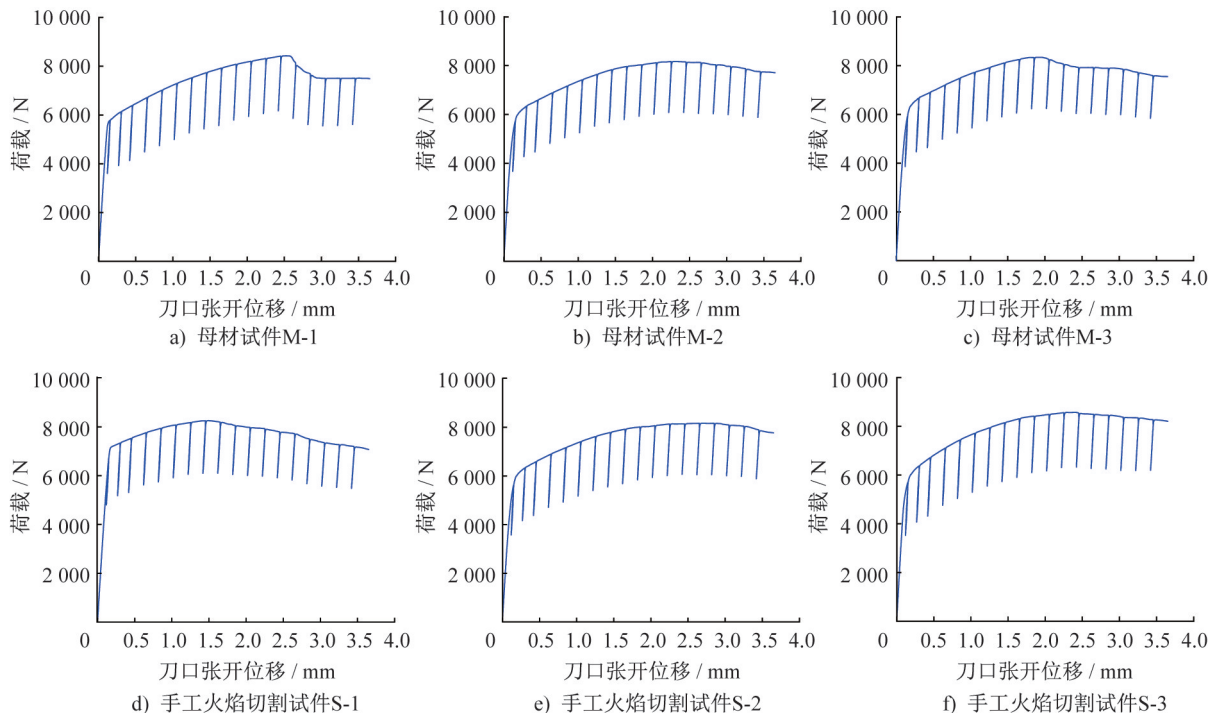


图 17 三点弯曲试验流程图

Fig. 17 Three-point bending test flow chart

3.2.3 试验结果

将所有三点弯曲试验中试件的荷载-刀口张开位移曲线汇总如图 18 所示。根据《金属材料 准静态断裂韧度的统一试验方法》(GB/T 21143—2014)给定的数据分析流程,计算得到三点弯曲试验 CTOD 特征值,如表 11 所示。首先计算母材 3 个三点弯曲试件的 CTOD 特征值平均值,随后分别计算手工火焰切割 4 个试件、半自动切割机火焰切割 4 个试件的 CTOD 特征值平均值,最后对这三种工况下的 CTOD 特征值平均值开展比较分析。



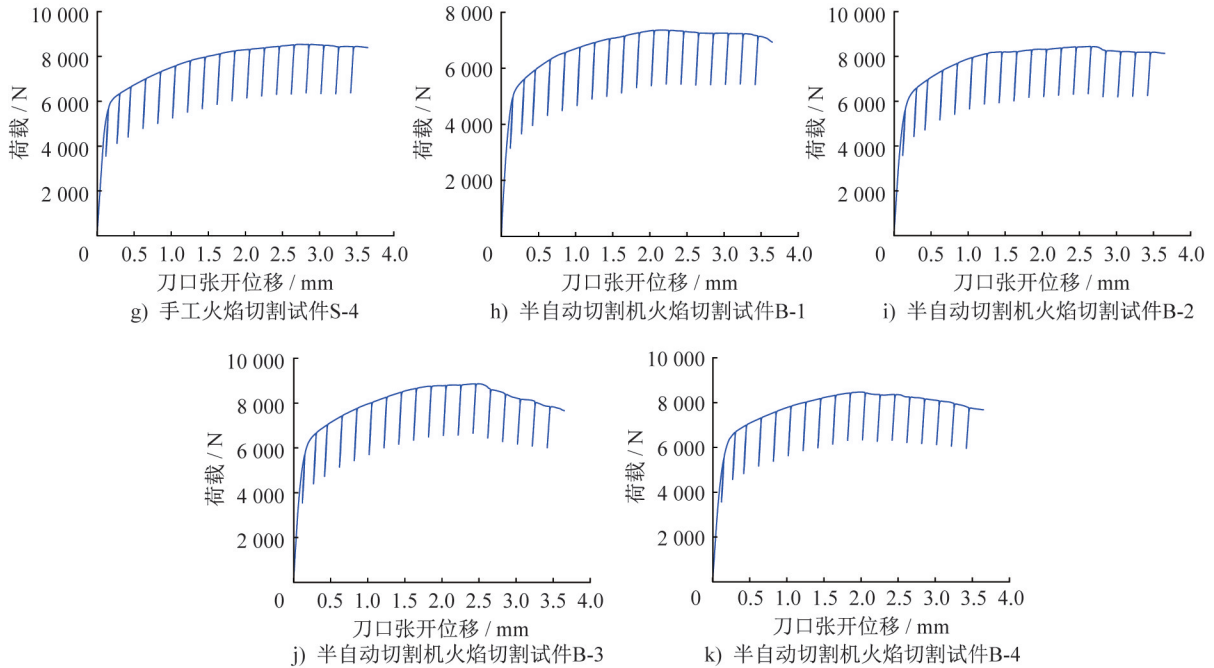
图 18 各试件 $P-V$ 曲线Fig. 18 $P-V$ curves of specimens

表 11 三种工况下三点弯曲试件的 CTOD 值
Table 11 CTOD values for three-point bending specimens under three conditions

工况	试件编号	δ_m /mm	δ_m 平均值/mm
无切割	M-1	0.63	0.56
	M-2	0.56	
	M-3	0.48	
手工火焰切割	S-1	0.37	0.58
	S-2	0.67	
	S-3	0.60	
	S-4	0.66	
半自动切割机火焰切割	B-1	0.50	0.57
	B-2	0.66	
	B-3	0.63	
	B-4	0.48	

对比分析三点弯曲试件的 CTOD 特征值,可以发现:母材的 CTOD 特征值平均值最低,为 0.56 mm;手工火焰切割与半自动切割机火焰切割后的试件,其 CTOD 特征值均较母材有所增加,且二者的增加幅度较为接近,由此可以认为火焰切割对 Q355B 钢材的断裂韧性几乎无影响。两种火焰切割后试件的 CTOD 特征值分别为 0.58 mm 和 0.57 mm,二者数值差异极小,可以认为不同火焰切割方式对 Q355B 钢材的断裂韧性几乎无显著影响。

4 结论

火焰切割凭借成本经济性好、切割效率高、适用范围广等优点,在钢材切割领域得到广泛应用,而热切割面的力学性能不仅直接决定其能否直接用于工程现场的装配与焊接作业,还进一步关系到建筑钢材后续的拆卸操作和循环再利用。本文针对手工火焰切割后与半自动切割机火焰切割后的 Q355B 钢材进行了宏观金相分析,研究其热影响区宽度,并且进行了静力拉伸试验、冲击试验和三点弯曲试验,对比分析了火焰切割后 Q355B 钢的基本力学性能的变化,以及不同火焰切割方式对 Q355B 钢性能指标的影响,得到以下结论:

(1) 20 mm 厚的国产 Q355B 钢火焰切割后热影响区宽度较小,手工火焰切割后切割面不平整,热影响区宽度约为 3.4 mm;半自动切割机火焰切割试件后其切割面更为平整光滑,热影响区分布更均匀且宽度更小,约为 3 mm。

(2) 经过火焰切割后 Q355B 钢的应力-应变曲线其屈服平台会缩短甚至消失。对比两种火焰切割方式,手工火焰切割的试验数据离散性更大。进一步对试验数据计算平均值后发现,火焰切割后的 Q355B 钢屈服强度略有下降,抗拉强度略有上升,但二者的变化均不明显,火焰切割对 Q355B 钢的基本力学性能影响不显著。

(3) 火焰切割后的 Q355B 钢韧脆转变温度基本无变化,韧脆转变区温度略有减小,上平台能和下平台能均小幅度提高,且下平台能的提升趋势更为明显。火焰切割后的 Q355B 钢虽表现出较好的冲击韧性,但火焰切割工

艺对其冲击韧性的整体影响程度并不明显。

(4) 手工火焰切割与半自动切割机火焰切割后的 Q355B 钢, 其 CTOD 特征值变化幅度都较小, 可以认为火焰切割对 Q355B 钢材的断裂韧性几乎没有影响。

(5) 综上所述, 经火焰切割的钢材其力学性能无显著变化, 具备很高的可再利用性, 热切割面可以直接用于装配和焊接作业中。该研究为钢材火焰切割后的再利用提供了数据支撑。

参考文献:

- [1] 陈增有, 马清波, 许鸿吉, 等. Q345E 低合金钢热切割热影响区的组织和性能研究[J]. 热加工工艺, 2012, 41(18): 229-231, 233. DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.2012.18.069. CHEN Zengyou, MA Qingbo, XU Hongji, et al. Research on microstructure and properties of hot cutting heat affected zone of Q345E low alloy steel[J]. Hot Working Technology, 2012, 41(18): 229-231, 233. DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.2012.18.069. (in Chinese)
- [2] 孙震, 徐惟诚, 陆海兵. B-HARD400 钢板自动火焰切割热影响区深度的判定[J]. 理化检验(物理分册), 2015, 51(4): 243-247. SUN Zhen, XU Weicheng, LU Haibing. Determination of automatic flame cutting heat affected zone depth of B-HARD400 steel plates[J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part A (Physical Testing)), 2015, 51(4): 243-247. (in Chinese)
- [3] AKKURT A. The effect of cutting process on surface microstructure and hardness of pure and Al 6061 aluminium alloy[J]. Engineering Science and Technology, 2015, 18(3): 303-308. DOI: 10.1016/j.jestech.2014.07.004.
- [4] 张萍, 孙宜强, 吴立新, 等. 不同切割方法对 Q345B 钢板切割面质量的影响[J]. 物理测试, 2010, 28(5): 15-18. DOI: 10.13228/j.boyuan.issn1001-0777.2010.05.003. ZHANG Ping, SUN Yiqiang, WU Lixin, et al. Effect on quality of cutting surface of Q345 steel plate using different cutting methods[J]. Physics Examination and Testing, 2010, 28(5): 15-18. DOI: 10.13228/j.boyuan.issn1001-0777.2010.05.003. (in Chinese)
- [5] 周崎, 李浩, 王尽沙, 等. 不同厚度 50Mn 钢板火焰切割热影响区范围[J]. 理化检验(物理分册), 2019, 55(5): 305-310. ZHOU Qi, LI Hao, WANG Jinsha, et al. Flame cutting heat affected zone range of 50Mn steel plate with different thickness[J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part A (Physical Testing)), 2019, 55(5): 305-310. (in Chinese)
- [6] 高小勇, 朱启茂. 火焰切割法取样加工余量对 Q345B 钢板力学性能的影响[J]. 轧钢, 2020, 37(5): 93-95. DOI: 10.13228/j.boyuan.issn1003-9996.20190167. GAO Xiaoyong, ZHU Qimao. Effect of sampling processing allowance of flame cutting method on mechanical properties of Q345B plate[J]. Steel Rolling, 2020, 37(5): 93-95. DOI: 10.13228/j.boyuan.issn1003-9996.20190167. (in Chinese)
- [7] 彭章祝, 曹龙韬, 孟腾逸, 等. 火焰切割对 16MnDR 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. DOI: 10.3696/j.issn.1674-165X.2023.05.015. PENG Zhangzhu, CAO Longtao, MENG Tengyi, et al. Effect of flame cutting on microstructure and properties of 16Mn DR welded joint[J]. MW Metal Forming, 2023(5): 76-80. DOI: 10.3696/j.issn.1674-165X.2023.05.015. (in Chinese)
- [8] 马清波, 陈丽园, 许鸿吉. 热切割热影响区对 Q345E 焊接接头组织和性能的影响[J]. 热加工工艺, 2011, 40(7): 159-160, 163. DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.2011.07.061. MA Qingbo, CHEN Liyuan, XU Hongji. Effect of heat affected zone of thermal cutting on microstructure and properties of welded joints of Q345E[J]. Hot Working Technology, 2011, 40(7): 159-160, 163. DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.2011.07.061. (in Chinese)
- [9] ANDRÉS D, GARCÍA T, CICERO S, et al. Characterization of heat affected zones produced by thermal cutting processes by means of Small Punch tests[J]. Materials Characterization, 2016, 119: 55-64. DOI: 10.1016/j.matchar.2016.07.017.
- [10] THIÉBAUD R, DREZET J M, LEBET J P. Experimental and numerical characterisation of heat flow during flame cutting of thick steel plates[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(2): 304-310. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2013.09.016.
- [11] 朱梓坤, 韩阳, 张舟, 等. Q690D 低合金高强钢模拟焊接热影响区的组织和性能[J]. 机械制造文摘(焊接分册), 2022(3): 12-19, 36. DOI: 10.12073/j.hj.20210922002. ZHU Zikun, HAN Yang, ZHANG Zhou, et al. Microstructure and properties of simulated heat affected zone of Q690D low alloy high strength steel [J]. Welding Digest of Machinery Manufacturing, 2022(3): 12-19, 36. DOI: 10.12073/j.hj.20210922002. (in Chinese)
- [12] ZONG L, LIU H, DING Y, et al. Experimental and numerical study on fatigue damage evolution of Q690D welding details[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2024, 212: 108264. DOI: 10.1016/j.jcsr.2023.108264.
- [13] 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 钢及钢产品 力学性能试验取样位置及试样制备: GB/T 2975—2018 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2018. State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China Steel and Steel Products-Location and Preparation of Test Pieces for Mechanical Testing: GB/T 2975—2018 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2018. (in Chinese)
- [14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 金属显微组织检验方法: GB/T 13298—2015 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2015. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Inspection Methods of Microstructure for Metals: GB/T 13298—2015 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2015. (in Chinese)
- [15] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 金属材料拉

- 伸试验 第1部分:室温试验方法:GB/T 228.1—2021[S].北京:中国标准出版社,2021.
- State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Metallic Materials—Tensile Testing: Part 1: Method of Test at Room Temperature: GB/T 228.1—2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021. (in Chinese)
- [16] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 金属材料 夏比摆锤冲击试验方法: GB/T 229—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Metallic Materials—Charpy Pendulum Impact Test Method: GB/T 229—2020[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020. (in Chinese)
- [17] 何轩, 刘拥军, 郭占英. Q345C 钢低温韧性的研究[J]. 热加工工程, 2018, 47(22): 46-48. DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.2018.22.011.
- HE Xuan, LIU Yongjun, GUO Zhanying. Study on low temperature toughness of Q345C steel [J]. Hot Working Technology, 2018, 47(22): 46-48. DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.2018.22.011. (in Chinese)
- [18] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 金属材料 准静态断裂韧度的统一试验方法: GB/T 21143—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Metallic Materials—Unified Method of Test for Determination of Quasistatic Fracture Toughness: GB/T 21143—2014 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2014. (in Chinese)

欢迎订阅 2026 年《新型建筑材料》月刊
邮发代号: 32-57

- 中国科技核心期刊
- RCCSE 中国核心学术期刊
- CACJ 中国应用型核心期刊
- 全国建材优秀期刊
- 中国期刊方阵“双效期刊”
- 华东地区优秀期刊
- 浙江省自然科学优秀期刊
- 中国科技论文统计源期刊
- 《中国学术期刊影响因子年报(自然科学与工程技术版)》统计源期刊
- 《世界期刊影响力指数(WJCI)报告》统计源期刊
- 万方数据数字化期刊群全文收录
- 中国学术期刊(光盘版)全文收录
- 维普数据库全文收录
- EBSCO 数据库全文收录
- JST 日本科学技术振兴机构数据库收录



欢迎关注本刊微信公众号

主要栏目及内容: 新型墙体材料、建筑石膏与胶凝材料、防水屋面材料、装饰装修材料、化学建材、保温材料与建筑节能、混凝土与制品、海绵城市、绿色建筑与绿色建材、理论研究与发展综述, 以及国家产业政策等。

1974 年创刊, 中国建筑材料科学研究总院有限公司主管, 由中国新型建材设计研究院有限公司主办。刊号: CN 33-1078/TU, ISSN 1001-702X。大 16 开, 进口纸胶印 160 页。国内外公开发行。

定价: 每期 8.00 元, 全年 12 期共 96.00 元(含邮费)。

各地邮局及本刊均可办理订阅手续。

另有历年合订本发行。

本刊承接广告, 欢迎联系。

地址: 310022 杭州市拱墅区华中路 208 号

电话: 0571-85175100, 85062600, 85066556

https://xxjz.cbpt.cnki.net

E-mail: nbm999@163.com