

轧制

金属快速剪切连接工艺及成形力研究

张双杰^{1,2}, 杨京², 马世博^{1,3}, 王伟^{1,2}, 李云匣²

(1. 河北科技大学 河北省材料近净成形技术重点实验室, 河北 石家庄 050018;

2. 河北科技大学 材料科学与工程学院, 河北 石家庄 050018; 3. 河北省楔横轧技术创新中心, 河北 石家庄 050031)

摘要: 剪切连接是无头轧制技术中的重要工艺, 变形过程中存在剪切、挤压和镦粗。为掌握成形载荷的变化规律, 基于上限法-基元矩形技术和多元回归分析建立了压下量为1倍板料厚度时的成形载荷预测模型, 可进行任意刃口宽度和搭接量组合参数下的理论成形载荷求解。对剪切连接进行了工艺实验, 分别得到了工艺参数对侧凸率、去头端厚度百分比和载荷值影响的主次顺序, 及相对于各判定指标的最优方案。通过建立综合评价指标并进行极差分析得到了最优参数组合。将实验载荷与所建立的预测模型理论载荷进行了对比, 两者数据相近, 最大相对误差小于8%。该研究为中间坯高温固态剪切连接奠定了理论基础, 对生产实践具有一定的指导作用。

关键词: 无头轧制; 剪切连接; 成形载荷; 侧凸率; 去头端厚度百分比

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.01.013

中图分类号: TG494

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 01-0098-08

Research on metal rapid shear connection process and forming force

Zhang Shuangjie^{1,2}, Yang Jing², Ma Shibo^{1,3}, Wang Wei^{1,2}, Li Yunxia²

(1. Hebei Key Laboratory of Material Near-net Forming Technology, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China;

3. Hebei Technology Innovation Center of Cross Wedge Rolling, Shijiazhuang 050031, China)

Abstract: Shear connection is an important process in headless rolling technology, and there are shearing, extrusion and upsetting in the deformation process. Therefore, in order to grasp the change laws of the forming load, based on the upper limit method-primitive rectangle technology and multiple regression analysis, a forming load prediction model when the reduction amount was one times the thickness of sheet metal was established, and the theoretical forming load under any combination parameters of edge width and overlap amount was solved. Then, the process experiments were conducted on the shear connection, and the primary and secondary order of influence of the process parameters on the side convex rate, the thickness percentage of head-cutting end and the load value, and the optimal scheme relative to each judgment index were obtained. Furthermore, the optimal parameter combination was obtained by establishing a comprehensive evaluation index and conducting range analysis. Finally, the experimental load was compared with the theoretical load of the established prediction model, the data of the two were similar, and the maximum relative error was less than 8%. Thus, this research has laid a theoretical foundation for the high-temperature solid-state shear connection of intermediate billets and has a certain guiding effect on the production practice.

Key words: endless rolling; shear connection; forming load; side convex rate; thickness percentage of head-cutting end

随着轧制行业的快速发展, 对轧材的精度、质

量稳定性提出了更高的要求。与传统轧制相比, 无头轧制因其较少的穿带和抛出轧制件的过程, 带坯在恒定的张力下进行轧制, 保证了轧制的精度和稳定性, 近年来备受行业关注^[1-2]。目前, 无头轧制主要通过常规轧线上中间坯的快速连接技术和连铸连轧技术实现^[3]。连铸连轧技术轧线短, 结构紧凑, 但设备成本高^[4]。常规热轧线上无头轧制设备和工艺简单、连接速度快、连接强度高、可进行不同材料轧坯的连接, 具有广泛的应用价值。

收稿日期: 2023-03-31; 修订日期: 2023-06-19

基金项目: 河北省自然科学基金资助项目 (E2021208025, E2020208044); 河北省创新能力提升计划项目 (225A2201D); 石家庄市后补助奖励专项基金项目 (227790017H)

作者简介: 张双杰 (1966-), 男, 博士, 教授

E-mail: zsjzili@163.com

通信作者: 王伟 (1986-), 男, 博士, 讲师

E-mail: 18631175658@163.com

中间坯连接技术是常规轧线上无头轧制的关键技术。在2007年,韩国浦项公司和三菱-日立公司利用中间坯的剪切-压合技术实现了轧制坯料的固态连接,并应用于工业化生产^[5]。国内张双杰等^[6]采用固态剪切连接技术研究分析了Fe/Ni的扩散行为,发现Fe/Ni相互扩散,形成了厚度约为3 μm的扩散层,扩散层的主要成分为Ni和Fe-Ni固溶体,其扩散机制为空位扩散机制或空位对扩散机制;并提出了一种相对简单的6杆1滑块机构,可实现上下叶片(近似等于金属板速度)的剪切和挤压运动^[7]。马世博等^[8]研究了不同压下量和冷却方式对Q345钢/镍的组织 and 性能的影响,发现随着压下量的增加,界面晶粒与组织细化程度提升,形成共有晶粒界面,压下量为125%料厚并空冷时,剪切连接试样的抗拉强度为500.56 MPa。

金属固态剪切连接过程中发生了挤压、镦粗和

剪切结合变形,力学行为复杂,工艺参数众多。为了保证剪切连接过程的顺利实施和合理选择成形设备,掌握成形力的变化规律是十分必要的。本文基于上限法等建立了剪切连接过程中的成形载荷预测数学模型,并进行工艺实验,获得了最优参数组合。将实验载荷和理论载荷进行了对比,为固态剪切连接的工艺设定和模具设计提供了理论参考。

1 剪切连接工艺及关键参数

金属固态剪切连接过程如图1所示,在上、下剪模的剪切作用下,两块顺序叠放的高温板料发生高速的剪切、挤压和镦粗变形,实现瞬间的固态连接。去除板料连接后产生的接头,整个连接过程完成。由于板料长度方向的尺寸远大于宽度方向的尺寸,板料的塑性变形可近似认为刚性平板的平面剪切类变形,处于平面应变状态。

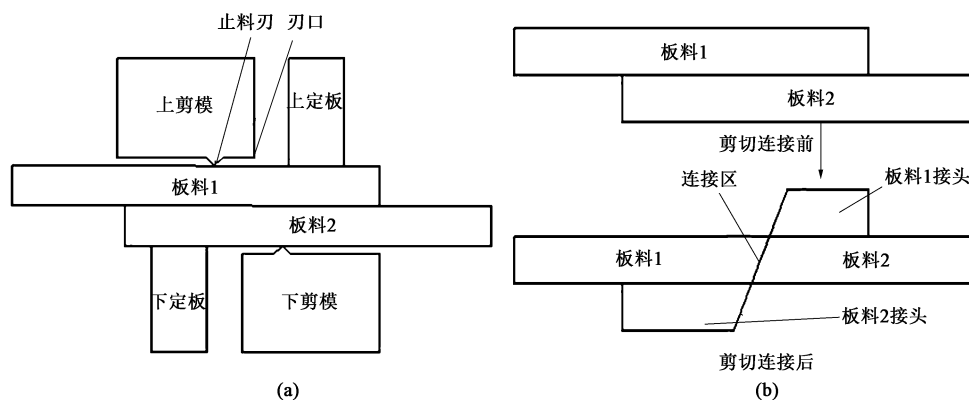


图1 中间坯固态剪切连接

(a) 固态剪切连接示意图 (b) 剪切连接前后的板料

Fig. 1 Solid-state shear connection of intermediate billet

(a) Schematic diagram of solid-state shear connection (b) Sheet metal before and after shear connection

随着模具的下压,板料在压力作用下发生剧烈的塑性变形,金属发生侧向流动,板料宽度逐渐增加,形成了变形区内的侧凸现象(图2中 C 为最大侧凸宽度)。去头端跟随模具运动,两块板料逐渐连接为一块,去头端与板料连接部位的厚度逐渐减小,称这部分厚度为去头端厚度 R 。侧凸与去头端示意图如图2所示。

对剪切连接后的板材将进行精轧,为保证轧制质量和轧制效率,对连接后产生的侧凸宽度和去头端的厚度尺寸有一定的要求^[9]。侧凸严重会造成轧制板料尺寸超差和内部缺陷等,板材连接后要切除去头端,因此侧凸宽度和去头端的厚度应越小越好。将侧凸率 C' 和去头端厚度相对于板料厚度的百分比 R' 作为主要指标,其计算公式分别为:

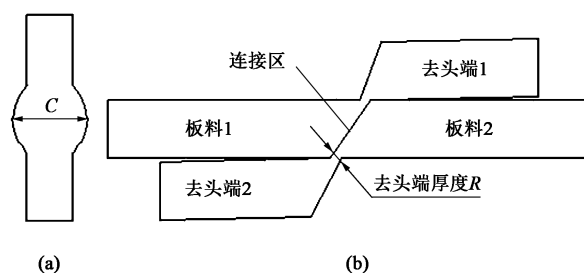


图2 侧凸(a)和去头端(b)示意图

Fig. 2 Schematic diagrams of side convex (a) and head-cutting end (b)

$$C' = (C - 2G)/2G \times 100\% \quad (1)$$

$$R' = R/2H \times 100\% \quad (2)$$

式中: $2G$ 为原始板料宽度, mm; $2H$ 为板料厚度, mm; C 为最大侧凸宽度, mm。

文献 [10] 表明, 影响剪切连接中 C' 、 R' 及成形载荷的主要参数有刃口的搭接量 B 、压下量 L ($L=s/2H \times 100\%$ 或 $(4H-L')/2H \times 100\%$, 其中, s 为模具行程, L' 为上下模刃口距离)、止料刀到刃口的距离即为刃口宽度 A 、止料刀高度 h , 主要影响参数如图 3 所示, 其中, 止料刀主要是为了防止剪切变形区内外金属的相互流动, 类似于精密冲模的齿圈压板^[11], 查阅冲压手册^[12], 将其高度 h 确定为 6 mm。本文采用理论与实验相结合的方式, 材料为 Q345 钢材, 剪切连接温度为 980 ℃, 板料尺寸为 200 mm×43.5 mm×29 mm。

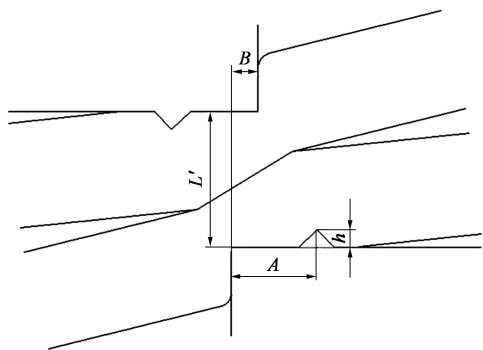


图 3 主要影响参数

Fig. 3 Main influencing parameters

2 基于上限法-基元矩形技术建立力学模型

上限法要求速度场满足动可容条件。日本著名学者工藤英明^[13]提出的“基元技术”的应用较为方便。基元技术是将金属变形体划分为若干个基本单元进行求解, 其中, 基元矩形适用于平面应变问题, 利于基元矩形技术处理剪切连接工艺可获得较为满意的上限解^[14]。

针对金属固态剪切连接工艺, 取连接区域垂直于板料长度方向一平面 (搭接量间平面) 作为研究对象, 如图 4 所示。原始板料宽度为 $2G$, 板料厚度为 $2H$ 。过几何中心点建立直角坐标系, 将板料平均分为 4 部分。进行剪切连接工艺时, 上剪模下压, 经研究发现, 当压下量为 1 倍板料厚度时 ($L=100\%$), 成形力最大^[15]。现针对压下量为 1 倍板料厚度时的剪切连接成形载荷进行数学模型推导。

设变形体上平均单位压力为 p , 将其无量纲化为 $p/2K$ (K 为剪切屈服强度), 记为功率消耗系数 e 。图 4 中以中心线作为边界的面为光滑面, 摩擦切应力 $\tau=0$ MPa, 记作 “s”; 与工具相接触的表面为

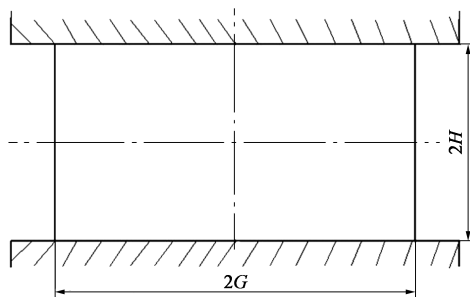


图 4 搭接量间平面

Fig. 4 Plane of overlap amount

粗糙面, $\tau=K$, 记作 “r”。取右上角 1/4 视为一个矩形单元, 其边界条件表示为 “srs”。此时功率消耗系数 e 可表示为:

$$e = \left(n - \frac{1}{2} \right) \frac{H}{G} + \frac{n + \frac{1}{2}}{4n - 1} \times \frac{G}{H} \quad (3)$$

式中: n 为 1/2 变形体划分的单元个数。

当矩形单元形状接近方形时可获得较低的上限解, 因此 n 与 H/G 存在一定的函数关系。令 $de/dn=0$, 得到:

$$n = \frac{1}{4} \left(\sqrt{3} \frac{G}{H} + 1 \right) \quad (4)$$

将 n 值代入式 (3) 得:

$$\frac{p}{2K} = e = \frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{1}{4} \left(\frac{G}{H} - \frac{H}{G} \right) \quad (5)$$

式中: p 为平均单位压力, 则作用在变形体的成形载荷即为其与接触面的投影面积的乘积。根据式 (5) 整理后可得:

$$P = 2K \cdot \left[\frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{1}{4} \left(\frac{G}{H} - \frac{H}{G} \right) \right] \cdot 2G \cdot D \quad (6)$$

式中: P 为板料成形载荷, N; K 为剪切屈服强度, MPa; D 为剪切成形段的长度, mm。

考虑到 Q345 钢的实际轧制温度为 900~1100 ℃, 本文对 980 ℃ 条件下的金属快速剪切连接进行研究。采用配有高温系统的 MTS C45.105 电子万能材料试验机, 依据 GB/T 228.2—2015^[16], 测定得出 980 ℃ 条件下 Q345 钢的抗拉强度为 147 MPa。一般取材料的剪切强度为 0.6~0.8 倍的抗拉强度, 本研究选用 0.7 倍的抗拉强度^[15], 即剪切强度为 102.9 MPa。前期工作通过 Deform 软件对该工艺条件下的剪切连接变形进行了数值模拟, 结果显示, 随着压下量的增加, 侧凸宽度也在逐渐增大, 但长度方向上出现侧凸的范围始终在两个止料刀之间^[15]。图 5 为经过剪切连接工艺后的板料俯视图, 侧凸宽度从中间向

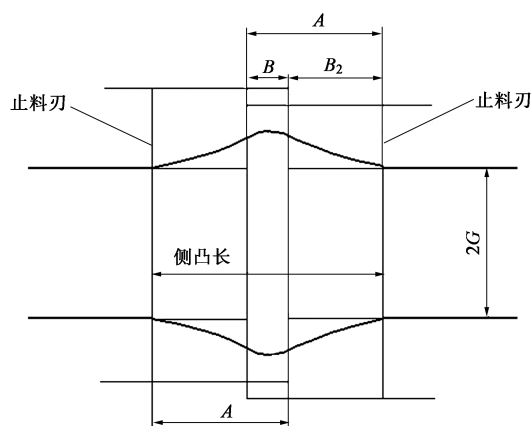


图 5 板料剪切连接后俯视图

Fig. 5 Top view after sheet metal shear connection

两端逐渐减小。将板料分为两部分求解成形载荷，分别为搭接量之间和止料刃到搭接边缘之间。前者的侧凸值由 C 近似代替；由于后者的侧凸变化范围较大，板料宽度不固定，因此在此部分求解成形力时设置了平均系数 c 。由此可得出板料成形载荷公式为：

$$P = 2K \cdot \left\{ \left[\frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{1}{4} \left(\frac{C}{2H} - \frac{2H}{C} \right) \right] \cdot C \cdot B + 2 \left[\frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{1}{4} \left(\frac{C_1}{2H} - \frac{2H}{C_1} \right) \right] \cdot C_1 \cdot B_2 \right\} = 2K \cdot \left\{ \left[\frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{1}{4} \left(\frac{C}{2H} - \frac{2H}{C} \right) \right] \cdot C \cdot B + 2 \left[\frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{1}{4} \left(\frac{cG}{H} - \frac{H}{cG} \right) \right] \cdot c \cdot 2G \cdot B_2 \right\} \quad (7)$$

式中： c 为平均系数； $2G$ 为原始板料宽度，mm； C_1 为止料刃到搭接边缘之间的侧凸宽度平均值（ B_2 范围内）， $C_1 = c \cdot 2G$ ，mm； B 为搭接量值，mm； B_2 为上（下）剪模止料刃到下（上）剪模刃口的距离，mm。

式（7）中， C 与平均系数 c 未知。前期对 C 通过麦夸特法进行了回归求解和对剪切连接进行了有限元模拟^[15]。侧凸与主要影响参数之间的关系为：

$$C = 36.18038 + 0.371417B + 15.409L \quad (8)$$

根据式（8）可获得不同压下量和搭接量所产生的 C 。

前期对压下量为 1 倍板料厚度下不同搭接量和刃口宽度进行了有限元模拟^[15]。将得到的成形载荷带入式（7）求出了不同工艺条件下的 c 值，并拟合出 c 关于搭接量和刃口宽度的表达式，如式（9）所示：

$$c = 1.613683 - 0.00112B^2 + 0.025485B + 0.000716A^2 - 0.06115A \quad (9)$$

进而可根据工艺参数求得理论成形载荷。将模拟参数、 c 的函数关系式及理论载荷整理如表 1 所示。基于式（7）、式（8）和式（9）可得到剪切连接成形载荷的数学模型，当压下量为 1 倍板料厚度时，任意刃口宽度和搭接量的组合形式均可通过该数学模型进行理论成形载荷的求解。

表 1 不同刃口宽度和搭接量下的成形载荷

Table 1 Forming loads under different edge widths and overlap amounts

搭接量 B/mm	刃口宽度 A/mm	模拟成形 载荷/kN	c	理论成形 载荷/kN
6	30	258	0.54	263.2
9	30	292	0.56	295.2
12	30	327	0.58	328.1
15	30	345	0.55	345.8
9	20	286	0.82	287.4
9	25	292	0.66	293.8
9	30	292	0.56	295.2
9	35	295	0.49	295.3
9	40	296	0.45	301.6

3 实验分析及验证

剪切连接工艺中，侧凸宽度和去头端厚度代表着板料的变形形态，成形载荷是选择成形设备的重要依据，3 个指标的值越小越好。为分析侧凸率、去头端厚度百分比和成形载荷 3 个判定指标随工艺参数的变化规律，及验证所推导的成形载荷数学模型的准确性，在 YT32-315 四柱式万能液压机上对 Q345 钢的剪切连接进行了工程实验。首先，将坯料表面进行打磨、清理，在板料两端用点焊预连接以夹紧对齐，利用电炉加热后进行实验，最后，测量出侧凸宽度、去头端厚度并记录压力传感器中显示的载荷值。为减小实验误差，每组实验均进行两次，结果取两组测量数据的平均值。板料剪切连接前后的实物图如图 6 所示。

3.1 实验结果及分析

对搭接量和压下量进行了单因素实验，其中搭接量过低会导致剪切变形严重，过大则会导致变形处于类似挤压状态，连接强度低^[17]，确定搭接量取值范围为 6~15 mm。压下量是变形程度的主要因素，确定其为 0.50~1.25 倍的板料厚度。实验所得的侧凸宽度等数据列于表 2。经实验分析，随着压

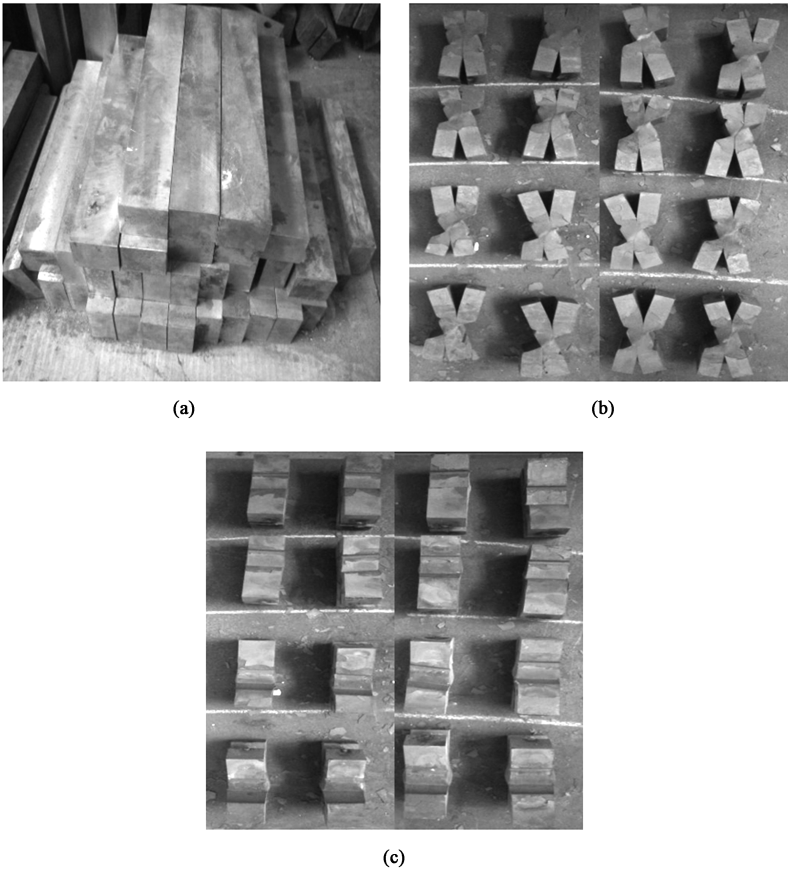


图 6 板料剪切连接前后对比图

(a) 连接前 (b) 连接后去头端面 (c) 连接后侧凸面

Fig. 6 Comparison diagrams before and after sheet metal shear connection

(a) Before connection (b) Head-cutting end surface after connection (c) Side convex surface after connection

表 2 单因素实验结果

Table 2 Results of single factor experiment

实验 编号	B/mm	$L/\%$	A/mm	C/mm	$C'/\%$	R/mm	$R'/\%$	成形载荷/ kN
I	9	50	30	45.41	4.39	19.74	68.07	264.6
II	9	75	30	48.51	11.52	12.49	43.07	282.4
III	9	100	30	54.05	24.25	7.83	27.00	287.6
IV	9	125	30	57.53	32.25	3.53	12.17	285.8
V	6	100	30	52.69	21.13	7.29	25.14	250.9
VI	9	100	30	54.05	24.25	7.83	27.00	287.6
VII	12	100	30	55.86	28.41	8.02	27.66	318.6
VIII	15	100	30	56.58	30.07	8.27	28.52	342.5

下量的增大，刃口处坯料进行镦粗和剪切的变形程度提升，侧凸率明显升高。坯料在模具下压的过程中被不断剪断，去头端厚度呈线性逐渐减小。而成形载荷随着压下量的增大，先急速后缓慢地升高，压

量到达 1 倍板料厚度后，再增大压下量，载荷的变化不明显。随着搭接量的增加，侧凸率、去头端厚度百分比和成形载荷均提升，搭接量对侧凸宽度及去头端厚度的影响相对于压下量较小，对载荷的影响相对较大。各判定指标随压下量和搭接量的变化趋势如图 7 所示。

为寻得剪切连接中最优参数组合，对搭接量、压下量和刃口宽度进行了 3 因素 4 水平正交实验，综合考虑板料强度及控制金属流动，刃口宽度取 20~35 mm。实验结果列于表 3。

对正交实验所得数据计算极差，确定出工艺参数对各判定标准影响的主次顺序。对于侧凸率，各因素的影响程度从大到小分别为压下量、搭接量和刃口宽度，最优方案为：搭接量 $B=6\text{ mm}$ ，压下量 $L=50\%$ ，刃口宽度 $A=30\text{ mm}$ 。对于去头端厚度百分比，各因素的影响程度从大到小分别为压下量、搭接量和刃口宽度，最优方案为：搭接量 $B=9\text{ mm}$ ，压下量 $L=125\%$ ，刃口宽度 $A=35\text{ mm}$ 。对于成形载荷值，各因素的影响程度从大到小分别为

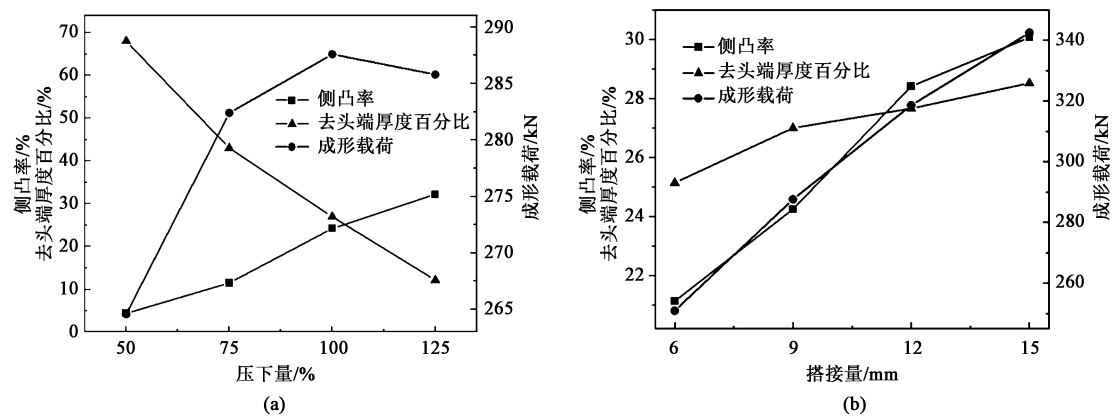


图 7 参数变化对评价指标的影响
(a) 压下量 (b) 搭接量
Fig. 7 Influences of parameter changes on evaluation indicators
(a) Reduction amount (b) Overlap amount

表 3 正交实验的方案与结果

Table 3 Schemes and reselts of orthogonal experimen								
实验 编号	B/ mm	L/%	A/ mm	C/ mm	C'/%	R/ mm	R'/%	成形载 荷/kN
1	6	50	20	47.21	8.53	19.88	68.55	252.4
2	9	75	20	51.40	18.16	13.26	45.72	286.8
3	12	100	20	55.12	26.71	9.98	34.41	318.0
4	15	125	20	60.68	39.49	4.45	15.34	332.6
5	6	75	25	49.52	13.84	13.24	45.66	271.2
6	9	50	25	47.98	10.30	19.10	65.86	262.4
7	12	125	25	60.52	39.13	4.62	15.93	282.1
8	15	100	25	57.26	31.63	8.23	28.38	340.2
9	6	100	30	52.88	21.56	7.68	26.48	253.6
10	9	125	30	58.21	33.82	3.98	13.72	290.2
11	12	50	30	47.62	9.47	18.98	65.45	302.3
12	15	75	30	51.86	19.22	14.34	49.45	332.1
13	6	125	35	55.86	28.41	4.20	14.48	270.0
14	9	100	35	55.21	26.92	7.58	26.14	289.6
15	12	75	35	52.12	19.82	13.40	46.21	298.9
16	15	50	35	47.98	10.30	19.45	67.07	292.5

搭接量、压下量和刃口宽度，最优方案为：搭接量 $B=6\text{ mm}$ ，压下量 $L=50\%$ ，刃口宽度 $A=35\text{ mm}$ 。

为得到综合最优参数，将多目标优化转化为单目标参数优化问题。在剪切连接过程中，首先应考虑得到一个良好的变形形态，将其相对尺度取为 3，因侧凸宽度与去头端厚度同等重要，将两者的相对尺度均取为 1.5。载荷的相对尺度取为 1.0。取正交实验得到的结果平均值的倒数与相对尺度的积作为 3 因素的加权系数。因此，综合评价指标 $F(i)$ 为：

$$F(i) = \frac{1.5}{\bar{f}_1} f_{1i} + \frac{1.5}{\bar{f}_2} f_{2i} + \frac{1}{\bar{f}_3} f_{3i} \quad (10)$$

式中： i 为实验编号， $i=1, 2, 3, \dots, 16$ ； f_{1i} 、 f_{2i} 、 f_{3i} 分别为正交实验中对应的侧凸宽度、去头端厚度、成形载荷值； \bar{f}_1 、 \bar{f}_2 、 \bar{f}_3 分别为正交实验中得到的侧凸宽度、去头端厚度、成形载荷的平均值。

综合评价指标越小，说明判定指标越好。利用式 (10) 计算出正交实验中不同参数组合所对应的综合评价指标数值，如表 4 所示。

表 4 正交实验综合评价指标
Table 4 Comprehensive evaluation indexes of
orthogonal experiment

实验编号	综合评价指标	实验编号	综合评价指标
1	4.81	9	3.37
2	4.18	10	3.16
3	3.96	11	4.87
4	3.43	12	4.49
5	4.07	13	3.05
6	4.76	14	3.54
7	3.28	15	4.26
8	3.86	16	4.91

为判断各工艺参数对综合评价指标数值大小的影响并得到最优参数组合，对表 4 进行极差分析，如表 5 所示，其中 \bar{k}_1 、 \bar{k}_2 、 \bar{k}_3 、 \bar{k}_4 为水平 1、2、3、4 对应的综合评价指标的平均值。各工艺参数对综合评价指标的影响趋势如图 8 所示。由图 8 可看出，综合评价指标值随着搭接量的增大而增大，随着压下量和刃口宽度的增大而降低。故欲使综合评价指

表 5 各水平平均综合评价指标及极差分析
Table 5 Average comprehensive evaluation indicators and range analysis at various level

均值	搭接量	压下量	刃口宽度
$\overline{k_1}$	3.82	4.84	4.09
$\overline{k_2}$	3.91	4.25	3.99
$\overline{k_3}$	4.09	3.68	3.97
$\overline{k_4}$	4.17	3.23	3.94
极差	0.35	1.61	0.15

标最小, 最优工艺参数组合应为搭接量 $B=6\text{ mm}$, 刃口宽度 $A=35\text{ mm}$, 压下量 $L=125\%$ 。

3.2 成形载荷的对比验证

由 3.1 节可知, 当压下量为 1 倍板料厚度时, 成形载荷达到最大值, 因此, 建立了基于压下量为 1 倍板料厚度的成形力数学模型, 根据不同的搭接量和刃口宽度进行了理论求解。实验与理论成形载荷如表 6 所示, 对其进行了误差计算, 最大相对误差为 7.99%, 可证明该数学模型的预测较为精准, 可以反映成形载荷与各工艺条件间的关系, 对生产实践有一定的指导作用。

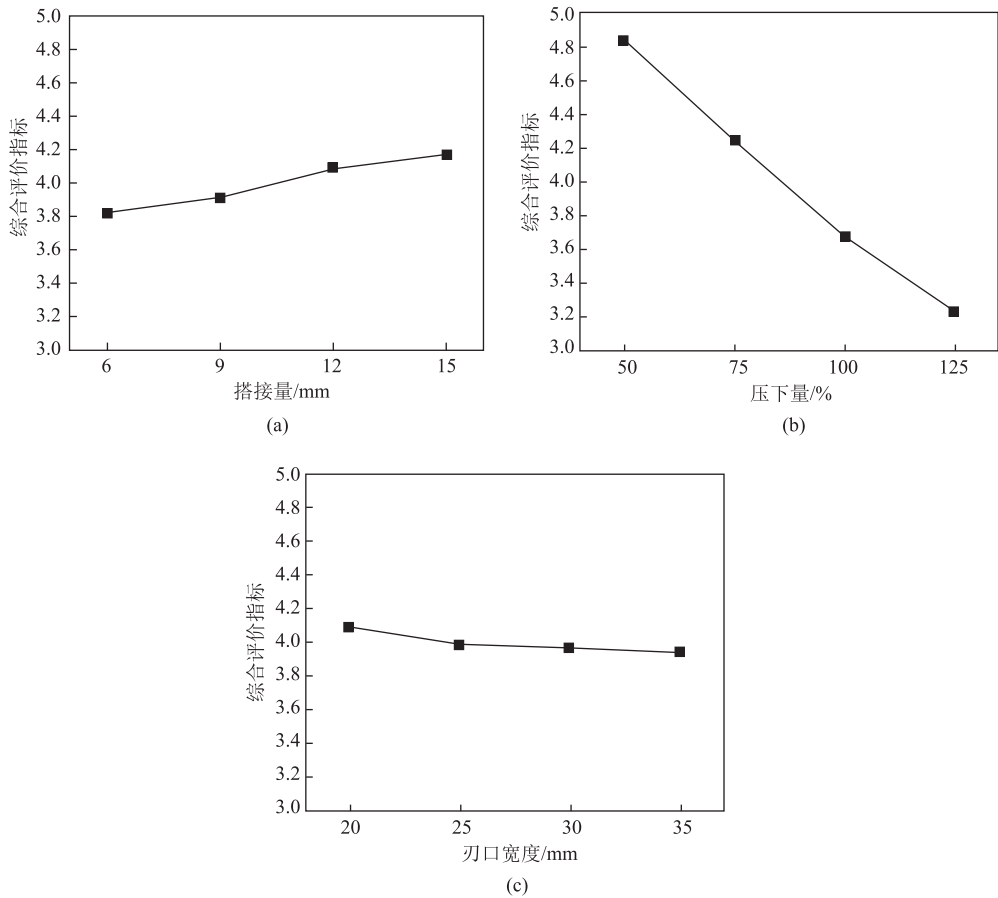


图 8 参数变化对综合评价指标的影响

(a) 搭接量 (b) 压下量 (c) 刃口宽度

Fig. 8 Influences of parameter changes on comprehensive evaluation indicators
(a) Overlap amount (b) Reduction amount (c) Edge width

4 结论

(1) 对不同搭接量、压下量和刃口宽度工艺参数进行了剪切连接实验。结果表明, 随着压下量的增大, 侧凸率明显升高。去头端厚度百分比线性减小,

成形载荷先增大后稳定; 随着搭接量的增加, 侧凸率、去头端厚度百分比和成形载荷均提升。根据正交实验所得极差结果可知, 对于侧凸率, 最优方案为: 搭接量 $B=6\text{ mm}$, 压下量 $L=50\%$, 刃口宽度 $A=30\text{ mm}$ 。对于去头端厚度百分比, 最优方案为: 搭接量 $B=9\text{ mm}$, 压下量 $L=125\%$, 刃口宽度 $A=35\text{ mm}$ 。

表 6 理论与实验成形载荷对比

Table 6 Comparison between theoretical and experiment forming loads

实验 编号	B/ mm	L/%	A/ mm	实验最			实验载 荷/kN	理论载 荷/kN	相对误 差/%
				大侧凸	大侧凸	c			
				宽度/ mm	宽度/ mm				
V	6	100	30	52.69	53.82	0.54	250.9	262.1	4.46
VI	9	100	30	54.05	54.93	0.56	287.6	297.4	3.41
VII	12	100	30	55.86	56.05	0.57	318.6	323.1	1.41
VIII	15	100	30	56.58	57.16	0.55	342.5	343.4	0.26
3	12	100	20	55.12	56.05	0.82	318.0	292.6	7.99
8	15	100	25	57.26	57.16	0.66	340.2	330.4	2.88
9	6	100	30	52.88	53.82	0.54	253.6	262.1	3.35
14	9	100	35	55.21	54.93	0.49	289.6	293.7	1.42

对于成形载荷值，最优方案为：搭接量 $B=6\text{ mm}$ ，压下量 $L=50\%$ ，刃口宽度 $A=35\text{ mm}$ 。

(2) 建立了综合评价指标函数，计算了正交实验中不同参数组合所对应的综合评价指标数值，并进行了极差分析。随着搭接量的增大，综合评价指标升高；随着压下量和刃口宽度的增大，综合评价指标降低。基于该函数的最优工艺参数组合为：搭接量 $B=6\text{ mm}$ ，压下量 $L=125\%$ ，刃口宽度 $A=35\text{ mm}$ 。

(3) 基于上限法-基元矩形技术和多元回归分析建立的成形载荷预测模型，给出了不同工艺参数下的理论成形载荷计算结果，与实验结果的最大误差为 7.99%，具有较高的预测精度，对剪切连接成形力预测及设备选择具有一定的指导作用。

参考文献：

[1] 马银涛, 李宁, 杨涛. 薄板坯连铸连轧无头轧制技术的应用[J]. 河北冶金, 2021, (6): 37-40.
Ma Y T, Li N, Yang T. Application of the generation thin slab continuous casting and rolling endless rolling technology [J]. Hebei Metallurgy, 2021, (6): 37-40.

[2] 董占奎, 王永和, 王奎. 热轧带钢无头轧制技术的发展与支撑[J]. 河北冶金, 2017, (12): 43-46.
Dong Z K, Wang Y H, Wang K. Development and support of endless rolling technology of hot rolled strip steel [J]. Hebei Metallurgy, 2017, (12): 43-46.

[3] 康永林, 田鹏, 朱国明. 热宽带钢无头轧制技术进展及趋势[J]. 钢铁, 2019, 54 (3): 1-8.
Kang Y L, Tian P, Zhu G M. Progress and trend on hot wide strip endless rolling technology [J]. Iron and Steel, 2019, 54 (3): 1-8.

[4] 姬会爽, 彭艳, 李伟, 等. SCR 连铸连轧产线结晶轮损伤机制研究及其延寿措施[J]. 稀有金属, 2022, 46 (2): 177-184.
Ji H S, Peng Y, Li W, et al. Damage mechanism of casting wheel and measures for prolonging life of SCR continuous casting and rolling line [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2022, 46 (2): 177-184.

[5] Lee J S, Kang Y H, Won C S, et al. Development of a new solid-state joining process for endless hot rolling [J]. Iron & Steel Technology, 2009, 6 (8): 48-54.

[6] Zhang S J, Wang W, Ma S B, et al. Fe/Ni diffusion behavior in the shear-extrusion solid state bonding process [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 67: 35-45.

[7] Zhang S J, Yao Y F, Li L C, et al. Kinematics analysis and optimization of the fast shearing-extrusion joining mechanism for solid-state metal [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2015, 28 (6): 1123-1131.

[8] 马世博, 侯瑞东, 邵明杰, 等. 固态金属剪切连接组织及界面演变研究[J]. 塑性工程学报, 2017, 24 (2): 204-211.
Ma S B, Hou R D, Shao M J, et al. Microstructure and interface evolution of solid metal shear bonding [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2017, 24 (2): 204-211.

[9] 兰宇, 王晓晨, 何海楠, 等. 中间坯剪切压合连接无头轧制建模仿真研究[J]. 山东冶金, 2021, 43 (3): 52-56.
Lan Y, Wang X C, He H N, et al. Modeling and simulation of endless rolling of intermediate billet with shear and press joint [J]. Shandong Metallurgy, 2021, 43 (3): 52-56.

[10] 何阳. 金属快速剪切挤压连接的关键参数研究[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2015.
He Y. Research on the Key Parameters of Metal Fast Shear Extrusion Connections [D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology, 2015.

[11] 李华建, 赵彦启, 肖振沿, 等. 渐开线齿形零件精冲尺寸精度分析及工艺参数优化[J]. 锻压技术, 2022, 47 (8): 83-87, 117.
Li H J, Zhao Y Q, Xiao Z Y, et al. Dimensional precision analysis and process parameter optimization on fine blanking for involute toothed parts [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (8): 83-87, 117.

[12] 王孝培. 冲压手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
Wang X P. Stamping Manual [M]. Beijing: China Machine Press, 2000.

[13] Kudo H. An upper-bound approach to plane-strain forging and extrusion-I [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1960, 1 (1): 57-83.

[14] 李双义, 谭粉英. 基元矩形技术的由来及其应用研究[J]. 应用力学学报, 1988, (2): 111-118, 133-134.
Li S Y, Tan F Y. Origin and application of primitive rectangle technique [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 1988, (2): 111-118, 133-134.

[15] 李云匣. 金属快速剪切挤压连接变形过程及变形力研究[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2016.
Li Y X. Research on the Deformation Process and Deformation Force of Metal Fast Shear Extrusion Connection [D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology, 2016.

[16] GB/T 228.2—2015, 金属材料 拉伸试验 第 2 部分: 高温试验方法[S].
GB/T 228.2—2015, Metallic materials—Tensile testing—Part 2: Method of test at elevated temperature [S].

[17] 张双杰, 李云匣, 马世博, 等. 金属快速剪切挤压连接变形的关键参数优化[J]. 塑性工程学报, 2017, 24 (3): 69-77.
Zhang S J, Li Y X, Ma S B, et al. Optimization on key parameters for the metal deformation of rapid shear extrusion bonding [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2017, 24 (3): 69-77.