

## 连续挤压包覆机挤压轮用钢的研究进展

汪圣锋<sup>1</sup> 刘宏玉<sup>1,2</sup>

(1 武汉科技大学理学院, 武汉 430065; 2 冶金工业过程系统科学湖北省重点实验室, 武汉 430065)

**摘要** 连续挤压包覆技术是在连续挤压技术基础上发展起来的一种新型塑料加工技术, 坯料在摩擦力作用下被挤压轮拽入并随其旋转和变形, 压入模腔并与模腔中的钢芯复合得到复合材。挤压轮的工作温度为 200 ~ 250 °C, 轮槽表面最高温度达 590 °C。文中叙述了挤压轮的工作条件、主要失效形式、挤压轮用钢的基本性能要求以及国内外挤压轮用钢的化学成分、研究进展和发展趋势。

**关键词** 挤压轮 热作模具钢 研究进展

## Research Progress on Steels for Extrusion Wheel of Continuous Extrusion Cladding Machine

Wang Shengfeng<sup>1</sup> and Liu Hongyu<sup>1,2</sup>

(1 College of Science, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065;  
2 Hubei Province Key Laboratory of System Science of Metallurgical Process, Wuhan 430065)

**Abstract** The continuous extrusion cladding technology is a new plastic making process developed based on continuous extrusion technology, of which the billet piece is dragged in by extrusion wheel at effect of friction force, turned with wheel and deformed, extruded in mould to clad the steel core in mould cavity and get cladding product. The service temperature of extrusion wheel is 200 ~ 250 °C and the highest temperature at surface of wheel trough is up to 590 °C. The service conditions and main failure form of extrusion wheel, basic requirement for properties and chemical composition of steel for extrusion wheel, its status of research and development trend at home and abroad are presented in this article.

**Material Index** Extrusion Wheel, Hot Working Die Steel, Research Progress

连续挤压包覆技术(Continuous Extrusion Cladding)是在连续挤压技术基础上发展起来的一种新型塑性加工技术, 已广泛应用于双金属复合导线、电缆护套、光缆护套等的生产上<sup>[1]</sup>。挤压轮是连续挤压包覆机的主要工作部件之一, 其工作寿命直接影响到连续挤压的生产成本和生产效率。在其服役过程中, 由于高温及与被加工材料的强烈挤压摩擦, 很容易造成挤压轮的过早失效。

### 1 挤压轮的工作环境及主要失效形式

连续挤压包覆原理如图 1<sup>[2]</sup>所示。坯料在摩擦力作用下被挤压轮拽入并随其旋转, 发生塑性变形后被压入模腔并与模腔中的钢芯复合得到复合材。

#### 1.1 工作温度和受力分析

通过测试挤压轮轮槽表面以下 6 mm 处的工作温度发现<sup>[3]</sup>: 随着挤压轮的旋转, 其温度呈周期性变化, 挤压轮每旋转一周, 温度就要经历一个升温 and 降温的过程, 温度变化在 40 °C 左右。最低温度 200 °C, 最高 250 °C。

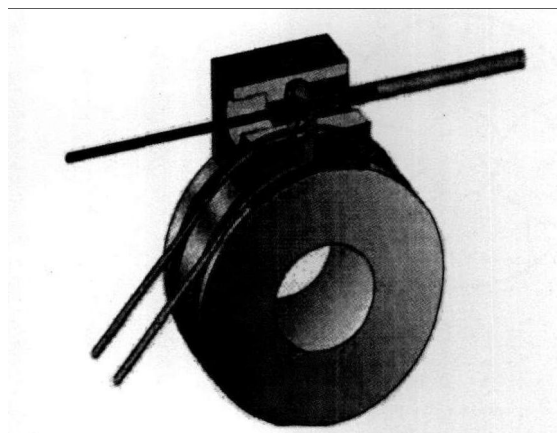


图 1 连续挤压包覆原理图

Fig. 1 Principle diagram of continuous extrusion cladding process

挤压轮温度的最高值出现在轮槽表面, 并在径向上逐渐向中心扩展, 轴向上逐渐向端面扩展<sup>[4]</sup>。在挤压轮工作过程中, 整个轮槽区域均有较高温升。刚与坯料冷端接触处温度下降, 而后随着坯料的旋转, 挤压轮逐渐接触坯料高温区, 自身温度也升至最高值; 离开坯料后, 热量向环境散失, 温度下降, 直至

再次接触坯料进入下一个温度循环周期。轮槽表面最高温度为 590 ℃。

在挤压轮受力集中处,热应力起主要作用<sup>[5]</sup>。对于挤压轮所受的热应力:当挤压轮的冷却孔在花键处,冷却孔表面为温度应力集中处,其最大等效应力  $s_{\max} = 927$  MPa,此处机械应力在 200 MPa 左右,该处所受真实应力为 1 172 MPa;当挤压轮冷却孔位于其中部时,温度应力集中处在挤压轮槽的塑性变形区内,轮槽表面的最大等效应力  $s_{\max} = 638$  MPa,机械应力为 282 ~ 459 MPa,所受真实应力为 920 ~ 1 097 MPa。

### 1.2 挤压轮主要失效形式及原因

挤压轮失效的主要形式为脆性断裂和疲劳裂纹破坏。当挤压轮的冷却孔在花键处,失效的主要形式是沿径向早期脆性断裂。破坏裂纹源主要产生于轮心花键齿根部,沿径向向边缘处传播(图 2a)。扩展中的裂纹在即将到达轮边缘时分叉,大部分呈现 Y 形,直到裂纹贯穿整个轮子而断裂<sup>[6]</sup>。

当挤压轮的冷却孔在挤压轮的中部时,其失效的主要形式是热疲劳裂纹失效。其破坏裂纹源产生于挤压轮槽表面(图 2b)<sup>[7]</sup>,由于周期性循环应力作用导致裂纹以疲劳形式扩散,导致挤压轮发生破坏。

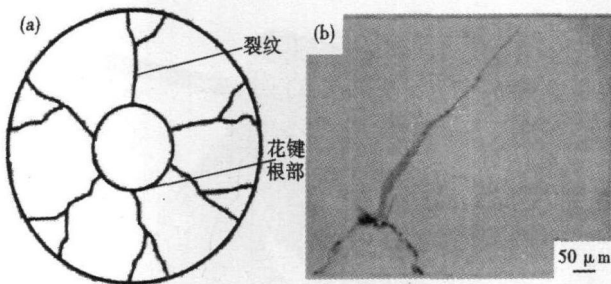


图 2 挤压轮中裂纹的扩展(a);失效挤压轮裂纹处抛光态形貌(b)

Fig. 2 (a) Crack propagation in extrusion wheel; (b) polished appearance of crack area in extrusion wheel

### 1.3 挤压轮用钢的性能要求

考虑挤压轮在工作过程中所受的最大应力,要求挤压轮用钢的屈服强度要大于 1 172 MPa。

挤压轮工作中的温度变化是一个循环过程,其最高温度达到 590 ℃,波动幅值 500 ℃左右,所以要求挤压轮用钢有高的耐热疲劳性能。

## 2 国内外挤压轮用钢的发展

### 2.1 国内

表 1 给出了国内主要挤压轮用钢及其化学成分。在 20 世纪 70 年代,我国引进了国外的连续挤压技术,当时国内的挤压轮用钢主要是 3Cr2W8V,这种钢在高温下有较高的强度、硬度和热稳定性,具有很高的抗回火能力和热强性,工作温度可达 650 ~ 700 ℃,但其缺陷也很明显:导热性低、抗热疲劳性差<sup>[8]</sup>。

20 世纪 80 年代,我国引进了在国外应用比较广泛的热作模具钢 H13 钢(4Cr5MoSiV1),该钢拥有比 3Cr2W8V 钢更优良的综合性能,因此取代其成为主要的挤压轮用钢。H13 钢在 400 ~ 600 ℃具有较高的热强度和硬度,高的耐磨性和韧性,较好的耐冷热疲劳性能,综合性能良好,热处理后 HRC 硬度值达 46,屈服强度 1 335 MPa,抗拉强度 1 534 MPa<sup>[9]</sup>。但由于含 Cr 较高,在钢中易形成熔点较低的  $Cr_{23}C_6$ ,因此,其工作温度超过 600 ℃则性能急剧下降<sup>[10]</sup>。对于当时主要以挤压生产铝型材来说,H13 钢是可以满足要求的。但是随着铜型材挤压技术的发展,由于铜的熔点较高,挤压轮的工作温度要达到 650 ℃,这样就容易造成挤压轮失效。于是开发了 HM1(3Cr3Mo3W2V)和 HM3(3Cr3Mo3VNb)钢。

HM1 在 3Cr3Mo3V 基础上增加 W 含量并提高 V 含量,HM3 则在其基础上降低含 C 量,增加 Nb 含量,两者在保持高强度和热稳定性的同时,提高了抗热疲劳能力,其在高温、高速、高载荷、水冷条件下工作,可有效防止模具断裂或热疲劳失效<sup>[11-13]</sup>。但其

表 1 国内主要挤压轮用钢的化学成分 / %

Table 1 Chemical composition of main steels for extrusion wheel at home / %

钢种	C	Si	Mn	Cr	W	Mo	V	其他元素	开发单位
3Cr2W8V	0.35	≤0.40	≤0.40	2.40	8.50	-	0.35		
H13(4Cr5MoSiV1)	0.35	1.00	0.30	5.00	-	1.50	0.90		
HM1(3Cr3Mo3W2V)	0.36	0.75	≤0.65	3.05	1.00	2.75	1.50		北京机电研究所
HM3(3Cr3Mo3VNb)	0.25	≤0.40	≤0.35	3.05	-	2.95	0.90	0.12Nb	北京机电研究所
HD2(4Cr3Mo3NiVNbB)	0.40	0.30	0.30	2.75	-	2.00	1.20	1.00Ni, 0.002B, 0.09Nb	华中科技大学
Y4(4Cr3Mo2MnVNbB)	0.40	0.40	1.10	2.80	-	2.10	1.00	0.004B, 0.09Nb	上海材料研究所
TM(4Cr3Mo2MnWV)	0.40	0.30	1.00	2.70	1.10	1.80	1.10	0.09Nb	抚顺钢厂
012Al(5Cr4Mo3SiMnVAl)	0.53	0.95	0.95	4.05	3.10	1.00	0.50	0.05Al	贵阳钢厂
SDH2	0.32	0.32	0.36	3.65	1.30	2.30	1.30	0.05Ni	上海大学
CHD	0.75	≤0.40	≤0.40	3.00	-	1.50	0.60	微量 Ni, Nb, RE	吉林大学
HHD	0.30	1.00	0.60	11.00	0.60	1.50	0.70	1.00Nb, 微量 N, RE	吉林大学

综合性能比 H13 钢稍差,且这种钢存在脱碳倾向,限制了其在挤压轮中的应用。

20 世纪 90 年代,随着冶金技术的发展,国内开发了一些可制造挤压轮的模具钢,如: HD2 (4Cr3Mo3NiVNbB)、Y4 (4Cr3Mo2MnVNbB)、TM (4Cr3Mo2MnWV) 钢,同时开发了高热强性新型基体钢 012Al (5Cr4Mo3SiMnVAl)。

HD2、Y4 和 TM 钢是在瑞典 QR090M 钢的基础上改进的。Y4 钢在 QR090M 钢基础上增加了约 0.40% Mn 和微量 Nb、B 元素;TM 钢与 Y4 钢相比多加了 1% W 但没加 B;HD2 钢与 QR090M 钢相比不含 Co,增加了 1% Ni 和微量 Nb、B,都具有高的的高温强韧性、高温硬度、热稳定性、抗热疲劳性等。Y4 钢的特点是在受热温度较高条件苛刻的环境使用<sup>[14-16]</sup>。TM 钢则具有高的的高温热强性和耐磨性,常在热强性或抗热磨损性能要求较高环境使用<sup>[17]</sup>。HD2 钢的高温强度和韧性都很优良,可在恶劣条件下工作<sup>[18]</sup>。但这 3 种钢主要用在一些特殊的工作条件下,其使用范围都比较窄,不能取代 H13 钢成为主要的挤压轮用钢。

012Al 钢是一种空冷硬化型的热作和冷作模具兼容的钢种,是在高速钢的基础上添加 Si、Al 和 Mn 元素开发的。在高温下的热强韧性要优于 H13 钢,但抗疲劳性稍差<sup>[19]</sup>,也只能用于特殊条件下需要很高热强韧性的挤压轮。

近年来国内开发了一些适合做挤压轮的模具钢,如在 H13 钢的基础上开发了 SDH2 钢、CHD 钢和 HHD 钢。SDH2 钢与 H13 钢相比,降低含 Cr 量、提高 Mo、V 含量同时添加 W 及微量 Ni 元素,有良好的强韧性,高的热稳定性及抗回火稳定性,比 H13 钢有更好的热疲劳性<sup>[20,21]</sup>。CHD 钢结合国内资源,添加了 Re 和 Ti 等进行复合变质处理,该钢具有良好的抗热机械疲劳性能和高温性能。HHD 钢则提高 Cr 含量到 10% 以上,同时加入了适量的 N,利用 N 的固溶强化及碳、氮化物的析出强化作用来提高材料的热强性和耐磨性,具有优良的抗氧化、抗腐蚀和抗热疲劳性能。但这些钢都没有形成工业生产规模<sup>[22]</sup>。

## 2.2 国外

表 2 国外主要挤压轮用钢的化学成分 / %

Table 2 Chemical composition of main steels for extrusion wheel at abroad / %

钢种	C	Si	Mn	Cr	W	Mo	V	其他元素	开发国家
H13	0.35	1.00	0.30	5.00	-	1.50	0.90		美国
SKD61	0.37	1.00	0.40	5.00	-	2.00	1.00		日本
8407	0.38	1.10	0.33	5.20	-	1.52	1.10	0.05Ni	瑞典
1.2344	0.38	1.00	0.35	5.20	-	1.20	1.00		德国
QDH	0.42	0.40	0.40	4.20	-	2.50	0.90	0.07Nb	日本
QR090M	0.40	0.30	0.75	2.60	-	2.25	0.90		瑞典
1.2367	0.37	0.40	0.45	4.95	-	3.00	0.55		德国
H42	0.63	0.38	0.55	4.24	6.50	5.11	0.97		美国
H19	0.38	0.35	0.35	4.35	4.20	0.40	2.00	4.15Co	美国
KDA1S	0.39	0.60	0.38	4.70	-	1.70	0.43	0.12Ni	日本
DH21	0.39	1.50	1.50	5.00	-	2.00	1.00		日本
DH71	0.40	0.35	10.20	3.00	-	2.00	1.00		日本
1.2888	0.20	0.25	0.50	9.50	5.50	2.00	-	1.00Co	德国
DIEVAR	0.38	0.20	0.50	5.00	-	2.36	0.55		瑞典
HOTVAR	0.55	1.00	0.75	2.60	-	2.25	0.85		瑞典

表 2 列出了国外主要的挤压轮用钢的化学成分。国外在 20 世纪 70 年代初开发出了连续挤压技术,当时挤压轮用钢主要是 3Cr2W8V,随后美国开发了以 H13 钢为代表的 H10、H11、H12、H13 系列钢,取代 3Cr2W8V 成为主要挤压轮用钢。

同时,各国根据本国需求,在 H13 钢的基础上开发了各自的优质 H13 钢,如日本在 H13 钢基础上提高 Mo 含量至 2%,开发的 SKD61 钢,该钢有很好的强韧性、耐磨性、耐热平衡性及抗热疲劳性能。瑞典在 H13 钢基础上开发的 8407 钢,有良好的耐热冲击能力,比普通的 H13 钢有更好的抗热疲劳性。德国的 1.2344 钢则比普通的 H13 钢有更高的耐热性和热冲击性。这些钢都是当时主要的挤压轮用钢,特别是 8407 钢,应用范围较广。

对于以挤压铝材为主的挤压轮,主要是用一些综合性能优良的钢,如日本 QDH 钢、瑞典 QR090M 钢、德国的 1.2367 钢等。同时对于以挤压铜材等需要在高温下工作的挤压轮,其用钢则须使用低碳高速钢和基体钢,如美国 H42(6W6Mo5Cr4V)<sup>[23]</sup> 钢以及高热强性的模具钢,如美国 H19 钢、日本 KDA1S、DH21、DH71 等<sup>[24]</sup>。

QDH 钢是日本山阳特殊制钢株式会社在 H13 钢基础上降低 Cr、Si 含量,提高 Mo 含量并加入微量 Nb 元素研制的。该钢较 H13 钢有更好的高温强度、抗软化能力和冷热疲劳性能<sup>[25]</sup>。

QR090M 钢是在 QR080M(3Cr3Mo2VMn) 钢的基础上加以改进研制的。QR080M 钢是在 H10 基础上通过优化合金元素的配比研制成,具有比 H13 钢更高的热强性和冷热疲劳性能,其不足之处是生产

成本有所提高<sup>[26-28]</sup>。而 QR090M 钢克服了这一缺点,该钢价格与 H13 钢差不多,但其有更好的热强度、热硬度和热疲劳性能,具有最佳的合金元素配比<sup>[29]</sup>。

1.2367 钢是在 H13 钢基础上增加 Mo 含量,降低 Si 含量开发的,其冲击韧性和热稳定性都优于 H13 钢,且有高的高温强度和抗热疲劳性能<sup>[30]</sup>。

H42 钢是将高速钢的 C 含量降至 0.3% ~ 0.6%,在降低部分红硬性和耐磨性的情况下改善其韧性和抗热疲劳性能,具有高的强度、好的热硬性,工作温度高达 600 ~ 700 °C,但是韧性较差。

近年来,国外也开发了一些性能优良,适合做挤压轮的模具钢。主要有瑞典 HOTVAR 钢、DIEVAR 钢和德国 1.2888 钢等。HOTVAR<sup>[31]</sup> 是瑞典 UDDEHOLM 开发的使用温度为 650 °C、硬度为 54 ~ 58 HRC 的热作模具钢<sup>[32]</sup>。DIEVAR 钢是上世纪末开发的,目的是为了替代 H13 钢,其热强性、韧性与延展性都高于 H13 钢<sup>[33,34]</sup>。

1.2888 钢是在 H13 钢的基础上开发的,具有高的抗热疲劳、热冲击开裂和高温耐磨性以及极其优良的热稳定性,可以在 700 °C 以上的高温下工作,扩

大了热作模具钢在高温下的应用。

### 3 发展趋势

国内目前的挤压轮用钢主要是 H13 钢,而国外则主要用优质的 H13 钢以及一些在 H13 钢基础上开发的优质新钢,其挤压轮的工作寿命普遍比国内长。因此国内有必要开发性能更好的挤压轮用钢。目前挤压轮模具钢的发展趋势是:

(1) 以 H13 钢为基础,降低 Cr 增加 Mo、V,也就是在不增加合金元素总量的前提下降低 Cr 含量,提高 W、Mo、V、Nb 等含量,从而提高其热强性。属于这一类的有:我国开发的 Y4、TM 及 HD 等,瑞典的 QR090、DIEVAR,德国的 1.2367、1.2888,日本的 QDH 钢等。

(2) 低碳高速钢和基体钢。这类钢碳含量低,基体钢化学成分接近于高速钢淬火状态的基体组织成分,未固溶的过剩碳化物量少于 5%,热强性高,耐磨性好,但是合金度高,成本高。如国内的 012Al,国外的 H45 钢等。

湖北省教育厅高校产学研合作资助项目(C2010021)

### 参考文献

- 宋宝韞,樊志新,刘元文.铜、铝连续挤压技术特点及工业应用.稀有金属,2004,28(1):257
- 运新兵,宋宝韞,刘元文.铜包钢接触线坯连续挤压包覆成形的实验研究.塑性工程学报,2004,11(6):55
- 王颖,樊志新,宋宝韞.TLJ400型连续挤压机挤压轮温度场测定与模拟.有色金属加工,2007,36(4):42
- 王颖.TLJ400型连续挤压机主轴系统研究:[硕士学位论文].大连:大连交通大学,2007
- 贺德昂.连续挤压机主轴部件强度分析与计算:[硕士学位论文].大连:大连铁道学报,2003
- 谢冬柏,王福会,高飞.挤压轮失效分析及热处理工艺改进.机械工程材料,2002,26(7):22
- 王春亮,杨力,陆慧.H13钢材挤压轮开裂分析.理化检验-物理分册,2009,45(增刊):89
- 崔昆.中国模具钢现状及发展(1).机械工程材料,2001,25(1):1
- 张家涛,钟毅,孙淑红.压铸用H13热作模具钢热处理工艺研究.特种铸造及有色合金,2009,29(3):237
- 王万阁.4Cr5MoV1Si(H13)模具钢.模具工业,1990,16(4):57
- 于波,王鑫.模具用钢及其展望.模具技术,2008,26(5):58
- 朱宗元.我国热作模具钢性能数据集(续Ⅷ).机械工程材料,2001,25(9):38
- 朱宗元.我国热作模具钢性能数据集(续Ⅷ).机械工程材料,2002,26(7):43
- 朱宗元.我国热作模具钢性能数据集(续Ⅵ).机械工程材料,2002,26(5):42
- 吴玉道.几种具有优良性能的模具钢.模具技术,2002,20(6):53
- 朱宗元.我国热作模具钢性能数据集(续Ⅸ).机械工程材料,2002,26(8):42
- 于波,谢建庆,王鑫.新型热作模具用钢的发展现状及应用.热处理技术与装备,2008,29(6):6
- 崔昆,何向山,罗学心.高性能热作模具钢.第一届国际模具技术会议论文集.北京:机械工业出版社,2000
- 朱宗元.我国热作模具钢性能数据集(续ⅩⅢ).机械工程材料,2002,26(3):41
- 陈建亭,吴晓春,闵永安.SDH2与8407钢热疲劳性能的对比如研究.材料热处理学报,2007,28(z):71
- 陈建亭,吴晓春,闵永安.高强韧性热作模具钢SDH2的研究.热处理,2006,21(3):17
- 方建儒,张瑞卿,柏建仁.热作模具材料研究进展.特种铸造及有色合金,2003,23(z1):152
- 赵昌盛.国外模具材料的应用及发展.模具制造,2004,4(8):65
- 马党参,陈再枝.国内外模具钢的现状与发展趋势.模具工程,2006,3(8):78
- 崔昆.国内外模具用钢发展概况.金属热处理,2007,32(1):1
- 黄春峰.国外新型热作模具钢及其热处理工艺.航空精密制造技术,2004,40(3):16
- Norstrom Lars Ake. Performance of Hot-work Tool Steels. Scandinavian Journal of Metallurgy,1982,11(1):33
- Norstrom L A, Ohrberg N. Development of Hot-work Tool Steel for High Temperature Applications. Metal Technology,1981,8(1):22
- 施雯,刘以宽.QR090SUPREME热作模具钢的性能.机械工程材料,1996,20(6):27
- 陈英伟,吴晓春.热作模具钢1.2367的性能研究.上海金属,2009,31(6):1
- Xie Hao Jie, Wu Xiao Chun, Min Yong An, et al. Uniform Design and Its Application in the Chemical Composition Design of Hot Work Die Steel. Key Engineering Materials,2007,353-358:1633
- 冯英育.新型热作模具钢材料-HOTVAR.国外金属热处理,2000,21(4):21
- Johnny Sjostrom, Jens Bergstron. Thermal Fatigue Testing of Chromium Martensitic Hot-work Tool Steel After Different Austenitizing Treatments. Journal of Materials Processing Technology,2004,153-154:1089
- 张洪奎,徐明华.浅析我国模具钢的发展空间.机械工程材料,2008,32(1):8

汪圣锋(1986-),男,硕士研究生,模具钢开发及使用性能研究。

收稿日期:2010-09-03