700 MPa级大梁板剪切边滚压强化工艺开发及应用研究

郑远宝 高亮庆 占炜 李少兵 欧阳可居 杨亮波

（东风商用车技术中心，武汉 430056）

摘要：为解决700 MPa级钢板车架纵梁剪切边疲劳强度不足的问题，采用光学显微镜、扫描电镜和疲劳试验机对现有工艺条件下的剪切边进行性能评价。结果表明，700 MPa级车架纵梁剪切边经滚压去毛刺工艺后，剪切边毛刺有效去除，但由于毛刺倒伏产生折叠，导致剪切边的疲劳强度σ_{-1}仅为206 MPa，疲劳失效起源于撕裂带侧滚压棱边处的折叠根部。为进一步提高剪切边的疲劳强度，结合CAE分析，对剪切边滚压工艺参数进行优化，结果表明，为在剪切边形成较大的残余压应力，滚轮工作面与热轧板表面的最佳角度为30°~45°，滚压深度为0.5~1.0 mm。优化后剪切边的上、下棱边滚压形成的倒角面平整光滑，原板材热轧表面无明显凸起，剪切边横截面轮廓中部未出现外凸，剪切边的疲劳强度σ_{-1}达到263~270 MPa。

关键词：大梁板 剪切边 滚压强化 疲劳强度

中图分类号：U465.1+1；U466 **文献标志码：**B **DOI:** 10.19710/J.cnki.1003-8817.20250248

Research on the Development and Application of Shear Edge Rolling Strengthening Process for 700 MPa Grade Beam Plates

Zheng Yuanbao, Gao Liangqing, Zhan Wei, Li Shaobing, Ouyang Keju, Yang Liangbo

(Dongfeng Commercial Vehicle Technology Center, Wuhan 430056)

Abstract: In response to the problem of insufficient fatigue strength of the shear edge of the 700 MPa level frame longitudinal beam, optical microscopy, scanning electron microscopy and fatigue testing machine are used to evaluate the properties of the shear edge under existing process conditions in this paper. The research results indicate that the burrs on the shear edge of the 700 MPa level frame longitudinal beam are effectively removed by rolling deburring process. However, due to the folding caused by burr lodging, the fatigue strength of the shear edge is only 206 MPa, and the fatigue failure originates from the folding root at the rolling edge of the tear band side. To improve the fatigue strength of the shear edge in further, the parameters of the shear edge rolling process are analyzed and optimized combined with CAE analysis. The results show that in order to form a large residual compressive stress on the shear edge, the optimal angle between the roller working surface and the hot-rolled plate surface is 30°~45°, with a rolling depth of 0.5~1.0 mm. The chamfered surface formed by rolling the upper and lower edges of the shear edge is smooth and flat by using optimized rolling process. The hot-rolled surface of the original plate has no obvious protrusions, and there is no outward protrusion in the middle of the cross-sectional profile of the shear edge. Finally, the fatigue strength of the shear edge reaches 263~270 MPa.

Key words: Grade beam plates, Shear edge, Rolling strengthening, Fatigue strength

1 前言

研究表明[1-2]，燃油车质量每减轻10%，燃油经济性将会提高6%~8%。同时，在商用车领域，用户对整车的质量和可靠性提出了更高要求。

高强钢原材料价格低、性能优越、成形零件刚

作者简介：郑远宝（1990—），男，工程师，硕士学位，研究方向为汽车用金属板材开发与应用。

参考文献引用格式：

郑远宝，高亮庆，占炜，等. 700 MPa级大梁板剪切边滚压强化工艺开发及应用研究[J]. 汽车工艺与材料，2026(2)：31-38.

ZHENG Y B, GAO L Q, ZHAN W, et al. Research on the Development and Application of Shear Edge Rolling Strengthening Process for 700 MPa Grade Beam Plates[J]. Automobile Technology & Material, 2026(2): 31-38.

性高、成形设备投资成本低，广泛用于实现汽车轻量化，但在实际应用中仍面临诸多挑战，尤其是当强度超过700 MPa级后，材料的塑性和韧性随强度的提高而降低，而材料在成形前需经过剪切，剪切边必然会对后续的成形及使用带来影响，已有研究人员针对700 MPa级以上高强钢的剪切工艺性能、剪切边的成形性及剪切分层等问题开展了研究[3-4]，结果表明，剪切边成形性与边部质量和材料微观组织有关，CP800材料的组织为细小、均匀的贝氏体，有利于局部成形；TRIP800材料的组织为铁素体和马氏体，两相之间硬度和韧性差异较大，整体成形性更优；而700 MPa级高强钢中由成分偏析造成严重的铁素体-珠光体带状组织是导致剪切加工过程出现分层开裂的直接原因。在实际应用中，剪切边疲劳强度不足导致剪切边开裂的现象一直存在，不仅降低了产品的使用寿命，也造成了一定的经济损失。事实上，滚压强化工艺广泛应用于柴油机连杆、铁路机车车轴卸荷槽、航空用高精度钛合金螺栓和超高强度钢MJ外螺纹等部位的局部强化[5-8]，滚压强化部位为滚轮接触处受形变强化和光整的局部区域。基于此，本文分析了剪切边疲劳强度偏低的原因，并进行了工艺优化。

2 剪切边滚压强化工艺开发及结果分析

2.1 试验方法

以700 MPa级厚度为8 mm的商用车大梁板为研究对象，按照GB/T 20066—2006《钢和铁 化学成分测定用试样的取样和制样方法》取样和制样，采用QSG750真空直读光谱仪，按GB/T 4336—2016《碳素钢和中低合金钢 多元素含量的测定 火花放电原子发射光谱法（常规法）》检测化学成分，结果如表1所示。按照GB/T 2975—2018《钢及钢产品力学性能试验取样位置及试样制备》于横向1/4位置取拉伸样，按GB/T 228.1—2021《金属材料 拉伸试验 第1部分：室温试验方法》在Z250/Z050电子拉力试验机上进行力学性能检测，结果如表2所示。采用不同的滚压工艺，通过改变滚轮结构、滚轮工作面与钢板表面的夹角以及滚压深度，将700 MPa级厚度为8 mm的大梁板两侧剪切边进行滚压处理，按图1所示，沿滚压前进方向取疲劳试验式样若干，采用线切割沿试验钢边部将试样取下，保证剪切边a处的原始状态，采用磨床将其他3个切割面磨平（粗糙度*Ra* 1.6），剪切边疲劳试样尺寸为200 mm×50 mm×8 mm，如图2所示。为充分表征剪切边的疲劳强度，在疲劳试样上、下面中间部位铣槽，以减小试样试验部位截面积，按GB/T 3075—2021《金属材料 疲劳试验 轴向力控制方法》进行疲劳试验，使用Amsler 45HFP1093 450 kN高频疲劳试验机，试验频率约为115 Hz，对称拉压载荷，寿命基数为1×10^7周次，以试样出现肉眼可见疲劳裂纹或系统共振频率降低7 Hz为失效判据。

表1 700 MPa大梁板化学成分（质量分数） %

牌号	C	Si	Mn	P	S	Nb	V	Ti	Al
700L	0.08	0.06	1.60	<0.01	<0.005	0.048	0.02	0.10	0.046

表2 700 MPa大梁板力学性能检测结果

牌号	厚度/mm	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	延伸率/%
700L	8.0	685	775	22.0

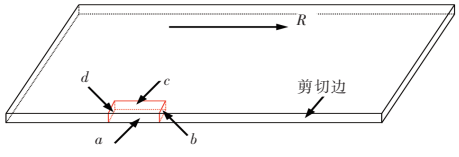


图1 剪切边疲劳试样位置示意

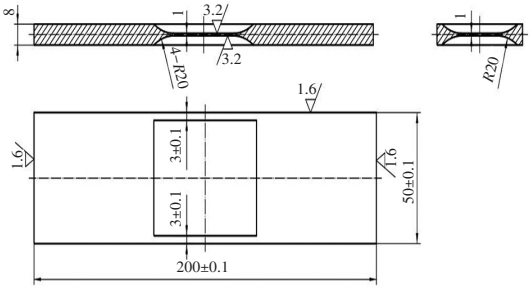


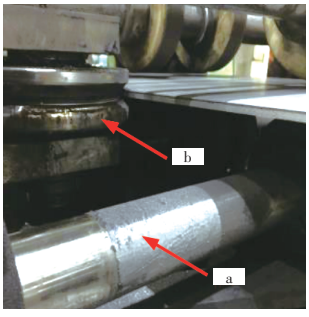
图2 疲劳试样外形尺寸

采用4%硝酸酒精溶液进行腐蚀，时长为15~20 s，使用GX71金相显微镜观显微组织；采用LEO1450VP扫描电子显微镜观察疲劳断口，采用Deform-3D软件建模和滚压分析。

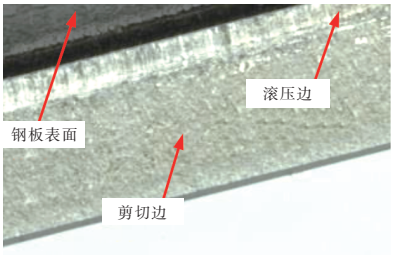
2.2 现有工艺条件下剪切边及疲劳强度分析

热轧大梁卷板在进入滚压工序之前，需纵剪分条为合适的宽度，分条后须去除剪切边毛刺，

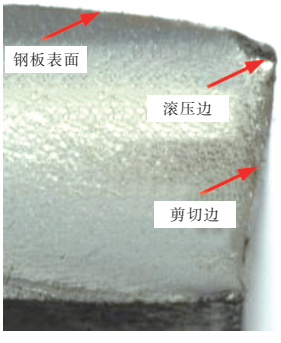
去毛刺的方式有很多,本文中,将滚轮安装在钢板的下方,使辊轮轴线与板材表面平行,利用碾压辊(轮)与钢板的线速度差打磨、碾压毛刺,如图3a中的a处所示;同时,在辊压线两侧设置单滚压装置,滚压轮的轴线与钢板表面垂直,如图3a中的b处所示。滚压工序结束后,按前述方法取剪切边疲劳试样若干,并进行拉-压疲劳强度检测。



(a)现生产滚毛刺+滚压装置



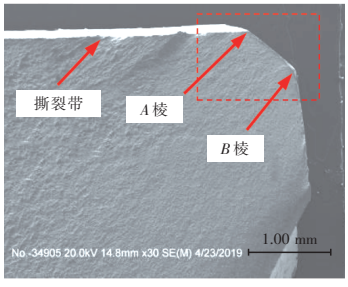
(b)剪切边外形



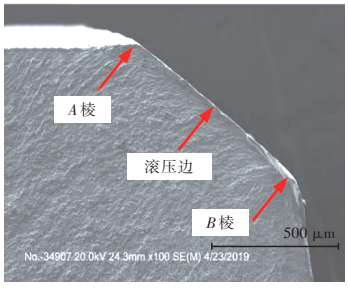
(c)疲劳试样裂纹源

图3　剪切边外形特征和疲劳裂纹源

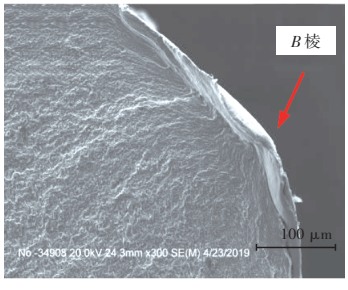
疲劳试验结果显示,在现有工艺条件下,剪切边的疲劳强度σ_{-1}为206 MPa,疲劳断口宏观形貌如图3c所示,可以看出,疲劳裂纹起源于滚压边。由图4可知,疲劳裂纹起源于撕裂带侧滚压棱边处的折叠根部,该折叠位于滚压倒角面与板面的棱角B上。折叠本体经过剧烈变形,与断口存在明显的界线,突出于基体断口。与基体相比,滚压边经剧烈变形而成,其与基体存在巨大的应变梯度,而折叠缺陷导致的疲劳失效已被验证真实存在[9]。因此,滚压边折叠的存在及其与基体件巨大的应变梯度是导致疲劳裂纹起源的直接原因。



(a)撕裂带侧滚压边



(b)裂纹起源于滚压边棱角



(c)滚压边-板面棱角处的折叠

图4　剪切边滚压后的疲劳断口

上述折叠的产生与滚压头和剪切边棱边间的作用过程有关。如图5所示,滚压开始时,棱角与滚压头的接触点为C,滚压过程中,滚压头水平移动,滚压结束时该接触点为B,即剪切边棱角C迁移至B,而不是垂直滚压面移动至N点,这种变形路径不利于剪切边疲劳性能的提高,具体分析如下。

a. 剪切边的原棱边C倒向B棱处,棱边与滚压头之间摩擦距离大,造成的剪切应变量大,易产生较大的折叠,且折叠可能是毛刺变形演变而来,已存在微裂纹。

b. 折叠本体变形量较大,与基体间存在较大的应变梯度;折叠本体硬度高,微裂纹易扩展,滚

压后的轮廓和折叠尺寸如图 6 所示，折叠处尺寸达 163 μm。

c. 剪切边的原棱边 *C* 倒向棱边 *B* 处，剪切边上的金属流向板面，而在棱边 *A* 附近产生张应力，不利于在剪切边上形成压应力。

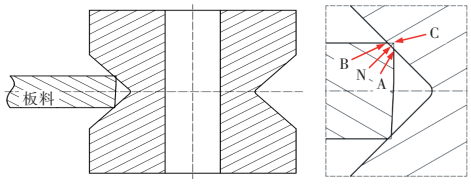


图 5 单滚轮滚压边形成过程

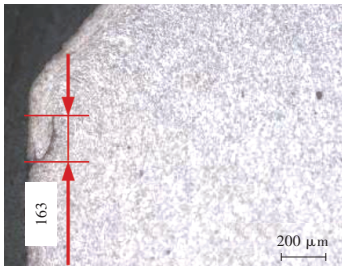


图 6 剪切边滚压折叠形貌

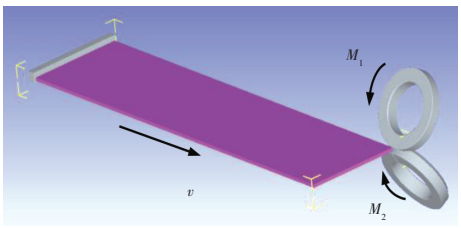
2.3 剪切边滚压工艺 CAE 优化分析

2.3.1 剪切边滚压有限元模型

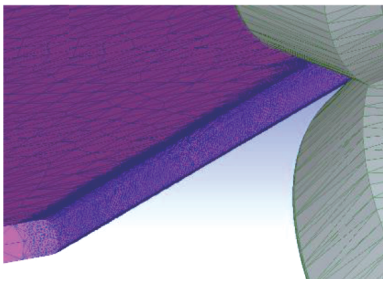
基于上述试验结果，需要改变滚压头的结构和压入方向，保证压入方向垂直于滚压头滚压面，以减小接触面摩擦力和最大应变量，防止或减小折叠，使更多剪切边棱角金属流向剪切边，增加剪切边上的压应变，提高剪切边残余压应力水平。

为更好地分析滚压角度和滚压深度对金属流动、剪切边压应变以及残余应力的影响，设计了单侧双滚轮滚压装置，分别对剪切边的光亮带侧和撕裂带侧进行滚压强化。

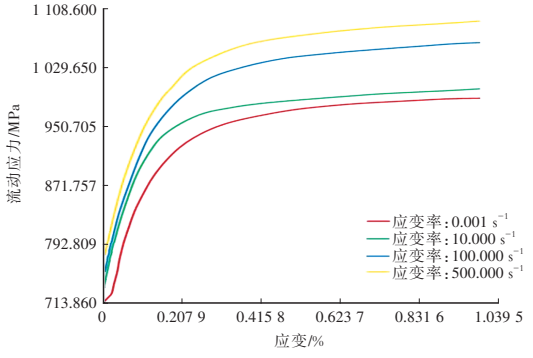
采用 Deform-3D 软件建模，如图 7a 所示，有限元模型包含一个长方体工件和一组圆环形滚轮，工件为弹塑性体材料，选用 700 MPa 级高强钢，材料性能如表 3 所示，应力应变曲线如图 7c 所示，工件尺寸为 750 mm×140 mm×8 mm，推进速度 v=100 mm/s。采用四面体单元进行网格划分（四面体最小边长为 6 mm，最大边长为 12 mm），并将工件距离滚轮侧 10 mm 处的网格进行一步细化为边长为 2 mm 的四面体，如图 7b 所示。滚轮为刚性体，为保证滚轮转动，设定初始扭矩 M_1=M_2=1 N·mm。



（a）有限元模型



（b）网格划分



（c）材料应力应变曲线

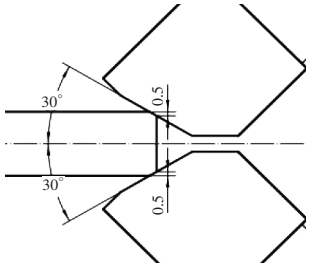
图 7 剪切边滚压有限元分析

表 3 工件材料性能参数

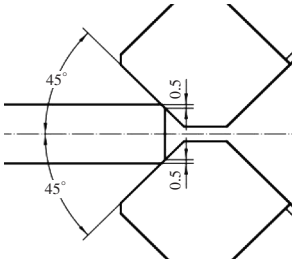
材料	密度 /kg·m^{-3}	弹性模量 /GPa	泊松比	抗拉强度 /MPa
700 MPa 级高强钢	7 850	210	0.3	700

2.3.2 滚压角度优化及结果分析

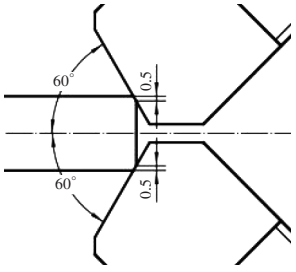
如图 8 所示，将滚轮工作面与钢板表面的夹角设置为 30°、45°、60° 3 种，滚压深度设置为 0.5 mm，板料厚度设置为 8.0 mm，3 种滚压方案对应的板料应力分布如图 9 所示。



（a）30°

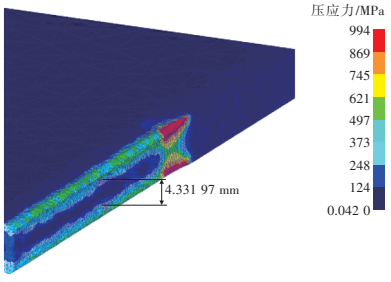


(b)45°

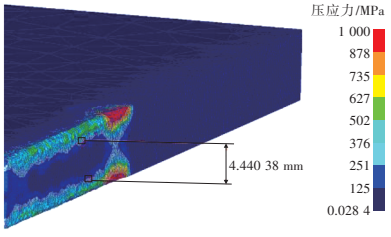


(c)60°

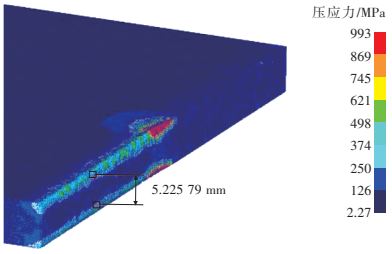
图8　不同滚压角度CAE分析方案



(a)30°



(b)45°



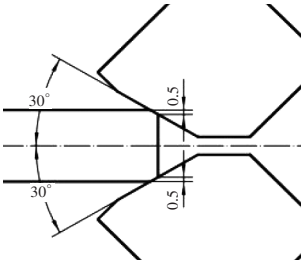
(c)60°

图9　不同滚压角度对应的应力分布

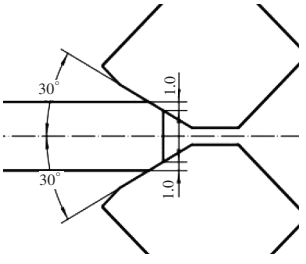
由图9应力云图分布结果可知,在滚压深度相同时,随着滚轮工作面与钢板表面夹角的增大,钢板剪切边侧无压应力存在的宽度从4.33 mm逐渐提高至4.44 mm、5.25 mm,即剪切边侧压应力区域的宽度在减小。从金属流动方面看,随着滚轮工作面与钢板表面夹角的增大,金属流动量逐渐从剪切边侧向钢板表面侧转移,从而导致剪切边侧的应变和压应力减小。当滚轮工作面与钢板表面夹角为30°和45°时,剪切边侧的应变和压应力相差较小,因此,滚轮工作面与钢板表面的夹角应控制在30°~45°。

2.3.3　滚压深度优化及结果分析

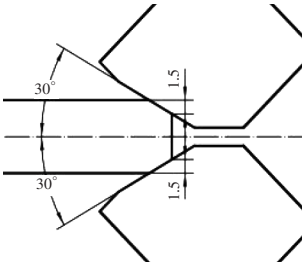
如图10所示,将滚压深度分别设置为0.5 mm、1.0 mm、1.5 mm,保持滚轮工作面与钢板表面的夹角为30°,板料厚度设置为8.0 mm,3种滚压方案对应的板料应力分布如图11所示。



(a)0.5 mm

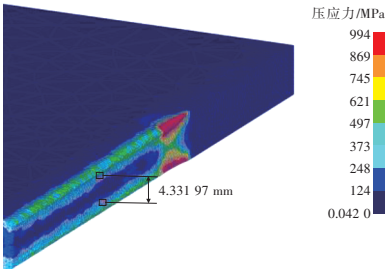


(b)1.0 mm

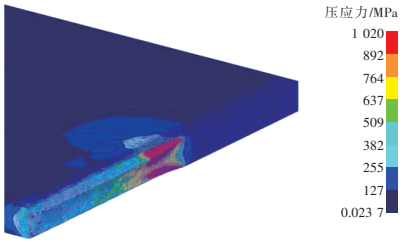


(c)1.5 mm

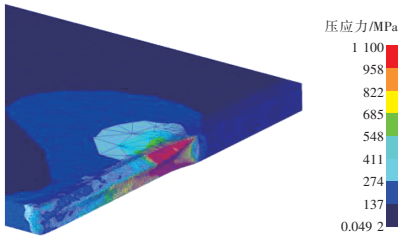
图10　不同滚压深度CAE分析方案



(a)0.5 mm



(b)1.0 mm



(c)1.5 mm

图 11　不同滚压深度对应的应力分布

由图 11 可知，当滚轮工作面与钢板表面的夹角相同时，剪切边侧压应力区域的宽度随滚压深度的增加而增加，钢板剪切边侧无压应力存在的宽度由 4.33 mm 逐渐降低至 0。从金属流动方面看，随着滚压深度的增加，钢板表面侧和剪切边侧均存在金属流动量，对应的应变和压应力增加。当滚压深度为 1.0 mm、1.5 mm 时，剪切边侧出现了较大的外凸变形，因此，滚压深度应控制在 0.5~1.0 mm。

综上，滚轮工作面与钢板表面的夹角应控制在 30°~45°，滚压深度应控制在 0.5~1.0 mm。

2.4　剪切边滚压试验及结果分析

根据 CAE 分析结果，分别制作滚轮工作面与钢板表面的夹角为 45°、30° 的滚轮装置，将其安装在辊压线上，分别对板料两侧的剪切边进行滚压强化处理，如图 12、图 13 所示，试验材料为 700L-t8.0，油缸压力为 6 MPa，试验中保持两侧的油缸压力相同，试验结束后截取两侧剪切边，如图 14、图 15 所示，观察滚压后的形貌，分别测量光亮带侧和撕裂带侧的滚压角度和滚压深度，并按前文中的方法取样并检测剪切边的拉-压疲劳强度，检测结果如表 4 所示。

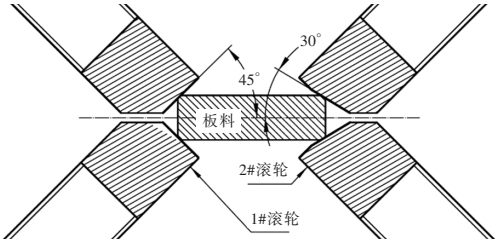
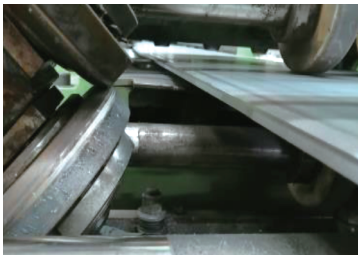


图 12　剪切边滚压强化示意

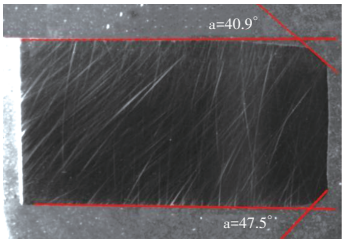


(a)45°滚轮装置

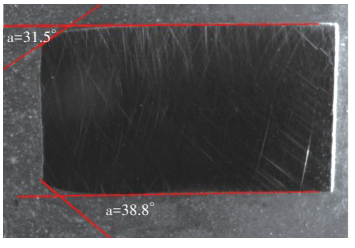


(b)30°滚轮装置

图 13　剪切边滚压强化试验

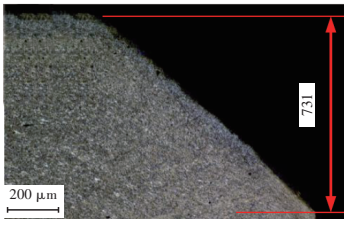


(a)45°滚轮滚压边

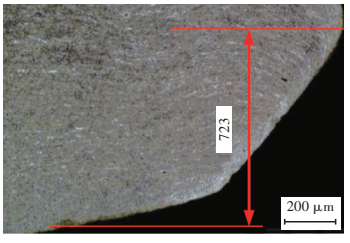


(b)30°滚轮滚压边

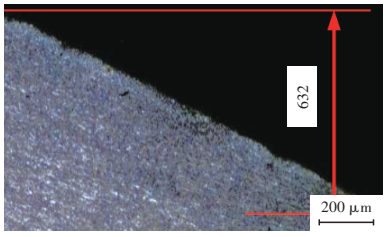
图 14　滚压边宏观形貌



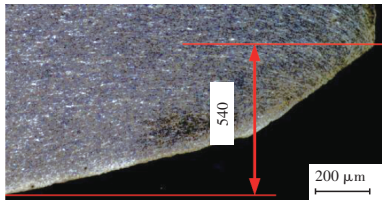
(a)45°滚压边光亮带侧



(b)45°滚压边撕裂带侧



(c)30°滚压边光亮带侧



(d)30°滚压边撕裂带侧

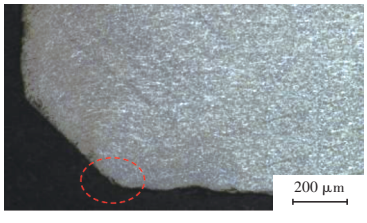
图15　滚压边微观形貌

由表4可知,45°滚轮滚压边对应的滚压角度和滚压深度均大于30°滚轮滚压边,但疲劳强度略低。

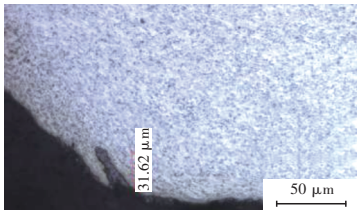
表4　2种滚轮滚压边尺寸及疲劳强度检测结果

滚轮角度/(°)	光亮带侧		撕裂带侧		疲劳强度 σ_{-1}/MPa
	滚压角度/(°)	滚压深度/μm	滚压角度/(°)	滚压深度/μm	
45	40.9	731	47.5	723	263
30	31.5	632	38.8	540	270

由图14可知,在2种滚压工艺条件下,原板材热轧表面无明显凸起,剪切边横截面轮廓中部未出现外凸。进一步观察表明,45°滚轮滚压边仍然存在微小的折叠。如图16所示,折叠缺陷的高度为31.62 μm,与改善前相比(图6),折叠明显减小,仅为原来的1/5。



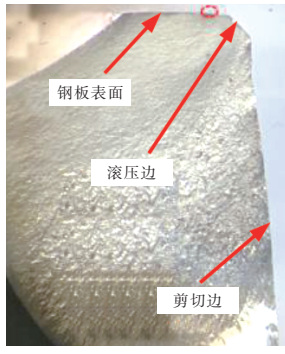
(a)45°滚压边光亮带侧



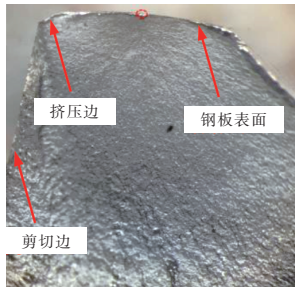
(b)45°滚压边折叠形貌

图16　45°滚轮滚压边及折叠

由图17可知,2组试样的疲劳裂纹均起源于靠近挤压边处的热轧板表面原始缺陷,疲劳源微观形貌及疲劳裂纹扩展如图18所示,与优化前相比,裂纹源已经发生本质转移,虽然在45°滚轮滚压边处仍然存在微小折叠,但不足以引起疲劳失效,表明滚压效果良好。

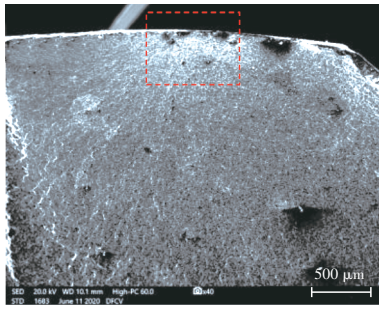


(a)45°滚轮

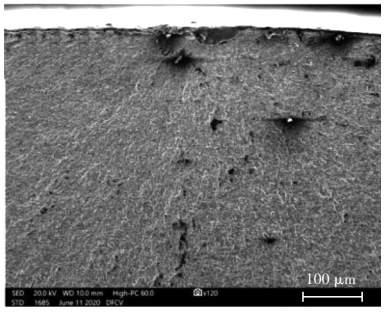


(b)30°滚轮

图17　疲劳试样断口



(a)低倍形貌



(b)高倍形貌

图18　疲劳扩展区典型照片

3 结论

a. 在现有生产工艺条件下，700 MPa级车架纵梁剪切边经滚压去毛刺工艺后，剪切边毛刺得到有效去除，但由于毛刺倒伏产生折叠，导致剪切边的疲劳强度σ_{-1}仅为206 MPa，疲劳失效起源于撕裂带侧滚压棱边处的折叠根部。

b. CAE分析结果表明，为在剪切边侧形成较大的残余压应力，滚轮工作面与钢板表面的角度应控制在30°~45°，滚压深度应控制在0.5~1.0 mm。

c. 采用优化后滚压工艺，剪切边的上、下棱边滚压后形成的倒角面平整光滑，原板材热轧表面无明显凸起，剪切边横截面轮廓中部未出现外凸，剪切边的疲劳强度σ_{-1}达到263~270 MPa。

参考文献：

[1] 黄金陵. 汽车车身设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 55-60.

[2] SRINIVASA K. Advancements in Lightweight Materials for Automobile Design: Impact on Fuel Efficiency And Safety[J]. World Journal of Advanced Research and Reviews, 2019, 2(1): 63-69.

[3] 牛超, 王雪听, 韩非. 基于改进Nakajima试验的高强钢剪切边成形性研究[J]. 塑性工程学报, 2025, 32(6): 273-277.

[4] 刘颖, 周朝刚, 汪云辉. 700 MPa级热轧高强钢在剪切加工过程中分层开裂的原因[J]. 机械工程材料, 2020, 44(3): 73-77.

[5] 李佳, 张子建, 赵登辉,等. 滚压强化对连杆用42CrMo4钢疲劳性能的影响[J]. 柴油机, 2023, 45(4): 53-60.

[6] 李伟龙. JZ50钢车轴超声滚压强化对疲劳寿命影响研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2023.

[7] 刘婧颖, 李浩楠, 徐昊, 等. 根部圆角滚压强化的高精度钛合金螺栓疲劳失效研究[J]. 机械制造与自动化, 2023, 52(6): 15-17+44.

[8] 王锋强, 黄遥, 任碧芳. 超高强度钢MJ外螺纹滚压强化及检测研究[J]. 航空精密制造技术, 2024, 60(1): 59-61.

[9] 马强, 李志广, 李萌, 等. 连杆断裂失效分析及锻造折叠缺陷控制研究[J]. 精密成形工程, 2023, 15(7): 219-228.

AT&M